

BÉTON ET MAÇONNERIE

Reprise des bétons dégradés

Une édition du syndicat
national des entrepreneurs
spécialistes de travaux
de réparation et renforcement
de structures (STRRES)

Décembre 2021

Validé par



Le présent guide s'adresse aux **entrepreneurs** qui ont à réaliser la reprise de bétons dégradés et, si besoin est, le traitement des armatures corrodées. Il concerne aussi les deux autres acteurs de l'opération que sont le **prescripteur** et le **contrôleur** (maître d'œuvre ou son représentant).

Les réparations traitées dans le présent document peuvent avoir un **caractère structural** nécessitant une réparation et/ou un renforcement ou **non structural** et peuvent aussi concerner la **préservation ou la restauration de la passivité** des armatures.

Le présent guide passe en revue la majeure partie des désordres que peuvent subir des structures en béton, béton armé ou précontraint, il en donne les causes et liste les techniques à mettre en œuvre pour identifier ces dernières enfin, il décrit les méthodes de protection, réparation ou renforcement pouvant être utilisées.

L'introduction ci-après précise les opérations couvertes par le présent guide et également les autres guides, auxquels il convient de se référer pour réaliser certaines opérations connexes telles que, par exemple, l'injection des fissures, le scellement d'armatures additionnelles, l'application d'un revêtement de protection en fin de travaux...).

Avertissement sur la validité des normes :

Une norme fait appel, pour son application, à des documents de référence. Si ceux-ci sont :

- * datés : seule l'édition citée s'applique ;
- * non datés : la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

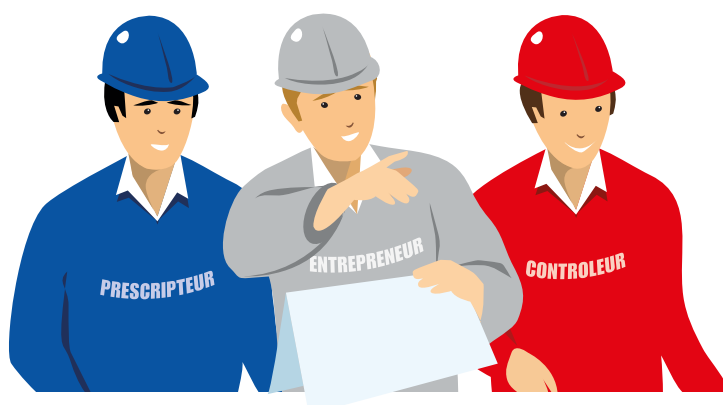


Figure n° 1 : les trois intervenants

SOMMAIRE

MODE D'EMPLOI DU PRÉSENT GUIDE	18
MODIFICATIONS APPORTÉES AU GUIDE FABEM 1 DE JUIN 2008	18
INTRODUCTION	23
1 DÉFINITIONS – GÉNÉRALITÉS	33
1.1 LA SITUATION DES DIFFÉRENTS DOCUMENTS TECHNIQUES ET ADMINISTRATIFS DISPONIBLES DANS LES PREMIÈRES DÉCENNIES DU XXI^E SIÈCLE	34
1.1.1 La normalisation française	34
1.1.2 La normalisation européenne	34
1.2 LES DÉFINITIONS	37
1.2.1 Les principales définitions de la norme homologuée NF P 95-101	38
1.2.2 Les principales définitions de la norme homologuée NF EN 1504-1	39
1.2.3 Les principales définitions de la norme harmonisée NF EN 1504-3	40
1.2.4 Les principales définitions de la norme harmonisée NF EN 1504-7	41
1.2.5 Les principales définitions de la norme harmonisée NF EN 1504-8	41
1.2.6 Les principales définitions de la norme NF EN 1504-9	42
2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	43
3 ÉTUDES PRÉLIMINAIRES	47
3.1 INTRODUCTION	48
3.2 GÉNÉRALITÉS	49
3.3 LA DÉMARCHE PRÉALABLE AUX TRAVAUX	51
3.3.1 Les trois étapes de la démarche	51

3.3.2	Première étape	54
3.3.2.1	Le relevé et la caractérisation des désordres	54
3.3.2.1.1	Méthodologies de gestion et de surveillance des ouvrages	54
3.3.2.1.2	Méthodologies de gestion et de surveillance des ouvrages – Cas du réseau national	54
3.3.2.2	Opérations à effectuer	55
3.3.2.3	Programme des investigations	55
3.3.2.3.1	Généralités	55
3.3.2.3.2	Cas des désordres ayant un caractère structural	55
3.3.2.3.3	Cas des désordres avec ou sans caractère structural affectant les matériaux	56
3.3.3	Seconde étape	57
3.3.3.1	Synthèse – Diagnostic - Pronostic	57
3.3.3.2	Opérations à effectuer	58
3.3.3.2.1	Par les laboratoires associés (pour mémoire)	58
3.3.3.2.2	Par le bureau d'étude	58
3.3.3.2.3	Rapport de diagnostic	61
3.3.4	Troisième étape – Le projet de réparation ou de renforcement	62
3.3.4.1	Choix de la stratégie et des objectifs de la réparation ou du renforcement	62
3.3.4.2	Objectifs à atteindre si l'option réparation ou renforcement est retenue	64
3.3.4.3	Projet de réparation ou de renforcement	64
3.3.4.3.1	Les différentes phases d'un projet de réparation ou renforcement	64
3.3.4.3.2	L'étude préliminaire	64
3.3.4.3.3	L'avant-projet de réparation ou de renforcement	66
3.3.4.3.4	Le dossier de consultation des entreprises	67
3.4	PRINCIPALES CAUSES DE DÉGRADATION DES BÉTONS, DES ARMATURES, DES STRUCTURES ET MÉTHODES D'ESSAIS ASSOCIÉES	70
3.4.1	Généralités	70
3.4.2	Les manifestations des désordres et dégradations	71
3.4.3	Désordres et dégradations des bétons dus à des défauts mineurs d'exécution	72
3.4.3.1	Description des désordres et dégradations	73
3.4.3.2	Méthodes d'investigation	73
3.4.4	Désordres et dégradations des bétons dus à des causes physiques	73
3.4.4.1	Désordres et dégradations du béton dus aux effets du gel-dégel (en surface ou à cœur) avec ou sans sels de déverglaçage	73
3.4.4.1.1	Description des désordres et dégradations	73
3.4.4.1.2	Méthodes de diagnostic et d'investigation	75
3.4.4.2	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets thermiques d'un incendie	76
3.4.4.2.1	Rappel des incendies catastrophiques des années 1990 à 2 000	76
3.4.4.2.2	Description des désordres et dégradations	76
3.4.4.2.3	Méthodes de diagnostic et d'investigation	78
3.4.4.3	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets des différents retraits (endogène, thermique, de dessiccation)	80
3.4.4.3.1	Description des désordres et dégradations	80
3.4.4.3.2	Méthodes de diagnostic et d'investigation	83
3.4.4.4	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets d'une érosion et/ou de chocs répétés	85
3.4.4.4.1	Description des désordres et dégradations	85
3.4.4.4.2	Méthodes de diagnostic et d'investigation	85

3.4.5	Désordres et dégradations des bétons dus à des causes chimiques	86
3.4.5.1	Généralités	86
3.4.5.2	Désordres et dégradations des bétons d'origine chimique externe	87
3.4.5.2.1	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets des eaux pures, voire acides (eaux industrielles...)	87
3.4.5.3	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets des eaux alcalines	89
3.4.5.3.1	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets de solutions salines dans certains sols	89
3.4.5.3.1.1	Effets des cations les plus agressifs	89
3.4.5.3.1.2	Effets des anions les plus agressifs	89
3.4.5.3.2	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets de l'eau de mer	91
3.4.5.3.3	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets d'attaques biochimiques	92
3.4.5.3.4	Désordres et dégradations dus aux effets d'autres agents agressifs	93
3.4.5.3.4.1	Désordres et dégradations des bétons par les graisses et les huiles	93
3.4.5.3.4.2	Désordres et dégradations des bétons par certains milieux gazeux	93
3.4.5.3.4.3	Anhydride sulfureux (SO ₂)	93
3.4.5.3.4.4	Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	93
3.4.5.3.4.5	Anhydride carbonique (CO ₂)	93
3.4.5.3.4.6	Méthodes de diagnostic et d'investigation des attaques chimiques externes vis-à-vis des bétons	93
3.4.5.4	Désordres et dégradations des bétons d'origine chimique interne (réactions de gonflement interne ou RGI)	95
3.4.5.4.1	Description des désordres et dégradations	95
3.4.5.4.2	Méthodes de diagnostic et d'investigation	96
3.4.6	Désordres et dégradations des bétons dus aux effets de la corrosion électrochimique des armatures de béton armé	98
3.4.6.1	Généralités	99
3.4.6.2	Processus de corrosion électrochimique des armatures	99
3.4.6.3	Description des désordres et dégradations	102
3.4.6.3.1	En béton armé non fissuré, la corrosion se développe en deux étapes	102
3.4.6.3.2	Béton armé fissuré – cas des fissures fines et peu actives	105
3.4.6.3.3	Béton armé fissuré – cas des fissures ouvertes actives ou non	107
3.4.6.3.4	Cas des réparations effectuées sans études préalables ou mal exécutées	108
3.4.6.4	Méthodes de diagnostic et d'investigation	110
3.4.7	Désordres et dégradations des structures en béton sous les effets de la corrosion des armatures de précontrainte	117
3.4.7.1	Généralités	117
3.4.7.2	Manifestation des désordres et dégradations	120
3.4.7.3	Méthodes de diagnostic d'investigation	123
3.4.8	Facteurs aggravants	128
3.4.8.1	Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs de conception	128
3.4.8.2	Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs d'exécution	129
3.4.8.3	Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs de gestion	130
3.4.8.4	Désordres et dégradations à caractère structural causés par des actions accidentelles non prises en compte lors de la conception	131
3.4.8.5	Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs lors de travaux de réparation ou de renforcement	132

3.5 MÉTHODES DE RÉPARATION, DE RENFORCEMENT ET DE PROTECTION	
À METTRE EN ŒUVRE	134
3.5.1 Généralités	134
3.5.2 Cas des défauts mineurs d'exécution – Méthodes de réparation et protection	137
3.5.2.1 Généralités	137
3.5.2.2 Cas des défauts de planéité, des flaches, des épaufrures superficielles et autres défauts assimilables – Méthodes de réparation	137
3.5.2.3 Cas des épaufrures superficielles d'un béton non armé ou armé n'atteignant pas les armatures – Méthodes de réparation	138
3.5.2.4 Cas des défauts superficiels entraînant des défauts d'aspect ou pouvant nuire à la durabilité de la partie de structure concernée – Méthodes de protection	138
3.5.3 Cas des désordres et dégradations d'origine physique – Méthodes de réparation, renforcement et protection	139
3.5.3.1 Généralités	139
3.5.3.2 Cas d'un béton dégradé par les effets du gel-dégel (en surface ou à cœur) avec ou sans sels de déverglaçage - Méthodes de réparation, renforcement et protection	139
3.5.3.2.1 Cas d'un béton dégradé par le phénomène de l'écaillage - Méthodes de réparation, renforcement et protection	139
3.5.3.2.2 Cas d'un béton dégradé par le gel interne éventuellement combiné à un phénomène d'écaillage - Méthodes de réparation, renforcement et protection	140
3.5.3.2.3 Tableau synoptique	141
3.5.3.2.4 Exemples de réparations	144
3.5.3.3 Cas d'un béton dégradé par les effets thermiques d'un incendie - Méthodes de réparation, renforcement et protection	149
3.5.3.3.1 Diverses méthodes de renforcement, réparation et protection	149
3.5.3.3.1.1 Cas des désordres de classe 1 (superficiels) - Méthodes de réparation et protection	149
3.5.3.3.1.2 Cas des désordres de classe 2 (écaillage limité et fissures) - Méthodes de réparation et protection	150
3.5.3.3.1.3 Cas des désordres de classe 3 (désorganisation du béton d'enrobage, présence d'un feuilletage du béton) - Méthodes de réparation, renforcement et protection	150
3.5.3.3.1.4 Cas des désordres de classe 4 (désorganisation du béton sur une grande profondeur, armatures déformées, structure pouvant présenter des déformations...) - Méthodes de réparation, renforcement et protection	150
3.5.3.3.2 Tableau synoptique	151
3.5.3.3.3 Exemple de réparation	153
3.5.3.4 Cas d'un béton dégradé par les effets des différents retraits (endogène, thermique, dessiccation) - Méthodes de réparation, renforcement et protection	157
3.5.3.4.1 Cas où les ouvertures des fissures respectent les ouvertures limites et que la fissuration a uniquement un impact esthétique (faïençage, microfissures, fissures fines) - méthodes de réparation et protection	158
3.5.3.4.2 Cas où les ouvertures des fissures respectent les ouvertures limites mais sont soumises à une circulation d'eau – Méthodes de réparation et protection	158
3.5.3.4.3 Cas où la structure présente pas d'insuffisance structurale mais où les ouvertures des fissures ne respectent pas les ouvertures limites et sont soumises ou non à des circulations d'eau – Méthodes de réparation et protection	158

3.5.3.4.4	Cas où la structure présente des fissures liées à une insuffisance structurale – Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	160
3.5.3.4.5	Tableau synoptique.....	160
3.5.3.4.6	Exemples de réparation.....	163
3.5.3.5	Cas d'un béton dégradé par les effets d'une érosion et/ou de chocs répétés - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	168
3.5.3.5.1	Cas où les désordres sont superficiels et si les armatures n'ont pas été touchées – Méthodes de réparation et protection.....	169
3.5.3.5.2	Cas où les désordres sont importants - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	169
3.5.3.5.3	Tableau synoptique.....	169
3.5.3.5.4	Exemple de réparations.....	171
3.5.4	Cas d'un béton dégradé par des effets chimiques (agents externes) - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	172
3.5.4.1	Cas d'un béton dégradé par les effets des eaux pures, voire acides (eaux industrielles) - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	173
3.5.4.1.1	Tableau synoptique (concerne la réparation des effets des attaques dues aux eaux pures et acides, voire d'autres attaques chimiques).....	174
3.5.4.1.2	Exemple de réparation.....	176
3.5.4.2	Cas d'un béton dégradé par les effets des eaux alcalines - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	177
3.5.4.3	Cas d'un béton dégradé par les effets des sols contenant des sels (sulfates, chlorures, nitrates, sulfures...) - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	178
3.5.4.4	Cas d'un béton dégradé par les effets de l'eau de mer - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	178
3.5.4.5	Cas d'un béton dégradé par les effets d'attaques biochimiques - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	179
3.5.5	Cas des désordres d'origine chimique interne – Réactions de gonflement interne (RGI) - Méthodes de réparation, renforcement et protection.....	180
3.5.5.1	Tableau synoptique.....	180
3.5.5.2	Exemple de réparation provisoire.....	181
3.5.5.3	Exemple d'une démolition-reconstruction.....	184
3.5.6	Désordres et dégradations dus à la corrosion des armatures de béton armé – Méthodes de préservation des armatures de la corrosion et méthodes de traitement des armatures corrodées.....	185
3.5.6.1	Généralités.....	185
3.5.6.2	Méthodes (préventives) de préservation de la passivité des armatures non encore touchées par la corrosion.....	188
3.5.6.3	Méthodes (curatives) destinées à restaurer la passivité des armatures touchées par la corrosion.....	191
3.5.6.3.1	Généralités.....	191
3.5.6.3.2	Première méthode curative - Le remplacement du béton pollué et/ou désorganisé et les divers traitements de protection des armatures.....	197
3.5.6.3.2.1	Généralités.....	197
3.5.6.3.2.2	Le remplacement du béton pollué.....	197
3.5.6.3.2.3	Les divers traitements de protection des armatures.....	200
3.5.6.3.3	Deuxième méthode curative – L'extraction électrochimique des chlorures et la réalcalinisation électrochimique.....	202
3.5.6.3.3.1	Troisième méthode curative – La protection cathodique.....	207
3.5.6.3.3.2	Quatrième méthode curative - La mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton.....	211

3.5.7	Cas de la corrosion des armatures actives – Méthodes de préservation des armatures de la corrosion et méthodes de traitement des armatures corrodées – Remplacement des armatures	214
3.5.7.1	Généralités	214
3.5.7.2	Démontage et remplacement des armatures de précontrainte	214
3.5.8	Cas des désordres structuraux d'origine mécanique (erreurs de conception, de calcul, d'exécution ou de gestion et actions accidentelles) - Méthodes de réparation, renforcement et protection	217
3.5.8.1	Généralités	217
3.5.8.1.1	Cas des actions de faible importance ne mettant pas en cause la capacité portante de la structure	220
3.5.8.1.2	Cas des actions mettant en cause la capacité portante de la structure	220
3.5.8.1.2.1	Cas des épaufrures, des cavités, des trous...	221
3.5.8.1.2.2	Cas des fissures de flexion, d'effort tranchant, de torsion...	224
3.5.8.1.3	Cas des éléments ou des structures dont la capacité portante après expertise a été jugée insuffisante	226
3.5.8.1.3.1	Solutions de renforcement par ajouts de béton et d'armatures passives intérieures au béton	226
3.5.8.1.3.2	Solutions de renforcement par ajouts d'armatures passives extérieures au béton (se reporter au guide FABEM 7)	231
3.5.8.1.3.3	Solutions de renforcement par ajouts d'armatures de précontrainte intérieures ou extérieures au béton (se reporter au guide FABEM 8)	234

4 PRÉPARATION GÉNÉRALE DE L'OPÉRATION 237

4.1 GÉNÉRALITÉS 238

4.2 CHOIX DES PRODUITS, SYSTÈMES ET PROCÉDÉS DE RÉPARATION, DE RENFORCEMENT ET DE PROTECTION 242

4.2.1 Généralités 242

4.2.2 Normes harmonisées – exigences de performance – marquage CE – niveau d'EVCP – niveau de réaction au feu - certification volontaire 243

4.2.2.1 Normes harmonisées – Marquage CE 243

4.2.2.2 Caractéristiques de performance 245

4.2.2.3 Niveau du système d'EVCP (rappel) 245

4.2.2.4 Niveau de réaction au feu (rappel) 245

4.2.2.5 Certification volontaire – Marques de qualité 246

4.2.3 Généralités 247

4.2.4 Critères de choix communs à tous les produits et systèmes de réparation, de renforcement et de protection 249

4.2.4.1 Critères de choix liés aux spécificités du travail à exécuter 249

4.2.4.1.1 Cas des normes françaises 249

4.2.4.1.2 Cas des normes européennes 250

4.2.4.1.3 Conclusions sur les critères de choix des produits 255

4.2.4.2 Critères de choix liés à la santé, la sécurité, la protection de l'environnement, etc. 257

4.2.5 Critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de réparation structurale et non structurale 258

4.2.5.1 Généralités 258

4.2.5.2 Choix des produits et systèmes de réparation structurale et non-structurale des bétons 261

4.2.5.2.1 Introduction 261

4.2.5.2.2 Composition des produits et systèmes de réparation des bétons 261

4.2.5.2.3	Critères de choix des produits et systèmes de réparation des bétons	263
4.2.5.2.3.1	Généralités	263
4.2.5.2.3.2	Première phase	264
4.2.5.2.3.3	Deuxième phase – Cas des produits de type 1 industriels relevant du marquage CE dans le cadre de la norme NF EN 1504-3	266
4.2.5.2.3.4	Deuxième phase – Cas des produits de type 2 (mortiers ou bétons) fabriqués en centrale ou sur le chantier conformes aux dispositions de la norme NF EN 206/CN ou au fascicule 65 du CCTG et des mortiers et bétons industriels assimilés ne relevant du marquage CE	278
4.2.5.2.3.5	réparations et/ou renforcements de bétons non-courants et utilisation lors de réparations et/ou renforcements de mortiers ou bétons non-courants	282
4.2.5.3	Choix des produits et systèmes de collage structural des bétons	285
4.2.5.4	Choix des produits et systèmes d'injection de l'interface entre le produit de réparation et le béton support	288
4.2.5.5	Choix des produits et systèmes d'injection ou de remplissage des fissures ou des vides du béton	288
4.2.5.6	Choix des produits et systèmes de scellement des armatures de béton armé	288
4.2.5.6.1	Généralités	288
4.2.5.6.2	Les textes de référence et leurs incohérences	290
4.2.5.6.3	Le marquage CE des produits de scellement	291
4.2.5.6.3.1	Cas de la norme NF EN 1504-6	292
4.2.5.6.3.2	Cas du DÉE (EAD) 330087-00-0601	293
4.2.5.6.3.3	Informations sur l'état d'avancement de la révision du FD P18-823	297
4.2.5.6.3.4	Solutions envisageables en attendant la parution des nouveaux textes en projet	297
4.2.5.6.3.5	Incidence sur les Guides FABEM 6 et 7	299
4.2.5.7	Choix des produits et systèmes de calage d'éléments	299
4.2.5.8	Choix des armatures passives additionnelles internes au béton	302
4.2.5.8.1	Aciers pour béton armé	302
4.2.5.8.2	Armatures de béton armé	302
4.2.5.8.3	Dispositifs de raboutage et d'ancrage	303
4.2.5.8.4	Cales, chaises et dispositifs de fixation	304
4.2.5.8.5	Boîtes d'attente	304
4.2.5.8.6	Aciers et armatures de béton armé inoxydables	304
4.2.5.8.7	Aciers et armatures de béton galvanisés	305
4.2.5.8.8	Armatures non métalliques de type polymère renforcé de fibres (PRF)	306
4.2.5.9	Choix des armatures passives extérieures au béton et collées	310
4.2.5.10	Choix des procédés et des armatures de précontrainte pour l'ajout de forces et des produits d'injection des conduits	311
4.2.5.10.1	Généralités	311
4.2.5.10.2	Kits ou procédés de précontrainte	312
4.2.5.10.3	Armatures de précontrainte	312
4.2.5.10.4	Conduits de précontrainte	313
4.2.5.10.5	Pipes d'injection, évènements purges	315
4.2.5.10.6	Tubes coffrants des déviateurs et des zones d'ancrage, les selles d'appui des déviateurs et pièces mécano-soudées	315
4.2.5.10.7	Produits d'injection des conduits de précontrainte	315
4.2.5.11	Choix des produits et systèmes d'ajout de forces par déformations imposées	316

4.2.6 Critères de choix spécifiques des produits et systèmes de restauration ou de préservation de la passivité des armatures	316
4.2.6.1 Généralités	316
4.2.6.2 Choix des produits et systèmes de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures avec apport d'alcalins	317
4.2.6.3 Choix des produits et systèmes nécessaires aux traitements électrochimiques	317
4.2.6.3.1 Généralités	317
4.2.6.3.2 Cas de la réalcalinisation par courant imposé	318
4.2.6.3.3 Cas de l'extraction des chlorures par courant imposé	318
4.2.6.3.4 Cas de la réalcalinisation ou de l'extraction des chlorures par anode sacrificielle	318
4.2.6.3.5 Cas de la prévention et de la protection cathodique	318
4.2.6.4 Choix des produits et systèmes utilisés pour appliquer un revêtement actif ou non sur les armatures de béton armé	319
4.2.6.5 Choix des produits et systèmes inhibiteurs de corrosion applicables sur les bétons	321
4.2.6.6 Choix des produits et systèmes pour la réinjection de conduits de précontrainte	321
4.2.7 Exigences concernant les constituants des produits et systèmes de réparation et les produits connexes	321
4.2.7.1 Généralités	321
4.2.7.2 Granulats pour bétons et mortiers	322
4.2.7.3 Liants hydrauliques	323
4.2.7.4 Additions	323
4.2.7.5 Fibres	324
4.2.7.6 Adjuvants	325
4.2.7.7 Ajouts	325
4.2.7.8 Eau de gâchage	325
4.2.7.9 Résines synthétiques	325
4.2.7.10 Compatibilité des constituants	326
4.2.8 Épreuve d'étude	327
4.3 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS	328
4.3.1 Les différents produits	328
4.3.2 Conditionnement des produits prêts à l'emploi	328
4.3.2.1 Généralités	328
4.3.2.2 Marquage – Étiquetage	329
4.3.2.2.1 Marquage et étiquetage liés aux normes européennes	329
4.3.2.2.2 Marquage et étiquetage liés aux normes françaises	330
4.3.2.2.3 Marquage et étiquetage - Synthèse des besoins	330
4.3.3 Conditionnement des produits fabriqués sur le chantier	332
4.4 TRANSPORT ET STOCKAGE DES PRODUITS	333
4.4.1 Généralités	333
4.4.2 Conditions de transport et de stockage - Examen des textes concernant les produits spéciaux pour béton (produits de réparation)	333
4.4.3 Conditions de transport et de stockage - Examen des textes concernant les bétons armatures et produits connexes livrés sur le chantier	334

4.5 MATÉRIELS À UTILISER	335
4.5.1 Généralités	335
4.5.2 Matériels de Préparation du support	335
4.5.3 Matériels de Préparation des produits	337
4.5.3.1 Généralités	337
4.5.3.2 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi de type monocomposant à base de liants organiques	338
4.5.3.3 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi multicomposants à base de liants organiques ou de liants hydrauliques et organiques	338
4.5.3.4 Matériels de préparation des produits prêts à l'emploi ou non à base de liants hydrauliques	339
4.5.4 Matériels de mise en œuvre des produits	339
4.5.4.1 Généralités	339
4.5.4.2 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes (mortiers et bétons) de réparation et renforcement des bétons	340
4.5.4.2.1 Cas des applications manuelles	342
4.5.4.2.2 Cas des applications mécanisées	343
4.5.4.3 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de collage structural des bétons	345
4.5.4.3.1 Cas du collage d'un béton durci sur un béton durci	345
4.5.4.3.2 Cas du collage d'un béton frais sur un béton durci	346
4.5.4.3.3 Cas du collage d'armatures passives extérieures au béton	346
4.5.4.4 Matériels pour l'injection de produits et systèmes dans l'interface entre le produit de réparation et le béton support	346
4.5.4.5 Matériels pour l'injection ou le remplissage de produits et systèmes dans des fissures ou des vides du béton	346
4.5.4.6 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de scellement, de manchonnage et de soudage des armatures de béton armé	347
4.5.4.7 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de calage d'éléments	348
4.5.4.8 Matériels de mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton	349
4.5.4.9 Matériels d'ajout de forces par précontrainte additionnelle	349
4.5.4.10 Matériels d'ajout de forces par déformations imposées	349
4.5.4.11 Matériels de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton	349
4.5.4.12 Matériels de mise en œuvre des traitements électrochimiques	350
4.5.4.12.1 Cas de l'extraction électrochimique des chlorures et de la réalcalinisation électrochimique	350
4.5.4.12.2 Cas de la prévention et de la protection cathodique	351
4.5.4.13 Matériels de mise en œuvre d'un revêtement actif ou non sur des armatures de béton armé	351
4.5.4.14 Matériels de mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur bétons	352
4.5.4.15 Matériels de réinjection de conduits de précontrainte	352

5.3.3.2.6	Cas des réparations non structurales ou structurales par injection dans des coffrages	388
5.3.3.2.7	Cas des réparations non structurales ou structurales par projection de mortier ou de béton	389
5.3.3.3	Réalisation des opérations de renforcement structural	395
5.3.3.3.1	Généralités	395
5.3.3.3.2	Réalisation d'un collage structural de bétons	397
5.3.3.3.2.1	Réalisation d'un collage béton durci sur béton durci	397
5.3.3.3.2.2	Réalisation d'un collage béton frais sur béton durci	397
5.3.3.3.3	Réalisation d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support	397
5.3.3.3.4	Réalisation d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton	399
5.3.3.3.5	Réalisation de scellements d'armatures de béton armé	399
5.3.3.3.6	Réalisation de calages d'éléments	399
5.3.3.3.7	Réalisation de la mise en place d'armatures passives additionnelles internes au béton	400
5.3.3.3.8	Réalisation du collage d'armatures passives extérieures au béton	400
5.3.3.3.9	Réalisation d'un ajout de forces par précontrainte additionnelle	401
5.3.3.3.10	Réalisation d'un ajout de forces par déformations imposées	401
5.3.3.4	Réalisation des opérations de restauration ou de préservation de la passivité des armatures	401
5.3.3.4.1	Réalisation du remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou l'augmentation du recouvrement des armatures et/ou l'augmentation de la résistivité du béton	402
5.3.3.4.2	Réalisation d'un traitement électrochimique de réalcalinisation du béton par courant imposé	404
5.3.3.4.3	Réalisation d'un traitement électrochimique d'extraction de chlorures du béton par courant imposé	408
5.3.3.4.4	Réalisation d'un traitement électrochimique de réalcalinisation ou d'extraction des chlorures du béton par anodes actives	408
5.3.3.4.5	Réalisation d'un traitement électrochimique de prévention ou de protection cathodique à courant imposé ou non	411
5.3.3.4.6	Mise en place d'un revêtement actif sur les armatures de béton armé	418
5.3.3.4.7	Mise en place d'un revêtement passif sur les armatures de béton armé	418
5.3.3.4.8	Réalisation d'une application d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton	418
5.3.3.4.9	Réalisation de la mise en œuvre d'une imprégnation ou d'un revêtement	419
5.3.3.4.9.1	Réalisation d'une réinjection de conduits de précontrainte	420
6	ESSAIS ET CONTRÔLES	421
6.1	GÉNÉRALITÉS	422
6.2	CONTRÔLES DE RÉCEPTION DES PRODUITS	423
6.2.1	Généralités	423
6.2.2	Réception des produits prêts à l'emploi	423
6.2.2.1	Réception des produits de réparation normalisés	423
6.2.2.1.1	Généralités	423
6.2.2.1.2	Réception des produits relevant des normes françaises de la série NF P 18-8**	424
6.2.2.1.3	Réception des produits relevant des normes européennes de la série NF EN 1504-**	425

6.2.2.2	Réception de certains produits de réparation	427
6.2.2.2.1	Généralités	427
6.2.2.2.2	Réception des produits pour une réalcalinisation ou une extraction des chlorures	427
6.2.2.2.3	Réception des produits pour une prévention ou une protection cathodique	427
6.2.2.2.4	Réception des produits inhibiteurs de corrosion sur béton	427
6.2.3	Réception des produits livrés sur le chantier	428
6.2.3.1	Cas des produits industriels ne relevant du marquage CE	428
6.2.3.2	Cas des produits fabriqués en centrale et des matériaux de construction	428
6.2.4	Réception des produits fabriqués sur le chantier	429
6.3	ÉPREUVES DE CONVENANCE	430
6.3.1	Généralités	430
6.3.2	Épreuve de convenance de préparation du support béton et des armatures	432
6.3.3	Épreuve de convenance de préparation et de mise en œuvre des produits	433
6.4	CONTRÔLES D'EXÉCUTION	436
6.4.1	Généralités	436
6.4.2	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures	448
6.4.2.1	Généralités	448
6.4.2.2	Contrôle d'exécution relatif à la préparation de l'opération de préparation du support béton et des armatures	448
6.4.2.3	Principes généraux relatifs aux contrôles de réception du support béton et des armatures	449
6.4.2.4	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton pour une restauration du béton et /ou un renforcement structural	451
6.4.2.4.1	Généralités	451
6.4.2.4.2	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'une réparation de surface du béton (produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs)	451
6.4.2.4.3	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'une réparation structurale ou non ou d'un renforcement (produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs)	454
6.4.2.4.4	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'un collage structural de bétons	455
6.4.2.4.5	Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement durci et le béton support	455
6.4.2.4.6	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton	455
6.4.2.4.7	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de scellement d'armatures de béton armé	456
6.4.2.4.8	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas de calages d'éléments	456
6.4.2.4.9	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton	457
6.4.2.4.10	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas de collages d'armatures passives extérieures au béton	457

6.4.2.4.11	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas d'un l'ajout de forces par précontrainte additionnelle.....	457
6.4.2.4.12	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas d'un l'ajout de forces par déformations imposées.....	457
6.4.2.5	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures.....	458
6.4.2.5.1	Généralités.....	458
6.4.2.5.2	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas du remplacement d'un béton carbonaté ou pollué ou d'une augmentation du recouvrement des armatures.....	459
6.4.2.5.3	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de traitements électrochimiques.....	460
6.4.2.5.4	Contrôles d'exécution sur la préparation des armatures dans le cas de la mise en œuvre de revêtements actifs ou non.....	461
6.4.2.5.5	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur béton.....	461
6.4.2.5.6	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton avant mise en œuvre d'une imprégnation ou d'un revêtement.....	461
6.4.2.5.7	Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte.....	462
6.4.3	Contrôles d'exécution des travaux de mise en œuvre après la préparation du support béton et des armatures.....	462
6.4.3.1	Généralités.....	462
6.4.3.2	Contrôles d'exécution lors de la préparation de l'opération.....	463
6.4.3.3	Contrôles d'exécution lors de la préparation des produits.....	465
6.4.3.3.1	Généralités.....	465
6.4.3.3.2	Cas de la préparation de produits prêts à l'emploi à base de résines de synthèse ou de liants hydrauliques modifiés par des résines de synthèse.....	465
6.4.3.3.3	Cas de la préparation des produits industriels considérés comme fabriqués en centrale ou sur le chantier.....	466
6.4.3.3.4	Cas de la préparation des produits fabriqués en centrale et sur le chantier.....	467
6.4.3.4	Contrôles d'exécution dans le cas d'une restauration du béton et /ou d'un renforcement structural.....	467
6.4.3.4.1	Généralités.....	467
6.4.3.4.2	Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs.....	469
6.4.3.4.2.1	Cas des applications manuelles.....	469
6.4.3.4.2.2	Cas des applications mécanisées.....	470
6.4.3.4.3	Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs.....	472
6.4.3.4.3.1	Cas des applications manuelles.....	472
6.4.3.4.3.2	Cas des applications mécanisées.....	472
6.4.3.4.4	Contrôles d'exécution dans le cas d'un collage structural de bétons.....	475
6.4.3.4.5	Contrôles d'exécution dans le cas d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support.....	475
6.4.3.4.6	Contrôles d'exécution dans le cas d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton.....	475

6.4.3.4.7	Contrôles d'exécution dans le cas de scellement d'armatures de béton armé.....	475
6.4.3.4.8	Contrôles d'exécution dans le cas de calages d'éléments.....	476
6.4.3.4.9	Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton.....	477
6.4.3.4.10	Contrôles d'exécution dans le cas de collages d'armatures passives extérieures au béton.....	477
6.4.3.4.11	Contrôles d'exécution dans le cas d'un l'ajout de forces par précontrainte additionnelle .	
6.4.3.4.12	Contrôles d'exécution dans le cas d'un l'ajout de forces par déformations imposées.	477
6.4.3.5	Contrôles d'exécution dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures	477
6.4.3.5.1	Contrôles d'exécution dans le cas du remplacement d'un béton carbonaté ou pollué ou d'une augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton.....	477
6.4.3.5.2	Contrôles d'exécution dans le cas de traitements électrochimiques.....	477
6.4.3.5.2.1	Cas de l'extraction des chlorures et de la réalcalinisation.....	477
6.4.3.5.2.2	Cas de la prévention ou de la protection cathodique.....	478
6.4.3.5.3	Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur des armatures de béton armé.....	478
6.4.3.5.4	Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur béton.....	479
6.4.3.5.5	Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'une imprégnation ou d'un revêtement.....	479
6.4.3.5.6	Contrôles d'exécution dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte.....	479
6.5	RÉCEPTION DES TRAVAUX.....	480
7	HYGIÈNE ET SÉCURITÉ.....	483
7.1	GÉNÉRALITÉS – GUIDE STRRES 0.....	484
7.2	CAS DES CHANTIERS DE RÉPARATION OU DE RENFORCEMENT.....	488
8	GESTION DES DÉCHETS DU CHANTIER.....	489
8.1	RAPPEL DES OBLIGATIONS.....	490
8.2	CAS DES CHANTIERS DE RÉPARATION OU DE RENFORCEMENT DES STRUCTURES EN BÉTON.....	492

9 FICHE SYNTHÉTIQUE DU PAQ	493
APPENDICE	497
TABLE DES ILLUSTRATIONS	500
LISTE DES TABLEAUX	512
ANNEXE N°1 : DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	515
ANNEXE N° 2 : HISTORIQUE DU BÉTON ARME	547
ANNEXE N°3 : LES ACIERS INOXYDABLES	569
ANNEXE N°4 : L'HYDRODÉMOLITION	579

AVERTISSEMENT

Le présent document a été rédigé dans l'optique d'une opération de mise **en œuvre d'une opération de reprise des bétons dégradés lourde et complexe**. Pour des chantiers de moindre importance, il peut être adapté, mais sans oublier les conséquences qui résulteraient d'une mauvaise exécution. Il est indispensable que soient respectées les exigences des normes et autres documents visés en référence et en annexe n°1 au **présent GUIDE** (sous réserve qu'ils soient applicables à l'opération) ainsi que la démarche qualité développée dans le présent texte.

MODE D'EMPLOI DU PRÉSENT GUIDE

1. **Premier cas : la méthode de réparation ou de renforcement** à mettre en œuvre a été fixée à la suite d'une **étude** (recherche des causes des désordres et mise au point d'un projet de réparation ou renforcement). Il reste à choisir les produits et le matériel de mise en œuvre, à appliquer les produits et à contrôler l'ensemble de l'opération :
 - a) Si la méthode est détaillée dans le présent GUIDE, il faut suivre ses indications à toutes les étapes de l'opération sachant que, si nécessaire, il renvoie aux autres guides du STRRES. Il suffit donc de se reporter directement à l'article 4.2 (choix des matériaux) et aux articles qui le suivent ;
 - b) Si la méthode est traitée en totalité par un des autres guides du STRRES, il suffit de s'y reporter (voir le Tableau n° 2 ci-après) ;
2. **Deuxième cas** : la structure présente des désordres dont les **causes restent incertaines** et, bien entendu, la **technique de réparation et/ou renforcement à mettre en œuvre n'a pas été fixée**. Dans un tel cas, avant de commencer les travaux, il est indispensable de lancer une **opération d'expertise et de diagnostic** puis un projet de réparation en s'appuyant sur le **présent GUIDE** qui décrit dans les parties suivantes et pour les structures en béton armé et précontraint :
 - a) la méthodologie à suivre lors de la réalisation d'une expertise dans le but d'aboutir à un **diagnostic** et un **pronostic**,
 - b) la consistance d'un projet de réparation ou de renforcement,
 - c) les différents désordres et leurs causes ainsi que les principales techniques d'investigation à mettre en œuvre,
 - d) les différentes techniques de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre en fonction des désordres constatés et de leurs causes (cette partie du guide renvoie, si nécessaire, à la norme en vigueur et/ou au **guide** du **STRRES** appartenant à la collection qui traite de la technique à mettre en œuvre).

MODIFICATIONS APPORTÉES AU GUIDE FABEM 1 DE JUIN 2008

ATTENTION, le présent GUIDE a été élaboré en se basant sur les textes existants, dont cinq normes européennes, quatre normes françaises, un fascicule du CCTG et une norme NF DTU, textes révisés ou en cours de révision. Le présent GUIDE indique les modifications qu'apportent ou pourraient apporter ces nouveaux textes et leurs éventuelles incidences sur d'autres textes existants. Les onze textes en cause sont les suivants :

1. **norme en révision : NF EN 1504-2** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le béton ;
2. **norme en révision : NF EN 1504-3** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : réparation structurale et non structurale ;
3. **norme en révision : NF EN 1504-9** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes ;
4. **norme révisée : NF EN 1504-8 de juin 2016** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et EVCP - Partie 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation et vérification de la constance des performances (EVCP) ;

5. **norme révisée : NF EN 1504-10** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux ;
6. **norme révisée : NF P95-101 de juin 2017** : Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Réparation de surface des bétons – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés ;
7. **norme en révision : NF P95-102-1** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés ;
8. **norme révisée : NF P95-103 de juin 2014** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – traitement des fissures et protection du béton – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés ;
9. **norme révisée : NF P95-104 de juillet 2020** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Spécifications relatives à la technique de la précontrainte additionnelle ;
10. **fascicule du CCTG révisé : Fascicule 65 version 1.2 d'octobre 2014 validée en 2018** : Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension.

Il faut ajouter à la liste la future **norme NF P95-105** : Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Armatures passives additionnelles à base de polymères renforcés de fibres collées en surface (EBR) ou en engravures (NSM) – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés

Note : Il y a lieu de mettre à jour les références de certaines des normes visées par le fascicule 65 du CCTG, car ce texte, qui date de 2014, n'a pas été révisé avant sa validation en 2018.

1. Document technique unifié : **NF DTU 21 de juin 2017** : Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton ;
2. Document technique unifié : **NF DTU 42.1 de novembre 2007** : Norme d'exécution des travaux – Réfection des façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymères.

Note : Le fascicule 65 du CCTG de 2000 a été révisé en 2008, puis une nouvelle fois pour intégrer la norme NF EN 13670/CN de février 2013 : Exécution des structures en béton – Complément à la NF EN 13670 de 2013. La NF EN 13670/CN a été complétée par la norme NF P18-451 de décembre 2018 : Béton – Exécution des structures en béton – Règles spécifiques pour les BFUP. Trois prénormes sont parues : la 1504-3 en septembre 2015, la 1504-7 en novembre 2015 et la 1504-10 en décembre 2015. La nouvelle norme NF EN 1504-10 est parue le 11 octobre 2017.

> LA VERSION PRÉCÉDENTE DU GUIDE FABEM 1, DATÉE DE JUIN 2008, S'APPUYAIT SUR :

1. **la norme NF EN 1504-2 d'avril 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 2 : Systèmes de protection de surface pour le béton ;
2. **la norme NF EN 1504-3 de février 2006** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : Réparation structurale et non structurale ;
3. **la norme NF EN 1504-4 de mars 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 4 : Collage structural ;

4. la norme **NF EN 1504-5 de mars 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 2 : Produits et systèmes d'injection du béton ;
5. la norme **NF EN 1504-6 de novembre 2006** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 6 : Ancrage de barres d'armatures ;
6. la norme **NF EN 1504-7 de novembre 2006** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 7 : Protection contre la corrosion des armatures ;
7. la norme **NF EN 1504-8 de mars 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité ;
8. la norme **XP ENV 1504-9 de 1997** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes. Cette norme a été homologuée en novembre 2008 ;
9. la norme **NF EN 1504-10 d'avril 2004** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 10 : Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux ;
10. le fascicule **65A du CCTG et son additif de mai 2000** : Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension ;
11. les **DTU suivants** :
 - **DTU 21 - NF P18-201 de mars 2004** : Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton,
 - **DTU 42.1 de décembre 1997** : Norme d'exécution des travaux – Réfection des façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymères,

Toutes ces modifications ont rendu obligatoire la révision du guide FABEM 1.

Le présent **GUIDE** fait aussi référence aux exigences en matière de **management de la qualité et de l'environnement** contenues dans les nouvelles normes **NF P95-101** et **NF P95-103**, qui visent les principes du recueil de clauses communes du **Référentiel Génie Civil 2010**, lesquels seront repris dans les versions révisées des divers **fascicules du CCTG dont le fascicule 65**.

Pour les produits de construction, le marquage CE se faisait jusqu'au 1^{er} juillet 2013 dans le cadre de la **Directive Produits de Construction (DPC)** du 21 décembre 1988 ; depuis, il se fait dans le cadre du **Règlement Produits de Construction (RPC)**.

Les produits bénéficiant du **marquage CE** dans le cadre de la **DPC** conservent actuellement leur marquage dans le cadre du **RPC**.

Il est rappelé que le **marquage CE** des produits et systèmes conformes à une **norme harmonisée** ou une **Évaluation Technique Européenne (ÉTE)** est obligatoire en France depuis l'**arrêté du 3 juillet 2006** dans le cadre du **décret n°92-647 du 8 juillet 1992**.

Note : des explications complémentaires, sur le marquage CE et l'étiquetage dans le cadre du RPC, figurent à l'article 1.1 ci-dessous.

Les articles nouveaux et ceux ayant subi les plus grandes modifications sont listés dans le tableau ci-après :

N° des articles	Titre	Modifications et compléments
Sans objet	Mode d'emploi du présent guide	Texte nouveau figurant dans les GUIDES FABEM les plus récents.
Sans objet	Introduction	Texte fortement modifié qui comporte : - une présentation des normes (produits de réparation) de la série NF EN 1504-** applicables, - l'introduction de deux notions : le principe (dans le sens de fonction) et les méthodes de réparation associées. Ces notions apparaissent dans les normes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10.
1	Définitions	Chapitre légèrement modifié avec l'introduction de définitions nouvelles.
3	Études préliminaires (175 pages)	Chapitre nouveau qui : - rappelle la nécessité impérative de rechercher les causes des désordres avant de procéder aux opérations de protection, de réparation et de renforcement. Ces études sont effectuées par le maître d'œuvre (études) sous l'autorité du maître de l'ouvrage. - donne la démarche à suivre en trois phases conformément à la norme NF EN 1504-9 : - expertise : identification des désordres, diagnostic : identification des causes, - projet de réparation ou de renforcement, puis dossier de consultation), - détaille les manifestations des désordres d'origine physique, chimique, électrochimique, - indique les techniques et essais à mettre en œuvre pour identifier les causes des désordres, - explique comment choisir la ou les méthode(s) de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre en fonctions des causes des désordres et de leur importance. Note : Cette partie études préliminaires dans le guide de 2008 (plus réduite ~100 pages) était rattachée au chapitre préparation générale de l'opération, ce qui n'était pas logique.
4	Préparation de l'opération, choix des produits et du matériel	Chapitre modifié et complété : Dans le domaine du génie civil, le texte a été modifié et complété pour prendre en compte les normes sur les techniques de réparation ou de renforcement récemment révisées : NF P95-101, NF P95-103 et NF P95-104 auxquelles s'ajoutent une norme en cours de révision : NF P95-102-1 et une norme en cours de rédaction : NF P95-105. Le Fascicule de documentation FD P18-823 est en cours de révision à cause des exigences de performance insuffisantes de la norme NF EN 1504-6 et de la parution de DÉE beaucoup plus complets sur le choix des produits de scellement des barres de BA à base de polymères (produits P et PC) et sur le dimensionnement des longueurs de scellement. Dans le domaine du bâtiment, de nombreux DTU sous forme de normes NF DTU ont été révisés, de nouvelles normes ont vu le jour. Enfin le chapitre prend en compte le Règlement Produits de Construction (RPC) qui a remplacé la Directive Produits de Construction (DPC). Note : ce RPC fait actuellement l'objet de critiques de la part de la Commission Européenne.

N° des articles	Titre	Modifications et compléments
5	Mode opératoire	Dans ce chapitre, le mode opératoire traite de la : - préparation du support béton et des armatures, - préparation de l'opération (réparation ou renforcement) - de la préparation des produits, - de l'exécution de l'opération. Les domaines concernés : le bâtiment et le génie civil présentent des spécificités qui sont détaillées.
6	Essais et contrôles	Dans ce chapitre sont détaillées pour chaque méthode de réparation ou de renforcement dans les deux domaines (bâtiment et génie civil) : - le contrôle de réception des produits avec ou sans épreuve d'étude, - les épreuves de convenue, - les contrôles d'exécution, - la réception des travaux.
7	Hygiène et sécurité	Ce chapitre renvoie au GUIDE O qui comporte un chapitre très détaillé sur ces sujets.
8	Gestion des déchets du chantier	Ce chapitre rappelle les règles à respecter.
9	Plan d'Assurance de la Qualité	Ce chapitre rappelle l'obligation du PAQ pour les études et travaux.
Sans objet	Appendice	Liste les documents de référence concernant la pathologie dans le bâtiment et le génie civil.
ANNEXE	Documents de référence	Mise à jour complète de l'annexe 1 (suppression des normes, NF DTU, DTU... obsolètes), introduction des textes à caractère normatif nouveaux ou révisés avec leur dates de valeur.

Tableau n° 1 : principales modifications apportées au guide FABEM 1 de 2008

En principe, lorsqu'un **texte important** (norme, fascicule du CCTG, DTU, guide technique, règles ou recommandations professionnelles, revue...) est cité pour la première fois dans le **présent GUIDE**, il apparaît avec son **titre en toutes lettres** et sa **date de valeur**. Pour les autres textes comme les très nombreuses normes d'essais, pour ne pas alourdir le document, leur titre et leur date de valeur sont reportés dans l'**annexe** du **présent GUIDE**.

INTRODUCTION

Les normes européennes **NF EN 1504-9 et 10** révisée de la **série 1504** relatives aux produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton y compris leur mise en œuvre et leur contrôle s'appuient sur les deux termes suivants :

1. les principes qui sont les **objectifs** auxquels doivent satisfaire les **méthodes de réparation, de renforcement et de protection** ;
2. les **méthodes** qui assurent, soit la **protection**, soit la **réparation** ou le **renforcement** des structures en béton.

ATTENTION

Pour réparer, renforcer ou protéger une structure en béton donnée, il est souvent nécessaire d'associer plusieurs principes et certaines des méthodes de réparation associées.

Par exemple, sur un élément présentant des corrosions d'armatures et soumis à une agression chimique (sulfates), après préparation des supports (béton et armatures), il est possible d'appliquer les principes suivants et les méthodes associées ci-après :

- **Principe P11 et méthode 11.1** : mise en œuvre d'un revêtement actif sur les armatures (pas toujours obligatoire),
- **Principe P7 et méthode 7.2** : remplacement du béton carbonaté ou pollué (obligatoire),

Et, en complément :

- **Le principe P6 et méthode 6.3** : ajout d'une couche de mortier ou de béton sur toute la surface pour résister aux sulfates,
- **Ou le principe P6 et méthode 6.1** : mise en œuvre d'un revêtement sur toute la surface pour résister aux sulfates...

Le terme « **principe** » ayant été jugé peu explicite, il lui a été substitué le terme « **fonction** » dans les normes françaises de la **série P95-100** révisées récemment ou en cours de révision. Il s'agit des normes, qui traitent de la réparation et du renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie et qui peuvent faire appel aux produits de protection ou de réparation relevant des normes européennes harmonisées de la **série 1504**.

AVERTISSEMENT : *Pour certains éléments de structures, pour certaines utilisations particulières et pour satisfaire à certaines fonctions, certains produits et systèmes utilisés dans le domaine du génie civil peuvent être utilisés dans le domaine du bâtiment et vice-et-versa.*

Le présent **GUIDE** relatif à la reprise des bétons dégradés des structures en béton armé et en béton précontraint traite de la mise en œuvre de la majeure partie des méthodes de réparation ou de renforcement, voire de protection des normes **NF EN 1504-9 et 10** révisées regroupées dans les **trois fonctions principales** suivantes :

Fonction principale I (principe 3) : la restauration du béton en redonnant à la structure sa **forme** (géométrie) et sa **fonction** avec, éventuellement, le **remplacement** d'éléments concernés par des désordres très importants ;

Fonction principale II (principe 4) : le renforcement structural pour restaurer la **portance de la structure** si cette dernière présente des désordres réduisant celle-ci, ou pour augmenter la **portance de la structure**, cette dernière, pouvant ou non, présenter des désordres ;

Fonction principale III (principe 7) : la restauration ou la préservation de la passivation. La **restauration** concerne les armatures touchées par la corrosion et la préservation les armatures non encore affectées par la corrosion.

- **certaines fonctions peuvent être considérées comme complémentaires des trois fonctions principales I, II et III. Il s'agit de :**
 - la protection contre la pénétration des agents agressifs (principe 1 de la norme),
 - la maîtrise de l'humidité (principe 2 de la norme),
 - l'augmentation de la résistance physique vis-à-vis de contraintes physiques et mécaniques provoquant l'usure et l'érosion de la surface du béton (principe 5 de la norme),
 - l'augmentation de la résistance de la surface du béton aux produits chimiques (principe 6 de la norme).
- **certaines autres fonctions peuvent être considérées comme complémentaires de la fonction principale III. Il s'agit :**
 - de l'augmentation de la résistivité du béton (principe 8. de la norme),
 - du contrôle cathodique (principe 9. de la norme),
 - de la protection cathodique (principe 10. de la norme),
 - du contrôle des zones anodiques et cathodiques (principe 11. de la norme).

Note : *les principes P2 (maîtrise de l'humidité) et P8 (augmentation de la résistivité) imposent que le béton soit protégé contre l'humidité ; une grande partie des méthodes de réparation visées par le principe P1 peuvent assurer cette protection.*

Les méthodes de traitement du béton dégradé et des armatures, qui sont visées ou développées dans le présent GUIDE font l'objet des textes suivants :

- **d'une part, des deux normes européennes déjà citées suivantes :**
 - **NF EN 1504-9** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 9 : Principes généraux d'utilisation des produits et systèmes (tableaux 1 et 2)
 - **NF EN 1504-10** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux (article 6 et tableau 1) ;

Note : *un certain nombre de termes techniques n'ont pas été traduits de la même façon dans ces deux normes et des méthodes de réparation ont été ajoutées dans la norme NF EN 1504-9 ce qui complique la lecture de ces textes. Avec la révision de la norme NF EN 1504-10 les deux textes sont quasiment identiques. En attendant une future mise à jour, le présent GUIDE fait référence aux méthodes visées par les normes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée.*

- **d'autre part, des normes françaises :**
 - NF P 95-101 (2017) : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement,
 - NF P 95-102-1 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Béton projeté (en cours de révision parution probable fin 2021),
 - NF P 95-103 (2014) : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Traitement des fissures et protection du béton,
 - NF P 95-104 (2020) : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle ;
 - NF P 95-105 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie - Spécifications relatives à la technique de réparation et renforcement par armatures additionnelles collées (en cours de création).

Les deux normes européennes traitent au total de 43 méthodes de réparation, de renforcement et de protection destinées à satisfaire 11 principes (fonctions). Cependant, certaines méthodes :

- sont données à titre informatif dans les normes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée dont l'annexe informative A contient quelques développements sommaires :
 - Méthode 1.4 : colmatage superficiel des fissures,
 - Méthode 1.6 : transformation de fissures en joints,
 - Méthode 11.3 application d'inhibiteurs de corrosion dans ou à la surface du béton ;
- relèvent d'autres normes européennes ou d'agréments techniques européens existants (ATE parus avant le 1^{er} juillet 2013) ou d'Évaluations Techniques Européennes (ÉTE parus depuis le 1^{er} juillet 2013) comme l'indiquent les deux normes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée. Il s'agit des huit méthodes suivantes :
 - Méthodes 1.7 et 2.4 : mise en place de panneaux extérieurs
 - Méthode 1.8 : application de membranes,
 - Méthode 2.5 : traitement électrochimique (contre les remontées d'eau),
 - Méthode 3.4 : remplacement d'éléments,
 - Méthode 4.7 : précontrainte (par post-tension),
 - Méthode 7.3 : réalkalinisation électrochimique du béton carbonaté,
 - Méthode 7.5 : extraction électrochimique des chlorures,
 - Méthode 10.1 : application d'un potentiel électrique (protection cathodique).

Note : le terme potentiel électrique est impropre, le remplacer par courant électrique.

L'utilisation de ces deux normes européennes 1504-9 et 10 est assez ardue à cause de l'enchevêtrement des méthodes de réparation ou renforcement et protection mais aussi à cause des renvois à d'autres normes. Les renvois aux normes de produits et aux normes d'exécution posent souvent des difficultés car il n'y a aucun moyen de savoir si ces renvois concernent la totalité ou une partie seulement des normes visées. Il est donc nécessaire d'analyser ces normes et leur domaine d'application avant de pouvoir y faire référence dans le marché.

ATTENTION, en ce qui concerne les normes d'essai, le prescripteur lors de la rédaction d'un marché se doit aussi d'analyser leur contenu afin de vérifier si elles sont applicables aux contrôles à effectuer.

En effet, par exemple, la norme relative aux produits de réparation NF EN 1504-3 est basée sur des normes d'essais, dont la plupart utilisent des éprouvettes de faible dimension coulées dans des moules et soumises à des essais en laboratoire. Les performances ainsi obtenue ne peuvent être transposées lorsque les produits de réparation sont mis en place par projection, en particulier par voie sèche, puisque dans ce cas, la composition du produit projeté est différente du produit livré sur le chantier à cause des retombées. De plus, la norme NF EN 1504-3 ne s'appuie pas sur une norme d'essai permettant la qualification de produits projetables.

Se reporter à l'article 1.1.2 ci-dessous qui traite de la normalisation européenne.

- Les normes françaises couvrent également une bonne partie des méthodes développées dans le présent GUIDE et les normes européennes 1504-9 et 10 révisée.

Il a été décidé, dans le présent GUIDE de se baser sur les tableaux 1 des normes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée listant les 43 méthodes de réparation, renforcement et protection.

Aux **43 méthodes citées**, le guide **FABEM 1** :

■ **en ajoute 6 non visées par les normes européennes :**

- Calfeutrement et pontage (techniques pouvant être assimilées par extension au colmatage superficiel visé par la méthode M 1.4 qui est un remplissage partiel pour boucher une fissure en surface),
- Calages,
- Béton contrecollé (méthode qui pourrait être assimilée à la méthode M4.4 relative à l'ajout de mortier ou béton adhérent dans le cadre d'un renforcement structural),
- Ajout de forces par déformations imposées,
- Réinjection des conduits de précontrainte ;

■ **en exclut 4 :**

- Méthode 1.6 : transformation de fissures en joints traitée dans le guide **FABEM 2**,
- Méthodes 1.7 et 2.4 : montage de panneaux extérieurs (bardages...),
- Méthode 1.8 : application de membranes évoquée dans le **guide FABEM 4**,
- Méthode 2.5 traitements électrochimiques, destinés à contrôler l'humidité (remontées d'humidité) traités dans le **guide FABEM 6** ;

Il reste donc **45 méthodes**, dont certaines font **doublon** (17 au total) car elles satisfont à plusieurs fonctions à la fois (un revêtement de surface peut protéger contre le passage d'agents agressifs mais aussi assurer la résistance à une action physique ou chimique).

Cependant, **les performances exigées ne sont pas forcément les mêmes pour chaque fonction et la mise en œuvre peut ne concerner qu'une face de l'élément à traiter ou toute sa surface** (par exemple toute la surface de l'élément est à traiter si l'on souhaite maîtriser totalement l'humidité et augmenter la résistivité).

Il est donc possible de séparer en **deux groupes indiqués 1 et 2 les 45 méthodes** de réparation et/ou de renforcement des bétons ou de préservation et/ou de restauration de la passivité des armatures. Ces méthodes sont listées dans le **Tableau n° 2 suivant inspiré du tableau 1** des deux normes **européennes** :

- **les méthodes du groupe 1** qui font déjà l'objet de normes spécifiques et/ou d'un guide du STRRES existant. La cinquième colonne du tableau liste les documents de références associés. Le **présent GUIDE** vise ces méthodes et renvoie, s'il existe, au **guide du STRRES** traitant du sujet et aux textes existants ; cependant il traite certaines méthodes spécifiques (elles apparaissent en caractères rouge dans le tableau) ;
- **les autres méthodes font partie du groupe 2**. Elles concernent par exemple, la mise en œuvre de mortier ou de béton dans le cadre d'une réparation, d'un renforcement avec ou sans restauration ou préservation de la passivité. Elles s'intègrent dans les trois fonctions principales susvisées.... Ces méthodes sont traitées en détail par le **présent GUIDE**.

Le Tableau n° 2, qui suit, liste les trois fonctions principales (cette notion de fonction principale n'est pas visée dans les normes de la série **NF EN 1504-****), **les fonctions complémentaires et les méthodes de réparation ou de renforcement associées**.

Tableau établi à partir du tableau n°1 des deux normes européennes EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée

Classement	Fonction ou principe	Groupe 1 ou groupe 2	Méthode satisfaisant à la fonction ou principe	Norme, guide du STRRES ou autre document concernés	Observations
Ces fonctions 1 et 2 sont complémentaires des fonctions principales I, II et III	1. Protection contre toute pénétration	1	1.1 : Imprégnation hydrophobe	FABEM 4 et NF P95-103	
		1	1.2 : Imprégnation	FABEM 4 et NF P95-103	
		1	1.3 : Revêtement	FABEM 4 et NF P95-103	
		1	1.4 : Colmatage superficiel des fissures ~ Pontage ou protection localisée ou généralisé (voir la note et la figure ci-dessous)	FABEM 2 (calfeutrement ou pontage) FABEM 4 (protection localisée ou généralisée) et NF P95-103	Annexe informative de la norme 1504-10
		1	Calfeutrement des fissures	FABEM 2 et NF P95-103	Techniques non détaillées par les deux normes 1504 (même rôle qu'un pontage ou une protection localisée ou généralisée)
		1	1.5 : Remplissage des fissures ~ Colmatage (voir la note et la figure ci-dessous)	FABEM 2, FABEM 3 et NF P95-103	
		1	1.6 Transformations de fissures en joints.	Exclue de FABEM 1 Voir FABEM 2	Annexe informative de la norme 1504-10
		Sans objet	1.7 Montage de panneaux extérieurs (bardages...)	Exclue de FABEM 1	Non détaillée par les deux normes 1504
	2. Maîtrise de l'humidité	1	1.8 Application de membranes.	FABEM 4	
		1	2.1 : Imprégnation hydrophobe	FABEM 4 et NF P95-103	Doubleton
		1	2.2 : Imprégnation	FABEM 4 et NF P95-103	Doubleton
		1	2.3 Revêtement	FABEM 4 et NF P95-103	Doubleton - Non détaillée par les deux normes 1504
		Sans objet	2.4 Montage de panneaux extérieurs (bardages...)	Exclue de FABEM 1	Non détaillée par les deux normes 1504
		1	2.5 Traitement électrochimique (remontées d'humidité)	Exclue de FABEM 1 Voir FABEM 6	Non détaillée par les deux normes 1504
		FONCTION PRINCIPALE I	3. Restauration du béton	2	3.1 : Application manuelle de mortier
2	3.2 : Nouveau coulage de béton ou de mortier			NF P95-101, NF DTU 21 et Fascicule 65	Méthode traitée dans FABEM 1
2	3.3 : Projection de béton ou de mortier			FABEM 5, NF EN 1414-487-1 et 2 et NF P95-102-1	Méthode traitée dans FABEM1 à cause de la révision de la P95-102
2	3.4 Remplacement d'éléments			Méthode traitée dans FABEM 1	Non détaillée par les deux normes 1504
2	Calages d'éléments			Méthode traitée dans FABEM 1	Non visée par les deux normes 1504

Tableau établi à partir du tableau n°1 des deux normes européennes EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée

Classement	Fonction ou principe	Groupe 1 ou groupe 2	Méthode satisfaisant à la fonction ou principe	Norme, guide du STRRES ou autre document concernés	Observations
FONCTION PRINCIPALE II	4. Renforcement structural	1	4.1 : Ajout ou remplacement de barres de BA en acier internes ou externes	FABEM 7, DTU 21 et Fascicule 65. Méthode visée par la NF P95-101	
		1	4.2 : Mise en place ou ajout de barres de BA en acier scellées dans des trous préformés ou forés dans le béton	FABEM 7, DTU 21 et Fascicule 65. Méthode visée par la NF P95-101	Le guide FABEM 7 nécessite une mise à jour
		1	4.3 : Collage de plaques de renforcement	FABEM 7 et future NF P95-105. Méthode visée par la NF P95-101	
		2	4.4 : Ajout sur la structure en béton de mortier ou de béton adhérent	Méthode traitée dans FABEM 1 NF P95-101 (concerne les réparations de surface)	Doublon (méthodes 3.1, 3.2, 3.3) – Ne traite pas des mortiers et bétons contrecollés
		1	4.5 : Injection de fissures, vides ou interstices	FABEM3 et NF P95-103	
		1	4.6 : Remplissage de fissures, vides ou interstices	FABEM 3 et NF P95-103	
		1	4.7 : Précontrainte additionnelle (post-tension)	FABEM 8 et NF P95-104	Non détaillée par les deux normes 1504
		1	Ajout de forces par déformations imposées (vérinage)	FABEM 8	Non visée par les deux normes 1504
Ces fonctions sont complémentaires des fonctions principales I, II et III	5. Augmentation de la résistance physique (actions physiques et mécaniques)	1	5.1 : Revêtement	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		1	5.2 : Imprégnation	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		1	5.3 : Ajout de mortier ou de béton	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
	6. Augmentation de la résistance chimique (attaque et pénétration des produits chimiques)	1	6.1 : Revêtement	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		1	6.2 : Imprégnation	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		1	6.3 : Ajout de mortier ou de béton	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon

Tableau établi à partir du tableau n°1 des deux normes européennes EN 1504-9 et NF EN 1504-10 révisée					
Classement	Fonction ou principe	Groupe 1 ou groupe 2	Méthode satisfaisant à la fonction ou principe	Norme, guide du STRRES ou autre document concernés	Observations
FONCTION PRINCIPALE III	7. Préservation et restauration de la passivité	1	7.1 : Augmentation du recouvrement des armatures par du mortier ou du béton	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		2	7.2 : Remplacement du béton contaminé ou carbonaté	Méthode traitée dans FABEM 1 NF P95-101 (concerne les réparations de surface)	Le remplacement correspond à appliquer un mortier ou un béton donc assimilable à un doublon .
		1	7.3 : Réalcalinisation électrochimique du béton carbonaté	Méthode traitée dans FABEM 1 NF P95-101 (concerne les réparations de surface)	
		2	7.4 : Réalcalinisation du béton carbonaté par diffusion	Citée dans FABEM 1	Doublon dans le sens où la méthode utilise un ajout de mortier ou de béton
		1	7.5 Extraction électrochimique des chlorures	Méthode traitée dans FABEM 1 NF EN 14038-2	
		1	Réinjection des conduits de précontrainte	FABEM 8	Non visée par les deux normes 1504 Juste citée dans la norme NF P95-104
Ces fonctions sont complémentaires de la fonction principale III	8. Augmenter la résistivité :	1	8.1 : Imprégnation hydrophobe	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		1	8.2 : Imprégnation (réduction de la porosité et augmentation de la résistance de la surface par remplissage total ou partiel des pores)	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
		1	8.3 : revêtement	FABEM 4 et NF P95-103	Doublon
	9. Contrôle cathodique	1	9.1 : Limitation de la teneur en oxygène (à la cathode) par saturation ou revêtement de surface	FABEM 4 et NF P95-103	La saturation n'est efficace que s'il y a immersion totale. Doublon
	10. Protection cathodique	1	10.1 Application d'un potentiel (courant) électrique	Méthode traitée dans FABEM 1 NF EN ISO 12696	
	11. Contrôle des zones anodiques	2	11.1 : Revêtements actif sur les armatures : * fournissant un environnement alcalin * jouant le rôle d'inhibiteurs de l'action électrochimique * permettant une réaction galvanique sacrificielle interstices	Méthode traitée dans FABEM 1 NF P95-101	
		2	11.2 : Revêtements de protection sur les armatures (revêtements étanches)	Méthode traitée dans FABEM 1 NF P95-101	
2		11.3 : Application d'inhibiteurs sur ou dans le béton	Méthode traitée dans FABEM 1	Annexe informative de la norme 1504-10	

Tableau n° 2 : liste et classification des différentes méthodes de réparation ou de renforcement traitées en tout ou partie dans le guide FABEM 1

Note : le terme *colmatage des fissures* concerne le remplissage des fissures qui peut être obtenu par gravité ou par injection. Le terme *colmatage superficiel des fissures* peut être obtenu par un remplissage partiel bouchant la fissure (technique non retenue par la norme NF P95-103. Dans le présent GUIDE il concerne les deux techniques suivantes le pontage et le calfeutrement qui sont traitées dans le guide FABEM 2. Dans une réparation structurale, le traitement de la fissure se fait par injection afin de remplir complètement la fissure.

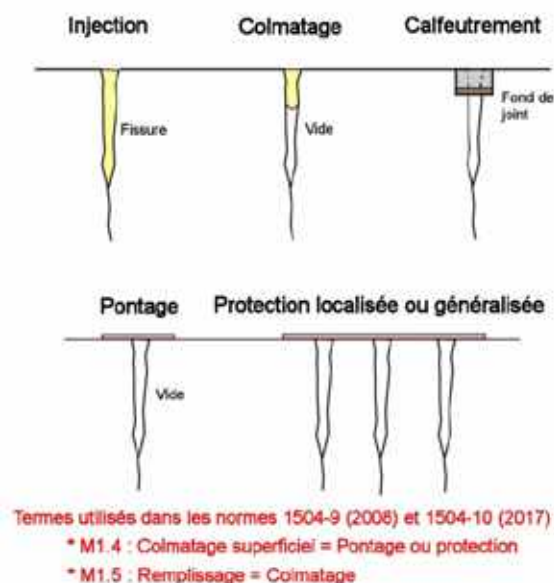


Figure n° 2 : Différents traitements des fissures

Note : les méthodes M3.1 (application manuelle de mortier), M3.2 (nouveau béton ou mortier coffré) et M3.3 (projection de béton ou de mortier) sont en fait des techniques de mise en œuvre et non des méthodes de réparation. Les deux méthodes de réparation couvrant ces trois techniques sont : l'ajout de béton ou de mortier et le remplacement du béton pollué, ou carbonaté ou endommagé !

- Pour simplifier l'utilisation des documents existants, le présent GUIDE retient 16 méthodes regroupées en deux ensembles A et B. En effet comme déjà évoqué ci devant :
 - certaines des méthodes satisfont à plusieurs fonctions à la fois. Par exemple, un recouvrement en mortier ou béton peut assurer la restauration du béton comme la résistance à des agressions physiques ou chimiques même si les exigences de performances peuvent être différentes.
 - la plupart des méthodes satisfaisant à la fonction principale II de renforcement structural satisfont aussi à la fonction principale I de restauration du béton. Ces deux types de méthodes ont été rassemblées dans l'ensemble A.
 - les méthodes qui satisfont à la fonction principale III de préservation ou de restauration de la passivité des armatures (Groupe III) ont été rassemblées dans l'ensemble B.

ENSEMBLE A : méthodes dont la fonction relève de la restauration du béton et/ou du renforcement structural :

1. Mise en œuvre de produits ou systèmes de réparation de surface des bétons (Cf. norme NF P95-101) sachant qu'un ajout de mortier ou de béton en faible épaisseur peut aussi servir à améliorer la résistance physique et/ou chimique du béton. De telles réparations n'ont que rarement un caractère structural ;
2. Mise en œuvre de produits ou systèmes de réparation ou de renforcement des bétons à caractère structural qui peut aussi servir à améliorer la résistance physique et/ou chimique du béton ;
3. Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage structural des bétons [béton durci sur béton durci et béton frais sur béton durci] ;
4. Mise en œuvre par injection de produits ou systèmes dans l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support ;
5. Mise en œuvre par injection ou remplissage de produits ou systèmes dans des fissures ou des vides du béton ;
6. Mise en œuvre de produits ou systèmes de scellement des armatures de béton armé (le guide FABEM 7 nécessite une mise à jour) ;
7. Mise en œuvre de produits et systèmes pour le calage d'éléments ;
8. Mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton ;
9. Mise en œuvre par collage d'armatures passives extérieures au béton
10. Ajout de forces par précontrainte additionnelle ;
11. Ajout de forces par déformations imposées ;

ENSEMBLE B : méthodes dont la fonction relève de préservation ou de la restauration de la passivité des armatures :

12. Mise en œuvre de produits ou systèmes dans le cadre des quatre méthodes suivantes qui sont déjà couvertes par les méthodes 1 et 2 visées ci-dessus :
 - Augmenter le recouvrement des armatures,
 - Remplacer un béton carbonaté et/ou pollué,
 - Réalcaliniser, par diffusion, le béton carbonaté,
 - Augmenter la résistivité du béton ;
13. Mise en œuvre de traitements électrochimiques :
 - De réalcalinisation,
 - D'extraction électrochimique des chlorures,
 - De protection cathodique ;
14. Mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur des armatures de béton armé ;
15. Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur des bétons ;
16. Mise en œuvre d'une réinjection de conduits de précontrainte.

Note : bien que la méthode 12 de l'ensemble B soit couverte par les méthodes 1 et 2 de l'ensemble A, elle Textesa été conservée car elle assure ici des fonctions concernant la passivité des armatures. Bien entendu, les articles du guide FABEM 1 qui traitent de cette méthode renvoient aux articles traitant des méthodes 1 et 2.

Ces 16 méthodes peuvent être utilisées seules ou combinées entre elles pour réparer ou renforcer une structure. Elles sont traitées avec plus ou moins de développements par le présent GUIDE lequel renvoie, si nécessaire, aux autres guides du STRRES.

Par exemple : les méthodes des **ensembles A et B** nécessitent parfois la mise en œuvre de certaines des méthodes complémentaires **du groupe 1** :

- une protection contre la pénétration d'agents agressifs par la mise en œuvre :
 - d'une imprégnation hydrophobe,
 - d'une imprégnation,
 - d'un revêtement de surface ;
- le colmatage local des fissures ;
- le remplissage des fissures ;
- l'application de membranes ;
- une protection ou un sur-revêtement.

Les différentes méthodes listées ci-dessus relèvent des **guides** du **STRRES** suivants, auxquels le lecteur est invité à se reporter :

GUIDE FABEM 2 : Traitement des fissures par : Calfeutrement – Pontage et protection localisée – Création d'un joint de dilatation ;

GUIDE FABEM 3 : Traitement des fissures par injection ;

GUIDE FABEM 4 : Protection des bétons.

1

Définitions – Généralités

1.1.1 LA NORMALISATION FRANÇAISE

Les fonctions auxquelles doivent satisfaire les produits et systèmes de réparation des bétons ont été identifiées dans des normes relatives aux produits spéciaux destinés aux réparations élaborées dans les années 80-90 (normes de la série **P 18-8**** dont certaines étaient le support de la **Marque NF produits spéciaux construction béton** qui est régie par le règlement **NF 030**). Les textes français étaient pionniers en Europe mais non forcément adaptés aux pratiques des autres pays. Cette classification française a donc été remise en cause par la parution des normes européennes et que la **marque NF** a prise en compte.

1.1.2 LA NORMALISATION EUROPÉENNE

Il existe de nombreuses **normes européennes** (normes d'essai, normes de produits, normes d'exécution...). Elles sont obligatoirement transposées en **normes françaises** dites **homologuées** par l'**AFNOR**.

Les normes concernant les **produits de construction transportables et stockables** (ce n'est pas le cas, par exemple du béton frais) sont dites **harmonisées**. Celles relatives au béton frais font partie des **normes volontaires**, normes qui peuvent faire l'objet de certaines adaptations et deviennent des **documents d'application nationale (DAN)**.

Les **produits de construction** peuvent librement circuler dans l'**espace économique européen (EEE)** à condition d'être bénéficiaires d'un **marquage CE**. Ce marquage peut être obtenu dans le cadre du **RPC**¹:

Lorsqu'un **produit de construction** est couvert par une **norme harmonisée** ou est conforme à une **Évaluation Technique Européenne** ou **ÉTÉ (European Technical Assessment [ETA])**, le fabricant établit une **Déclaration des Performances (DdP** sigle anglais : **DoP**) pour ce produit lors de sa mise sur le marché (article 4). Cette déclaration indique que le produit satisfait aux **7 exigences fondamentales du RPC**. Cependant il existe trois cas de dérogation permettant au fabricant de ne pas établir la **DdP** (se reporter à l'article 5 du **RPC**).

Une **ÉTÉ** est validée par un **organisme agréé** par chaque gouvernement (en France, le **CSTB** et le **CEREMA**). L'organisme s'appuie sur un **Document d'Évaluation Européenne** ou **DÉE (European Assessment Document [EAD]** élaboré par l'**Organisation Européenne d'Évaluation Technique (European, Organisation for Technical Assessment [EOTA])**.

Note : l'article 19 du RPC indique qu'un fabricant peut présenter une demande d'évaluation technique européenne. Dans ce cas, un document d'évaluation européen est rédigé et adopté par l'organisation des OET si le produit de construction n'est pas couvert ou n'est pas totalement couvert par une norme harmonisée et/ou pour lequel les performances correspondant à ses caractéristiques essentielles ne peuvent être entièrement évaluées conformément à une norme harmonisée.

Note : le marquage CE d'un produit peut aussi avoir été obtenu dans le cadre de la Directive produits de Construction (DPC), qui imposait le respect de 6 exigences essentielles, soit par l'intermédiaire d'une norme harmonisée, soit par celui d'un Agrément Technique Européen (ATE). Ce marquage reste acquis pour le moment.

> Remarques importantes :

- les exigences de performance relatives à un produit de construction font l'objet d'un **mandat de la Commission Européenne**. Ensuite, la **norme harmonisée** correspondante est finalisée. Dans chaque **norme harmonisée** le paragraphe « analyse » permet de connaître le n° du mandat ;

¹ Lorsqu'un produit de construction n'est pas apte à être transporté et distribué dans tout l'espace économique européen, il peut cependant faire l'objet d'une norme européenne qui est qualifiée de volontaire. C'est le cas pour le béton frais dont la durée d'utilisation est très réduite. Il relève, en Europe, de la NF EN 206-1 et, en France, de la NF EN 206/CN et du dascicuke 65 du CCGT applicable aux marchés publics.

- conformément à la **DPC, une norme harmonisée**, dans son **annexe ZA** informative, définissait l'**étiquetage et le marquage CE**. Ce n'est plus le cas avec le **RPC**, qui fixe dans son **article 9** les informations qui doivent être marquée, soit sur les produits, soit sur les étiquettes ou sur les documents d'accompagnement en sus du **sigle CE** (il n'y a plus de modèle type d'étiquette) ;
- l'**annexe ZA** des normes harmonisées ne fixe pas un **niveau de performance** pour un produit, elle fixe une **valeur seuil** (« plancher ») ou la **classe déclarée** (par le fabricant) si la norme prévoit plusieurs classes (niveaux de performance). Il appartient donc **au marché**, soit de fixer le niveau requis ou la classe nécessaire, soit dans le cas d'un **usage particulier** de s'appuyer sur les résultats d'une **épreuve d'étude ou de convenance**. Bien entendu, dans ce cas, la consistance de l'épreuve est à définir au **marché** ;

Note : l'article n°2 du **RPC** indique que les performances correspondant aux caractéristiques essentielles pertinentes d'un produit de construction sont exprimées en niveau, en classe ou au moyen d'une description. Il interdit la notion de test réussi/non réussi et impose de donner la performance sous forme d'une valeur numérique.

ATTENTION : les normes européennes concernant les produits de construction, comme celles de la **série 1504** relatives aux **produits et systèmes de réparation ou de protection**, fixent pour respecter le **mandat** :

- les niveaux de performances minimaux requis (caractère obligatoire) pour « **toutes les applications prévues** » par la norme ;
- les niveaux de performances minimaux requis (caractère optionnel) pour « **certaines applications prévues** » par la norme ;
- accessoirement, dans une **annexe informative**, les performances pouvant être requises pour « **certaines applications spéciales** ».

Les exigences :

- pour « **toutes les applications prévues** » sont identifiées par le **symbole** : ■ ;
 - celles pour « **certaines applications particulières prévues** » sont identifiées par le **symbole** □.
- ATTENTION, c'est le fabricant qui décide si son produit doit ou non satisfaire à une ou plusieurs des applications particulières de la norme ;**
- pour **des applications spéciales** visées ou non dans une **norme**, il est possible, pour le **maitre d'œuvre**, de fixer des **exigences spécifiques**. Cela impose de tester le produit lors d'une **épreuve d'étude** en liaison avec le **fabricant et l'entrepreneur** sauf si le produit a été formulé par le fabricant pour satisfaire aux **exigences de certaines applications spéciales**.

- l'**annexe ZA** autorise dans le **cadre du RPC** :
 - pour les performances des produits de réparation et de protection du béton deux systèmes d'Évaluation et de Vérification de la Constance des Performances (systèmes d'EVCP) vis-à-vis des sept exigences fondamentales du RPC mais de niveaux très différents :
 - pour les produits à faibles performances : le système 4 (déclaration du fabricant),
 - pour d'autres produits : le système 2+ (vérification initiale et surveillance du système de contrôle de production) ;

Note : dans le cadre de la **DPC**, existaient deux systèmes d'attestation de conformité vis-à-vis des six exigences essentielles avec les mêmes de niveaux (4 et 2+).

- pour les produits soumis aux réglementations relatives à la réaction au feu, trois systèmes d'EVCP (1, 3 et 4) en liaison avec les Euroclasses ;

Il est donc important que le **marché** fixe les niveaux **d'EVCP** pour les produits de réparation ou de protection du béton à fournir et à mettre en œuvre et ce en fonction des **usages prévus**.

Pour pouvoir passer des **classifications européennes aux classifications nationales** et surtout pour pouvoir utiliser ces nouvelles normes européennes, des **textes passerelles** ont été élaborés dans le domaine des ouvrages d'art comme du bâtiment. Ces textes ont été rendus également nécessaires pour les deux raisons supplémentaires suivantes :

- **toutes les normes européennes** ne sont pas encore parues et tous les textes de référence français n'ont pas encore été mis à jour ;
- **les normes européennes** introduisent pour certaines fonctions des **exigences de performances comportant plusieurs niveaux** mais, malheureusement, sans donner les critères de choix des niveaux. Ces niveaux sont explicités dans le **présent GUIDE**.

Note : se reporter à l'annexe n°1 qui traite de tous les documents de référence cités dans le présent GUIDE. Elle liste, en particulier, les normes françaises actuellement conservées ou révisées.

Les principales définitions normalisées des termes utilisés dans le présent GUIDE se trouvent regroupées dans les normes suivantes :

- la norme homologuée **NF P 95-101** : Réparation de surface des bétons — Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés ;
- la norme homologuée **NF EN 1504-1** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité — Partie 1 : Définitions ;
- la norme harmonisée **NF EN 1504-3²** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité Partie 3 : Réparations structurales et réparations non structurales ;
- la norme harmonisée **NF EN 1504-7³** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité — Partie 7 : Protection contre la corrosion des armatures ;
- la norme homologuée **NF EN 1504-8⁴** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité — Partie 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité ;
- la norme homologuée **NF EN 1504-9** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité — Partie 9 : Principes généraux d'utilisation des produits et systèmes.



Figure n° 3 les normes des séries **NF P 95-1**** et **NF EN 1504-****

² Les normes de cette série apparaissent comme « norme française homologuées ». Il faut lire le paragraphe « analyse » qui indique celles qui ont été élaborées sous le mandat européen M/128 et qui débouchent sur le marquage CE et ont le droit au titre de normes harmonisées.

³ Cette norme date de novembre 2006.

⁴ Des définitions complémentaires se trouvent également dans la norme homologuée **NF EN 1504-10**.

1.2.1 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HOMOLOGUÉE NF P 95-101

Outre les définitions des normes NF EN 1504-1, NF EN 1504-3, NF EN 1504-7 et NF EN 1504-9, s'appliquent :

1. Termes généraux

- **Dégradation structurelle ou structurale** : abaissement des caractéristiques d'un élément d'une structure (perte de section, diminution des performances des matériaux, etc.) mettant en cause la tenue de l'élément ou de l'ensemble de celle-ci.
- **Dégradation non structurelle ou non structurale** : dégradation ne mettant pas en cause la tenue d'un des éléments et de l'ensemble d'une structure. Elle appelle une réparation qualifiée de non-structurale.
- **Support** : surface sur laquelle l'applicateur met en œuvre une réparation de surface.
- **Nettoyage** : le but du nettoyage est d'éliminer la poussière, les matériaux décollés et les agents contaminants afin d'améliorer l'adhérence entre le support et le matériau appliqué.
- **Repiquage (du béton)** : enlèvement de matière à la surface du béton jusqu'à une profondeur maximale de 15 mm
- **Enlèvement (de béton) ou purge** : enlèvement des parties contaminées (ou du béton pollué ou carbonaté), détériorées et/ou de parties saines du béton.

2. Produits et matériaux

- **types de produits utilisés** : les produits utilisés (mortiers et bétons) se classent en trois familles :
 - les produits à base de liants hydrauliques (sigle : CC : Cement mortars and Concretes),
 - les produits à base de liants hydrauliques modifiés par des résines (sigle : PCC : Polymer, Cement mortars and Concretes),
 - les produits à base de résines synthétiques (sigle : PC : Polymer mortars and Concretes)
- **produits à base de liants hydrauliques** : mortiers et bétons constitués de liants hydrauliques et de granulats. Éventuellement des adjuvants peuvent être utilisés ;
- **produits à base de liants hydrauliques modifiés par des résines** : mélanges généralement pré-dosés en usine, composés de liants hydrauliques, de granulats, modifiés par des ajouts de résines synthétiques (**polymères**). Des fibres peuvent être incorporées au mélange. La composition de ces mélanges, y compris le dosage en eau, doit être parfaitement définie par le fabricant ;
- **produits à base de résines synthétiques** : mélanges constitués de granulats et d'une résine synthétique constituant le liant et éventuellement d'ajouts et/ou de fibres ;
- **mortier ou béton de réparation industriel prêt à gâcher** : mortier ou béton de réparation dosé et mélangé à sec en usine, ne nécessitant que l'addition d'eau et un malaxage sur le chantier selon les spécifications et dans les conditions indiquées par le fabricant. Ils sont parfois appelés : **mortiers et bétons performantiels** ;
- **mortier ou béton de réparation industriel pré-dosé** : mortier ou béton de réparation dont les composants sont entièrement dosés en usine et livrés sur le chantier où ils sont mélangés et malaxés selon les spécifications et dans les conditions indiquées par le fabricant. L'ensemble des différents composants d'un mortier de réparation industriel pré-dosé est souvent désigné par le terme de « **kit** ». Le plus souvent, il s'agit des produits PC ;
- **mortier ou béton de réparation fabriqué sur chantier ou en centrale** : mortier ou béton de réparation constitué à partir de différents constituants dosés et malaxés sur le chantier ou en centrale selon une composition prédéfinie. Ils sont aussi appelés : **mortiers et bétons de recette**.

- **temps d'utilisation des produits** : durée pendant laquelle le produit est applicable conformément aux prescriptions du fabricant, dans les conditions du chantier.

ATTENTION : Les termes «délai maximal d'utilisation», «durée de vie en pot», «délai d'utilisation», «durée pratique d'utilisation», «temps d'utilisation» et «temps ouvert» sont utilisés dans les normes de la série **NF EN 1504** :

• **NF P18-810 de septembre 1989** : *Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Détermination de la Durée Pratique d'Utilisation (DPU)* ;

• **NF EN 12189 d'août 1999** : *Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination du temps ouvert (produits de collage)*.

Si certains de ces termes correspondent à des divergences de traduction, tous ces termes recouvrent des **mesures effectuées en laboratoire sur des quantités définies de produits mélangés et pour une gamme de température définie**. Les résultats de ces mesures servent essentiellement à identifier un produit mais sont très utiles pour informer l'utilisateur sur la réactivité du produit. Il est effectivement utile de pouvoir disposer d'informations sur la durée de vie en pot du volume du « kit » susceptible d'être utilisé sur le chantier ainsi que pour les conditions de température pouvant être rencontrées pendant les travaux.

Cependant, sur un chantier, les conditions d'application sont variables et différentes de celles du laboratoire : les quantités de produits mélangées, les techniques utilisées, les conditions hygrothermiques ambiantes et du support ne sont pas les mêmes. Elles influencent le «**temps d'utilisation**» réel du produit. Ce temps peut être estimé lors des **épreuves de convenue**. Il doit être réévalué en cas de **changement des conditions hygrothermiques sur le chantier**.

1.2.2

LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HOMOLOGUÉE NF EN 1504-1

Note : la norme NF EN 1504-1 d'octobre 2017 comporte près de trois pages de définitions, seules les principales qui concernent les produits et systèmes, sont reprises ci-après.

- **produits et systèmes de réparation à base de ciment** : mortiers, bétons et coulis hydrauliques ou hydrauliques polymères ;
- **revêtement (C)** : produit et/ou système utilisé pour le traitement du béton, destiné à produire une couche protectrice ;
- **imprégnation hydrophobe (IH)** : produit utilisé pour le traitement du béton, destiné à produire une surface hydrofuge avec peu ou aucune modification de son aspect ;

Note : dans la norme NF EN 1504-2, le sigle des imprégnations hydrophobes est (H) ce qui entraîne une confusion avec le sigle réservé aux liants hydrauliques (H).

- **imprégnation (I)** : produit utilisé pour le traitement du béton, destiné à réduire la porosité de surface et à renforcer la surface ;
- **liant hydrauliques (H)** : matériau inorganique qui réagit à l'eau et qui subit une réaction d'hydratation pour produire un matériau solide ;
- **liant polymère réactif (P)** : liant constitué en général de deux composants, une base en polymère réactif et un durcisseur ou catalyseur qui polymérisent à la température ambiante. Des ajouts peuvent être effectués ;
- **mortier ou béton hydraulique (CC)** : mortiers et bétons à base d'un liant hydraulique mélangé à des granulats calibrés et qui peuvent inclure des adjuvants et des additions qui, lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, font prise par une réaction d'hydratation ;
- **mortier ou béton de ciment hydraulique polymère (PCC)** : mortier ou béton hydraulique modifié par l'ajout de polymères additifs en quantité suffisante pour lui conférer des propriétés spécifiques ;

- **mortier ou béton polymère (PC)** : mélange de liant polymère et de granulats calibrés dont la prise se fait par réaction de polymérisation ;
- **mortier ou béton projeté** : mortier ou béton appliqué sous pression au moyen d'une buse et acheminé par des tuyaux ;
- **support** : surface sur laquelle un matériau de protection ou de réparation doit être appliqué.

> **Les polymères généralement utilisés sont :**

- les acryliques, les méthacrylates ou les résines acryliques modifiées sous forme de poudres redispersables ou de dispersions aqueuses,
- les mono- ou co - ou ter-polymères de vinyle sous forme de poudres redispersables ou de dispersions aqueuses,
- les copolymères styrène-butadiène, généralement sous forme de dispersions aqueuses, les latex de caoutchouc naturel,
- les résines époxydes.

Note : les sigles utilisés dans les textes français des années 90 peuvent différer de ceux qui ont été adoptés dans la norme européenne. Les correspondances entre les sigles, les abréviations et les noms sont données par le tableau ci-après.

Dénominations françaises usuelles	Dénominations européennes	Dénominations anglaises
Mortier et béton hydrauliques	CC : mortier et béton hydrauliques	hydraulic mortars and hydraulic Concretes
Liant hydraulique (LH)	H : liant hydraulique	Hydraulic binders
LHM : liant hydraulique modifié par ajout d'un polymère organique EP-C : système époxy-ciment	PCC : mortier ou béton de ciment hydraulique polymère	Polymer Cement mortars Concrete
Mortiers et bétons organiques (à base de résine)	PC : mortier et béton polymères	polymer mortars and Polymer Concretes
EP : résine époxyde	P : liant polymère réactif	Reactive Polymer

Tableau n° 3 : correspondances entre les dénominations françaises usuelles et européennes.

1.2.3 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HARMONISÉE NF EN 1504-3

- **produit d'accrochage** : constituant d'un système de réparation utilisé pour améliorer l'adhérence d'un mortier ou d'un béton de réparation sur un support en béton de manière à créer une liaison permanente insensible, en service, à l'humidité et aux bases fortes ;
- **temps de raidissement** : temps au-delà duquel l'ouvrabilité d'un béton ou d'un mortier de réparation à base de liants hydrauliques ou à base de liants hydrauliques modifiés à l'aide de polymères est perdue ;

Note : comme indiqué dans l'article 1.2.1 ci-dessus, il existe de nombreuses définitions comme : « délai maximal d'utilisation », la durée de vie en pot... L'extrait ci-après de l'article 6.3.3 de la norme NF P95-101 a le mérite d'être explicite :

« Quel que soit leur mode de conditionnement et de préparation, les produits sont mis en œuvre en respectant le temps d'utilisation du produit validé lors de l'épreuve de convenance. Le temps d'utilisation du produit dépend de la nature du liant, de la température ambiante, de la quantité fabriquée et de l'adjonction éventuelle d'un adjuvant et intègre la durée du transport le cas échéant ».

- **absorption capillaire** : capacité d'un produit ou système de réparation à absorber de l'eau en l'absence de pression hydrostatique ;

Note : la pénétration du liquide n'a lieu que si la structure poreuse est ouverte.

- **compatibilité thermique** : capacité d'un produit ou système de réparation à supporter des cycles thermiques rapides et répétés lorsqu'il a été appliqué sur un support en béton ayant subi une préparation.

Note : le produit ou le système supporte les cycles thermiques sans que son adhérence au support soit affectée.

1.2.4 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HARMONISÉE NF EN 1504-7

- **revêtements actifs** : revêtements contenant des pigments électro-chimiquement actifs, susceptibles d'agir comme inhibiteurs ou pouvant assurer une protection cathodique localisée ;

Note : les revêtements actifs sont obtenus, soit par galvanostégie (procédé de traitement de surface électrochimique visant à recouvrir un objet en métal, d'une couche métallique), soit par application de peintures riches en éléments métalliques. Ils ont pour but la protection contre la corrosion sans effet inhibiteur.

Les revêtements actifs à base de ciment sont des produits ou systèmes de type CC ou PCC, ils peuvent contenir des inhibiteurs de corrosion.

- **revêtements étanches** : revêtements qui isolent l'armature de l'eau interstitielle dans la matrice environnante à base de ciment.

Note : les revêtements étanches sont des produits ou systèmes de type P, qui isolent ainsi l'acier des effets de l'eau qui peut pénétrer dans le béton.

1.2.5 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HARMONISÉE NF EN 1504-8

- **lot** : quantité de matériau fabriquée, soit en une seule opération, soit, dans le cas d'une production en continu, en quantité définie (en tonnes), dont la composition doit être démontrée comme uniforme par le producteur et qui ne doit pas représenter plus d'une journée de production ;

Note : un lot doit être identifié par un code ou un numéro.

- **essai d'identification** : essai visant à vérifier une valeur déclarée concernant la composition ou une propriété du produit ou du système en termes de cohérence de la production ;

Note : cet essai a pour objet de garantir que le produit ou le système soumis à l'essai correspond au produit ou au système qui a été soumis à l'essai initial de type, dans la limite des tolérances admises.

- **essai de performance** : essai visant à vérifier une valeur attribuée à une propriété donnée du produit ou du système concernant ses performances spécifiées pendant l'application et l'utilisation ;

Note : cet essai a pour objet de garantir que le produit ou le système est conforme à ses caractéristiques de performance spécifiées.

- **valeur déclarée** : valeur déclarée et consignée par écrit par le fabricant à des fins d'identification ou d'exigences de performance.

1.2.6**LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME NF EN 1504-9**

- **défaut** : état inacceptable qui peut être intrinsèque ou résulter d'une détérioration ou d'un dommage ;
- **durée de vie théorique** : période de service utile prévue de la structure en béton dans les conditions d'utilisation prévues ;
- **maintenance** : mesures récurrentes ou continues qui permettent d'effectuer des opérations de réparation et/ou de protection ;
- **passivité** : état dans lequel l'acier dans le béton ne se corrode pas spontanément du fait d'une pellicule de protection ;
- **protection** : mesure destinée à empêcher ou à réduire l'apparition de défauts dans la structure ;
- **réparation** : mesure destinées à rectifier les défauts dans la structure ;
- **durée de vie utile** : période pendant laquelle les performances sont atteintes ;
- **substrat** : surface sur laquelle un matériau de protection ou de réparation doit être appliqué.

Note : le terme substrat est principalement utilisé dans le domaine des peintures. Le présent GUIDE emploie aussi le terme support.

Note : tous les termes : durée de vie utile, durée de vie probable, sont à rapprocher de la « durée d'utilisation du projet » au sens de l'Eurocode O.

2

Documents de références

L'évolution continuelle des documents de référence et, en particulier, des normes rend très rapidement caduc tout document imprimé. La liste complète des documents de référence visés dans le **présent GUIDE** a donc été reportée dans l'**annexe n°1 avec les dates de valeur de ces documents**. On notera cependant que les références normatives d'un certain nombre de textes, y compris certaines normes, ne sont pas à jour.

Les mises à jour des documents de référence peuvent être recherchées sur les sites des organismes liés à la réparation dont une liste est annexée au GUIDE 0.

Il est fait référence dans les différents chapitres du **présent GUIDE** à un certain nombre de textes actuellement en vigueur (**normes, normes-DTU et fascicules du CCTG...**). À cause de la parution de nouvelles normes ou de la révision des normes existantes, **certaines de ces textes vont devoir être modifiés ou retirés ces prochaines années**. Le **présent GUIDE** prend cependant en compte, si nécessaire, certaines des modifications ainsi apportées. De plus, dans la mesure du possible, ce guide pointe les textes dont les références normatives ne sont pas à jour.

Rappel important : en général, les normes et les guides ne fixent ni le **rôle de chacun des intervenants**, ni les conditions de choix des produits et de leur **mise en œuvre**, ni la consistance exacte des **épreuves d'étude et de convenance** ou des **contrôles** (par exemple, types et nombre d'essais). Ils ne traitent pas non plus de ce qui relève des **contrôles internes ou externes ou extérieurs** à l'entreprise, etc. **Il appartient donc au marché de fixer les exigences correspondantes.**

Il est rappelé que, dans un **marché**, la contractualisation d'un texte tel qu'un **fascicule du CCTG**, un **DTU (norme-DTU ou NF DTU)**, une **norme, voire une partie d'un guide...** doit le plus souvent être complétée par des **exigences additionnelles** adaptées aux dispositions du texte et aux conditions de réalisation des travaux de réparation, de renforcement et de protection à effectuer. Par exemple :

- dans un **fascicule du CCTG**, les documents à fournir, les travaux à exécuter et les contrôles à effectuer par l'entrepreneur sont fixés **mais pas leur nombre**. Le **marché** adapte et complète, si nécessaire, les stipulations du fascicule ;
- dans un **DTU (norme-DTU ou NF DTU)**, la liste des travaux relatifs au **corps d'état concerné** par celui-ci est fixée. Le **DTU** peut attribuer à **d'autres corps d'état** certains des travaux préparatoires. Enfin, il renvoie **aux documents particuliers du marché (DPM)** pour fixer certains des **travaux du corps d'état** qui n'ont pas été retenus dans la liste susvisée (ce point est explicité dans la remarque ci-après, compte tenu de son incidence sur la rédaction des pièces du **marché**) ;
- dans une **norme, plusieurs niveaux de performances** pouvant être proposés, un choix est à faire ;
- **les conditions climatiques** (température et hygrométrie) retenues dans une **norme** pour les essais des produits peuvent ne pas correspondre à celles du site de l'ouvrage ;
- pour un **produit**, les conditions de réalisation des essais fixées par une norme peuvent ne pas correspondre aux caractéristiques du produit mis en œuvre du fait de la technique de mise en œuvre utilisée (cas du béton projeté) ;
- dans un **guide**, normalement, seules certaines parties peuvent relever de la contractualisation.

EXEMPLE : l'extrait ci-après du tableau n° 3 de la norme **NF EN 1504-3** relative aux produits de réparation du béton montre la nécessité de fixer dans le **marché** si le produit est destiné à une **réparation structurale ou non structurale** ainsi que **les niveaux de performance** attendus. En effet, **deux classes** sont proposées par type de réparation (R 1 et R 2 pour les réparations non structurales et R 3 et R 4 pour les réparations structurales).

Le choix des niveaux de performances lorsqu'il y a plusieurs classes peut figurer dans les normes nationales. **Le marché, dans le cadre d'un projet particulier ou pour des applications spéciales, peut fixer le niveau des performances nécessaires des produits et systèmes.**

Point n°	Caractéristique de performance	Support de performance	Méthode d'essai	Exigence			
				Structurale		Non structurale	
				Classe R 4	Classe R 3	Classe R 2	Classe R 1
1	Résistance en compression	Aucun	NF EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
3	Adhérence	MC(0,40)	NF EN 1542	≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
5	Résistance à la carbonatation	Aucun	NF EN 13295	d _k ≥ béton témoin [MC(0,45)] (*)		Aucune exigence	

Tableau n° 4 : extrait de la norme NF EN 1504-3

Note : (*) le sigle MC(0,45) correspond à l'un des supports en béton de référence de la norme NF EN 1766.

REMARQUE IMPORTANTE :

Un marché de bâtiment est décomposé le plus souvent en **plusieurs marchés** attribués à différents **corps d'état**.

Un marché de génie civil fait appel le plus souvent à une **entreprise générale** ou à un **groupement d'entreprises**.

Les **textes officiels** concernant ces **deux domaines** ont été rédigés en conséquence. **Il faut en tenir compte lors de la rédaction d'un marché de réparation. Dans la mesure du possible, le présent GUIDE attire l'attention sur les particularités des deux domaines.**

> Les deux paragraphes qui suivent illustrent cette remarque :

- dans le domaine du génie civil, le fascicule 65 du CCTG vise essentiellement les **ouvrages neufs** en béton même si, parfois, il traite de la **reprise de défauts d'exécution**. Il est donc nécessaire que les pièces du **marché** soient rédigées en s'appuyant par exemple : sur les normes réparations en vigueur, les guides de l'IFSTTAR (Ex-LCPC) et du CEREMA (Ex-SETRA).

Note : l'IFSTTAR a été fusionné le 1^{er} janvier 2020 avec l'Université Paris-Est-Marne la Vallée pour former l'Université Gustave-Eiffel.

- dans le domaine du bâtiment, différents **DTU (norme-DTU et NF DTU)** sont pour la plupart relatifs à la réalisation de travaux neufs, cependant certains traitent spécifiquement des travaux de réfection.

Note : dans les différents **NF DTU et DTU** la majeure partie des contrôles relève de l'entrepreneur mais ces contrôles ne sont pas détaillés comme c'est le cas dans les fascicules du CCTG.

Il est donc conseillé au rédacteur d'un marché de mise en œuvre d'un produit ou d'un système de réparation, de renforcement ou de protection sur une structure existante, soit de bâtiment, soit de génie civil de se familiariser avec les textes concernant les deux domaines à la fois pour un enrichissement personnel et une meilleure efficacité. La liste des textes figure dans l'annexe I du présent GUIDE relative aux documents de référence.

3

Études préliminaires

- 3.1** Introduction
- 3.2** Généralités
- 3.3** La démarche préalable aux travaux
- 3.4** Principales causes de dégradation des bétons, des armatures, des structures et méthodes d'essais associées
- 3.5** Méthodes de réparation, de renforcement et de protection à mettre en œuvre

La détection systématique de l'apparition de désordres sur un ouvrage ou un parc d'ouvrages et la prise des décisions qui s'imposent ne peuvent être obtenues que si l'ouvrage ou le parc d'ouvrages fait l'objet d'une **gestion rigoureuse**. **La sécurité des usagers, des tiers et des ouvrages est à ce prix.**

L'article 3.3.2.1.1 donne quelques indications sur la méthodologie de gestion des ouvrages et, en particulier, ceux du réseau routier national non concédé.

Comme l'introduction commune à l'ensemble des guides du STRRES le rappelle, l'expérience montre que, dans un certain nombre d'opérations de réparation, lors des travaux, des **dérapages dans les quantités et les coûts se produisent** ou bien, rapidement, voire quelques années après les travaux, de **nouveaux désordres apparaissent à proximité de la réparation ou celle-ci ne tient pas**. Toutes ces déconvenues sont, le plus souvent, **dues à la faiblesse du diagnostic lors des études préliminaires**.

En effet, certaines **maîtrises d'ouvrage** croient qu'il suffit, pour réparer un ouvrage, de traiter **les désordres visibles** (par exemple, les épaufrures, les éclatements, les armatures endommagées...) et, qu'en conséquence, pour eux, **les études préliminaires** portent uniquement sur le **relevé des désordres apparents** et sur le **métré** qui s'y rapporte. Il faut, en fait, procéder à une **évaluation de la structure en béton** en suivant la procédure détaillée ci-après.

ATTENTION, la norme **NF EN 1504-9** impose dans son article A4.3 que **l'évaluation de l'état réel** d'une structure en béton soit effectuée dans sa globalité avant de procéder à une **préconisation** et aux opérations de protection et de réparation. De plus, dans son **annexe A** (informative), elle en donne les lignes directrices.

La nécessité des études et investigations préalables à la consultation des entreprises pour la réalisation des travaux et la **procédure à suivre** est tirée de l'article 4 des normes de la série **NF P95-100** révisées qui font référence à la norme **NF EN 1504-9**. Ces études et investigations sont, normalement, à la charge de la **maîtrise d'ouvrage !**

En cas de contentieux, l'absence ou l'insuffisance des **études préalables** pourraient être prises en compte dans les motifs de la décision d'un tribunal.

La démarche à suivre est quasiment conforme au processus développé dans le **guide technique de 1996** édité par le LCPC et dans le **guide de novembre 2003** édité par l'AFGC. Cette démarche, qui comprend également la phase travaux, est développée ci-après en tenant compte des indications sur la consistance des études préliminaires données par les normes **NF P95-101**, **NF P95-102-1** et **NF EN 1504-9**.

Toute opération de réparation a pour origine la prise en compte d'observations alarmantes sur l'aspect d'une partie de bâtiment ou d'ouvrage. Ces premières observations, après la prise des **premières mesures de sauvegarde** qui s'imposent, demandent évidemment à être approfondies et il faut entrer alors dans un processus en sept étapes, qui comporte en 4^{ème} position une étape⁵, parfois facultative, relative à la **mise en sécurité de l'ouvrage** en attendant les travaux ou pendant ceux-ci :

1. la détection de la dégradation ;
2. l'auscultation – le diagnostic – le pronostic ;
3. l'établissement du projet de réparation ;
4. la mise en sécurité de l'ouvrage ;
5. la mise en œuvre des produits ;
6. les contrôles et vérifications des résultats ;
7. la surveillance.

Il y a lieu de rappeler que la deuxième étape, qui porte sur « l'auscultation – le diagnostic – le pronostic », est **essentielle**. Elle doit permettre d'identifier la pathologie, d'en estimer l'étendue et d'en identifier les causes. **La qualité de ce diagnostic** revêt une grande importance pour le choix de la méthode de réparation, sa réussite ou son échec et, notamment, sa durabilité.

Se rappeler « que toute réparation sans un diagnostic préalable ou issue d'un diagnostic erroné est vouée à l'échec ».

5 Cette quatrième étape sur la mise en sécurité de l'ouvrage, qui est parfois incontournable, n'apparaît pas dans le guide technique de 1996 susvisé.

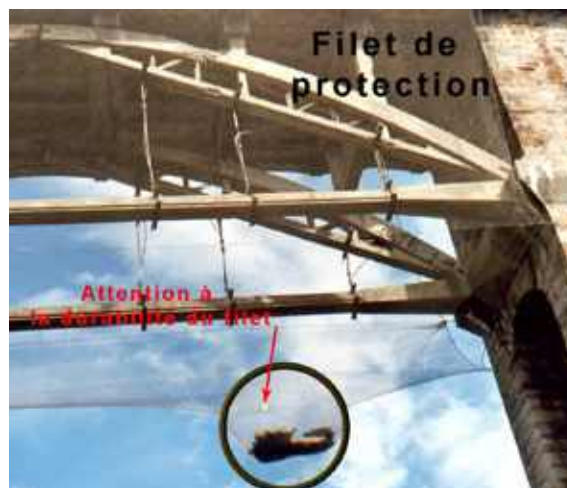


Photo n° 1 : filets de protection sous le pont en béton armé de Carroual à Erquy (Côtes d'Armor) conçu par Harel de la Noë et actuellement désaffecté (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 2 : le guide LCPC-SETRA de 1996 et le guide de l'AFGC de 2003 (crédit photo AFGC, LCPC et SETRA)

L'expérience montre que, malgré les soins apportés à la mise au point d'un **projet de réparation ou de renforcement**, il est parfois nécessaire d'y apporter **certaines modifications lors des travaux** à cause des observations faites pendant ceux-ci (par exemple : l'absence de certaines des armatures, la non-concordance entre la position des armatures sur les plans et dans la structure, la présence de nids de cailloux ou de vides...).

Une **étude primaire de qualité** est un des éléments qui permet ensuite de mettre au point un marché à même de garantir, en évitant certains litiges, les intérêts des **différents intervenants** (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre et entreprise).

Le **présent GUIDE** attire l'attention sur tous les points qui doivent être repris dans un marché mais n'a pas vocation à traiter de la rédaction de celui-ci. Pour ce faire :

- dans le domaine des ouvrages d'art, le **Sétra (CEREMA)** édite des recueils de clauses de marchés de réparation ;
- dans le domaine du bâtiment, il existe divers ouvrages, des guides, voire des didacticiels.

Les cinq articles qui suivent (3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4 et 3.3.5) s'inspirent de l'article 4 des normes de la série **NF P95-100** avec de nombreuses adaptations et compléments, car le présent **GUIDE**, contrairement aux normes de la série, englobe les **réparations structurales et les renforcements**, ce qui impose de développer de **l'évaluation de la capacité portante** des ouvrages. Les articles traitent :

1. des trois étapes de la démarche préalable aux travaux ;
2. du programme des investigations ;
3. du choix de la stratégie et des objectifs de la réparation ou du renforcement ;
4. du projet de réparation.

Si nécessaire, il y a lieu de mettre en œuvre des **mesures de sauvegarde** afin d'assurer la sécurité des usagers, de l'ouvrage et des tiers (par exemple dans le cas d'un risque de rupture fragile). Ces mesures (purges, mise en place de filets, limitation du trafic, mise en œuvre de soutènements provisoires...) sont à prendre dès **l'étape 1** et à adapter au fur et à mesure du déroulement de l'expertise, des études et des investigations.

3.3.1 LES TROIS ÉTAPES DE LA DÉMARCHÉ

L'article 4 de la **norme NF EN 1504-9** fixe la démarche à suivre pour évaluer l'état réel d'une structure en béton préalablement à la réalisation d'une réparation et/ou d'une protection. Cet article s'appuie en outre sur **l'annexe A informative** de la même norme dont il faut retenir les principes.

L'objectif de ces études et investigations préalables, à réaliser **avant passation du marché de travaux**, est d'aboutir à un **projet de réparation**.

Les différentes investigations et études correspondantes relèvent de l'autorité du **maître de l'ouvrage** et de son **maître d'œuvre**.

Il peut être nécessaire de solliciter l'assistance « **un expert⁶** » ayant une expérience professionnelle étendue dans le domaine des structures, dans celui des propriétés physico-chimiques des matériaux, dans celui de l'instrumentation des structures et des techniques d'auscultation ainsi que dans le domaine juridique. Cet expert intervient dans le cadre d'une **Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO)**. Le cadre de sa mission est développé ci-après. Bien entendu, dans les cas très complexes, le recours à des « **spécialistes pointus dans leur domaine** » peut s'avérer indispensable.

La mission de l'expert commence dès la première étape et va au minimum jusqu'à la remise du **rapport de diagnostic à la fin de l'étape 2** bien qu'il soit souhaitable qu'il participe également à la **mise au point du projet de l'étape 3**. Outre son rôle de **conseil du maître de l'ouvrage**, l'expert doit assurer la **coordination** des différents intervenants (bureau d'études, laboratoire...).

Note : en l'absence d'une participation d'un expert, il appartient au maître d'œuvre d'assurer cette mission.

> **Cela passe par une démarche en trois étapes :**

- **Étape 1 : le relevé visuel et la caractérisation des désordres** aboutissant à un **pré-diagnostic** (causes probables et conséquences) ainsi qu'à un **programme d'investigations** si nécessaire. Le relevé porte sur l'état des bétons de la structure ou de certains éléments de celle-ci et notamment sur la présence :
 - d'éclatements de béton,
 - de fissures [actives ou non] de flexion, d'effort tranchant, de diffusion d'efforts concentrés, d'entraînement, de poussée au vide,
 - de symptômes de réactions de gonflement interne ou de gélivité du béton,

⁶ À ne pas confondre avec l'expert désigné par un tribunal, par exemple, dans le cas d'un contentieux.

- de désordres affectant les armatures passives ou actives apparentes (corrosion, ruptures, détensions, etc.),
- l'état des réparations et/ou protections antérieures,
- etc.

Cette étape examine également les **conditions d'accessibilité** aux parties d'ouvrage à ausculter si nécessaire.

- **Étape 2** : étude pour aboutir à un **diagnostic** pouvant s'appuyer sur des **essais, mesures, instrumentations existantes ou nouvelles, et investigations**, ainsi que sur une **évaluation de la capacité portante** de la structure (**recalculs**), destinés à confirmer les causes et l'étendue des désordres, à déterminer leurs conséquences et à établir les préconisations qui s'imposent. Il est indispensable de s'assurer que le **modèle de recalcul** reflète avec le maximum de précision le **fonctionnement réel de la structure**. Dans le cadre des investigations, il est possible de s'appuyer sur les essais cités dans le paragraphe A.9.2 de l'annexe informative A de la norme **NF EN 1504-10** ainsi que sur ceux développés dans différents guides et documents listés dans **L'ANNEXE 1** ci-après (documents de référence).

> **Cette étude doit aussi permettre de s'assurer :**

- de l'absence de désordres existants ou latents liés :
 - aux règles de calcul utilisées à l'époque de la construction (par exemple la prise en compte de coefficients de frottement trop optimistes lors du calcul de la tension d'armatures de précontrainte post-tendues, la non prise en compte des gradients thermiques dans les ouvrages précontraints hyperstatiques...), voire à des erreurs dans les notes de calculs,
 - aux matériaux (par exemple la présence d'un béton gélif ou atteint d'une réaction de gonflement interne, la présence d'armatures corrodées ou d'armatures de précontrainte sensibles à la corrosion fissurante sous tension...),
 - aux dispositions constructives en vigueur lors de la construction (par exemple des faiblesses d'enrobage favorisant la corrosion des armatures, des entassements de conduits de précontrainte responsables de défauts de bétonnage...),
 - aux conditions d'exécution des travaux (par exemple les défauts d'injection des conduits de précontrainte [risques de corrosion], le non-respect des enrobages, une chape d'étanchéité insuffisante...),
 - etc.

***Note :** En l'absence de données fiables dans le dossier de l'ouvrage, des recherches bibliographiques peuvent permettre d'identifier les caractéristiques des armatures de béton armé et de précontrainte à prendre en compte dans les recalculs. Par exemple : les plus anciennes armatures à haute adhérence, dont la limite élastique dépendait du fabricant et du diamètre des barres, nombre de systèmes de précontrainte mis en œuvre dans des ouvrages existants ne sont plus commercialisés...*

- **Au terme de l'étape 2**, il faut aboutir à classer les désordres constatés en deux catégories :
 - les désordres structuraux non liés aux matériaux (insuffisance de résistance de l'ouvrage en flexion, à l'effort tranchant, pathologies affectant les fondations, désordres dus à un choc accidentel, etc.).
 - les désordres à caractère structural ou non constatés ou à venir des matériaux (béton d'enrobage pollué ou carbonaté, corrosion des armatures de béton armé avec ou sans réduction de section, épaufrures, ruptures par corrosion d'armatures de précontrainte, etc.).

***Note :** les désordres des matériaux lorsqu'ils sont étendus ou ceux liés à certains phénomènes (cas des effets des réactions de gonflement interne) doivent être considérés comme des désordres à caractère structural.*

- **Étape 3 : établissement du projet de protection, de réparation ou de renforcement** basé sur les objectifs à atteindre (**programme exigentiel** à établir par le **maître d'ouvrage**) et précisant la façon d'y parvenir (principes et méthodes, dans le cadre des diverses contraintes à prendre à compte : exploitation, délais, intempéries, coûts, accès, etc.).
- **Au terme de l'étape 3**, il faut aboutir à :
 - des prescriptions sur les **méthodes de protection, réparation et/ou renforcement** à utiliser, basées sur les principes identifiés au terme de l'étape 2 et retenus par le **maître de l'ouvrage** dans le cadre de sa **stratégie de gestion**, en tenant compte des conditions de stabilité de l'ouvrage pendant toutes les phases de travaux ;
 - d'éventuelles prescriptions sur les moyens à mettre en œuvre et les contraintes à respecter ;
 - des spécifications sur les performances des produits et systèmes (cf. l'article 4.2 ci-dessous du présent GUIDE) ; et des spécifications relatives aux diverses épreuves (étude, convenance et contrôle).

À chacune de ces **trois étapes**, il est nécessaire de prendre en compte la présence éventuelle de matériaux pouvant présenter un risque pour la **santé des personnes** et pour **l'environnement** dans le cadre des futurs travaux (se reporter au **GUIDE 0** du **STRRES**, aux **normes** de la série **NF P95-100** et au fascicule **65** du **CCTG**).

Le guide de novembre 2003 de l'AFGC : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion donne, dans son annexe A3, des conseils pour passer **commande d'un diagnostic**.

Les **trois étapes de la démarche** sont détaillées dans les articles qui suivent.

Remarque : à titre exceptionnel, dans le cas où certaines de ces **études et investigations** n'ont pu être réalisées avant la passation du contrat des travaux de réparation, il est envisageable de les effectuer au début des travaux. La responsabilité d'une telle décision relève du **maître de l'ouvrage**.

Dans ce cas, il importe que le **marché** prévoit leur exécution pendant la **période de préparation des travaux** (il faut adapter la durée de cette période à l'importance des opérations à effectuer), fixe qui en est chargé, et précise que le projet de réparation et/ou de renforcement doit être adapté et mis à jour en fonction des conclusions des études et investigations.

Dans un tel cas, un **marché à tranches conditionnelles** paraît être la meilleure solution. Cela peut éviter la remise en cause de tout ou partie du projet de réparation et à une réévaluation importante du montant des travaux.

Se reporter à l'article 3.3.4.3 ci-dessous relatif au projet de réparation ou renforcement.

3.3.2 PREMIÈRE ÉTAPE

3.3.2.1 Le relevé et la caractérisation des désordres

Cette première étape s'appuie, le plus souvent, sur les données disponibles issues des résultats des actions de surveillance de l'ouvrage dans le cadre de la gestion du parc des ouvrages.

3.3.2.1.1 Méthodologies de gestion et de surveillance des ouvrages

> **La gestion d'actifs, ici au sens d'ouvrages, relève des principes développés dans les normes NF ISO suivantes :**

- **NF ISO 55000 de juillet 2014** : Gestion d'actifs – Aperçu général, principes et terminologie ;
- **NF ISO 55001 de juillet 2014** : Gestion d'actifs – Systèmes de management – Exigences ;
- **NF ISO 55002 de juillet 2019** : Gestion d'actifs – Lignes directrices pour l'application de l'ISO 55001.

3.3.2.1.2 Méthodologies de gestion et de surveillance des ouvrages – Cas du réseau national

> **Dans le cas du domaine des ouvrages d'art du réseau de l'État non concédé, la gestion des ouvrages s'appuie sur les textes, méthodes et logiciels suivants :**

- **l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA)** annexée à la circulaire du 16 février 2011. Elle remplace l'instruction de 1979 modifiée le 26 décembre 1995 et est constituée :
 - du fascicule 0 : Dispositions générales applicables à tous les ouvrages,
 - du fascicule 1 : Dossier d'ouvrage,
 - du fascicule 2 : Généralités sur la surveillance,
 - du fascicule 3 : Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde ;
- **les autres fascicules** (actuellement au nombre de 22) qui constituaient la seconde partie de l'ITSEOA de 1979 ne font plus partie intégrante de l'instruction et ont désormais le statut de **guides d'application** comme le fascicule n°31 relatif aux ponts en béton non armé et en béton armé, le fascicule n°32 relatif aux ponts en béton précontraint, le fascicule n°12 relatif aux appuis (piles et culées)... ;
- **la méthode IQOA** : Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (ponts et murs de soutènement) qui permet l'évaluation structurelle des ouvrages d'art et de leurs équipements (classes de 1 à 3U) ;
- **le logiciel LAGORA** : Logiciel d'Aide à la Gestion des Ouvrages d'art qui permet de programmer les actions de surveillance et d'entretien et d'en conserver les résultats... ;
- **des méthodes d'analyse des risques** concernant :
 - les buses métalliques,
 - les ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée[®] »,
 - la résistance à l'incendie des ponts routiers...

Note : Consulter la bibliographie en annexe où sont listés de nombreux autres documents didactiques.

3.3.2.2 Opérations à effectuer

> **En fonction de l'importance de l'ouvrage à réparer et des désordres constatés par les actions de surveillance, il convient d'effectuer en les adaptant les opérations listées ci-après :**

- réalisation d'une **visite préliminaire** et de certaines **opérations connexes** comme l'examen du **dossier de l'ouvrage** qui contient tous les résultats des actions de surveillance. Le but de ces actions est d'élaborer un **pré-diagnostic** ;
- proposition de mise en œuvre de **mesures de sauvegarde** immédiates, si nécessaire, en complément des mesures déjà mise en place ;
- proposition de recherche, si nécessaire, des **itinéraires de déviation** et, en cas d'impossibilité, la proposition d'étude d'un **ouvrage provisoire** (pont ou passerelle piétons) ;
- proposition de mise en jeu **des responsabilités et garanties** si cela est nécessaire (cas du contentieux) ;
- évaluation du **coût probable et de la durée des investigations** pour s'assurer que celles-ci sont raisonnables au vu de l'importance de l'ouvrage et de sa **valeur vénale** ;
- mise au point d'un **programme d'investigation** ;
- lancement des opérations liées au diagnostic (Étape 2).

3.3.2.3 Programme des investigations

3.3.2.3.1 Généralités

> **L'objectif du programme des investigations est de confirmer le pré-diagnostic c'est-à-dire de classer et d'identifier, d'une part, les causes des dégradations et, d'autre part, les facteurs d'aggravation à savoir :**

- **1. les causes :**
 - causes physiques ;
 - causes chimiques ou biochimiques ;
 - causes mécaniques.
- **2. les facteurs d'aggravation :**
 - erreurs de conception ;
 - défauts d'exécution ;
 - insuffisances de gestion.

Les principaux désordres des structures en béton et leurs causes et les principales méthodes d'essai associées sont développés dans l'article 3.4. Cet article sert de base à l'ensemble des autres guides de la famille [FABEM].

3.3.2.3.2 Cas des désordres ayant un caractère structural

Si les désordres constatés ont un **caractère structural** (par exemple : fissures importantes et actives, déformations, tassement d'appui, rupture de certains éléments...), l'**objectif du programme des investigations** concerne l'évaluation de la **capacité portante** de l'ouvrage

> **Le programme d'investigations porte sur les points suivants :**

- **les essais et mesures à effectuer qui permettent d'obtenir un modèle de calcul concordant avec le comportement réel de l'ouvrage :**
 - évaluation des charges permanentes (par exemple : masse volumique du béton y compris les armatures, épaisseur de la chaussée et masse volumique des enrobés, métré des réseaux, pesée des réactions d'appui...),

- mesure des déformations sous un chargement calibré progressif,
- réalisation d'un essai de décompression,
- mesure de la tension des armatures de précontrainte par un essai à l'arbalète,
- évaluation de l'importance des tassements d'appui constatés et réalisation des investigations spécifiques destinées à connaître l'état des fondations...

■ **les conditions d'évaluation de la capacité portante de la structure « recalcul » :**

- choix de la méthode de calcul (méthodes courantes de niveau 1 (1^{er} ordre) ou 2 (2^{ème} ordre), voire méthodes avancées),
- recalcul basé sur les mêmes hypothèses et modélisation identique que dans la note de calculs d'origine afin de rechercher des erreurs éventuelles,
- recalcul en tenant compte des résultats de certaines investigations (par exemple : poids des équipements et superstructures, valeurs des réactions d'appui...),
- recalcul basé sur de nouvelles hypothèses et une modélisation plus réaliste en tenant compte de l'évolution des règles de charges et de calcul...

Note : l'article 3.3.3.2 ci-dessous et l'annexe 1 listent les principaux textes existants portant sur l'évaluation de la capacité portante des structures.

3.3.2.3.3 Cas des désordres avec ou sans caractère structural affectant les matériaux

Dans le cas de tels désordres, l'objectif du programme d'investigations est :

> **de confirmer si les désordres concernent :**

- le béton seul,
- les armatures passives ou actives seules,
- le béton et les armatures passives ou actives,
- de circonscrire l'étendue des désordres et de préciser leurs importances, en évaluant :
 - les enrobages des armatures de béton armé, voire de précontrainte,
 - les surfaces et profondeurs de béton dégradé,
 - les profondeurs de béton pollué ou carbonaté,
 - les pertes de section des armatures, voire l'existence de ruptures...

> **de prédire leurs évolutions probables et leurs conséquences sur l'ouvrage à partir de :**

- profils de teneurs en chlorures (libres et totaux) et de fronts de carbonatation,
- mesures électrochimiques dans le cas de la corrosion des armatures passives et actives de pré-tension...
- mesures spécifiques dans le cas de corrosion des armatures actives de post-tension internes ou extérieures au béton (radiographie ou gammagraphie, radar, détection de l'humidité dans les conduits extérieurs, l'ouverture de fenêtres dans le béton,
- évaluation de l'évolution des déformations dans le cas de RGI...

> **et de déterminer certaines caractéristiques des matériaux en place, d'apparence saine ou dégradée :**

- résistance mécanique, masse volumique, cohésion superficielle,
- perméabilité de surface, porosité accessible à l'eau,
- analyse minéralogique et chimique du béton : notamment pour déterminer la nature et la teneur en ciment, la nature des granulats, l'existence de RGI...

Ces caractéristiques sont indispensables en cas de recalculs et dans tous les cas pour le choix de produits de réparation compatibles.

> **La réalisation des investigations in situ nécessite de choisir des zones de mesures « représentatives » en tenant compte :**

- de l'âge de l'ouvrage et de sa durée d'utilisation résiduelle,
- des difficultés d'accès (personnel et matériels),
- des contraintes d'exploitation et des contraintes diverses imposées par le **maître de l'ouvrage**,
- de l'environnement général de l'ouvrage (climat, ambiance maritime, zone industrielle, gel, salages, etc.),
- des différentes parties de l'ouvrage et de leurs expositions,
- de la manifestation visible ou non des désordres, etc.

Pour être **statistiquement interprétable et permettre le diagnostic**, un nombre de zones et d'essais minimum est indispensable.

Si, le comportement de l'ouvrage montre que les désordres des matériaux présentent un caractère structural, le programme des investigations doit être complété en s'inspirant des développements de l'article ci-devant.

3.3.3 SECONDE ÉTAPE

3.3.3.1 Synthèse – Diagnostic - Pronostic

Au terme de l'étape 2, après une analyse des résultats des diverses investigations effectuées, il faut aboutir :

> **En premier à un diagnostic portant sur :**

- les désordres structuraux non dus à des pathologies affectant les matériaux (chocs, tassements d'appui, erreurs de conception, de réalisation...) et, par voie de conséquence :
 - l'origine et le classement de ces autres désordres à caractère structural ;
 - la capacité portante de l'ouvrage si cela est nécessaire.

Note : à partir du moment où le diagnostic a permis d'identifier les causes des désordres et leur importance, il est possible de cerner la ou les méthodes de réparation et/ou de renforcement à mettre en œuvre.

- l'origine et le classement des désordres constatés sur les matériaux :
 - **les désordres constatés sur les matériaux** (béton d'enrobage pollué ou carbonaté, corrosion des armatures, épaufrures, etc.) peuvent ou non avoir une **incidence structurale**. Ils doivent faire l'objet d'une réparation pouvant relever :
 - des techniques de la norme NF P95-101 liées aux réparations de surface des bétons,
 - des techniques de la norme NF P95-101 associées à d'autres techniques à caractère structural (ajout d'armatures passives internes ou externes, précontrainte additionnelle, etc.) ;
 - **les autres désordres ou défauts, notamment « latents »** (par exemple béton carbonaté sans corrosion constatée, etc.) qui relèvent d'autres techniques comme celles visées par les **normes NF P95-103** (traitement des fissures et protection du béton), **NF EN 1504-9**, voire de la **protection cathodique**, la **déchloruration** et la **réalcalinisation**.

> **En second à un pronostic portant sur :**

- les risques présentés par l'ouvrage,
- l'évolution prévisible des désordres et, lorsque cela est possible, sur une estimation de la durée de vie résiduelle.

> **En troisième, si cela s'avère nécessaire, des enseignements portants sur :**

- la surveillance à exercer sur des ouvrages de la même catégorie et qui pourraient présenter les mêmes désordres,
- les règles de calcul à appliquer et les dispositions sur la conception à respecter sur les ouvrages à construire.

> **En quatrième, le devenir de l'ouvrage, basé sur les solutions envisageables en fonction des exigences du maître d'ouvrage liées à sa stratégie de gestion de l'ouvrage à savoir, du maintien en l'état et sous surveillance à la démolition-reconstruction. Ces solutions sont explicitées à l'article 3.3.4.1 ci-dessous.**

3.3.3.2 Opérations à effectuer

3.3.3.2.1 Par les laboratoires associés (pour mémoire)

Les laboratoires sont chargés d'effectuer les diverses investigations prévues dans le **programme des investigations**. Les procédures d'essai et les emplacements des mesures doivent être soumis à l'acceptation du **maître d'œuvre**. De plus, les résultats des essais et mesures effectués ne doivent jamais être livrés sans une **interprétation validée**.

3.3.3.2.2 Par le bureau d'étude

En s'aidant du **dossier de l'ouvrage** et des autres documents disponibles (photos de chantier, livres techniques, guides du réseau technique, articles dans les revues techniques, recherches sur internet, presse nationale ou locale...) s'ils existent, il faut :

- analyser toutes les pièces du **dossier de l'ouvrage** et, en particulier, tous les documents d'exécution (comptes rendus des réunions, résultats des mesures et contrôles effectués sur le chantier, incidents d'exécution [fiches de non-conformité], traitements des non-conformités, documents ayant trait à la gestion de l'ouvrage [PV des visites et inspections détaillées, opérations d'entretien et réparations effectuées])... Par exemple, de cette analyse il est possible de tirer :
 - la liste de toutes les pièces du dossier et aussi les pièces manquantes,
 - la date de réception et les dates des fins de responsabilités et garanties,
 - les hypothèses de calcul et les règles de calcul utilisées (coefficients de pondération des actions, coefficient de minoration des résistances des matériaux, coefficients de frottement...),
 - le calendrier d'exécution prévu et celui réalisé,
 - l'ordre des opérations prévu et celui réalisé,
 - les caractéristiques des matériaux mis en œuvre (résistance, modules...),
 - les efforts mis en œuvre (par exemple, les tensions initiale et finale des armatures de précontrainte, les valeurs des réactions d'appui...),
 - les incidents ou accidents d'exécution et, en particulier, les anomalies climatiques,
 - l'état de l'ouvrage lors de sa réception (défauts et désordres existants),
 - les caractéristiques des chargements effectués lors des épreuves de l'ouvrage,
 - les caractéristiques des convois exceptionnels les plus lourds ayant emprunté l'ouvrage,
 - la date d'apparition des désordres,
 - les réparations effectuées...

- **analyser les résultats des inspections détaillées**, les photos et relevés effectués pour en tirer les causes probables des désordres (insuffisance de résistance en flexion ou au cisaillement, pathologies des matériaux...);
- **analyser les plans, les hypothèses de calcul et les notes de calculs** afin d'y détecter des imprécisions, des approximations, des erreurs...;
- **interpréter les résultats des mesures** effectuées sur les matériaux in situ et en laboratoire;
- **interpréter les résultats des mesures** effectuées sur le fonctionnement de la structure lors des investigations in situ (déformations sous chargement calibré, pesée des réactions d'appui, tension des armatures de précontrainte...);
- fixer les **hypothèses du recalcul, la modélisation de la structure**, les programmes à utiliser.

RAPPEL IMPORTANT : indépendamment des erreurs de conception, d'exécution..., les **désordres structurels** non liés aux matériaux apparaissent sous les **actions et charges qu'a réellement subies la structure** et non sous les combinaisons des charges nominales ou caractéristiques des règles de calcul !

- **recalculer l'ouvrage** et s'assurer que les **résultats obtenus expliquent les désordres et sont en accord avec le fonctionnement réel de la structure** (par exemple, sous les charges d'épreuves, existence de tractions dans le béton au droit des zones fissurées, réactions d'appui calculées très proches des réactions mesurées...);
- en déduire la **force portante de l'ouvrage**, les insuffisances structurales actuelles, voire les insuffisances à venir (cas de désordres potentiels à venir)...

ATTENTION, il n'existe pas de **règles nationales françaises pour l'évaluation des ouvrages existants** et les règles de calcul du BA et du BP actuelles (Eurocodes) ou précédentes (BAEL et BPEL...) ne sont pas directement applicables au recalcul d'une structure ancienne sans adaptations.

Le **présent GUIDE** ayant essentiellement pour objet de présenter les **méthodes de reprise des dégradations du béton**, il n'a pas à traiter des **méthodes d'évaluation des structures existantes**. Ce domaine est précisé dans certains des documents de référence figurant dans l'annexe 1 (par exemple, les documents **[6], [14], [15]**), ou listés ci-après :

- **CWA 16633** : Ageing behavior of Structural Components with regard to Integrated Lifetime Assessment and subsequent Asset Management of Constructed Facilities (may 2013);
- **ISO 13822 : d'août 2010** : Bases du calcul des constructions – Évaluation des constructions existantes;
- **BRIME** : Gestion des Ponts en Europe - Projet Européen BRIME, Collection Études et Recherches des LPC - série Ouvrages d'art - n° 49, IFSTTAR, France (2010);

Le document issu du **projet BRIME** décrit, en particulier, les **différents niveaux d'évaluation** d'un ouvrage existant comme le montre le tableau ci-après allant de l'absence de recalcul aux complexes analyses probabilistes en fonction de la **stratégie de gestion de la structure du maître de l'ouvrage** (stratégie développée dans l'article 5 de la **norme NF EN 1504-9**).

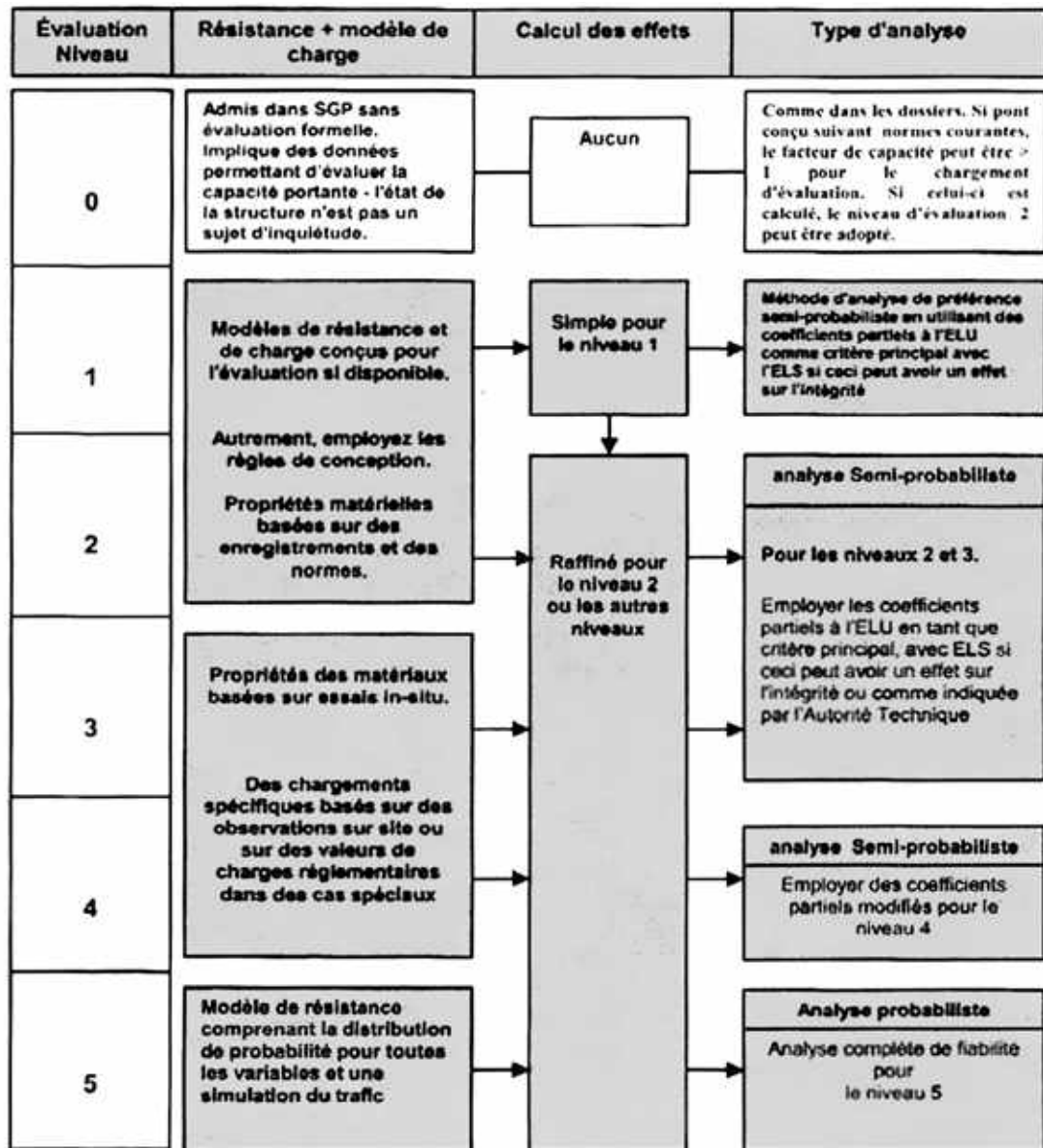


Tableau n° 5 : tableau issu du projet BRIME

Le document français le plus récent sur l'évaluation des ouvrages d'art est le **guide du CEREMA** : « Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art » de février 2016.

Ce guide s'adresse à des **ingénieurs très expérimentés**. En effet, un ouvrage existant a été conçu, calculé et construit en se basant sur les règles, normes, produits et matériaux, dispositions constructives... en vigueur à l'époque de la réalisation. Même après renforcement, il ne pourra pas satisfaire à toutes les exigences des règles et normes actuelles. **Des adaptations sont donc nécessaires** :

- le plus souvent au niveau des **états limites** de service (par exemple un assouplissement des exigences sur la fissuration) à la condition que la **sécurité de la structure** vis-à-vis des **états limites ultimes** soit assurée tout en maîtrisant le coût des travaux ;
- **les adaptations** peuvent aussi concerner les charges routières avec la prise en compte :
 - soit des charges de l'**Eurocode 1 partie 2** pour les ponts soumis à un trafic important ;
 - soit les charges du **titre II du fascicule 61 du CPC de 1971** réédité en 1980 pour des ponts moins circulés ;
 - voire les charges qui circulent réellement sur l'ouvrage après une analyse exhaustive du trafic.

3.3.3.2.3 Rapport de diagnostic

Il présente l'ensemble des résultats et leur interprétation. Il doit être rédigé dans le souci d'être compréhensible pour un **maître de l'ouvrage** le plus souvent non-initié.

> Il comprend :

- l'identification de l'ouvrage, le nom du demandeur ;
- l'identification du laboratoire et/ou du bureau d'études ainsi que les identités des personnes chargées des essais et des études ;
- une brève description de l'ouvrage ;
- le rappel des objectifs de l'étude ;
- la liste des documents consultés ;
- une synthèse du dossier de l'ouvrage et des opérations de surveillance ;
- les résultats de l'inspection détaillée et des essais in situ et de laboratoire prévus par le programme des investigations ;
- un développement sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable et leur incidence sur la sécurité ;
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude, des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage (maintien ou renforcement des limitations, construction d'un ouvrage provisoire...) ;
- des conclusions claires sur les éventuels recours en responsabilités et garanties ;
- une liste des réparations, renforcements et travaux à effectuer avec un ordre de priorité ;
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation qui paraissent les mieux adaptées ;
- tous les documents fournis par le laboratoire et/ou le bureau d'études en annexe au rapport ;
- etc.

RAPPEL : "La responsabilité décennale joue lorsque les désordres rendent l'ouvrage impropre à sa destination. Il s'agit de désordres qui compromettent la solidité de l'ouvrage, l'affectent dans un de ses éléments constitutifs ou dans un de ses éléments d'équipement (élément dont la dépose ou la repose ne peut s'effectuer sans détériorer l'ouvrage)".

Figure n° 4 : extrait de l'arrêt Trannoy du Conseil d'État du 2 février 1973

3.3.4 TROISIÈME ÉTAPE – LE PROJET DE RÉPARATION OU DE RENFORCEMENT

3.3.4.1 Choix de la stratégie et des objectifs de la réparation ou du renforcement

Le choix de la stratégie et des objectifs de la réparation ou du renforcement pour la structure doit être basé sur une analyse et une validation des exigences du **maître de l'ouvrage**.

Note : les résultats des investigations au cours de l'étape 2 et les études de l'étape 3 peuvent parfois conduire à remettre en cause les exigences du maître de l'ouvrage.

La norme NF EN 1504-9 définit **six options de gestion** qui vont de la simple surveillance jusqu'à la démolition de tout ou partie de la structure.

L'article 5 de cette norme identifie les **options et facteurs** à prendre en compte dans le choix d'une **stratégie de gestion d'un ouvrage** comme développé ci-après.

> **Le choix de la stratégie se base, d'une part, sur les 6 options suivantes :**

- aucune action pendant un certain temps, à l'exception de la surveillance ;
- nouvelle analyse de la capacité structurale susceptible de conduire à l'altération du fonctionnement ;
- prévention ou réduction de la détérioration ;
- renforcement ou réparation et protection de tout ou partie de la structure en béton ;
- reconstruction ou remplacement de tout ou partie de la structure en béton ;
- démolition de tout ou partie de la structure en béton.

Note : la norme européenne reste floue sur les actions à mener pour certaines des six options.

Et, d'autre part, sur différents **facteurs** classés dans les **4 catégories** suivantes :

> **1.Facteurs de base :**

- l'utilisation future prévue et la durée de vie restante de la structure ;
- les performances requises de la structure (y compris la résistance au feu et l'étanchéité à l'eau) ;
- la durée de vie utile probable des travaux de protection ou de réparation ;
- la disponibilité requise de la structure, l'interruption admise de son utilisation et les opportunités relatives aux travaux de protection, de réparation et de surveillance supplémentaires ;
- le nombre et le coût des cycles de réparation acceptables pendant la durée de vie théorique de la structure en béton ;
- le coût des stratégies de gestion alternatives par comparaison au coût global du cycle de vie y compris toutes inspections et maintenance ultérieures ou autres cycles de réparation ;
- les propriétés et méthodes de préparation possibles du substrat existant ;
- l'aspect de la structure protégée et réparée.

> **2.Facteurs structuraux :**

- les actions pendant et après la mise en œuvre de la stratégie ;
- les actions et la manière dont elles seront contrariées.

> 3. Facteurs relatifs à la santé et sécurité :

- les conséquences de la défaillance de la structure ;
- les exigences relatives à la santé et à la sécurité (en particulier la présence de produits nocifs dans des éléments de l'ouvrage existant : amiante, plomb...) ;
- l'effet sur les occupants ou les utilisateurs de la structure et sur les tiers parties.

> 4. Facteurs relatifs à l'environnement :

- l'environnement et l'exposition de la structure et la question de savoir si elle peut être modifiée localement (à vérifier avec la **norme NF EN 206/CN** de décembre 2014 : Béton — Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la **norme NF EN 206** et le **fascicule 65 du CCTG**) ;
- la nécessité ou l'opportunité de protéger tout ou partie de la structure en béton contre les effets des intempéries, de la pollution, du brouillard salin, etc., y compris la protection du substrat pendant les travaux de réparation.

Les travaux de réparation ou de renforcement visés dans le **présent GUIDE** relèvent normalement de l'**option d)** « **renforcement ou réparation et protection de tout ou partie de la structure en béton** » au sens de l'article 5.2 de la **norme NF EN 1504-9**, avec la prise en compte des **exigences de sécurité vis-à-vis des usagers et des tiers**.

Le **programme du maître de l'ouvrage** peut s'inspirer de la **norme NF EN 1504-9** et de la **recommandation T1-94** aux maîtres d'ouvrage publics pour l'établissement de **programmes exigeants** dans le domaine du Génie Civil élaboré par le Groupe Permanent d'étude des Marchés de Travaux (**GPEMT**) à adapter aux ouvrages à réparer.

Pour la commande des études de réparation ou renforcement et leur pilotage, il est possible de s'inspirer du guide du SETRA de novembre 1997 : Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art.

Avec les éléments dont il dispose, dont le rapport de diagnostic issu de la deuxième étape susvisée, le **maître de l'ouvrage** peut prendre une **première décision** : accepter tout ou partie des différentes solutions proposées dans le cadre de sa **stratégie de gestion** puis faire **lancer les études des solutions retenues** qui s'inscrivent dans les **six options susvisées** retranscrites ici dans un souci de clarté :

1. le maintien en l'état avec surveillance ;
2. le lancement d'études complémentaires ;
3. maintien en état avec des actions de prévention ou de réduction de la détérioration (par exemple : des limitations d'utilisation...) ;
4. la réparation ou le renforcement et la protection de tout ou partie de la structure (souvent plusieurs solutions sont envisageables) ;
5. la démolition-reconstruction partielle ou totale ;
6. la fermeture et la démolition partielle ou totale de la structure...

Le **présent GUIDE** étant consacré aux réparations, renforcements et protection des ouvrages en béton, la suite du guide ne traite que les options 4 et 5.

3.3.4.2 Objectifs à atteindre si l'option réparation ou renforcement est retenue

> **Au terme de l'étape 3, il faut aboutir à :**

- des plans détaillés et les notes de calculs justificatives lorsqu'il s'agit de réparations ou renforcements à caractère structural ;
- des plans des zones devant faire l'objet de réparations à caractère non-structural ;
- des prescriptions sur **les méthodes de réparation ou renforcement** à utiliser, basées sur les **principes** identifiés au terme de l'étape 2 et retenus par le **maître de l'ouvrage** dans le cadre de sa **stratégie de gestion** détaillée ci-devant ;
- des prescriptions sur les moyens à mettre en œuvre et les contraintes à respecter ;
- des spécifications sur les performances des produits et systèmes à mettre en œuvre ;
- des spécifications relatives aux diverses épreuves à effectuer en cours de travaux (études, convenances et contrôles) ;
- montrer qu'à toutes les étapes de la réparation, en particulier lorsqu'il est envisagé de purger le béton endommagé, pollué ou carbonaté au voisinage des armatures, la **stabilité de la structure reste assurée** ;
- définir les conditions spécifiques de surveillance et de maintenance de l'ouvrage après travaux ;
- etc.

3.3.4.3 Projet de réparation ou de renforcement

3.3.4.3.1 Les différentes phases d'un projet de réparation ou renforcement

Un projet de réparation ou de renforcement se déroule en trois phases :

- Phase 1 : l'étude préliminaire ;
- Phase 2 : l'avant-projet de réparation ou renforcement ;
- Phase 3 : le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

3.3.4.3.2 L'étude préliminaire



Photo n° 3 : désordres d'un réservoir d'eau potable (crédit photo D. Poineau)

> **Cette étude doit intégrer à la fois :**

- le coût purement financier de l'opération ;
- les contraintes environnementales et sociétales qui ont aussi leur coût ;
- les contraintes techniques d'exécution (moyens d'accès à l'ouvrage pour effectuer les travaux, matériels utilisables [fonction de la géométrie de la structure et des possibilités d'accès], techniques d'exécution à privilégier pour éviter les traumatismes aux matériaux, étaielements provisoires et/ou renforcements provisoires indispensables...).

L'intervention du **maître de l'ouvrage** et de son **maître d'œuvre** lors des **revues de projet** est indispensable pour éviter les **dérives** (par exemple, non-respect du **programme du maître de l'ouvrage**, réparation inadaptée par son importance et son coût aux désordres constatés...).

ATTENTION, un projet de réparation ou de renforcement diffère sur bien des points d'un projet d'ouvrage neuf. En effet :

- la réparation (ou le renforcement) peut imposer à la structure des efforts locaux ou généraux pour lesquels elle n'a pas été conçue, ce qui peut imposer des renforcements supplémentaires ;
- de plus, la géométrie de la structure est fixée ainsi que le ferrailage et le câblage ;
- les dimensions et la position des armatures peuvent ne pas être conformes aux plans d'exécution. Il est en effet exceptionnel de disposer des plans de recollement ;
- les matériaux existants ont des performances différentes des matériaux actuels ;
- les ouvrages anciens ont des dispositions constructives parfois inhabituelles ;
- etc.

Il faut donc adapter le projet de réparation et les procédures d'exécution à la structure existante et non l'inverse !

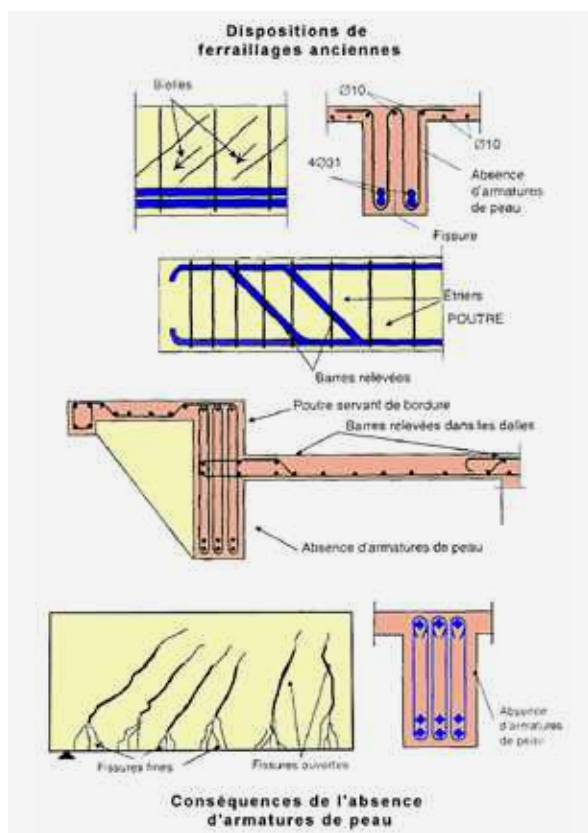


Figure n° 5 : dispositions des armatures dans des ouvrages anciens

Il faut, en outre, s'assurer que le **matériel nécessaire pour exécuter les travaux** pourra être **mis en œuvre sans difficulté** (par exemple : vérifier que les vérins de mise en tension de la précontrainte additionnelle peuvent passer par les trous d'homme existants au droit des entretoises d'une poutre-caisson, concevoir des dispositions pour pouvoir vériner un tablier dont la conception d'origine n'avait pas prévu cette opération...).



Photo n° 4 : adaptation du matériel de vérinage aux emplacements disponibles et renforcements pour équilibrer les efforts concentrés (crédit photo VSL - M. Loubeyre)

> **En final l'étude doit expliciter dans les différentes pièces de l'étude :**

- la signalisation du chantier ;
- les moyens d'accès nécessaires ;
- les moyens et matériels à mettre en œuvre ;
- l'ordre d'exécution des travaux ;
- les risques encourus ;
- les contrôles à effectuer ;
- la durée d'exécution des travaux, y compris la période la plus favorable d'exécution ;
- le coût de l'ensemble de l'opération (travaux annexes, ouvrages provisoires, études, travaux et contrôles) ;
- les **variantes de conception** et d'exécution envisageables.

3.3.4.3.3 L'avant-projet de réparation ou de renforcement

Le **maître de l'ouvrage**, aidé par son **maître d'œuvre**, voire en complément, par l'**expert** (son conseiller technique d'**AMO**), fixe la ou les solutions qui doivent faire l'objet d'un **avant-projet de réparation (APR)** puis d'un **dossier de consultation des entreprises (DCE)**.

L'**APR** est élaboré suivant la même démarche que l'**étude préliminaire**, sachant qu'il a pour but de mettre au net et dans les détails la ou les solutions retenues (plans détaillés, notes de calculs, avant-métré, estimation et mémoire).

3.3.4.3.4 Le dossier de consultation des entreprises

> **Le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) est constitué par l'APR auquel s'ajoutent les pièces écrites dont les principales sont rappelées ci-après :**

- le Règlement de la Consultation (RC) ;
- l'Acte d'Engagement (AE) ;
- le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP) ;
- le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) ;
- les pièces mentionnées comme contractuelles (par exemple : plans, dossier géotechnique...) ;
- l'état de prix forfaitaires et le bordereau des prix unitaires ;
- le détail estimatif ;
- etc.

Dans le cas où le projet se réfère aux **Eurocodes** et, en particulier, à l'**Eurocode 2**, le projet intègre obligatoirement la **norme NF EN 13670/CN**, voire la **norme NF P18-451** auxquelles le marché ajoute la **norme NF DTU 21** (domaine du bâtiment) ou le **fascicule 65 du CCTG** (domaine du génie civil). Le marché doit alors préciser :

- l'**utilisation prévue** (50 ans, 100 ans...) ;
- la **durée de vie utile restante** de la structure c'est-à-dire la durée d'utilisation du projet ;
- la **classe d'exécution** ;
- la **catégorie d'inspection** (de contrôle) : certaines méthodes d'exécution l'imposent, c'est le cas pour le béton mis en place par projection) ;
- la **classe retenue** pour les tolérances géométriques.

CONSEILS :

- **Classe d'exécution :**
 - **classe 3** pour des travaux importants et à caractère structural avec autocontrôle, contrôle interne et contrôle extérieur,
 - **classe 2** dans les autres cas avec autocontrôle et contrôle interne sauf si un contrôle extérieur est demandé par le maître d'ouvrage ;
- **Catégorie d'inspection :**
 - Seules les **catégories 2 et 3** imposent un plan qualité ;
- **Classe des tolérances géométriques :**
 - normalement la **classe 1** correspond à un marché conforme à l'EC 2 sans coefficient partiels réduits. La **classe 2** impose la fixation de tolérances d'exécution réduites et d'en contrôler la réalité lors de l'exécution (se reporter aux annexes de la **norme NF EN 1990** de mars 2003 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des constructions ou Eurocode 0).

Note : voir également les normes **NF EN 1990/A1** de juillet 2006, **NF EN 1990/NA** de décembre 2011 et **NF EN 1990/A1/NA** de décembre 2007.

Lors de la rédaction du **DCE** et de ses **pièces écrites**, il est important de traiter en détail les **six points suivants** que l'**entrepreneur** devra prendre en compte lors de la réalisation des travaux (se reporter aux **recommandations de 1993** pour la rédaction de **marchés de réparation d'ouvrages d'art**, document édité par le **Sétra**) :

1. les **sujétions d'exécution à prendre en compte** (se reporter aux deux articles précédents) ;
2. les **investigations et les études déjà effectuées et celles à effectuer par l'entrepreneur** (voir ci-après) ;

3. **les travaux à réaliser** : consistance détaillée des travaux de réparation ou de renforcement et protection (se reporter aux deux articles précédents) ;
4. **l'assurance de la qualité** (une bonne partie des documents [procédures et documents de suivi] sont spécifiques) ;
5. **les responsabilités et garanties** (voir ci-après) ;
6. **les variantes et propositions techniques** (voir ci-après).

Le point n°2 a pour but de fixer ce qui est **de la responsabilité de l'entrepreneur, de celle du maître de l'ouvrage et du maître d'œuvre** en particulier sur « l'état de l'ouvrage ». Trois solutions sont possibles :

- l'état de l'ouvrage est fixé par le marché (par exemple, si la qualité de l'expertise ne laisse planer aucun doute sur l'état et la capacité portante de la structure...) ;
- la détermination de l'état de l'ouvrage est mise à la charge de l'entrepreneur (il est nécessaire de fixer un cadre, par exemple, les hypothèses à prendre en compte, les investigations et les calculs à effectuer) ;
- l'état de l'ouvrage est donné à titre indicatif par le marché (il est cependant nécessaire de fixer les objectifs à atteindre, voire les investigations minimales à effectuer).

Si les investigations mises à la charge de l'**entrepreneur**, normalement pendant la **période de préparation des travaux**, sont importantes et susceptibles de modifier le projet de réparation ou de renforcement, il est vivement conseillé de prévoir un **marché à tranches conditionnelles** par exemple comme suit :

1. **la première tranche** porte sur les investigations et l'analyse des résultats ;
2. **la seconde tranche** porte sur la modification du projet et la réévaluation des quantités et des coûts ;
3. **la troisième** porte sur les travaux de réparation ou de renforcement après accord du **MOA** sur les modifications apportées au projet de base techniques et financières (dans le cas contraire le **MOA** peut envisager un nouvel appel d'offres après avoir réglé les indemnités compensatoires à prévoir au marché...).

Le point n°5 rappelle qu'une opération de réparation ou de renforcement mal étudiée ou mal conduite peut entraîner des désordres dans la structure existante, voire son effondrement et provoquer également des dommages à des tiers ou à des usagers. Il est donc indispensable que l'**entrepreneur** soit correctement assuré vis-à-vis de ces risques. Le **Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP)** doit fixer les règles du jeu indispensables.

Le point n°6 précise que le **Règlement de la Consultation (RC)** doit indiquer si les **variantes** sont autorisées (il faut fixer le type et nombre des variantes). Il doit également définir les **propositions techniques** auxquelles l'**entrepreneur** doit répondre.

Rappel : une variante peut être de conception ou d'exécution, elle a toujours une incidence sur les quantités et les prix.

> Il est possible de distinguer (se reporter à la directive « DJ 75 » sur le jugement des offres éditée par le Sétra) :

- les variantes larges (en réparation, elles jouent en cas de conception-réalisation, ce qui ne doit pas supprimer l'expertise et les études préalables, bien au contraire) ;
- les variantes limitées majeures (jouent sur la conception et la réalisation) ;
- les variantes limitées mineures (jouent sur la conception ou la réalisation) ;

Exemples de variantes limitées :

- variante limitée majeure : dans le cas d'une précontrainte additionnelle, le remplacement d'un câblage croisé par un câblage rectiligne (modifications importantes des notes de calculs et des plans) ;
- variante limitée mineure : dans le cas d'une précontrainte additionnelle, le remplacement de massifs d'ancrage armés par des armatures de BA par des massifs en BFUP.

Rappel : une proposition technique ne doit pas avoir d'incidence sur les quantités et les prix.

Par exemple :

- le remplacement d'un procédé de précontrainte par un autre, sous réserve que la puissance des câbles reste quasiment la même, est à considérer comme une proposition technique.
- au contraire, le remplacement de torons clairs par des torons gainés-protégés est une variante de conception limitée mineure, car les coefficients de frottement étant fort différents entre les deux types de câbles, les quantités de précontrainte à mettre en œuvre ne sont pas les mêmes.

Rappel : L'expérience montre que, malgré les soins apportés à la mise au point d'un projet de réparation ou de renforcement et protection, il est parfois nécessaire d'y apporter certaines **modifications lors des travaux** à cause des observations faites pendant ceux-ci (par exemple : armatures absentes ou déplacées, nids de cailloux ou vides cachés...).

Le marché doit préciser que, si un **problème apparaît lors de la réalisation des travaux**, l'**entrepreneur** a l'obligation de prendre toutes les dispositions permettant d'assurer la **sécurité de la structure** (par exemple : la mise en place d'étaisements) et faire des **propositions**, dans un délai raisonnable, pour remédier au **problème rencontré**. Dans un tel cas, un **avenant au marché** peut s'avérer nécessaire.

Note : prévoir les mêmes précautions dans le marché de maîtrise d'œuvre.



Photo n° 5 : différents désordres de structures en béton armé et précontraint (photomontage)

3.4.1 GÉNÉRALITÉS

> **Les principaux désordres rencontrés sur les ouvrages de génie civil et dans les bâtiments en béton peuvent être attribués :**

- au « vieillissement » de la structure en question mais, en réalité ce mot peut cacher, pudiquement, un sérieux manque d'entretien c'est-à-dire un **défaut de gestion** ;
- à des causes accidentelles : chocs, incendies, surcharges, ... ;
- à des erreurs de conception, de calcul, d'exécution aussi bien pour des ouvrages neufs que lors de réparations...

Cette classification est importante pour instruire le dossier mais, pour traiter les désordres, **il est préférable de classer les causes d'abord selon les mécanismes mis en jeu**, c'est-à-dire selon qu'ils sont la conséquence :

- d'altérations d'origine physique ;
- d'altérations d'origine chimique ;
- d'altérations d'origine électrochimiques (corrosion) ;
- de sollicitations mécaniques excessives.

> **Il faut préciser, ensuite, si les causes sont :**

- d'origine purement mécanique ;
- issues d'erreurs de conception, d'exécution ou de gestion (par exemple, insuffisance d'entretien, erreur commise lors d'une réparation...).

Note : le terme général de lixiviation du béton employé par les spécialistes recouvre les termes suivants :

- phénomènes mécaniques d'érosion ;
- phénomènes physiques de transfert d'ions par diffusion (gradients de concentration) ou par perméation (gradients de pression) ;
- phénomènes chimiques de réactions.

3.4.2 LES MANIFESTATIONS DES DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS

> **Avant de pouvoir identifier les causes, il faut en premier relever les désordres et leur importance. En allant du plus bénin au plus grave, il est possible de distinguer :**

- les défauts sans conséquences importantes sur le plan structural, telles que : variations de teintes sur un même parement, efflorescences, taches noires, pommelages, fuites de laitance, bullage, flaches, marbrures, fissures superficielles, etc.) ;
- les défauts indiquant que l'évolution risque de se faire anormalement : ressuage important, nids de cailloux, faïençage, etc. ;
- les défauts indiquant une évolution plus ou moins avancée : écaillage, fissuration, délamination, gonflements, etc. ;
- les défauts traduisant une modification du fonctionnement de la structure et ayant donc une incidence structurale : fissuration importante, déformation excessive, corrosion avec forte réduction de section des armatures de béton armé, ruptures d'armatures de précontrainte (concerne essentiellement les armatures de précontrainte extérieure et les armatures de précontrainte par pré-tension), etc. ;
- les défauts structuraux indiquant la proximité d'un état limite ultime et nécessitant une restriction de l'usage de l'ouvrage, voire sa mise hors service.

Les articles qui suivent, sans avoir un caractère totalement exhaustif, listent les principales causes provoquant la dégradation du béton, des armatures et des structures. **Ils décrivent les dégradations** qui en résultent et donnent les méthodes d'investigation usuelles qui permettent d'en confirmer les causes.

> **Sont développés dans les articles suivants les désordres et dégradations des bétons et des structures en béton dus à :**

- 3.4.3 des défauts mineurs d'exécution ;
- 3.4.4 des causes physiques ;
- 3.4.5 des causes chimiques ;

- 3.4.6 à la corrosion électrochimique des armatures de béton armé ;
- 3.4.7 à la corrosion des armatures de précontrainte ;
- 3.4.8 à des facteurs aggravants – erreurs de conception et d'exécution initiaux ou lors de réparations, actions accidentelles non prises en compte...

Les **méthodes d'investigation** peuvent relever de normes, de recommandations... Nombre de ces **méthodes d'investigation** ainsi que diverses **méthodologies de diagnostic** sont disponibles sous forme de fiches sur le site de l'IFSTTAR sous le vocable : **Cahiers Interactifs de l'IFSTTAR**. Dans le **présent GUIDE** :

1. le numéro d'une **méthode d'investigation** apparaît entre parenthèses (**fiche xx**). Chaque fiche donne le domaine d'emploi de l'essai, le matériel nécessaire, la procédure d'exécution et comment interpréter les mesures ;
2. le numéro d'une **méthodologie de diagnostic** apparaît dans les mêmes conditions. Il y a lieu de distinguer les **diagnostics de l'état des matériaux (Série D)** et les **diagnostics structuraux (série E)**.

Il est également possible de consulter le manuel : Méthodologie non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton paru aux presses Ponts et Chaussées en 2005.

Note : les coordonnées du site de l'IFSTTAR et de l'université Gustave Eiffel sont :

- <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/index.html>
- <https://www.univ-gustave-eiffel.fr>

> **Repérage des méthodes d'investigation relatives aux pathologies des ouvrages en béton visées dans le présent GUIDE :**

- Série A auscultations sur prélèvements : béton (A1), acier (A2) ;
- Série B auscultations du matériau en place : béton (B1), béton armé (B2), acier (B3) ;
- Série C auscultations de structures : reconnaissance de la géométrie (série C1), mesures de déformations générales et mouvements (série C2), mesures locales de fonctionnement (série C3), mesures de forces (série C4), essais statiques de chargement et essais dynamiques (série C5).

> **Repérage des méthodologies de diagnostic :**

- Série D diagnostics de l'état des matériaux : béton (D1), acier (D2) ;
- Série E diagnostics structuraux : problèmes génériques (E1), ouvrages en béton (E2).

3.4.3

DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS DES BÉTONS DUS À DES DÉFAUTS MINEURS D'EXÉCUTION

Les défauts mineurs que sont les variations de teintes sur un même parement, efflorescences, taches noires, pommelages, marbrures, fuites de laitance, bullage, petits nids de cailloux, flaches, défauts de planéité ou d'aplomb, fissures superficielles, petites épaufrures, etc., font normalement l'objet sur le chantier d'une **fiche de non-conformité**.

Ces défauts, pour la plupart portent sur l'aspect ; cependant, certains de ces défauts (nids de cailloux, épaufrures...) peuvent **réduire la durabilité** de la partie de la structure concernée en favorisant la pénétration des agents agressifs liés aux **classes d'exposition aux effets de l'environnement** de la structure.

3.4.3.1 Description des désordres et dégradations

Les principaux désordres et dégradations font l'objet d'un guide édité par le **LCPC** (IFSTTAR) : Défauts d'aspect des parements en béton paru en 1991 auquel le lecteur peut se reporter.



Photo n° 6 : guide du LCPC de 1991

3.4.3.2 Méthodes d'investigation

Le relevé de tels défauts est le plus souvent visuel. Il faut en premier en identifier les causes de façon à modifier, si nécessaire, la ou les **procédures d'exécution**. Ensuite, il faut mesurer la superficie du défaut, sa profondeur...Parfois, des **investigations plus poussées** sont nécessaires si la partie de structure est en contact permanent avec l'eau ou des agents agressifs ou que le **marché** impose que le béton durci présente certaines performances (perméabilité, cohésion de surface...).

3.4.4 DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS DES BÉTONS DUS À DES CAUSES PHYSIQUES

Cet article traite des effets des températures extrêmes (gel-dégel et incendie), des retraits, de l'érosion et des chocs répétés.

3.4.4.1 Désordres et dégradations du béton dus aux effets du gel-dégel (en surface ou à cœur) avec ou sans sels de déverglaçage

3.4.4.1.1 Description des désordres et dégradations

Elle se traduit par deux formes de désordres et désagrégations :

- l'écaillage qui concerne la peau du béton ;
- une microfissuration, voire une fissuration dans la masse du béton généralement parallèlement aux faces exposées créant ainsi un feuilleteage.

- les effets du salage aggravent les dommages au béton en provoquant, en plus, la corrosion des armatures.

Ces dégradations sont dues à l'eau contenue dans les réseaux de capillaires des bétons. Dès que la température du béton descend en-dessous de -3°C à -4°C , l'eau des gros capillaires gèle, ce qui se traduit par une augmentation de volume de 9% et la création de pressions hydrauliques.

De plus, il se produit des différences de concentration en sels dissous (la glace se forme à partir de l'eau pure) entre l'eau à proximité des lentilles de glace et celle des capillaires. Par effet d'osmose, les concentrations tendent à s'équilibrer, ce qui crée des pressions dites osmotiques.

Si les pressions deviennent trop élevées et supérieures à la résistance à la traction du béton, celui-ci se fissure.



Photo n° 7 : béton affecté par l'écaillage (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 8 : bétons affectés par le gel interne (crédit photo D. Poineau)

Note : le fascicule 65 A du CCTG de 1993 dans son additif a introduit pour la première fois la prise en compte des effets du gel (modéré à sévère) dans la formulation des bétons. En 2000, après révision, le fascicule 65 A, qui visait les recommandations du LCPC pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel de 2003 basées sur celles de Rhône-Alpes, a introduit des « classes d'exposition » (EA à ED) proches de celles des Eurocodes pour le choix des formules de béton. Les désordres dus au gel/dégel avec ou sans salage ne devraient normalement plus concerner les ouvrages construits antérieurement à la parution de ces textes. De nouvelles recommandations vont paraître fin 2021 début 2022.

L'additif au fascicule 65-A du CCTG a été approuvé par le décret 93-446 du 23 mars 1993 et modifié par le décret 2000-524 du 15 juin 2000. Il complétait le fascicule 65-A applicable à l'exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint. Il traitait, en particulier, des stipulations applicables aux ouvrages faisant appel à des techniques ou à des procédés de construction particuliers tels que : le bétonnage sous conditions climatiques extrêmes...

3.4.4.1.2 Méthodes de diagnostic et d'investigation

Le diagnostic de la gélivité d'un béton relève de la fiche (D-1-2). Lors de l'expertise, il est nécessaire d'identifier les éléments de l'ouvrage concernés, ainsi que l'origine de la sensibilité du béton, soit à l'écaillage, soit au gel interne. Il faut donc qualifier l'environnement et la classe d'exposition correspondante. Il faut rechercher, la présence de granulats gélifs, la tenue de la formule du béton à l'écaillage ou au gel en fonction des conditions d'environnement et aussi la présence d'eau (venues d'eau, stagnation d'eau, défaut d'étanchéité...) qui contribue à saturer le béton et le rend plus sensible aux effets du gel.

La classe d'exposition de l'ouvrage est qualifiée en s'appuyant sur la norme NF EN 206/CN et les cartes de gel et de salage sachant qu'il faut tenir compte pour le gel, d'une part, de l'exposition au vent car les températures sont mesurées sous abris dans les stations météorologiques et, d'autre part, du microclimat pouvant entourer l'ouvrage.

	Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent
Gel faible ou modéré pour les éléments très exposés aux risques d'écaillage ⁽¹⁾	XF1	XF2	XF4
Gel faible ou modéré pour les autres éléments	XF1	XF2	XF2
Gel sévère	XF3	XF4	XF4

Tableau n° 6

(1) Il s'agit des éléments qui présentent des surfaces horizontales soumises à des stagnations d'eau et aux projections directes de sels de déverglaçage : corniches, solins de joints de dilatation, longrines d'ancrage de dispositifs de retenus...

Le test de gélivité des granulats relève de la norme NF EN 1367-1 d'août 2007 : Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altération des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel.

> **Les tests de gélivité et d'écaillage du béton relèvent des normes :**

- **NF P 18-424 de mai 2008** : Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau (cette norme concerne les bétons soumis à un gel sévère et une forte saturation en eau) ;
- **NF P 18-425 de mai 2008** : Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air - Dégel dans l'eau (cette norme concerne les bétons soumis à un gel faible ou modéré) ;
- **XP P 18-420 de mai 2012** : Bétons – Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence de solution salines.

ATTENTION, La durée des tests de gel-dégel est de 3,5 mois et celle du test d'écaillage de 3 mois.

Se reporter aux fiches n° A1-6, A1-7 et A1-8 de l'IFSTTAR sur les mesures concernant respectivement le facteur d'espacement (bulles d'air internes au béton), le gel interne et l'écaillage du béton.

Note : la présence d'entraîneurs d'air dans les bétons leur assure une résistance au gel-dégel mais elle favorise la carbonatation et la pénétration des agents agressifs et donc la corrosion des armatures. Aussi, depuis les années 2000, les textes relatifs à la composition des bétons soumis au gel-dégel ont évolué (cf. le nouveau fascicule 65 du CCTG...).

3.4.4.2 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets thermiques d'un incendie

3.4.4.2.1 Rappel des incendies catastrophiques des années 90 à 2 000

Dans les années 90 et 2000 des incendies dramatiques ont montré que les règles sur la sécurité dans les tranchées couvertes et les tunnels étaient à revoir et qu'un incendie pouvait provoquer, outre de très nombreuses victimes, de graves désordres aux bétons des ouvrages de génie civil : incendies du tunnel sous la Manche (18 novembre 1996, 11 septembre 2008), incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), incendie du funiculaire de Kaprun en Autriche (11 novembre 2000)...

Plus récemment, il y a lieu de citer l'incendie du pont Mathilde à Rouen (29 octobre 2012) et celui de la « Grenfell Tower » à Londres (nuit du 13 au 14 juin 2017).

3.4.4.2.2 Description des désordres et dégradations

L'élévation de température dans un béton soumis à un incendie monte rapidement. Par exemple, à 5 cm du parement du talon d'une poutre :

- au temps $t = 30$ mn, la température atteint ≈ 150 C° ;
- au temps $t = 2$ h, la température atteint ≈ 600 C° ;
- au temps $t = 4$ h, la température atteint ≈ 850 C° ;

Lors d'un incendie, au fur et à mesure que le béton monte en température, sa microstructure se transforme (déshydratation des silicates hydratés commence vers 300°C, décomposition de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en chaux vers 450 à 500°C, transformation du carbonate de chaux en chaux vive entre 700 à 900°C...

Dès que la température du béton dépasse 200°C, ses caractéristiques mécaniques (résistance, module d'Young) diminuent pour s'annuler entre 600 et 800°C).

L'augmentation de la température du béton provoque des déformations du béton et de la structure concernée.

> Enfin, lors d'un incendie il se produit un écaillage du béton sous l'action des deux phénomènes suivant :

- la dilatation thermique différentielle entre la peau et le cœur du béton qui engendre des contraintes de cisaillement et de traction ;
- les gradients de pression de vapeur très importants, qui se forment à l'intérieur du béton non encore échauffé où l'eau reste liquide et où une partie de la vapeur se condense. Cette eau forme une sorte de barrière. Le reste de la vapeur s'échappe à la surface du béton.

Plus le béton a une perméabilité et une porosité réduites, plus les destructions par écaillage sont importantes. Par exemple, lors de l'incendie du tunnel sous la Manche, dans la zone du sinistre, des voussoirs de 60 cm d'épaisseur en **BHP de classe 60** ont été fortement endommagés.

De plus, si la température que subit le béton est très élevée, il se produit une destruction locale du matériau par décomposition de ses constituants et une forte chute du module d'Young. En effet, dès que la température du béton atteint :

- 110°C, les hydrates de la pâte de ciment commencent à se décomposer ;
- 573°C, la température de fusion du quartz est atteinte ;
- 800°C, le carbonate de chaux (CaCO_3) se décarbonate avec libération de chaux vive, les granulats calcaires perdent une partie de leur cohésion, etc.



Photo n° 9 : béton après un incendie (crédit photo CETU)

Un incendie a également des conséquences **sur les armatures de béton armé**, en particulier s'il s'agit **d'aciers doux écrouis** par traction et torsion ou par torsion seule utilisés entre les années 50 et 80. En effet, une température forte peut recuire les aciers avec une forte chute (de l'ordre de 15 à 18 %) de leur limite élastique. Le même phénomène existe aussi pour les **aciers plus récents** élaborés par trempe et revenu. Cet effet est sensible si la température des armatures atteint 350°C (300°C pour être prudent, car il dépend aussi du temps de maintien de la température au niveau de l'acier) et de l'effet de trempe de l'eau des lances des pompiers.

Les effets d'un incendie peuvent également toucher les **armatures de précontrainte** et plus particulièrement les **armatures extérieures au béton**.



Photo n° 10 : état de la précontrainte additionnelle d'un VIPP après un incendie (crédit photo CEREMA)

3.4.4.2.3 Méthodes de diagnostic et d'investigation

En cas d'incendie important, des investigations spécifiques doivent donc être menées aussi bien sur le béton et les armatures que sur la structure. Se reporter à la fiche (D1-4) de diagnostic d'un béton dégradé par un incendie et au document du LCPC intitulé « Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie » Méthodes d'essais des LPC n°62 – décembre 2005 ainsi.

Les investigations doivent permettre de classer les dégradations constatées sur le béton et les armatures en **quatre classes** comme sur l'image ci-après.

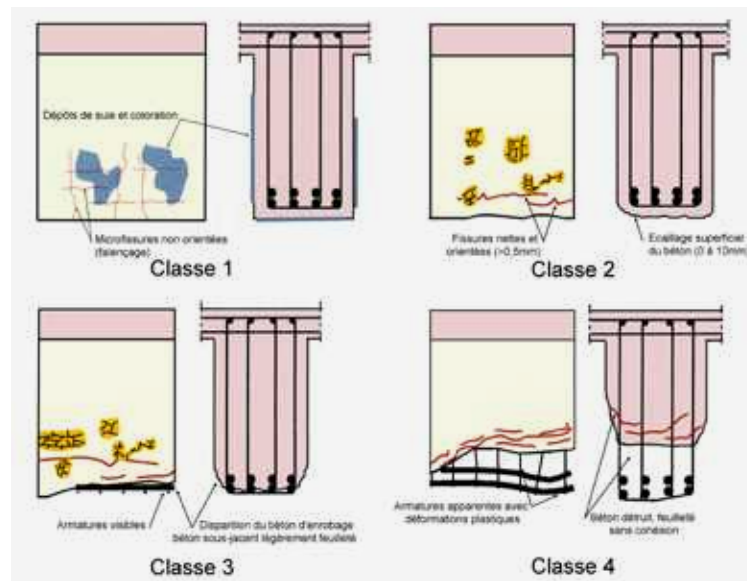


Figure n° 6 : les 4 niveaux de dégradations par le feu
(extrait de la méthode d'essai des LCPC n°62)

a) Cas du béton :

- Examen visuel avec mesures de l'état du béton :
 - importance des dépôts de suie,
 - couleurs des parois,
 - écaillage (profondeur moyenne, profondeur maximale, surface),
 - fissures (faciès, ouverture apparente, densité, développé),
 - zones de béton sans cohésion (emplacement, surface, profondeur),
 - armatures apparentes,
 - pertes totale de béton,
 - déformation rémanentes ;
- Mesures in-situ :
 - de la dureté de surface au scléromètre conformément à la **norme NF EN 12504-2 de mars 2013** : Essais pour béton dans les structures Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement (fiche B1-1),
 - auscultation sonore du béton conformément à la **norme NF EN 12504-4 de mai 2005** : Essais pour béton dans les structures Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son (fiche B1-2) ;
 - l'auscultation est combinée avec des carottages (**norme NF EN 12504-1 de juin 2019** : Essais pour béton dans les structures - Partie 1 : Carottes - Prélèvement, examen et essais en compression [fiche A1-1]) et des essais en laboratoire pour pouvoir identifier et tracer les zones d'iso-vitesse et d'iso-résistance ;

- pour l'interprétation des mesures sur éprouvettes, il faut s'appuyer sur les **normes NF EN 13791 et NF EN 13791/CN** : Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton. Elles sont applicables à condition que le diamètre des carottes soit supérieur à 50 mm et le nombre des carottes ≥ 3 , elles ne sont pas utilisables pour les micro-carottes

Note : l'adaptation de la norme NF EN 13791/CN à la norme européenne d'août 2019 est en cours de rédaction.

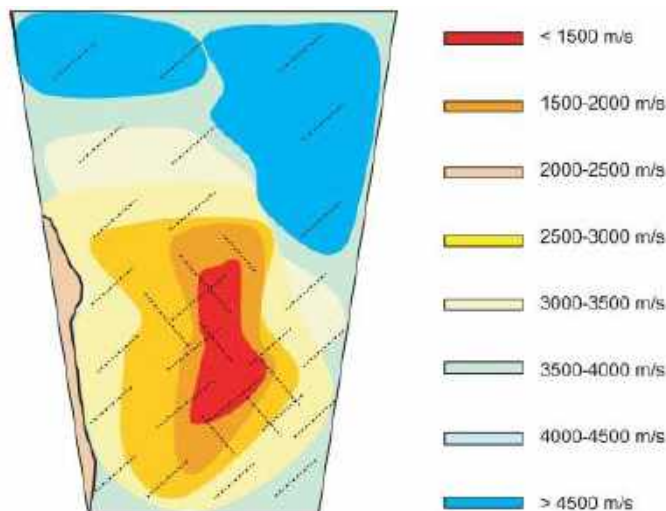


Figure n° 7 : courbes d'iso-vitesse (extrait de la méthode d'essai des LCPC n°62)

■ **Mesures et investigations en laboratoire :**

- mesures de profils soniques sur carottes pour détecter la profondeur des dégradations,
- mesures de la fréquence de résonance du béton de carottes ce qui donne des profils de mesure du module d'Young,
- simulation d'un incendie dans un four de laboratoire sur des carottes prélevées sur l'ouvrage,
- estimation de la température atteinte à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB) par l'identification des modifications de la texture et des phases minérales sous l'action de l'incendie,
- estimation de la température atteinte par diffractométrie des rayons X...

b) Cas des armatures :

- les investigations susvisées d'estimation de la température atteinte dans le béton permettent d'estimer les températures atteintes au niveau des armatures lorsqu'elles ne sont pas apparentes ;
- l'analyse chimique de l'acier permet d'évaluer si celui-ci présente encore les caractéristiques des normes en vigueur à l'époque de mise en œuvre ;
- mesure des caractéristiques physiques sur des armatures prélevées in-situ et comparaison aux caractéristiques des normes en vigueur à l'époque de mise en œuvre ;
- vérification de l'absence de trempe sous l'action de l'eau déversée par les lances des pompiers...

3.4.4.3 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets des différents retraits (endogène, thermique, de dessiccation)

3.4.4.3.1 Description des désordres et dégradations

Dès son début de prise, le béton subit différentes actions qui peuvent se combiner et provoquer des fissures :

- **la sédimentation** d'un béton mal formulé (insuffisance de fines et excès d'eau) ou l'évaporation excessive de l'eau du béton frais non durci provoque des cassures dans le béton en cours de durcissement dites aussi **fissures de ressuage** ; ce sont les effets du **retrait plastique** appelé aussi **retrait d'auto-dessiccation**. Des remontées importantes d'eau à la surface du béton en fin de bétonnage est le signe d'une apparition du phénomène. Les fissures se développent au droit des armatures du premier lit et la surface du béton devient légèrement concave ;



Photo n° 11 : fissures de ressuage

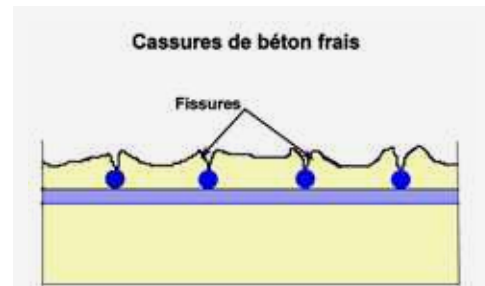


Figure n° 8 : schéma des fissures de ressuage

- **les gradients thermiques** qui existent, entre le cœur du béton et sa peau dans les pièces massives ou entre les parties minces et les parties massives d'une pièce ou dans les zones de reprises de bétonnage, peuvent mettre la peau du béton en traction. Cela peut entraîner la formation de fissures (Il existe des méthodes de mesure des effets thermiques développés par un béton lors de sa prise et des logiciels qui permettent d'évaluer les gradients thermiques et les contraintes qui peuvent se développer dans le béton) ;

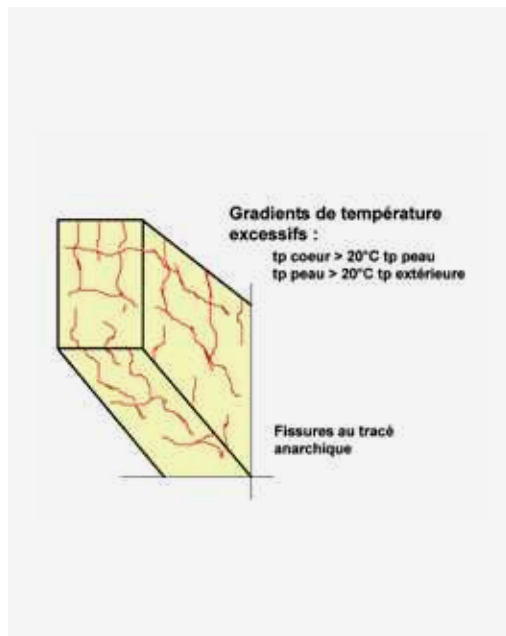


Figure n° 9 : fissuration anarchique à la surface d'une pièce massive

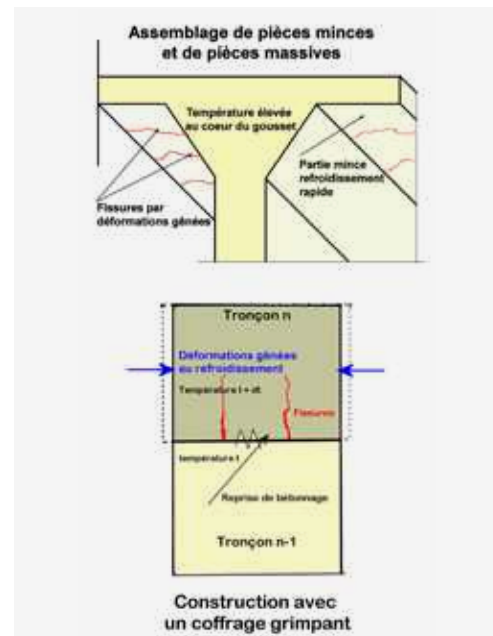


Figure n° 10 : incidence des retraits thermiques sur les pièces minces et massives et dans les zones de reprise de bétonnage

- le **retrait endogène** qui est une réduction de volume de la pâte de ciment hydraté. Cette réduction de volume est aussi appelée « **contraction de Le Chatelier** ». Ce retrait vaut 1.10^{-4} pour les bétons courants et 2.10^{-4} pour les BHP ;

Note : les **BFUP** ont un retrait endogène encore plus élevé mais la réaction très rapide n'entraîne pas de conséquences néfastes.

- Le **retrait de séchage** qui se développe dans le béton durci. Il est possible d'identifier deux phases :
 - le retrait par dessiccation du béton au jeune âge (l'absence de cure ou une cure mal conduite sont à l'origine des fissures qui en résultent). Les fissures se produisent si la montée en résistance du béton ne permet pas d'équilibrer les tractions qui se développent. Si la cure réduit la montée en résistance, elle réduit aussi le retrait et la perméabilité de la peau du béton donc la pénétration des agents agressifs ;
 - le retrait par dessiccation de la peau du béton pendant la vie de l'ouvrage. Sur environ une dizaine de centimètres de profondeur, en fonction de l'alternance de l'ensoleillement, du vent et de la pluie, le béton perd son eau et les tractions qui en résultent provoquent des fissures (le plus souvent traversantes) ou augmentent l'ouverture des fissures existantes dues aux autres retraits. Un tel phénomène se constate, en particulier, au niveau des reprises de bétonnage sachant que l'absence ou l'insuffisance des armatures de peau permet aux fissures de s'ouvrir largement.

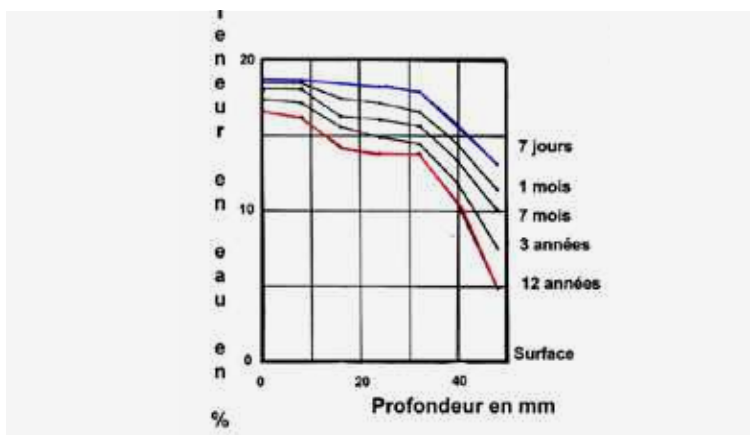


Figure n° 11 : diagramme montrant l'évolution de la teneur en eau de la peau d'un béton avec le temps

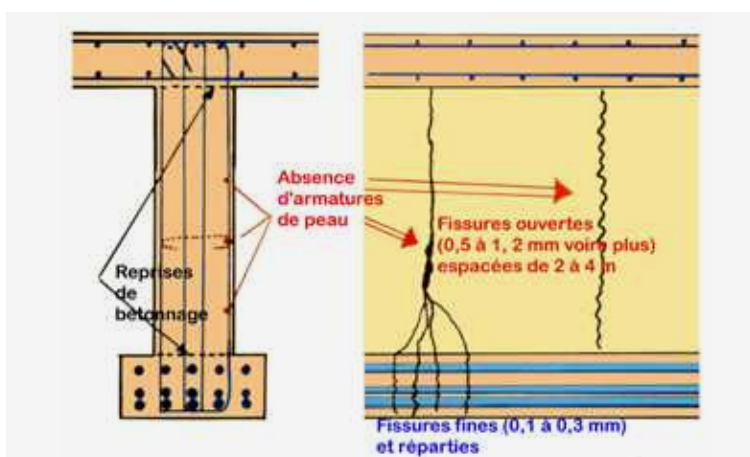


Figure n° 12 : conséquences d'une absence ou d'une insuffisance des armatures de peau

Les règles de calcul actuelles comme l'**Eurocode 2** conduisent à prévoir des enrobages importants lorsque l'ouvrage en béton est soumis à un environnement agressif (cas des ouvrages à la mer). Il y a lieu de prévoir des dispositions particulières pour éviter la création de fissures en forme de « V » dans le béton d'enrobage non armé.

Attention, à ne pas confondre une fissure de retrait qui est bloquée par le ferrailage du talon de la poutre avec une fissure de flexion laquelle traverse le talon.



Photo n° 12 : fissure non traversante



Photo n° 13 : fissure traversante

L'attention du lecteur est aussi attirée sur les **reprises de bétonnage** où peuvent se développer, malgré la présence des armatures, des fissures traversantes ou non traversantes dans lesquelles peuvent pénétrer les agents agressifs avec, facteurs aggravants possible, l'**eau** (l'humidité atmosphérique, la pluie, l'eau liquide, les eaux chargées en fondants [sels de déneigement]) entraînant la corrosion des armatures. Ces circulations d'eau sont particulièrement **dangereuses** lorsqu'elles ne sont pas visibles (cas de la reprise de bétonnage d'un mur de soutènement au niveau de la semelle de fondation) avec à la clé des ruptures brutales.

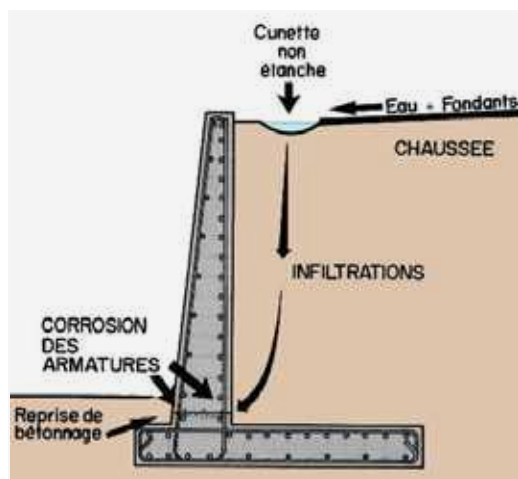


Figure n° 13 : reprise de bétonnage pouvant être soumise à un passage d'eau

Les fissures sont à considérer comme des désordres lorsque leur ouverture dépasse les **ouvertures limites** des **règles de calcul** lesquelles sont fonctions des **conditions d'environnement** de la structure. Sont concernés les ouvrages pour lesquels la fissuration était limitée par lesdites règles. Pour les autres, les désordres sont avérés dès que les fissures dépassent 0,4 à 0,5 mm à fortiori lorsqu'elles sont traversantes et exposées à l'eau.

L'ouverture d'une fissure varie en fonction des variations thermiques et hydrométriques saisonnières et même journalières avec les effets de l'ensoleillement. L'ouverture d'une fissure est maximale en hiver.

3.4.4.3.2 Méthodes de diagnostic et d'investigation

Les diverses méthodes d'investigation citées ci-après sont applicables à tous les types de fissures (fissures dites mortes, faiblement actives ou actives à caractère structural ou non-structural) :

- les microfissures peuvent être rendues apparentes par l'arrosage de la surface fissurée ;
- l'accès aux faces opposées d'un élément permet de savoir si la fissure est ou non traversante ;
- l'ouverture apparente en surface se mesure avec un fissuromètre ou avec un compte-fils ;
- le souffle d'une fissure (variations d'ouverture sous les effets thermiques et hygrométriques ou d'un chargement) peut être mesuré à l'aide de **comparateurs mécaniques** (fiche C3-1), **d'extensomètres mécaniques** (fiche C3-6) ou **électriques** (fiche C3-2) appelés aussi **capteurs de déplacement** ;
- une **auscultation sonore** de la surface du béton (fiche B1-2) permet d'évaluer la profondeur d'une fissure. L'allongement du tracé de l'onde sonore se traduit par un décrochement de la ligne espace-temps qui est une droite si le béton est homogène et non fissuré (vitesse de propagation constante).

Les fissures sont ensuite reportées sur un plan sur lequel figure le ferrailage, voire le câblage si l'élément est précontraint.

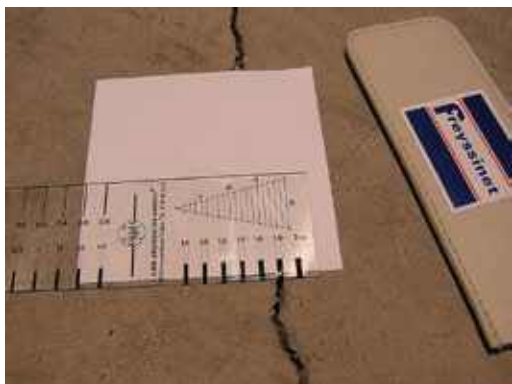


Photo n° 14 : utilisation d'un fissuromètre Saugnac (crédit photo Freyssinet)



Photo n° 15 : utilisation d'un compte-fils (crédit photo Freyssinet)

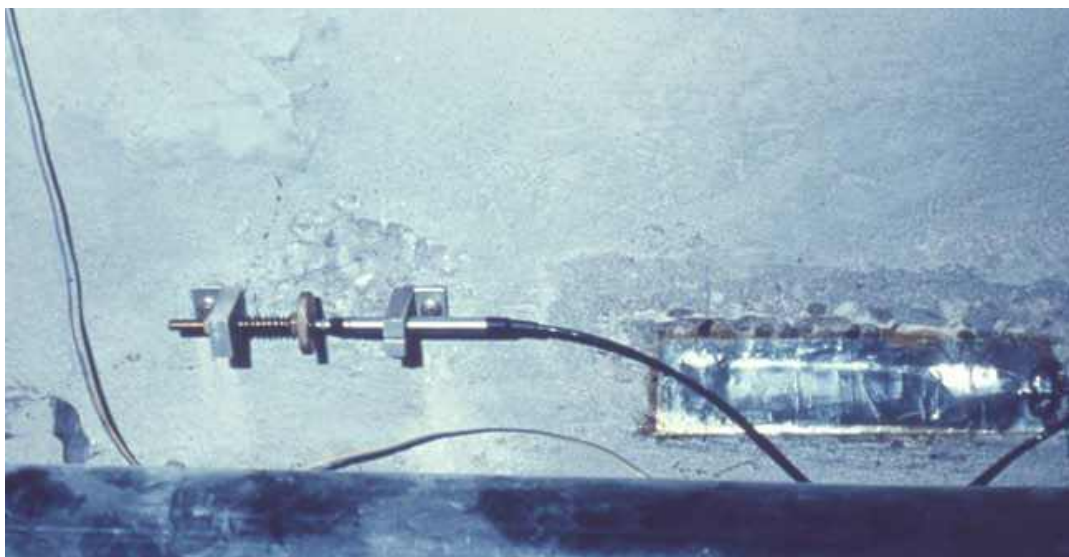


Photo n° 16 : à gauche de l'image, se trouve un capteur de déplacement et à droite une jauge de déformation (crédit photo D. Poineau)

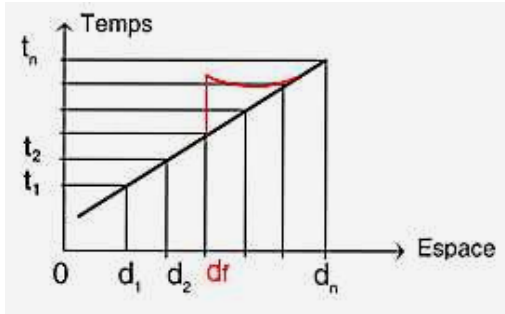


Figure n° 14 : tracés espace-temps d'un béton homogène sans ou avec une fissure

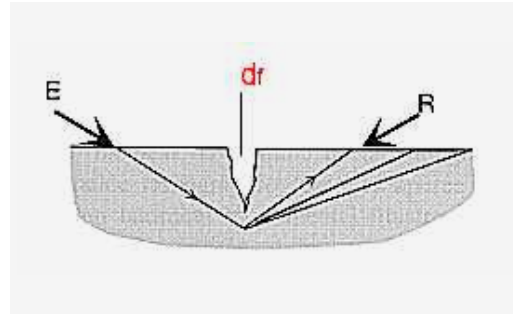
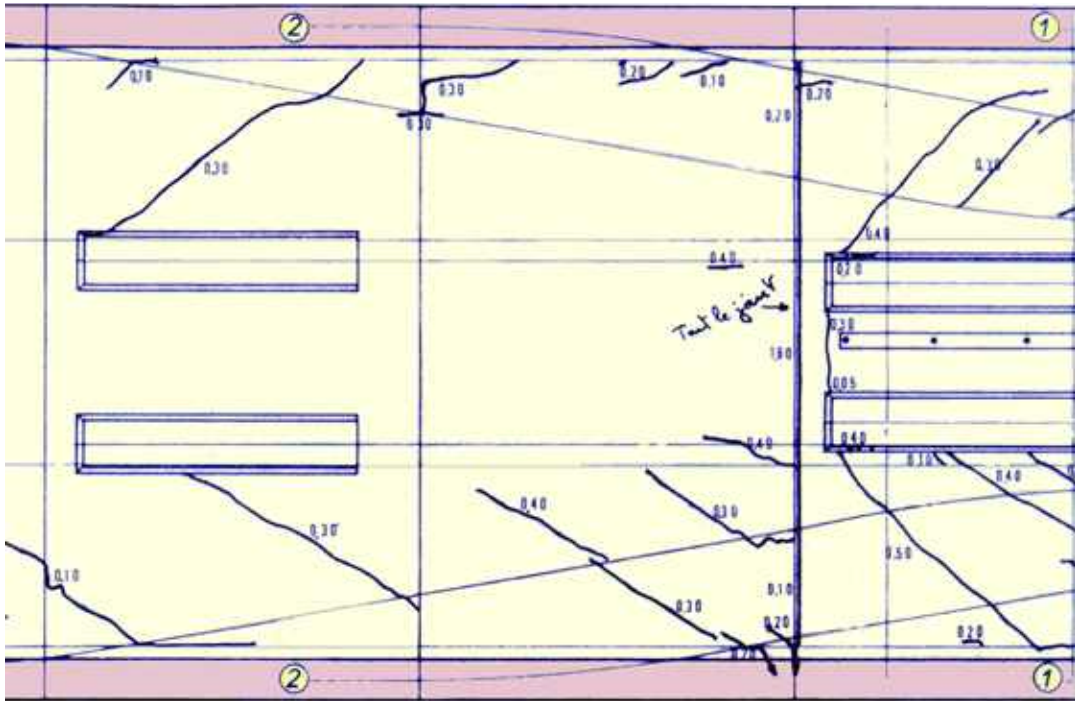


Figure n° 15 : déviation des ondes sonores au droit d'une fissure



A1-20

A1-22

A1-24

Figure n° 16 : report des fissures sur un plan (ici il s'agit de fissures à caractère structural)

3.4.4.4 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets d'une érosion et/ou de chocs répétés

3.4.4.4.1 Description des désordres et dégradations



Photo n° 17 : érosion hydraulique du radier de la chute des Bois près de Chamonix (crédit photo Weargrit)

> Ces désordres peuvent apparaître par exemple :

- lorsque des véhicules (poids lourds, chariots-élévateurs...) roulent directement sur le béton. L'érosion est fortement aggravée s'ils sont équipés de pneus à crampons ;
- sur les piles dans les rivières à caractère torrentiel, dans les évacuateurs de crues sous l'action de l'abrasion engendrée par l'eau et les matières en suspensions ainsi que par les chocs dues aux blocs rocheux transportés par le courant ;
- dans les traverses de chemin de fer, qui sont au contact du ballast, sous les effets du passage des trains...

3.4.4.4.2 Méthodes de diagnostic et d'investigation

> Les investigations in-situ portent sur la détermination de l'importance des désordres, il convient de relever :

- à quel moment le phénomène a été constaté (vitesse de détérioration) ;
- si les détériorations sont locales ou généralisées ;
- quelles sont les profondeurs moyenne et maximale des détériorations ;
- si les armatures sont affectées (réduction du diamètre, ruptures, disparition) ;
- si des prélèvements de carottes sont nécessaires pour effectuer des essais en laboratoire.

> **Les essais en laboratoire à effectuer vont dépendre du facteur qui provoque l'abrasion ou l'érosion :**

- la norme **NF EN 1504-2** vise la méthode d'essai **TABER (NF EN ISO 5470-1 de septembre 2017)** : Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique – Détermination de la résistance à l'usure – Partie 1 : appareil d'essai d'abrasion Taber ;
- la norme **NF EN 13813 de juin 2003** : Matériaux de chape et chapes – Matériaux de chapes – Propriétés et exigences. Cette norme concernant le domaine du bâtiment vise plusieurs méthodes d'essai pour la mesure de la résistance à l'usure ;
- les deux essais spécifiques de la **CNR** (Compagnie Nationale du Rhône) simulent l'un l'effet de l'abrasion et l'autre les chocs sous l'action des eaux chargées en particules abrasives ou charriant des blocs de pierres et des galets. Ces deux essais figurent dans l'annexe informative A de la norme **NF P95-103** ;
- etc.

Matériaux	Indice de résistance à l'abrasion
Verre (témoin)	1
Bétons et mortiers très résistants	< 1
Bétons et mortiers résistants	< 2
Bétons et mortiers de résistance moyenne	< 2 et < 3

Tableau n° 7 : tableau donnant l'indice de résistance à l'abrasion (essai **CNR**)

Matériaux	Volume de l'empreinte (cm ³)
Bétons et mortiers très résistants	< 150
Bétons et mortiers résistants	<150 et < 250
Bétons et mortiers de résistance moyenne	< 250 et < 400

Tableau n° 8 : tableau donnant un indice de résistance aux chocs en fonction du volume de l'empreinte dans le matériau (essai **CNR**)

3.4.5 DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS DES BÉTONS DUS À DES CAUSES CHIMIQUES

3.4.5.1 Généralités

Dans cette catégorie, il est possible de distinguer **deux cas** selon que les agresseurs sont **des agents externes ou internes** au béton.

1. Principaux agents externes :

- les eaux pures ;
- les milieux acides ;
- les eaux alcalines ;
- les solutions salines :
 - les sulfates,
 - les chlorures,
 - les nitrates,
 - les sulfures ;

- l'eau de mer ;
- certains milieux biologiques ;
- les graisses et huiles ;
- les milieux gazeux ;
- les milieux solides (sols).

Certaines structures de génie civil, surtout dans le **domaine de l'industrie**, peuvent être soumises à **d'autres agents agressifs**.

Le fascicule de documentation FD P18-011 de mars 2016 : Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons, donne la **classification des environnements agressifs** pour les bétons. Le **degré d'agressivité** des solutions (eaux) et aussi des sols (noté de : A1 à A4) est fonction de la concentration en agents agressifs et du pH des solutions et des sols. Ce document donne également le **niveau de protection** à assurer (noté de 1 à 3), ainsi que les **mesures à prendre** pour la **confection des bétons**, voire leur **protection** par des revêtements.

2. Principaux agents internes :

> **Certains agents internes peuvent être responsables de réactions chimiques dites de gonflement interne (RGI) que sont :**

- **l'alcali-réaction (AR)**, lorsque certains granulats réagissent avec les ions alcalins présents dans les constituants du béton ;
- **la réaction sulfatique interne (RSI)**, soit lorsque les granulats contiennent des agents pathogènes comme des sulfates, soit lorsque l'ettringite primaire ne se forme pas lors de la prise du béton, en particulier par excès de température pendant celle-ci. Ce dernier phénomène peut concerner les pièces massives ou les pièces étuvées.

L'article 3.4.5.2.1 ci-dessous explicite les **dégradations d'origine chimique externe** ainsi que les **méthodes d'investigation** correspondantes. Les **dégradations dues à des facteurs internes** et les **méthodes d'investigation** correspondantes sont traitées ensuite dans l'article 3.4.5.4 ci-dessous.

> **Aux causes chimiques de dégradation du béton, il faut ajouter les effets de la corrosion des armatures sous l'action de phénomènes électrochimiques qui concernent :**

- **les armatures de béton armé**. Ce phénomène de corrosion, largement développé dans le guide de novembre 2003 de l'AFGC (Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion), est explicité dans l'article 3.4.6 ci-après du **présent GUIDE**;
- **les armatures de précontrainte** dont les différentes sortes de corrosion sont développées dans l'article 3.4.7 ci-dessous.

3.4.5.2 Désordres et dégradations des bétons d'origine chimique externe

3.4.5.2.1 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets des eaux pures, voire acides (eaux industrielles...)

Le ciment hydraté présent dans le béton contenant de la chaux (la portlandite) provoque un équilibre très basique (pH compris entre 12,6 et 13,7). Il passive alors parfaitement l'acier vis-à-vis de la corrosion.

Les eaux pures c'est-à-dire faiblement minéralisées (eaux de pluie, de fonte de la neige, eaux issues de massifs granitiques...), voire légèrement acides, lorsqu'elles entrent en contact avec le béton, dissolvent la chaux produite par l'hydratation du ciment, elles font alors progressivement diminuer le pH et annihilent ainsi la passivation des aciers mais aussi la résistance du béton.

D'autres constituants du béton, tel que le silicate calcique hydraté ou C-S-H, les aluminates de calcium peuvent également être attaqués. La présence de dépôts de calcite blanchâtre à la surface du béton est le signe d'une telle attaque.



Photo n° 18 : traces de calcite dues au passage de l'eau à travers le béton faute d'une chape d'étanchéité efficace (crédit photo D. Poineau)

Note : Les eaux stagnantes ou à faible courant sont agressives lorsque leur titre alcalimétrique complet (TAC) est inférieur à 1mé/l (50 mg d'équivalent CaCO_3) soit 5 degrés français.

Les phénomènes sont accentués lorsque les eaux sont nettement acides (pH~4,5 à 5) c'est le cas de certaines eaux de source, de certains cours d'eau (par exemple en Guyane), des eaux usées...

Pour les eaux contenant de l'acide carbonique, la valeur du pH ne suffit pas à qualifier leur agressivité, il faut se référer à leur concentration en CO_2 .

Les acides humiques, contenus dans les eaux des sols tourbeux, les eaux des forêts de pins..., sont **faiblement agressifs** mais, comme ils se trouvent partout, ils sont potentiellement dangereux.

Les eaux réellement acides, que l'on trouve dans le **domaine industriel**, ont une action importante de dissolution du ciment et de granulats calcaires et sont principalement les solutions d'acides forts (les acides chlorhydrique, nitrique et sulfurique). Plus le **pH** est faible plus l'attaque est importante. L'acide sulfurique crée, en plus, des sulfates entraînant des composés expansifs (ettringite). Les attaques du béton de la structure peuvent être aussi dues à d'autres acides que les acides forts. Il s'agit, par exemple, des acides acétique, lactique, butyrique, formique en provenance de sucreries, laiteries, papeteries, tanneries...

3.4.5.3 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets des eaux alcalines

Les bétons à base de ciment Portland résistent bien aux eaux alcalines ($\text{pH} > 7$) à faible concentration ($< 10\%$ de NaOH) que l'on trouve dans les massifs calcaires). Cependant, même pour de faibles concentrations, lorsque le béton est en contact sur une face avec la solution basique et que l'autre face est soumise à évaporation, il peut y avoir des désordres par accumulation des sels. Par ailleurs, les bétons à base de **ciments alumineux** sont attaqués jusqu'à destruction totale par les eaux basiques.

Les eaux basiques, par leur apport d'alcalins, peuvent également favoriser des réactions de gonflement interne ou RGI (voir l'article 3.4.5.4 ci-dessous).

3.4.5.3.1 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets de solutions salines dans certains sols

> L'agressivité des sols est liée à la présence de l'eau et est fonction de sa circulation et de sa pression. Elle est également fonction des agents agressifs présents dans les sols. Par exemple :

- les sulfates sont présents dans les sols contenant du gypse. Les sulfures de fer (pyrites) sont présents dans les schistes (cas des remblais) et les sols argileux. Leur oxydation produit également des sulfates,
- les sols des marécages peuvent contenir des acides humiques et de l'acide carbonique,
- les sols des décharges peuvent contenir des agents agressifs qui peuvent arriver au contact des bétons par l'intermédiaire des eaux d'infiltration.

L'agression des solutions salines et des sols est fonction, d'une part, **des cations** et, d'autre part, **des anions** des sels dissous.

Ici ne sont traités que **les agents agressifs les plus courants**, qui se présentent sous forme liquide ou solide dans les eaux et les sols.

Note : ces agents agressifs peuvent aussi se trouver dans l'atmosphère, leurs effets sont traités ci-après.

3.4.5.3.1.1 Effets des cations les plus agressifs

Le magnésium sous forme de sulfates ou de chlorures dissout partiellement les éléments calciques des ciments et forme de la brucite $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ sans résistance notable.

L'ammonium sous forme de sulfates, chlorures et nitrates agit de la même façon que le magnésium sur les ciments.

Les ions bicarbonate (HCO_3^-), en concentration massique supérieure à celle des ions ammonium (NH_4^+) réduit fortement leur agressivité.

3.4.5.3.1.2 Effets des anions les plus agressifs

Cas des sulfates :

Il s'agit ici d'un phénomène d'expansion créé par l'attaque de l'aluminate tricalcique (C_3A) du ciment par les **sulfates** qui provoque la formation de cristaux **d'ettringite dite secondaire** ou sulfo-aluminate de calcium hydraté à 32 molécules d'eau par mole ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Ce produit expansif est aussi appelé « **sel de Candlot** » (nom du chimiste français qui a mis en lumière ce phénomène).

> **Les sulfates se trouvent un peu partout :**

- à cause de l'anhydride sulfureux (SO_2), présent dans l'atmosphère urbaine notamment qui s'oxyde en présence d'humidité pour donner de l'acide sulfurique et des sulfates ;
- dans les eaux « séléniteuses » provenant de sous-sols riches en gypse (présentes dans le sous-sol de certaines zones de la région parisienne Meaux, Meulan, etc.), de sols alluviaux et argileux, de remblais utilisant, soit des matériaux de démolition (donc du plâtre), soit des matériaux en provenance de terrils chargés en sulfures et sulfates, de certains engrais (sulfates d'ammonium, de potassium et de magnésium), d'usines d'engrais et de produits chimiques ;
- ils sont également contenus dans l'eau de mer, les effluents urbains (égouts), l'eau des lagunes (chotts d'Afrique du Nord), dans certains fondants routiers, dans les zones où il y a une utilisation intensive d'engrais, dans des schistes houillers parfois utilisés dans le Nord de la France comme remblais ;
- à cause des pyrites, présentes quelquefois dans les granulats du béton et qui s'oxydent facilement en sulfates très réactifs.

Suivant le cas les sulfates sont à présents dans l'environnement extérieur du béton mais peuvent être aussi présents à l'intérieur de ce dernier ; dans ce second cas, le phénomène est analogue à celui de la réaction sulfatique interne (RSI) visée ci-après.



Photo n° 19 : dégradations du béton par une attaque sulfatique externe (crédit photo LCPC)

> **L'effet est différé mais se traduit par :**

- une fissuration et un « pourrissement » dus aux pressions de cristallisation de l'ettringite ;
- l'accentuation de la pénétration des sulfates dans les fissures ;
- la progression de l'attaque suivant un front de dégradation dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps ;
- la destruction plus ou moins complète du béton.

Note : en présence d'un milieu contenant des sulfates, il faut utiliser des ciments à teneur limitée en aluminat tricalcique comme les ciments relevant de la norme NF P15-319 de janvier 2014 : *Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates. Récemment ont été mis sur le marché des ciments ne contenant pas de gypse pour éviter la RSI.*

Cas des chlorures :

> **Les chlorures présents dans l'eau de mer et dans les fondants routiers (sels de déverglaçage) sont souvent à l'origine des corrosions sévères des armatures. Ils peuvent aussi provoquer certaines réactions chimiques plus ou moins destructrices du béton :**

- le chlorure de calcium (Cl_2Ca) forme avec l'aluminat tricalcique (C_3A) des chloroaluminates ;
- le chlorure de magnésie donne un précipité de brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et du chlorure de calcium soluble ;
- en présence de sulfates, il se forme de l'ettringite gonflante ;

- en présence de gaz carbonique et de silice de la thaumasite gonflante...

Cas des nitrates :

Les nitrates sont en général faiblement agressifs sauf le nitrate d'ammonium qui est fortement agressif à cause de son cation (NH_4^+). Le nitrate d'aluminium $5\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ est également agressif.

Cas des sulfures :

En présence d'air et d'humidité, les sulfures peuvent s'oxyder et créer soit des sulfates, soit, en milieu acide, de l'hydrogène sulfuré (H_2S) qui, en s'oxydant à son tour, crée de l'acide sulfurique. L'hydrogène sulfuré se dégage aussi de certaines eaux thermales, des eaux d'égout...

3.4.5.3.2 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets de l'eau de mer

L'eau de mer de pH voisin de 8,2 est un milieu moyennement agressif pour le béton. Elle contient en effets des ions chlorure (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}) et magnésium (Mg^{++})...L'attaque est variable selon le taux de sulfates et de magnésium, voire la présence de micro-organismes et le degré d'immersion du béton dans l'eau de mer ou son exposition aux embruns :

- **parties de structure en immersion totale** : l'attaque chimique est faible pour un béton peu poreux et fabriqué avec un **ciment pour travaux à la mer** relevant de la norme **NF P15-317 de septembre 2006** : Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer ;
- **parties de structures en immersion alternée** (dans les zones d'éclaboussures, de marnage et d'aération différentielle [environ 1 m sous les PBE]) : différentes actions physiques se conjuguent aux attaques chimiques pour aggraver les conditions d'exposition :
 - l'érosion par les vagues, le sable, les galets...
 - l'absorption et l'évaporation répétée de l'eau,
 - la cristallisation expansive des sels,
 - la fissuration, la délamination, les éclatements dus à la corrosion des armatures ;
- **parties de structures soumises aux embruns** : le béton peut subir de légères agressions mais les chlorures peuvent provoquer la corrosion des armatures et donc des dommages importants.

Note : les embruns peuvent être transportés sur plusieurs kilomètres de profondeur (jusqu'à 50 à 60 km) suivant l'importance des vents et déposer sur les parois des structures des agents agressifs (80 à 160 g/m²/an de sels divers).

L'attaque est aussi intense **en climat froid**, où le béton est soumis en plus aux cycles gel-dégel, **qu'en climat chaud**, où l'effet thermique accélère la vitesse de dégradation et en particulier la corrosion des armatures.



Photo n° 20 : dégradations du béton d'une pile dues à l'eau d'une lagune (crédit photo Freyssinet)

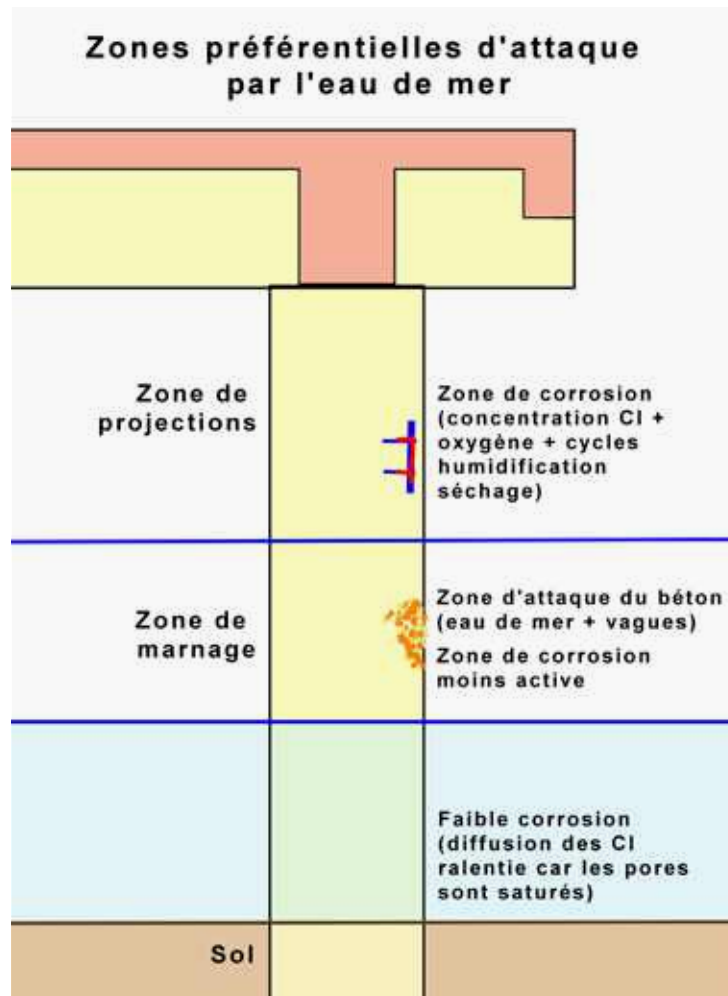


Figure n° 17 : zones préférentielles d'attaque par l'eau de mer d'une structure

3.4.5.3.3 Désordres et dégradations des bétons dus aux effets d'attaques biochimiques

> Dans ce domaine il faut considérer essentiellement deux cas :

- l'attaque sulfo-bactérienne dans les réseaux d'assainissement, qui met en jeu des micro-organismes du cycle du soufre (thiobacillus qui sont des bacilles sulfo-oxydants) et provoque la formation d'hydrogène sulfuré (H₂S). Celui-ci, en s'oxydant en présence d'humidité, donne de l'acide sulfurique puis des sulfates et donc, in fine, la formation d'ettringite ;
- le vieillissement biologique, qui résulte de l'activité de bactéries, d'algues, de champignons, de lichens ou de mousses.

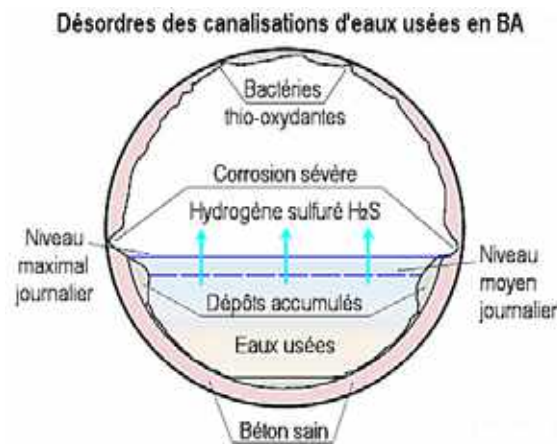


Figure n° 18 : attaques chimiques dans une canalisation d'eaux usées en béton

3.4.5.3.4 Désordres et dégradations dus aux effets d'autres agents agressifs

3.4.5.3.4.1 Désordres et dégradations des bétons par les graisses et les huiles

Les graisses et huiles acides peuvent attaquer le béton. Il en est de même de certaines huiles : de foie de morue, de baleine, de ricin, de noix de coco.

3.4.5.3.4.2 Désordres et dégradations des bétons par certains milieux gazeux

Les gaz de combustion et ceux émis par l'industrie peuvent contenir divers produits chimiques, qui dissous dans l'eau (eaux de pluie, interstitielle du béton...), sont agressifs pour le béton. Une teneur en humidité relative supérieure à 65 % et une température en dessous du point de rosé sont des facteurs favorisant les attaques.

3.4.5.3.4.3 Anhydride sulfureux (SO₂)

En présence d'humidité, son oxydation conduit à la formation d'acide sulfurique et de sulfates dont les effets sont décrits ci-devant.

3.4.5.3.4.4 Sulfure d'hydrogène (H₂S)

Ce gaz à odeur caractéristique est présent dans les eaux thermales et surtout les eaux usées. Il est agressif pour une teneur supérieure à 0,1 mg/m³ pour les bétons qui se trouvent en atmosphère confinée et en présence d'oxygène. Il peut aussi donner lieu à la formation d'acide sulfurique et de sulfates dont les effets sont décrits ci-devant.

3.4.5.3.4.5 Anhydride carbonique (CO₂)

La carbonatation du béton (transformation de la chaux en carbonate de calcium) se produit en présence d'une humidité relative comprise entre 50 et 70 %. La carbonatation réduit favorablement la porosité mais défavorablement le pH du béton ce qui entraîne la dépassivation des armatures et leur corrosion en présence d'humidité et d'oxygène.

3.4.5.3.4.6 Méthodes de diagnostic et d'investigation des attaques chimiques externes vis-à-vis des bétons

Se reporter aux **fiches de diagnostic** : **(D1-5)** relative à l'état du béton attaqué par des eaux acides et **(D1-6)** relative à l'état d'un béton soumis à une réaction sulfatique externe.

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206-1		
		XA1	XA2	XA3
Agressivité des eaux en fonction de leur concentration en agents agressifs et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale.				
CO ₂ agressif (mg/l)	NF EN 13577 ^{a)}	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 ^{b)} jusqu'à saturation
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000 ^{c)}
Mg ²⁺ (mg/l)	NF EN ISO 7980	> 300 et < 1 000	> 1 000 et < 3 000	> 3 000 ^{b)} jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100 ^{c) d)}
pH	NF T 90-008	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0 ^{c)}
TAC (mé/l) ^{e)}	NF EN ISO 9963-1 et NF EN ISO 9963-2	< 1,0 et > 0,4	< 0,4 et > 0,1	< 0,1 ^{b)}
Agressivité des sols				
SO ₄ ²⁻ (mg/kg de sol séché à 105 °C ± 5 °C) ^{f)}	NF EN 196-2	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000 ^{c)}
Degré d'acidité	Voir Annexe A	> 200	g)	g)
Baumann-Gully (ml/kg)				
Agressivité des gaz en milieu humide > 75 % en présence d'oxygène				
SO ₂ (mg/m ³)	NF EN 14791	≥ 0,15 et ≤ 0,5	> 0,5 et ≤ 10	> 10 et ≤ 200 ^{c)}
H ₂ S (mg/m ³)	NF EN ISO 19739	< 0,1 ^{h)}	≥ 0,1 et ≤ 10 ^{h)}	> 10 et ≤ 200 ^{c) h)}
<p>a) Il est également possible d'utiliser la méthode Legrand — Poirier décrite en [1].</p> <p>b) Une protection externe (enduits, revêtements) ou interne (imprégnation) est recommandée (voir 7.1).</p> <p>c) Si le degré d'agressivité des solutions, des sols et des gaz présenté dans ce tableau dépasse les concentrations de la classe XA3, il est nécessaire de prévoir une protection externe (enduits, revêtements) ou interne (imprégnation).</p> <p>d) Lorsque la concentration massique en ions bicarbonate (HCO₃⁻) est supérieure à la concentration en ions ammonium (NH₄⁺), il n'est pas nécessaire de prévoir de protection et les dispositions de XA3 suffisent, indépendamment de la concentration en NH₄⁺ (voir 5.1.4.2).</p> <p>e) 1 mé/l = 50 mg/l d'équivalent CaCO₃ = 5 degrés français = 2,8 degrés allemands.</p> <p>f) Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10⁻⁵ m/s peuvent être placés dans une classe inférieure. En cas de risque d'accumulation d'ions sulfate dans le béton due à l'alternance de périodes sèches et de périodes humides ou par «suction capillaire» une valeur égale ou supérieure à 2 000 mg/kg conduit à un classement en XA2.</p> <p>g) Conditions d'attaque non observées en pratique.</p> <p>h) Les valeurs mentionnées correspondent à des concentrations supposées homogènes. Dans le cas contraire, les limites sont ramenées à ≥ 0,1 et ≤ 7 (XA2) et > 7 et ≤ 25 (XA3), exprimées en concentration moyenne du milieu considéré (en mg/m³).</p>				

Tableau n° 9 : tableau extrait du fascicule de documentation FD P18-011

Les classes d'agressivité chimique des solutions, des gaz et des sols vis-à-vis des bétons sont données dans le tableau ci-devant lequel donne la **liste des normes d'essai** à mettre en œuvre pour identifier les agents agressifs. Dans certains cas, les limites du tableau peuvent être dépassées du côté défavorable, ce qui impose que le projet de réparation soit adapté à l'agressivité mesurée avec, par exemple, la mise en place d'un revêtement...

Lorsque les **armatures** sont affectées par la **corrosion**, il convient de se reporter aux articles 3.4.6.4 et 3.4.7.3 ci-dessous qui traitent des méthodes d'investigation correspondantes.

3.4.5.4 Désordres et dégradations des bétons d'origine chimique interne (réactions de gonflement interne ou RGI)

> Comme cela a été évoqué plus haut (articles 3.4.5.1 ci-dessus), deux cas sont à considérer :

■ l'alcali-réaction (AR) :

- les phénomènes complexes connus sous le nom d'alcali-réaction mettent en jeu la formation lente et irréversible en milieu très basique de gels gonflants par réaction par exemple entre certaines formes de silice mal cristallisée contenue dans les granulats et les alcalins de la solution interstitielle du ciment hydraté. Il existe trois formes d'AR : réaction alcali-silice la plus fréquente, réaction alcali-silicate et réaction alcali-carbonate,
- les ions alcalins proviennent essentiellement du ciment mais aussi des granulats (notamment les granites), des adjuvants, de l'eau de gâchage. Ils peuvent aussi être apportés par l'eau de mer ou les sels de déverglaçage,
- cette réaction ne peut se développer qu'en présence d'eau (l'eau extérieure mais aussi l'eau interne au béton). La chaleur accélère la vitesse de la réaction ;

■ La réaction sulfatique interne (RSI) :

- la réaction sulfatique interne résulte d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire qui, normalement, se transforment en ettringite primaire non pathogène lors de la prise du béton. Si cette réaction ne peut avoir lieu, l'ettringite dite de formation différée expansive qui peut se former ultérieurement dans le béton durci provoque sa désorganisation ;
- cette remobilisation des sulfates nécessite une élévation de température notable et durable du béton pendant sa prise du béton (par exemple, > 75°C pendant plus de 4 heures) ; plusieurs autres facteurs ont un rôle : la nature du ciment et son dosage, la teneur en aluminat tricalcique (C3A), la teneur en alcalins du béton... ;
- ce phénomène concerne donc les pièces traitées thermiquement et les pièces massives ;
- la réaction réclame de l'eau et plus spécialement un environnement chaud et humide.

Note : la présence de granulats contenant des sulfates provoque les mêmes désordres.

3.4.5.4.1 Description des désordres et dégradations

Se reporter au manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton publié par le LCPC en février 1999 et au **guide d'aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne** » du LCPC de novembre 2003.

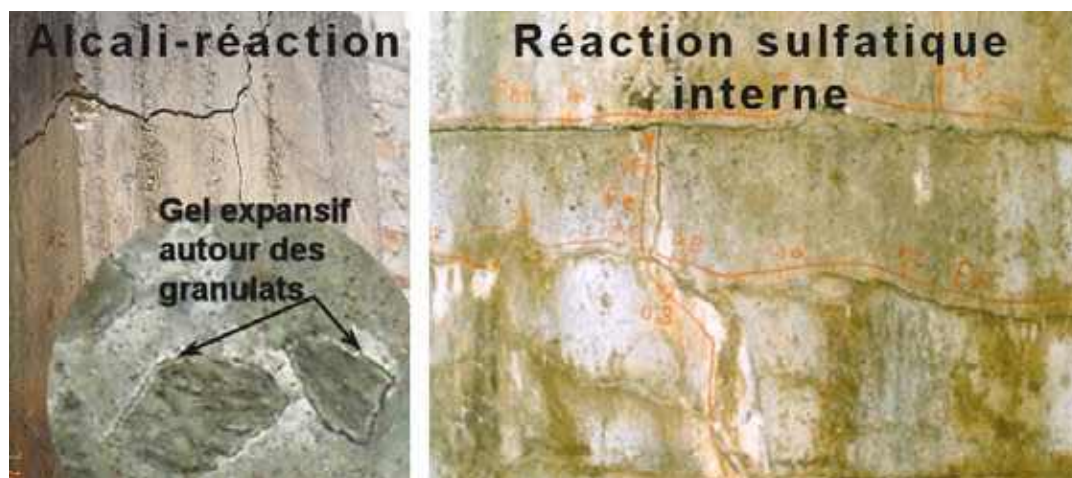


Photo n° 21 : exemples d'alcali-réaction et d'attaque sulfatique interne (crédit photo D. Poineau et LCPC)

Cas de l'alcali-réaction :

L'expansion due à l'alcali-réaction se manifeste par l'apparition d'un faïençage de la surface du béton avec des mailles de 10 à 50 mm de côté, une profondeur de fissuration de quelques centimètres et une ouverture des fissures de quelques dixièmes de millimètre. L'humidité souligne parfois ce faïençage.

Un réseau de fissures en mailles de 10 à 40 centimètres se superpose au faïençage. L'ouverture des fissures croît avec l'évolution du gonflement. Les fissures peuvent atteindre des ouvertures de quelques millimètres (augmentation annuelle de l'ouverture de 0,05 à 0,5 mm) et leur profondeur plus de 10 centimètres. Dans le cas des pièces faiblement armées, les fissures peuvent devenir traversantes et découper l'élément de béton armé en blocs juxtaposés semblables à une maçonnerie de pierres sèches. L'humidité peut également souligner le réseau des fissures.

Dans le cas d'un poteau ou d'une poutre précontrainte **les fissures s'orientent suivant la direction de la contrainte principale de compression.**

Le gonflement peut entraîner un **rejet des lèvres d'une fissure** (décalage en plan).

La surface d'un béton atteint par l'alcali-réaction peut se décolorer et les fissures devenir jaunâtres voire se couvrir d'efflorescences et d'exsudations de calcite. De plus, peuvent apparaître de **petits cratères** d'un diamètre de 1 à 2 centimètres appelés « **pop out** ». Ces cratères sont dus au gonflement des granulats proches de la surface et qui font éclater celle-ci.

Cas de la réaction sulfatique interne :

> Le gonflement dû à la réaction sulfatique interne provoque des désordres très voisins de ceux dus à l'alcali-réaction :

1. faïençage ;
2. fissures en mailles ;
3. coloration jaunâtre des parements, etc.

Cas d'une attaque sulfatique externe : (rappel)

Des parements blanchâtres avec fissures et écaillage peuvent faire suspecter une attaque sulfatique externe. Une coloration jaunâtre ou ocre des parements peut être observée lorsque la réaction sulfatique est combinée à une l'alcali-réaction. Les zones soumises à des venues d'eau ou d'humidité sont les zones préférentielles d'attaque (murs de soutènement, piédroits de culées, pieds de piles, etc).

Lorsque le pourrissement se développe avec la formation du sel de Candlot sans résistance (**ettringite dite secondaire**), le diagnostic est plus facile. Cependant, compte tenu que d'autres attaques chimiques produisent des effets similaires, seule une **analyse chimique des eaux ou des sols** permet de trancher.

3.4.5.4.2 Méthodes de diagnostic et d'investigation

Se reporter :

- à la **fiche de diagnostic (D1-3)** relative aux **réactions de gonflement interne du béton** ;
- au **guide technique de novembre 2003 du LCPC** : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne ;
- aux **recommandations provisoires du LCPC d'octobre 2010** : Protection et réparation des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne du béton.

> **La méthodologie hiérarchisée à suivre comprend :**

- Des investigations dans le dossier de l'ouvrage et in-situ qui portent sur :
 - le relevé de l'importance des désordres et les zones affectées,
 - le recueil d'informations (composition des bétons, traitements thermiques...),
 - la caractérisation de la fissuration (mesure de l'indice de fissuration),
 - le suivi des déformations dans le temps (utilisation de la distancemétrie par fil invar, (fiche C2-3) méthode infra-rouge (fiche C2-4) d'extensomètres à grande base...),
 - le suivi des températures et de l'hygrométrie ;

> **Des investigations en laboratoire sur prélèvements (carottes de longueur supérieure à la profondeur des fissures) sur lesquelles sont pratiquées :**

- la recherche de la présence de gel autour des granulats ;
- la détection des gels par fluorescence à l'acétate d'uranyl (fiche A1-4) ;
- la réalisation d'exams microscopiques pour rechercher la présence de gel autour des granulats avec l'utilisation du MEB (microscope électronique à balayage) sur des prélèvements (fiche A1-1) réalisés dans les zones fluorescentes (en cas de non fluorescence, une RSI peut être suspectée et confirmée par une analyse minéralogique du béton durci) ;
- la détermination des constituants du béton par une analyse minéralogique et, en particulier, la teneur en alcalins (fiche A1-2),
- l'analyse pétrographique des granulats et sables du béton (fiche A1-3),
- la mesure des caractéristiques mécaniques résiduelles du béton comme le module d'Young (fiche A1-5),
- l'évaluation de l'expansion résiduelle du béton par un essai de gonflement accéléré dans une étuve (durée d'environ 6 mois). Cette mesure permet de savoir si la réaction est achevée ou non. Si l'expansion n'est pas achevée, la valeur de l'expansion résiduelle à venir est un facteur clé dans la prise de décision sur le devenir de la structure.

Il y a lieu de rappeler que la réparation des structures atteintes par les **RGI** est très coûteuse et que les résultats espérés ne sont pas toujours atteints. Il est donc conseillé d'appliquer lors de la construction d'un ouvrage les **diverses recommandations et guides** relatifs à la prévention des **RGI** qui ont évoluées avec l'avancement des recherches :

- **recommandations de 1994 du MEL** relatives à l'alcali-réaction (obsolète) ;
- **guide technique de 2007 du LCPC** pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne [formation différée d'ettringite] (obsolète) ;
- **fascicule de documentation FD P18-464 d'avril 2014** : Béton - Dispositions pour la prévention des phénomènes d'alcali-réaction. Ce fascicule donne les critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction (classement : NR, PR ou PRP) ;
- **guide technique de 2017 du LCPC** pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (formation différée d'ettringite) ;
- **fascicule de documentation FD P18-541 de juin 2015** : Béton – Guide pour l'élaboration du dossier carrière dans le cadre de la prévention de l'alcali réaction ;
- **norme NF P18-454 de décembre 2004** : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Essai de performance ;
- **fascicule de documentation FD P18-456 de novembre 2004** : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance ;
- **norme NF EN 206/CN** relative aux bétons (formulation, fabrication...) traite de la prévention de l'alcali-réaction.



Photo n° 22 : guide du LCPC de 2003
(crédit photo LCPC)



Photo n° 23 : guide du LCPC de 2007
(crédit photo LCPC)

3.4.6 DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS DES BÉTONS DUS AUX EFFETS DE LA CORROSION ÉLECTROCHIMIQUE DES ARMATURES DE BÉTON ARMÉ⁷

Pour de plus amples informations sur les mécanismes de la corrosion..., il est loisible de consulter les documents scientifiques et techniques de l'AFGC suivants :

- guide de novembre 2003 relatif à la maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction ;
- guide de juillet 2004 relatif à une conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages.

Les dégradations des bétons d'une structure entraînées par la **corrosion des armatures de béton armé** peuvent se superposer aux dégradations d'origine physique et/ou chimique, voire mécanique. **À terme, la corrosion entraîne la ruine de tout ou partie de la structure**, comme le montre les photos ci-après.

⁷ Les caractéristiques des armatures de béton armé depuis les débuts de cette technique à nos jours sont données dans l'annexe n°3 au présent guide qui présente un bref historique du béton armé.

3.4.6.1 Généralités

La durabilité des armatures de béton armé est assurée par leur enrobage de béton sain, c'est-à-dire contenant encore une réserve en ciment susceptible de libérer la chaux nécessaire au maintien du milieu basique ($\text{pH} \approx 12$ à 13). Dès que cette condition n'est plus remplie, l'acier peut se corroder en formant une **rouille gonflante** qui est capable de faire éclater le béton. La corrosion des armatures se développe principalement dans les trois cas suivants :

- par suite de la carbonatation atmosphérique du béton (formation de calcite par réaction du dioxyde de carbone - ou gaz carbonique - de l'air avec la chaux disponible du béton) qui perd ainsi ses capacités protectrices ;
- par action de courants de fuite susceptibles d'apparaître dans une structure (corrosion galvanique) ;
- par action de contaminants corrosifs :
 - introduits au cours du malaxage des composants (par exemple, le chlorure de sodium en cas d'utilisation d'eau de mer pour le malaxage du béton ou le chlorure de calcium utilisé comme antigel lors de la fabrication du béton...),
 - mélangés accidentellement à un composant du béton (par exemple, au cours du transport d'un ciment dans une citerne ayant contenu du chlorure de calcium ou de sodium...),
 - provenant de l'environnement extérieur (chlorure de sodium, eau de javel ou autres contaminants). Cela concerne tout particulièrement les ouvrages en milieu marin avec ou sans gel, les piscines...,
 - les ouvrages ou parties d'ouvrages exposés aux effets du gel (verglas, neige) combinés aux sels de déneigement-dégel appelés aussi fondants.

3.4.6.2 Processus de corrosion électrochimique des armatures

Il est important de bien comprendre le **processus qui conduit à la corrosion électrochimique des armatures**. Il dépend de l'agent agressif (classe d'exposition) mais, également, de l'importance de l'ouverture des fissures du béton celle-ci devant rester limitée comme l'imposent les règles de calcul du BA et du BP.

Les diagrammes théoriques de corrosion (équilibres potentiel - pH) ont été établis par l'**électrochimiste belge Pourbaix** pour une **température de 25°C** et sous la **pression atmosphérique normale** : la **température comme la pression agissent sur l'importance et la vitesse de la corrosion**.

Ces graphiques indiquent les **domaines où une réaction peut se produire**, ceux où il y a **immunité** (pas de réaction possible) et ceux où il y a **passivation** (la réaction peut se produire dans certaines conditions). Lorsqu'une réaction peut avoir lieu, le diagramme de Pourbaix ne donne aucune indication sur la **réalité de la corrosion ni sur sa vitesse**.

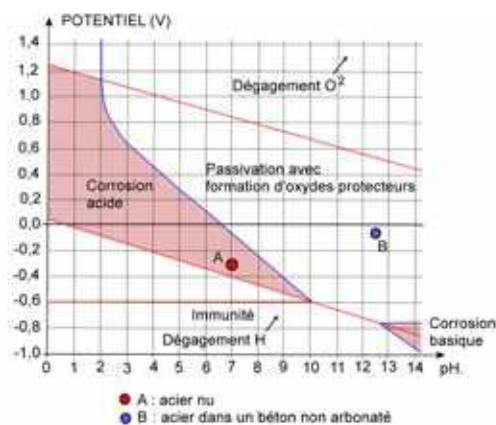
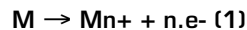


Figure n° 19 : diagramme de Pourbaix pour un acier dans des eaux de pH différents

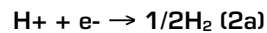
Le **diagramme de Pourbaix**⁸ ci-devant montre que l'alcalinité du ciment (pH de 12 à 13) rend le milieu passivant (cela concerne le béton comme les coulis d'injection des conduits de précontrainte à base de ciment). Les aciers se trouvent dans une **zone dite de recouvrement ou de passivation** (formation d'oxydes protecteurs) ce qui les **protège de la corrosion**. Lorsque le pH baisse et atteint 9, les aciers passent dans une zone dite de **corrosion acide**. Les aciers ne sont plus passivés et une corrosion peut se développer.

La **corrosion électrochimique** combine une action chimique et une action électrique. Elle se développe, soit parce que le métal est immergé dans un liquide, soit parce qu'il se trouve dans une atmosphère humide. Le liquide forme le milieu conducteur ou électrolyte. Il y a création d'une pile entre le métal (pur) qui sert **d'anode** et une impureté, par exemple, la calamine qui sert de **cathode**. Lorsque la pile fonctionne, la réaction (1) suivant se produit :

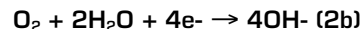


Les **atomes de métal M** perdent **des électrons** et deviennent **des ions** qui passent dans la solution. Les électrons libérés (**e-**) restent dans le métal et se dirigent vers la cathode. **Cette première réaction est dite « anodique ou d'oxydation ».**

Le système métal-électrolyte devant rester en équilibre, d'autres réactions doivent se développer à la même vitesse **pour consommer les électrons libérés**. Ces réactions (2a ou 2b) sont dites **« cathodiques ou de réduction »** :



La réaction **2a** qui se produit en milieu acide en l'absence d'oxygène conduit à un dégagement d'hydrogène pouvant être **naissant**, ce qui favorise la **corrosion fissurante sous tension** des armatures de précontrainte et des boulons HR, qui peuvent être sensibles à cette forme de corrosion.



En milieu non acide, les produits des réactions (1) et (2b) qui sont dans l'électrolyte se combinent entre eux pour former un hydroxyde. Cet hydroxyde précipite sur le métal pour former une couche plus ou moins imperméable. Si cette couche est imperméable, elle bloque les diverses réactions. Cette réaction (3) est dite de **recouvrement** (anciennement dite de **passivation**). On utilise les **termes de polarisation anodique ou cathodique** suivant que le dépôt, qui bloque la réaction, se forme sur l'anode ou la cathode. Ultérieurement, si la couche de recouvrement est détruite, en particulier, lorsque le pH diminue, la corrosion peut alors se développer.



Photo n° 24 : exemple de corrosion avec polarisation cathodique (crédit photo Freyssinet)

⁸ Les diagrammes de Marcel Pourbaix sont disponibles, par exemple, dans *l'Atlas des équilibres électrochimiques* paru aux éditions Gauthier-Villards en 1963.

Effets de la carbonatation du béton :

La carbonatation fait progressivement tomber le pH à 9. Les armatures sont alors dépassivées et, s'il y a présence d'humidité et d'oxygène, la corrosion peut démarrer. Dans un milieu sec comme l'intérieur d'un bâtiment hors pièces humides, la carbonatation peut être très importante, mais la corrosion inexistante.

Effets des chlorures :

Si la concentration en ions chlorure, au contact des armatures, dépasse les seuils suivants (seuils admis par la communauté scientifique), il y a chute brutale du pH et la corrosion des armatures se développe :

- au moins 0,4% du poids du ciment de la formule du béton ;
- au moins de 0,04 à 0,1% du poids du béton suivant son dosage en ciment.

Remarque : Ces valeurs ne doivent pas être confondues avec celles fixées dans la norme NF EN 206/CN et le fascicule 65 du CCTG qui correspondent à une limitation des chlorures dans le béton ou le mortier d'un ouvrage à construire !

Lorsque la teneur en chlorures est très élevée dans un béton (ouvrage à la mer), il peut se produire une dissolution des armatures sans gonflement apparent (formation de « rouille dite verte »). Cette corrosion, par l'absence de toute manifestation visuelle, bien que rare, est redoutable.

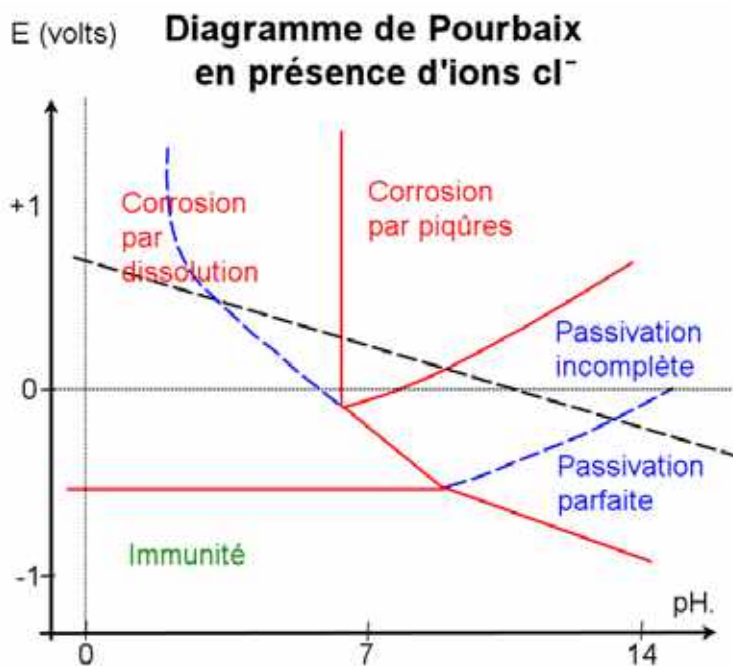


Figure n° 20 : diagramme de Pourbaix en présence de chlorures

Note : d'autres contaminants (iode, brome, fluor...) peuvent aussi provoquer la corrosion des armatures.

Les mécanismes de pénétration des agents agressifs dans le béton (le gaz carbonique et les chlorures) :

Les agents agressifs contenus dans l'air, l'eau ou le sol pénètrent dans le béton par les pores et les fissures :

- sous l'action de la pression du gaz ou du liquide (loi de Darcy) ;
- par diffusivité, c'est-à-dire sous l'effet d'un gradient de concentration (lois de Fick) :
 - l'eau contenue dans une atmosphère humide tend à pénétrer dans un béton desséché,
 - la solution interstitielle du béton d'une zone tend à avoir la même composition que celle de la zone voisine.

Si l'on arrive à quasiment bloquer la pénétration des agents agressifs en réduisant très fortement la perméabilité du béton, par exemple, par un revêtement de protection :

- la pénétration du gaz carbonique sera très faible et le front de carbonatation ne continuera sa progression que très lentement vers l'intérieur du béton ;
- cependant les chlorures présents dans la peau du béton, vont continuer à pénétrer par diffusivité dans la masse du béton de façon, qu'à terme, leur dosage soit uniforme. S'ils sont en quantité suffisante, leur dosage au droit des armatures pourra donc atteindre la valeur critique et engendrer une corrosion.

En conclusion, en présence de chlorures il faut mesurer à la fois **leur profondeur de pénétration** mais aussi **leur répartition en quantités**, de façon à pouvoir calculer, à terme, le dosage qu'ils atteindront au droit des armatures. **ATTENTION**, si ce dosage risque de dépasser le **seuil critique**, la technique de réparation choisie devra pouvoir éliminer le surplus de chlorures !

3.4.6.3 Description des désordres et dégradations

Pour les ponts en béton armé, il est possible de s'appuyer sur le **fascicule n°31 de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO)** et les guides de la **méthode IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art)** qui décrivent les différents désordres que peuvent présenter ces ouvrages et, en particulier, ceux qui peuvent être le signe d'une corrosion de leurs armatures.

3.4.6.3.1 En béton armé non fissuré, la corrosion se développe en deux étapes :

- la première, d'une durée « t_0 », est la **période dite « d'incubation »** (phase dormante) pendant laquelle les agents agressifs pénètrent dans le béton d'enrobage et finissent par arriver au contact des armatures ;
- ensuite, dès que le pH tombe à 9 et si le milieu est humide et aéré, la corrosion se développe, ce qui marque le **début de la période dite de propagation** ;
- l'expansion de la rouille (jusqu'à près de 800 %), qui se développe, provoque dans un premier temps la fissuration du béton d'enrobage le long des armatures corrodées puis sa fracturation ;
- ensuite, le béton éclate, les morceaux tombent au sol. Il y a alors **danger pour les usagers et les tiers** ;
- enfin, il y a disparition progressive des armatures par dissolution et, à terme, **effondrement de tout ou partie de la structure**.

Manifestations visuelles de la corrosion (a)

- 1 fissures
- 2 fractures
- 3 éclats locaux
- 4 chutes du béton d'enrobage
- 5 réductions de la section des barres
- 6 ruptures de barres...

(a) la corrosion est déjà fortement développée lorsque les désordres apparaissent.



Photo n° 25 : manifestations visuelles de la corrosion (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 26 : filet de protection contre les chutes de morceaux de béton (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 27 : exemple de désordres extrêmes dus à la corrosion – Grand Rocher du Zoo de Vincennes avant réhabilitation – Encorbellement d'un pont (crédit photo D. Poineau)

Actuellement, le milieu du génie civil considère que la durée de la période dormante d'incubation correspond à la « durée d'utilisation du projet » (durée de vie de la structure). En effet, au-delà de cette période, l'état de l'ouvrage se détériore.

Cette « fin de vie » ne doit pas être confondue avec celle qui correspond à l'effondrement de tout ou partie de la structure, qui se produit bien plus tard⁹.

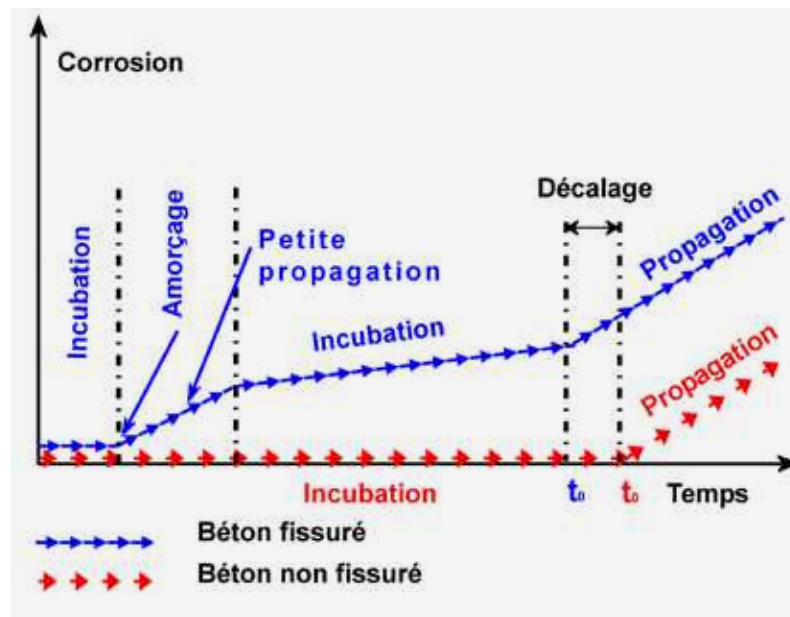


Figure n° 21 : le développement de la corrosion des armatures : cas du béton fissuré et cas du béton non fissuré

⁹ Consulter l'article de R. François, G. Arligue et J. C. Maso sur la durabilité du béton soumis à l'action des chlorures dans le Cahier de l'AFGC n° 310 de décembre 1994 (Annales de l'ITBTP n°529 de décembre 1994 dans la série béton n°316).

Dans une pièce en béton armé, la **pénétration des agents agressifs n'est généralement pas uniforme, en effet :**

- l'enrobage des armatures peut varier (non-respect de l'enrobage prescrit par défaut de calage, déformation des armatures sous le poids des ouvriers lors du bétonnage...);
- la perméabilité et la porosité du béton n'est pas constante (présence d'un nid de cailloux, plus faible compacité locale par défaut ou excès de vibration...);
- l'exposition aux agents agressifs des différentes faces de la pièce n'est la même (l'eau de pluie ruisselle sur la face exposée au vent dominant, les projections d'eau chargée en sels de déverglaçage sont plus importantes sur les corniches et longrines de fixation des barrières de sécurité que sur les poutres protégées par le hourdis du tablier...);
- la forme de la pièce joue également (les armatures situées dans l'angle d'une pièce rectangulaire sont plus exposées que celles situées le long d'une paroi plane ou circulaire car la pénétration des agents agressifs se fait par les deux parois adjacentes...);
- etc.

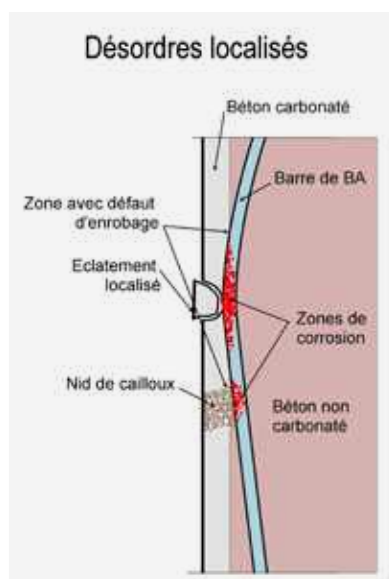


Figure n° 22 : figure montrant des zones de pénétration préférentielle des agents agressifs (cas de la carbonatation)

3.4.6.3.2 Béton armé fissuré – cas des fissures fines et peu actives :

Il s'agit des fissures dont les variations d'ouverture sont liées aux variations thermiques et hygrométriques. Après une **petite phase d'incubation**, la corrosion apparaît tout d'abord sous forme de **piqûres** à la surface des armatures, le plus souvent au droit des fissures qui se développent **au droit des armatures transversales** (les chlorures jouent ici le rôle principal). Il y a donc une **amorce de corrosion** :

- si les fissures ont un souffle négligeable et sont relativement fines (< 0,4 mm d'après les études), les résidus de la corrosion peuvent boucher les fissures, ce qui bloque la réaction ;
- la carbonatation et les chlorures continuent cependant à pénétrer dans le béton de couverture des aciers de BA et à se rapprocher des lits d'armatures ;
- on retrouve, comme dans le cas précédent, la **période d'incubation**. Puis, dès que le **pH descend à 9**, la corrosion démarre comme précédemment. En conclusion, dans le cas du béton fissuré, la **durée de la phase dormante « t₀ » est légèrement plus courte** que dans le cas du béton non fissuré.

ATTENTION, si les fissures laissent passer l'eau, les produits de corrosion ne peuvent pas se déposer. Dans un tel cas, la corrosion peut être beaucoup plus rapide et peut même provoquer une **rupture partielle ou totale** de l'élément, car la corrosion est concentrée au droit de la fissure. Ce risque concerne par exemple les encorbellements, les murs de soutènement, des dalles où la corrosion peut se développer insidieusement au droit des **reprises de bétonnage**. Dans le domaine du bâtiment plusieurs effondrements de balcons se produisent tous les ans : la corrosion peut être en cause mais pas dans tous les cas.



Photo n° 28 : passage d'eau au travers de la fissure d'une dalle
(crédit photo D. Poineau)



Photo n° 29 : fissure avec passage d'eau et conséquences de la corrosion localisée ainsi induite (crédit photo DDE54)

3.4.6.3.3 Béton armé fissuré – cas des fissures ouvertes actives ou non :

Si l'ouverture des fissures dépasse 0,5 mm, c'est la porte ouverte à la pénétration des produits agressifs, le phénomène est accéléré si les fissures sont traversantes et au contact de l'eau ou de l'humidité.

Si les fissures sont actives, la corrosion se développera également plus rapidement. Les résultats de recherches sur ce sujet sont peu nombreux. Dans ce cas, il faut tenir compte du phénomène de **fatigue des armatures**.

Les fissures peuvent aussi marquer, si elles atteignent et dépassent nettement le millimètre, un début de plastification des armatures ce qui indique une insuffisance de charge portante.

ATTENTION, des fissures largement ouvertes ne sont pas toujours le résultat d'une insuffisance de force portante. Cependant, elles mettent en jeu la durabilité de la structure en favorisant la **corrosion des armatures**, voire la destruction du béton à cœur. Dans tous les cas, de telles fissures relèvent de la pathologie.

À titre d'exemple, l'absence d'armatures de peau dans les âmes de poutres de grande hauteur peut conduire, sous les effets des retruits gênés, à des fissures de plusieurs millimètres d'ouverture (la photo suivante montre une fissure traversante de 4 mm d'ouverture en surface constatée sur l'âme d'une poutre du pont de Saint-Romains-des-Îles sur la Saône). Les essais de chargement effectués sur ce pont n'ont pas montré de réduction importante de la résistance mécanique de la structure.

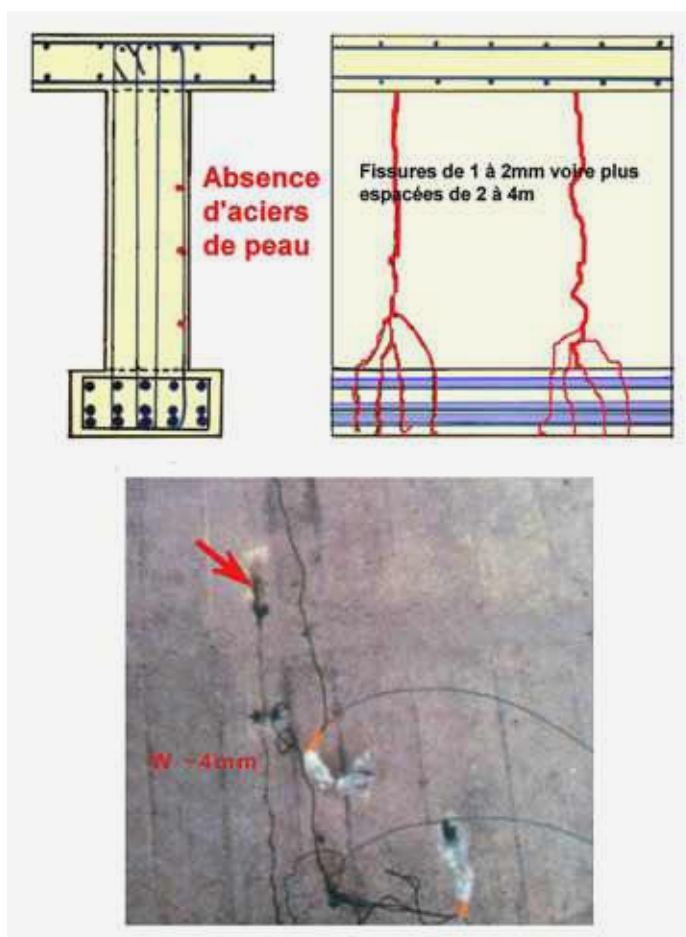


Photo n° 30 : fissure de retruits gênés (crédit photo D. Poineau)

S'il est logique que l'**ouverture des fissures** soit fonction de l'intensité du chargement appliqué, elle est aussi fonction de l'**épaisseur de l'enrobage** des armatures. Pour deux poutres à ferrailage et chargement identiques et dans les mêmes conditions d'environnement :

- l'**ouverture des fissures de la poutre ayant le plus fort enrobage** sera plus importante que l'ouverture des fissures de l'autre poutre ;
- mais la **durée d'incubation** de la poutre ayant le plus fort enrobage sera plus longue que la durée d'incubation de l'autre poutre.

Note : les règles de calculs du BA actuelles imposent des enrobages d'armatures importants pour les ouvrages soumis à des environnements agressifs. Le béton de couverture des aciers n'étant pas armé, les effets des retraits peuvent conduire à la formation de fissures largement ouvertes. Des dispositions doivent être prises pour limiter la fissuration lors du choix de la formule du béton, lors de la réalisation des travaux (durée et efficacité de la cure), voire la mise en place d'un ferrailage anti-fissuration résistant à la corrosion.

ATTENTION, le plus souvent, une structure présente :

- des insuffisances d'enrobage de ses armatures localisées dans certaines zones,
- un béton dont les caractéristiques ne sont pas uniformes en matière de perméabilité et/ou de porosité par exemple à cause de nids de cailloux, de la réalisation du bétonnage d'une pièce (face supérieure... ;
- des parties plus ou moins exposées à l'environnement agressif et aux polluants (par exemple, sur les parties quasiment horizontales, l'humidité favorise en plus le développement de micro-organismes générateurs d'attaques acides...).

Par voie de conséquence, le **développement de la corrosion n'est pas uniforme** dans la structure. Le long d'une armature, certaines parties jouent le rôle d'**anode** vouée à la dissolution et d'autres, le rôle de **cathode**.

3.4.6.3.4 Cas des réparations effectuées sans études préalables ou mal exécutées

ATTENTION, réparer une zone délaminée suite à une corrosion des armatures de béton armé causée par un défaut local d'enrobage ou un nid de cailloux, au moyen d'un mortier de réparation après avoir purgé le béton dégradé ainsi que la rouille des armatures mais sans **aucune investigation ni réflexion préalables**, comporte des risques :

- en effet, il peut se produire un déséquilibre entre le **pH du béton d'enrobage conservé et celui du mortier de réparation** pouvant entraîner, en présence d'humidité, l'amorçage d'une nouvelle corrosion dans les parties d'armatures adjacentes à la zone réparée. Il y a formation de **macro-cellules de corrosion** : l'armature au droit de la zone réparée joue alors le rôle de **cathode** et les parties de l'armature situées à proximité subissent le rôle d'**anodes** et sont le siège d'une nouvelle corrosion par **inversion de polarité** ;

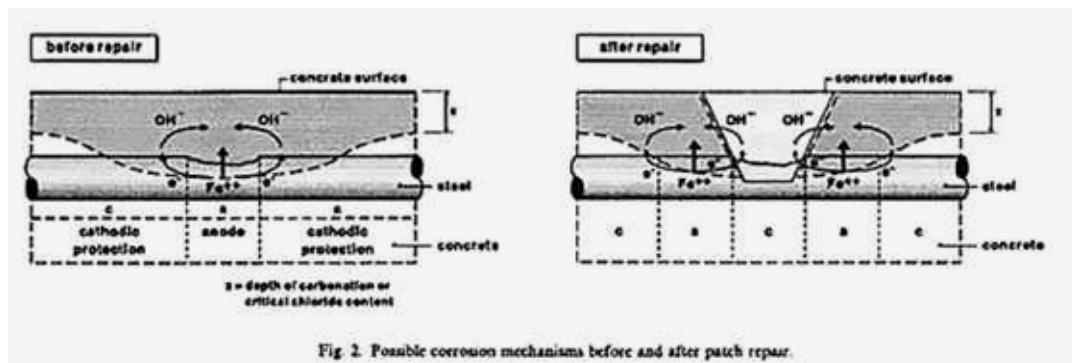


Figure n° 23 : formation de macro-cellules de corrosion après une réparation limitée à la zone anodique corrodée sans tenir compte de la pénétration d'agents agressifs dans le béton adjacent (extrait d'un article du Professeur Raupach de l'université d'Aix-la-Chapelle daté du 13 juillet 2006)

- de plus, l'interface entre le matériau de réparation et le béton existant, qui est une reprise de bétonnage sensible à la fissuration, peut fournir un chemin préférentiel de pénétration des agents agressifs (chlorures notamment). L'ampleur du phénomène de fissuration dépend de plusieurs facteurs défavorables :
 - une préparation du support trop énergique peut endommager l'adhérence entre les armatures et leur béton d'enrobage ;
 - un matériau de réparation peut avoir des propriétés physiques (résistance, adhérence et coefficient de dilatation) et/ou chimiques peu compatibles avec le béton existant, voire un retrait important favorise la fissuration, les décollements ;
 - une technique et/ou des conditions de mise en œuvre inadaptées de la réparation, par exemple : une mauvaise préparation du support, le non détournement complet des armatures, le barbouillage sans discernement d'un produit de protection (inhibiteur) sur les armatures et le béton, l'absence de cure... favorisent également la formation de fissures à l'interface entre le produit de réparation et le béton conservé ainsi que des défauts d'adhérence.

Dans ces cas, quelques années après la réparation, apparaissent de **nouveaux désordres** dus à la corrosion. La suite du guide précise les procédures à suivre pour limiter une réapparition trop rapide de ces phénomènes.



Photo n° 31 : constat d'une nouvelle corrosion quelques années après une réparation mal exécutée (crédit photo D. Poineau)

3.4.6.4 Méthodes de diagnostic et d'investigation

Se reporter à la fiche (D1-1) relative à la **corrosion du béton armé**. Le choix de la méthode de restauration ou de conservation de la passivité des armatures de béton armé à mettre en œuvre, impose de connaître la profondeur de pénétration des agents agressifs et/ou leur dosage...

> **Les investigations permettant d'y répondre portent sur tout ou partie des points suivants :**



Photo n° 32 : inspection détaillée du pont de la Caille 74 (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 33 : défaut d'enrobage, cause de la corrosion des armatures (crédit photo LRPC de Strasbourg)

- **le relevé des désordres apparents** (fissures, zones de coulures d'eau, éclatements de béton, délaminations, armatures apparentes...). Ce relevé peut se faire :
 - manuellement par l'inspecteur chargé de l'inspection ;
 - à l'aide de caméras à très haute définition combinées à un premier logiciel permettant d'obtenir un montage orthographique (2D) ou photogrammétrique (3D) et un second logiciel pour transformer les montages en plans,
 - à l'aide de caméras acoustiques à très haute-définition dans le cas d'inspections subaquatiques ;

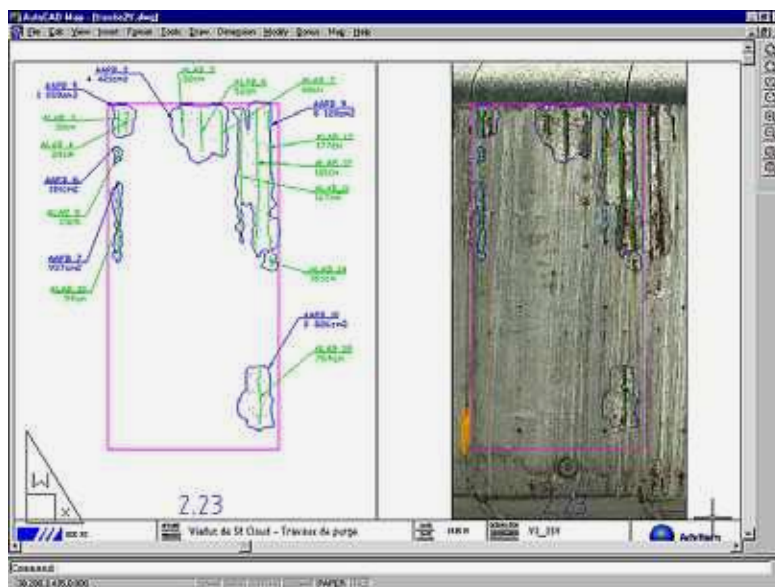


Figure n° 24 : photo initiale et transposition graphique (crédit photo Freyssinet)

- **la position, l'enrobage, voire le diamètre des armatures**, notamment dans les zones où la profondeur de carbonatation et/ou les teneurs en chlorures du béton sont à contrôler. Se reporter à la fiche **méthodologie de diagnostic (E-2-4)**. Les moyens de mesure usuels sont les suivants :
 - le pachomètre, profomètre et Ferroskan (détecteurs de métaux) (fiche B2-1),



Photo n° 34 : relevé de la position des armatures de béton armé avec un pachomètre (crédit photo D. Poineau)

- le radar (fiches C1-1 à C1-3),

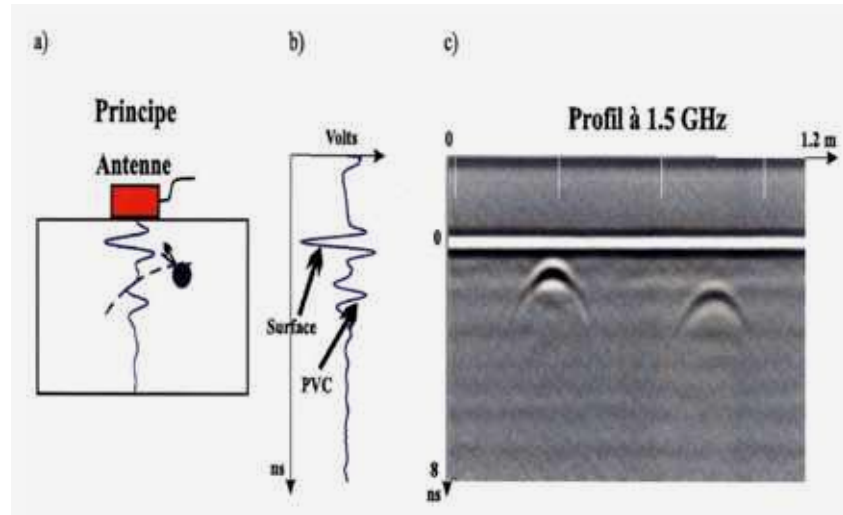


Figure n° 25 : principe de mesure du géo-radar (crédit photo Freyssinet)

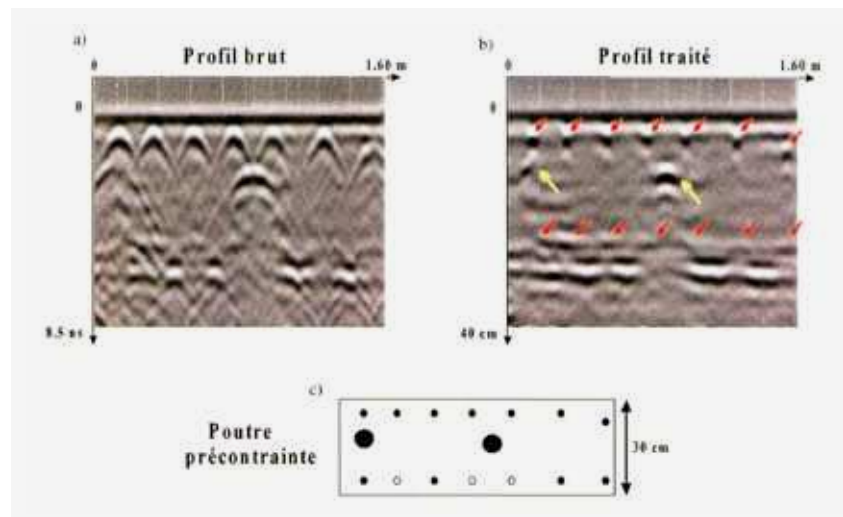


Figure n° 26 : résultat d'une mesure brute au géo-radar et après interprétation donnant la position des armatures de BA et de câbles de précontrainte (crédit photo Freyssinet)

- la radiographie et la radioscopie (rayons X) ou la gammagraphie (rayons γ) (fiche B5-1) ;

Note : la technique à utiliser dépend de la possibilité de mise en œuvre (par exemple, les contraintes de radioprotection peuvent être un obstacle à l'utilisation de la radiographie ou de la gammagraphie), de la profondeur d'investigation et de la précision souhaitées.

- la profondeur de carbonatation se mesure au moyen d'un réactif coloré conformément à la norme NF EN 14630 de février 2007 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphthaléine (essai n°11 de la norme NF EN 1504-10) (fiche B2-2) ;



Photo n° 35 : mesure de la profondeur de carbonatation (crédit photo Lerm)

- **la teneur en chlorures** se mesure en laboratoire sur des échantillons prélevés sur site sous forme de poudre ou de carottes. La mesure de la teneur en chlorures relève de la norme **NF EN 14629 de juillet 2007** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage du taux de chlorure d'un béton durci (essai n°12 de la norme **NF EN 1504-10**) (fiche B2-3). La mesure s'effectue à diverses profondeurs de manière à déterminer le profil des chlorures avec un dosage en fonction de la profondeur ;
- **la pénétration d'autres polluants**, par exemple, en cas d'agression chimique se mesure sur des prélèvements à effectuer sur place (poudre ou carottes) et les analyses se font en laboratoire (essais n°13 et 14 de la norme **NF EN 1504-10**) (fiche B2-3) ;
- **la réduction de la section et du diamètre des armatures corrodées** peut se mesurer au pied à coulisse. Cette mesure est nécessaire au recalcul de la capacité portante de la structure (essai n°17 de la norme **NF EN 1504-10**) ;
- **la corrosion des armatures passives** enrobées de béton peut être estimée par des sondages sonores, par un examen visuel après les avoir dégagées, par la **mesure du potentiel d'électrode** (essai n°18 de la norme **NF EN 1504-10**) (fiche B2-4). Se reporter à la **recommandation RILEM TC 154-EMC** ou à la norme **ASTM C 876-09**. Cette technique est souvent associée aux deux techniques suivantes :

ATTENTION, le risque de corrosion **ne peut pas être évalué simplement** par les valeurs obtenues lors des mesures à cause de la teneur en eau variable du béton. Ne pas utiliser les valeurs du tableau ci-après issu de l'ancienne norme **ASTM C-876-91**.

Potentiel de corrosion (électrode Cu/CuSO4) mesuré en mV	Probabilité de corrosion
$E > -200$	(< 10%) peu probable
$-200 > E \geq -350$	(~50%) corrosion incertaine
$-350 > E \geq -500$	(50 à 90%) corrosion très probable

Tableau n° 10 : tableau issu de l'ancienne norme **ASTM** **totale**ment obsolète

- la mesure de la résistivité électrique du béton qui indique le risque de corrosion et qui doit être connue par exemple pour la mise en œuvre d'une protection cathodique (essai n°15 de la norme NF EN 1504-10), (fiche B2-6), voir également la recommandation de la RILEM TC 154-EMC ;
- La mesure de la vitesse de corrosion (fiche B2-5) ;

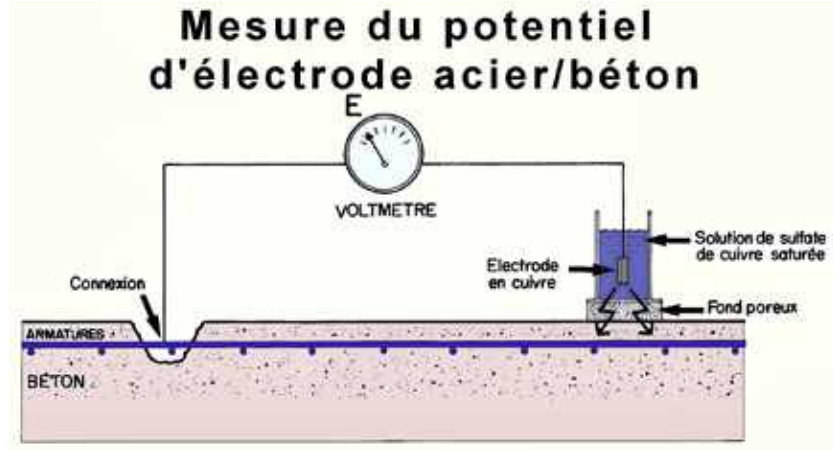


Figure n° 27 : principe de mesure du potentiel d'électrode

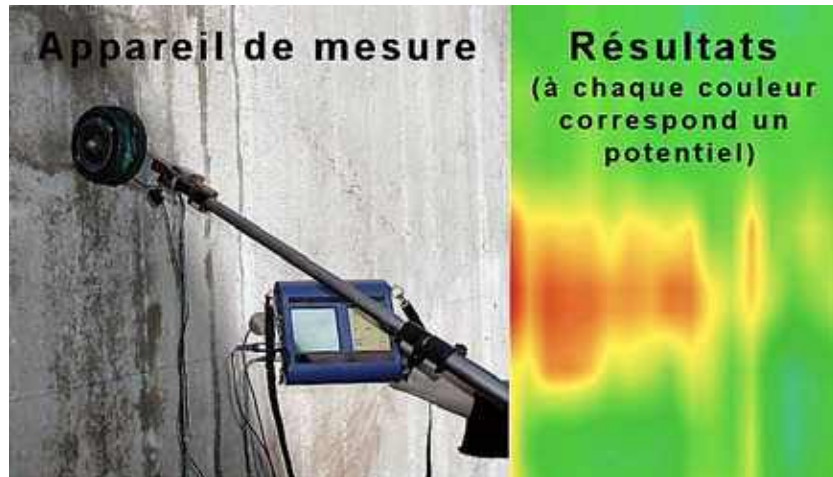


Figure n° 28 : résultats d'une mesure de potentiel (crédit photo CEBTP – G. Taché)

Les mesures de résistivité (apparente ρ_a) doivent être interprétées, avec beaucoup de précautions, comme suit :

Résistivité mesuré en Ωm	Probabilité de vitesse de corrosion importante
$\rho_a > 1\ 000-2\ 000$	Négligeable (béton trop sec)
$500 < \rho_a \leq 1\ 000$	Faible
$100 < \rho_a \leq 500$	Modérée à forte quand l'acier est actif (zones humides)
$\rho_a < 100$	La vitesse de corrosion n'est pas régie par la résistivité

Tableau n° 11 : probabilité de la vitesse de corrosion en fonction de la résistivité du béton

Les mesures de l'intensité du courant de corrosion doivent être interprétées, avec beaucoup de précautions, en utilisant les données du tableau ci-après. Ce tableau a été élaboré en utilisant la loi de Faraday donnant la masse de métal consommée lors d'une corrosion galvanique :

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot I \cdot t$$

La réduction annuelle de l'épaisseur « e » vaut :

$$m = \rho \cdot S \cdot \Delta e = \frac{A}{n} \cdot I \cdot t \text{ d'où } \Delta e = \frac{A}{n \cdot F \cdot \rho} \cdot t \cdot \frac{I}{S}$$

Avec :

ρ = masse volumique de l'acier (7800 kg/m³)

S = surface de la pièce (m²)

Δe = variation d'épaisseur de la pièce métallique sur une période de 1 an (m)

A = masse atomique du métal (55, 85x10⁻³ kg/mol)

n = valence (2 pour le fer Fe²⁺)

I = intensité du courant (A)

i = densité de courant en (A/m²)

t = 1 an = 3,1536x10⁷ secondes

F = constante de Faraday = 96 500

On en déduit :

$$\Delta e(m) = 0,001169 \cdot i(A/m^2)$$

$$\text{ou } \Delta e(mm) = 0,01169 \cdot i(\mu A/m^2)$$

Courant de corrosion mesuré en $\mu A/cm^2$	Vitesse de corrosion en mm/an	Niveau de corrosion
< 0,1	< 0,001169	Négligeable
0,1 < et ≤ 0,5	0,001169 < et ≤ 0,00585	Faible
0,5 < et ≤ 1	0,00585 < et ≤ 0,01169	Modérée
> 1	> 0,01169	Élevée

Tableau n° 12 : vitesse et niveau de corrosion en fonction de l'intensité du courant de corrosion

■ la mesure de l'humidité du béton peut être effectuée par divers moyens :

- un capteur capacitif (fiche C3-18),
- une bombe au carbure qui donne l'humidité massique (HM) d'un morceau de béton prélevé à au moins 4 cm de profondeur (annexe B du NF DTU 54.1 P1-1 de février 2018 : Travaux de bâtiment - Revêtements de sol coulés à base de résine de synthèse),
- une sonde hydrométrique qui donne l'humidité hygrométrique (HRE) du béton mesurée à au moins 5 cm de profondeur (annexe B du NF DTU 54.1 P1-1).

3.4.7 DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS DES STRUCTURES EN BÉTON SOUS LES EFFETS DE LA CORROSION DES ARMATURES DE PRÉCONTRAINTÉ¹⁰

3.4.7.1 Généralités

Dans une structure précontrainte, des désordres peuvent affecter le matériau béton (se reporter aux articles 3.4.4 et 3.4.5 ci-dessus), les armatures passives (se reporter à l'article 3.4.6 ci-dessus), voire la structure porteuse qui peut présenter des insuffisances de capacité portante (excès de charges, non prise en compte de certaines actions [gradients thermiques, poussées au vide, efforts concentrés...], erreurs de calcul, erreurs d'exécution...).

Le béton précontraint peut aussi subir les conséquences de la **corrosion de ses armatures actives**, c'est-à-dire une réduction de sa capacité portante qui peut aller dans les cas extrêmes jusqu'à l'effondrement de la structure.

> **Les armatures de précontrainte peuvent, en effet, subir deux types de corrosions :**

- **une corrosion classique dite par dissolution** analogue à celle des armatures de béton armé qui, progressivement, réduit la section résistante des armatures ;
- **une corrosion dite « fissurante sous tension »** qui entraîne à terme une rupture fragile des armatures.

> **La susceptibilité à la corrosion sous tension peut être due :**

- à la composition de l'acier (par exemple une teneur élevée en cuivre) ;
- au processus de fabrication (par exemple, les armatures laminées [il s'agit de productions anciennes] sont plus susceptibles que les armatures tréfilées) ;
- au processus de trempe (par exemple, les armatures trempées à l'huile sont plus susceptibles que les armatures trempées au plomb)...

ATTENTION, toute armature de précontrainte, même si elle est peu susceptible vis-à-vis de la corrosion fissurante sous tension compte tenu des essais spécifiques imposés par la certification, lorsqu'elle est soumise à **un contact permanent avec de l'eau** (par exemple, l'eau fossile issue de décantation du coulis d'injection et ce malgré son pH élevé de l'ordre de 12) peut être affectée par une corrosion de dissolution à laquelle se superpose **une corrosion fissurante sous tension** et se rompre brutalement.

Note : le phénomène a été observé dans les années 60. Ensuite, la Commission Ministérielle de la précontrainte (CMP) puis la Commission interministérielle de la précontrainte (CIMP) ont imposé des essais qui ont permis d'agréer à partir de 1974 les armatures de précontrainte avec ou sans réserve (classes A et B). En 1979, l'agrément est devenu avec ou sans limitation d'emploi (classes A et B). Pour les armatures de classe B, plus sensibles au phénomène, il était imposé une procédure spécifique de mise en œuvre avec le respect d'un délai maximal entre la mise en tension et leur protection par injection. Ces deux classes ont perduré pendant les années 80. Depuis 2006, en France, c'est l'Association pour la Qualification de la Précontrainte et des Équipements (ASQPE) créée en 2002 qui assure la certification des armatures.

¹⁰ Se reporter à l'ouvrage de l'AFGC « LA PÉRENNITÉ DU BÉTON PRÉCONTRAIT » paru aux Presses des Ponts en 2014.



Photo n° 36 : pont de Crévechamps, corrosion par dissolution d'armatures de précontrainte internes au béton (crédit photo LRPC de Strasbourg)



Photo n° 37 : fissures de corrosion fissurante sous tension sur un fil d'un toron (crédit photo LRPC du Bourget)

Dans le cas de la **précontrainte par pré-tension**, les causes de la corrosion sont analogues à celles qui provoquent la corrosion des armatures de béton armé (Carbonatation du béton, pénétration des chlorures...). Ces armatures peuvent être sensibles aux **deux phénomènes de corrosion**.

Dans le cas de la **précontrainte par post-tension** et lorsque l'injection des conduits a été réalisée à l'aide d'un **coulis à base de ciment**, il faut distinguer la **précontrainte intérieure au béton** et la **précontrainte extérieure au béton** avec des causes de corrosion qui peuvent être différentes :

■ **en précontrainte intérieure au béton, la corrosion peut être due :**

- à la présence d'agents agressifs dans les conduits :
 - soit sous forme d'eau fossile ; cette eau peut provenir, soit d'une chasse incomplète des eaux de lavage des conduits (opération interdite depuis les années 2000), soit d'une mauvaise purge de l'extrémité du conduit d'où sort le coulis, ou à un phénomène d'essorage du coulis par les torons dans les parties inclinées des conduits...,
 - soit sous forme d'une pâte blanchâtre et humide, cette pâte provient d'une décantation du coulis après l'injection due à une incompatibilité de ses constituants (ciment et adjuvants)...
- à la pénétration d'agents agressifs dans les conduits plus ou moins bien injectés :
 - soit par les ancrages (par exemple, mauvais remplissage des encoches des câbles relevés combiné avec des cachetages non étanches et une chape d'étanchéité défectueuse, ...),
 - soit par la surface du béton, en partie courante, à cause de la présence de défauts de bétonnage (vides ou nids de cailloux, fissures...).

■ **en précontrainte extérieure au béton protégée par un coulis de ciment, la corrosion peut être due :**

- à la présence d'agents agressifs dans les conduits comme en précontrainte intérieure au béton (pâte blanchâtre humide ou eau fossile). Les premiers cas de corrosion fissurante sous tension avec ruptures de câbles extérieurs ont été constatés dans les années 90 ;

Note : le phénomène d'essorage du coulis au travers des canicules entre torons est mis en lumière par l'essai de stabilité des coulis au tube incliné à 30° et de un mètre de longueur conformément à la méthode d'essai du n°64 d'avril 2007 des LCPC.

- à la pénétration d'agents agressifs à cause de conduits en PEHD endommagés (fissures longitudinales causées par un toron lors de son enfilage en cas de perte du doigt d'enfilage, soudures au miroir fissurées, manchons de raccordement dessoudés, événements non rebouchés...). Des corrosions locales importantes ont été récemment constatées comme le montre les photos ci-après.

Se reporter à la note n°3 de novembre 2018 éditée par le CEREMA : Note d'information ouvrages d'art – Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure.



Photo n° 38 : présence de la pâte blanche dans un conduit de précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment (crédit photo Services techniques de la Réunion)



Corrosion avancée du câble avec rupture de fils



Endommagement de gaine au droit d'un déviateur

Photo n° 39 : extrait de la note d'information n°3 de novembre 2018 du CEREMA

3.4.7.2 Manifestation des désordres et dégradations

> Cas des armatures de précontraintes pré-tendues :

Les armatures étant enrobées dans le béton, la corrosion se produit comme pour les armatures de béton armé dès que les agents agressifs arrivent à leur contact. Il se produit ensuite des **délaminages**, puis la **chute de morceaux de béton**. Il est possible de dire que la **corrosion prévient** sous réserve que la surveillance de l'ouvrage soit assurée correctement.

> Cas des armatures de précontrainte post-tendues intérieures au béton :



Photo n° 40 : fissuration d'une poutre isostatique en béton précontraint (crédit photo LRPC d'Aix-en-Provence)

Les conduits étant enrobés par le béton de la structure, la corrosion peut se développer insidieusement sans signes avertisseurs jusqu'au jour où des fissures structurales de flexion ou d'effort tranchant apparaissent. Parfois, c'est la **rupture brutale de l'ouvrage** qui révèle le phénomène.

Les risques de rupture sont plus importants lorsque la structure précontrainte ou un de ses parties peut être considérée comme **fragile** (exemples : consoles courtes, tabliers comportant une seule, voire deux poutres isostatiques, armatures de précontrainte équilibrant des réactions négatives, faible ferrailage passif ...) à fortiori lorsque les défauts d'injection des conduits sont généralisés car il n'y a pas de possibilité de réancrage des fils ou des torons dans le coulis.

La bonne connaissance de l'ouvrage (type de structure, période de construction...) et l'apparition de divers défauts (traces de calcite, circulations d'eau, mortier de protection des ancrages décollé...) peuvent conduire le **gestionnaire de l'ouvrage** à organiser une **inspection détaillée et des investigations spécifiques** qui peuvent permettre de confirmer l'existence d'une corrosion.

Note : il y a lieu de rappeler que la précontrainte des ouvrages calculés avec les règles de calcul de 1953 et 1965 était une « précontrainte totale » c'est-à-dire que les tractions n'étaient pas admises. En conséquence, le ferrailage passif avait juste pour objet d'éviter les fissures de retrait avant la mise en précontrainte. Si les sollicitations réelles dépassent les sollicitations prise en compte dans le projet ou si la précontrainte devient insuffisante (pertes trop importante, rupture de fils, de torons ou de câbles) l'élément précontraint concerné subit une fissuration importante, des déformations excessives, voir une rupture pouvant être brutale.

Pour les ponts en béton précontraint, il est possible de s'appuyer sur le **fascicule n°32 de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO)** et les guides de la **méthode IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art)** qui décrivent les différents désordres que peuvent présenter ces ouvrages et, en particulier, ceux qui peuvent être le signe d'une corrosion de leurs armatures.



Photo n° 41 : trace de calcite sous le talon d'une poutre d'un VIPP (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 42 : ancrage sans protection (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 43 : défaut de bétonnage sous le talon d'une poutre préfabriquée constaté après un sondage au marteau (crédit photo LRPC de Strasbourg)

> Cas des armatures de précontrainte post-tendues extérieures au béton et protégés par un coulis de ciment :

La présence d'eau fossile ou de pâte blanche humide, voire de gaines en PEHD endommagées provoque la corrosion des fils de torons puis leur rupture progressive. La tension dans le toron concerné ne diminue pas puisque les fils se réancrent du fait du toronnage. Lorsque, théoriquement, 20% des fils se sont rompus, la contrainte dans les fils encore intacts atteint leur contrainte de rupture mais le toron rompu se réancrage dans le coulis durci situé à proximité de la zone de corrosion : la tension du câble n'est donc pas modifiée. Ensuite, lorsque, environ, 20% des torons se sont rompus, la contrainte dans les torons intacts atteint leur contrainte de rupture : le câble se rompt alors brutalement en libérant toute l'énergie qu'il avait accumulée à sa mise en tension aux pertes de tension déjà effectuées près.

Note : la rupture de fils d'un toron entraîne des excentricités donc des surtensions dans les autres fils. Le ratio des 20% de ruptures est donc uniquement une image permettant de visualiser le processus. La formule donnant l'énergie libérée lors de la rupture figure ci-après dans l'article 3.5.7.

La photo ci-après se passe de commentaires. Le croquis suivant explicite les causes de cette rupture à savoir la présence « d'eau fossile » à proximité de l'ancrage due à la décantation du coulis et une mauvaise réalisation de l'injection.



Photo n° 44 : le fouettement du câble, ici un 12T15, est la conséquence de la rupture par corrosion de cette armature de précontrainte extérieure (crédit photo D. Poineau)

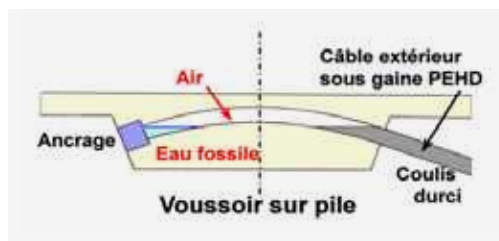


Figure n° 31 : « eau fossile » cause de la rupture

Compte tenu des **risques de graves dommages corporels** pour le **personnel chargé de la gestion de l'ouvrage** et des **risques de destruction des matériels et réseaux existants** dans l'ouvrage, depuis quelques années, les deux techniques suivantes sont couramment mises en œuvre et remplacent les injections au coulis de ciment des conduits de précontrainte extérieure :

- **l'injection à la cire pétrolière des conduits.** Dans ce cas, si un toron se rompait, il ne pourrait se réancrer. Théoriquement, la tension du câble diminuerait au fur et à mesure de la rupture des autres torons constituant le câble. À ce jour, ce phénomène n'a pas été constaté (la cire protège contre la corrosion et ne contient pas d'humidité sous réserve de l'intégrité des gaines en PEHD). L'énergie développée par la rupture d'un seul toron est sans commune mesure avec celle due à la rupture d'un câble constitué de plusieurs torons, voire de plusieurs dizaines de torons. De plus, conformément au **fascicule 65 du CCTG**, les torons sont obligatoirement logés dans un conduit dont la résistance est suffisante pour empêcher le fouettement du toron rompu ;
- **l'utilisation de torons gainés—protégés disposés** dans un conduit injecté au coulis de ciment avant leur mise en tension. Le coulis de ciment empêche les torons de frotter les uns contre les autres ce qui peut détruire leur gaine. De plus, le gainage protège le toron du contact avec le coulis.

3.4.7.3 Méthodes de diagnostic d'investigation

L'évaluation de la tension d'une armature de précontrainte (intérieure ou extérieure) relève de la fiche de **méthodologie de diagnostic (E-2-5)**.

> Cas des armatures de précontraintes pré-tendues :

Les armatures de précontrainte étant au contact direct du béton comme celles de béton armé, il est possible d'utiliser les méthodes d'investigation de l'article 3.4.6.4 ci-dessus et celles relative à l'évaluation qualitative des armatures visées ci-après lors de l'ouverture de fenêtres dans le béton.

> Cas des armatures de précontraintes post-tendues internes au béton :

Les fiches de méthodologie de diagnostic **(E-2-7)** et **(E-2-8)** ainsi que le guide méthodologique d'avril 2000 et octobre 2001 relatif à la surveillance et à l'auscultation des **Viaducs à Travées Indépendantes à Poutres Précontraintes (VIPP)** explicitent les différents méthodes qui peuvent être utilisées pour, en premier, évaluer qualitativement les armatures puis, en second, pour quantifier la capacité portante résiduelle de l'ouvrage. Il s'agit par exemple de :

- la radiographie, la radioscopie et la gammagraphie déjà évoquées (fiche B5-1) permettent de connaître mais uniquement au niveau des emplacements des clichés :
 - la présence ou l'absence de coulis de ciment dans les conduits de précontrainte,
 - la conformité ou non du tracé des conduits aux plans d'exécution,
 - une éventuelle rupture de fils ou de torons,
 - la conformité ou non du ferrailage passif ;

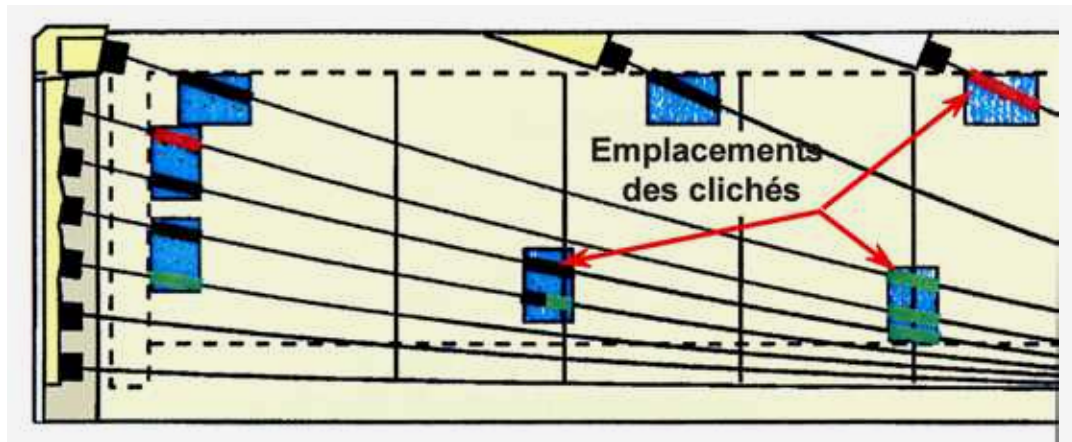


Figure n° 32 : plan de câblage d'une poutre et emplacement des clichés (Extrait du guide méthodologique susvisé)

Note : lorsque le cliché concerne un câble situé dans un plan vertical comme l'âme d'une poutre, l'interprétation du cliché est relativement facile : un manque partiel de coulis apparaît en noir et le câble en blanc comme sur la photo suivante. Au contraire, si le câble se trouve dans un plan horizontal comme une dalle, l'interprétation est plus délicate : les noirs et les blancs sont atténués et les limites des changements de teinte sont rapprochées sur les bords de l'image du conduit. De plus, l'interprétation des clichés est impossible dans les zones d'entassement de câbles comme les goussets, les talons des poutres...

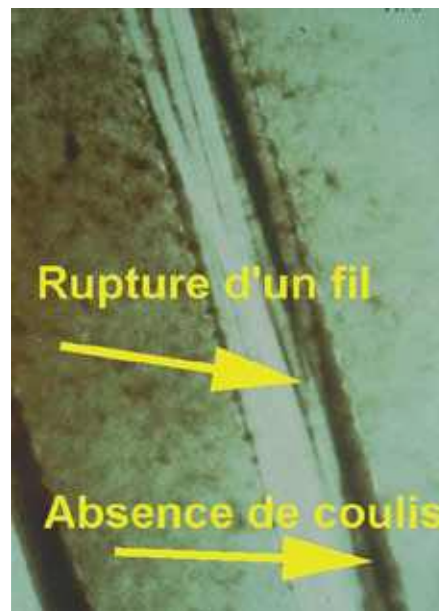


Photo n° 45 : cliché radiographique d'un câble de précontrainte (crédit photo LR)

- l'utilisation d'un endoscope (fiche C1-5) à introduire :
 - par l'évent d'injection au niveau de la tête d'ancrage si celle-ci est accessible (ancrages capotés) et en l'absence de coulis dans cette zone,
 - dans un conduit de précontrainte mal injecté ;



Photo n° 46 : fenêtre montrant l'absence de coulis et la corrosion des torons (crédit photo LR)

- l'ouverture de fenêtres (opération délicate et complexe) qui permettent de constater :
 - l'état des conduits (oxydation ou non),
 - la présence ou non du coulis et son état par son niveau de compacité, de fissuration d'humidité,
 - **l'état des armatures de précontrainte**, qui peuvent être saines sans aucune trace de rouille ou affectées :
 - d'un simple enrrouillage qui disparaît lorsqu'on brosse ou frotte l'armature,
 - par des piqûres, qui, si elles sont entourées de taches noires, évoluent vers la corrosion sous tension ou qui, si elles sont de couleur rouge, évoluent vers une corrosion par dissolution,
 - par des cratères qui marquent une perte de section,
 - par une corrosion généralisée,
 - par une corrosion sous tension (fissures et/ou ruptures).



Photo n° 47 : piqûres avec taches noires symptômes d'une corrosion fissurante sous tension (extrait du guide technique VIPP du LCPC d'octobre 2001)

Ces ouvertures permettent aussi de faire divers prélèvements et analyses (se reporter au guide) et **l'utilisation d'un endoscope** (fiche C1-5) pour examiner l'état des armatures de part et d'autre de l'ouverture si le conduit, dans cette zone, est vide de coulis.

- la mesure de la tension des armatures par des essais à l'arbalète (fiche C4-3),
- la mise en œuvre d'une surveillance acoustique (fiche B5-3) pour comptabiliser les ruptures de fils ou de torons en attendant la fin des études, la prise de décision et le lancement des travaux de réparation ...

> Cas des armatures de précontraintes post-tendues extérieures au béton :

Les conduits, le plus souvent **en polyéthylène à haute densité (PEHD) sont visibles sauf au droit des zones de déviation et d'ancrage**, il est donc possible de constater des défauts des conduits : fissures, ruptures de soudures entre tronçons, gonflements... donc les emplacements de défauts potentiels des armatures. Se reporter à la fiche de **méthodologie de diagnostic (E-2-4)**. Parmi les techniques d'investigations utilisées, il y a lieu de citer :

- le sondage au marteau qui peut permettre de repérer des zones où le coulis d'injection manque,
- l'ouverture des capots d'ancrage qui peut permettre de constater la présence « d'eau fossile », l'absence de coulis, la corrosion des armatures
- la mesure de l'humidité contenue dans le coulis d'injection à l'aide d'un capteur capacitif (fiche B5-2) ce qui permet de repérer les zones où peuvent alors être effectués des ouvertures de fenêtres dans les conduits,
- la détection de l'humidité contenue dans le coulis d'injection à l'aide d'une caméra infrarouge,
- l'ouverture de fenêtres dans les conduits (opération relativement facile avec un fer à souder) qui permettent de constater l'état du coulis et des armatures,
- l'utilisation d'endoscopes facilite l'examen de l'état des armatures, d'une part, à l'arrière des ancrages si cette zone est vide de coulis et, d'autre part, à proximité des fenêtres ouvertes dans les conduits,
- la mesure de la tension des câbles injectés au coulis de ciment par leur mise en vibration (fiche C4-2),
- la mise en œuvre d'une surveillance acoustique (fiche B5-3) pour comptabiliser les ruptures de fils ou de torons comme pour les armatures de précontrainte intérieures au béton.

Deux nouvelles techniques d'investigation prometteuses ont récemment été mises en œuvre et présentées lors de la journée IMG (Ingénierie de Maintenance du Génie Civil) du 27 septembre 2019. Il s'agit :

1. **du contrôle non destructif par une méthode magnétique** de la précontrainte extérieure en **partie courante** (hors déviateurs et bossages ou massifs d'ancrage) **et sous manchons**. Cette méthode est adaptée des deux méthodes d'investigation d'un câble monotorons multicouches (câble utilisé dans certains ponts suspendus et à haubans) :
 - B5-4 : évaluation du degré d'oxydation,
 - B5-5 : évaluation des défauts de section ;

Ce procédé développé par le **CEREMA** permet de détecter : des pertes de section à partir de 1%, des zones d'initialisation de corrosion mais ne donne pas la valeur exacte de la perte de section.

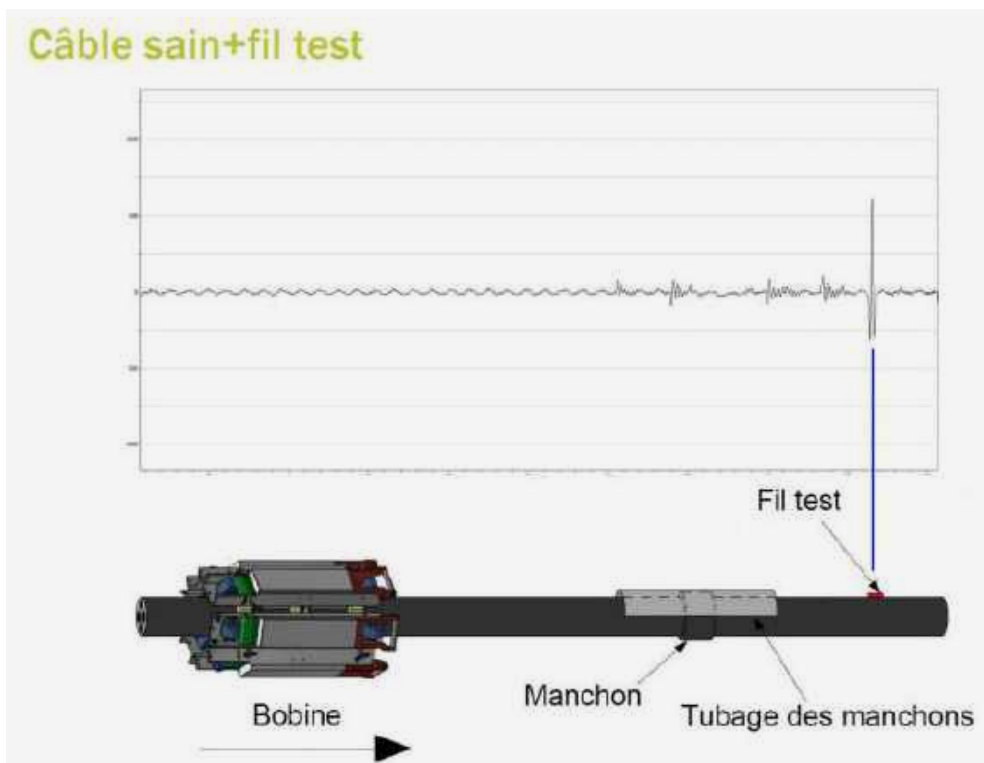


Figure n° 33 : principe du procédé (crédit photo Cerema Centre-Est et Sud-Ouest)

2. du contrôle de l'état des têtes d'ancrage et des fils rompus par réflectométrie d'ondes ultrasonores guidées (procédé USCAN ® SIXENSE/IFSTTAR). Ce contrôle est effectué sur chacun des fils des différents torons constituant le câble et la profondeur d'investigation est d'environ 2 m dans une zone où le câble est noyé dans un bloc de béton donc inaccessible.

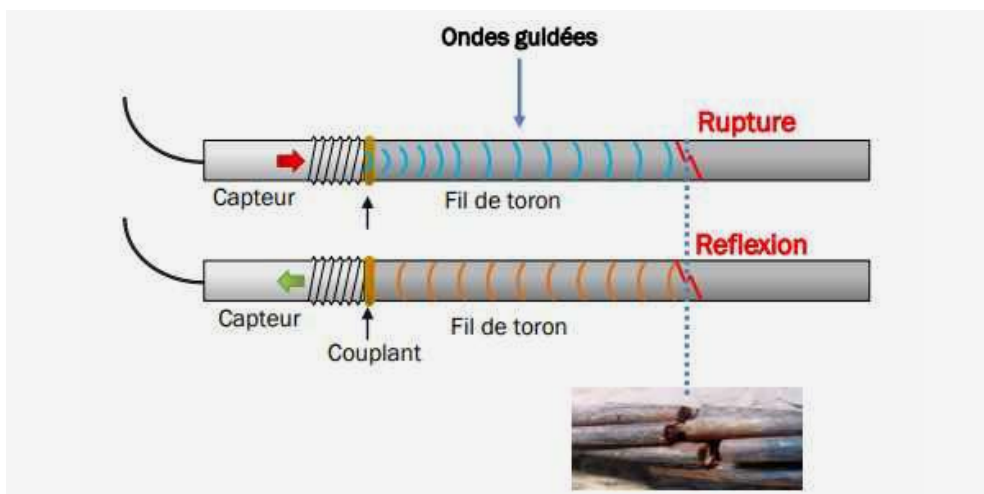


Figure n° 34 : principe du procédé (crédit photo procédé USCAN SIXENSE-IFSTTAR)

3.4.8 FACTEURS AGGRAVANTS

Il s'agit des cas de **désordres et dégradations à caractère structural** dus à des erreurs de conception, de calcul, d'exécution et de gestion, à des actions accidentelles non prises en compte lors de la conception, voire à des erreurs lors de travaux de réparation ou de renforcement

Le présent article, **loin d'être exhaustif**, liste diverses causes pouvant entraîner des **désordres structuraux** qui peuvent se superposer aux **désordres que peuvent subir les matériaux** engendrés par des attaques physiques ou chimiques susvisées. Ces désordres structuraux peuvent aussi bien concerner des ouvrages existants que des ouvrages réparés ou renforcés.

Rappel : de tels désordres nécessitent une **expertise** afin d'aboutir à un diagnostic, une évaluation de la capacité portante résiduelle et à un projet de réparation, voire de remplacement. Les investigations à mettre en œuvre sont fonction des désordres constatés et de leurs causes probables. De plus, il peut être nécessaire de rechercher si la **responsabilité des différents acteurs** est engagée.

Il est possible de s'appuyer sur les fiches relatives aux **méthodologies de diagnostic** déjà citées et aux **fiches (E-2-3) et (E-2-6)**.

3.4.8.1 Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs de conception

> **Peuvent être en cause :**

- les règles de charges et de calcul qui peuvent présenter des insuffisances comme la non-prise en compte de certaines actions (cas des gradients thermiques dans les structures en BP avant 1975),
- des dispositions constructives contestables...,
- le choix de structures inutilement complexes,
- la sous-estimation de l'agressivité de l'environnement,
- la non-prise en compte de « **l'effet d'échelle** » par le projeteur, c'est-à-dire, lorsque la conception de la structure sort du domaine d'emploi visé par les règles de calcul usuelles (géométrie inhabituelle, matériaux nouveaux, armatures de précontrainte de très forte puissance, phénomènes habituellement négligés mais qui peuvent s'avérer prépondérants...),
- une modélisation de structure inadaptée pouvant conduire à sous-estimer l'importance des sollicitations (par exemple, dans des calculs aux éléments finis), voire des erreurs de calcul,
- la non-prise en compte des tolérances d'exécution dans le calcul des sollicitations,
- la tentation de faire travailler la matière au maximum de ses possibilités ce qui conduit à des structures étriquées, qui s'avèrent difficiles à réaliser sans défaut, donc plus sensibles au vieillissement et à l'agressivité du milieu environnant,
- la conception d'un ferrailage mal optimisée avec :
 - des entassements d'armatures qui conduisent à des difficultés de bétonnage et des défauts d'enrobage,
 - des recouvrements de barres tous dans la même section qui fragilisent la structure,
 - etc.



Photo n° 48 : non prise en compte des effets de diffusion des efforts concentrés sous les ancrages et de l'effet d'échelle dans ce pont-dalle à nervure étroite et très larges encorbellement et, de plus biais (crédit photo D. Poineau)

3.4.8.2 Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs d'exécution

- le choix de matériaux inadaptés à l'environnement et aux conditions climatiques favorisant par exemple : la gélivité du béton ou des alcali-réactions,
- la mauvaise formulation du béton qui engendre :
 - des réactions sulfatiques internes,
 - une porosité et une perméabilité trop élevées facilitant ainsi la pénétration des agents agressifs,
 - des canaux de ressuyages sur les parements...
- la mise en œuvre de matériaux dont les caractéristiques mécaniques diffèrent de celles prise en compte dans la note de calculs (par exemple : un coefficient de fluage du béton nettement supérieur à la normale),
- les difficultés de mise en œuvre du béton engendrées par une mauvaise conception du ferrailage,
- les défauts de calage des armatures, la déformation des armatures sous le poids des ouvriers... entraînant le non-respect des enrobages des armatures,
- la mauvaise réalisation des coffrages, qui entraîne des fuites de laitance (nids de cailloux), des déplacements des armatures (insuffisances d'enrobage), des hors-profils et divers autres défauts ou des blocages s'opposant aux premiers retraits,
- les mauvaises conditions de transport du béton frais, en particulier par temps chaud, qui favorise, notamment, la ségrégation et le raidissement précoce,
- la mauvaise mise en œuvre du béton, qui peut provoquer des défauts d'homogénéité, une ségrégation et des défauts de bétonnage,
- la mauvaise réalisation de l'injection de conduits de précontrainte,
- le décoffrage sans précaution et/ou mauvaise manutention d'éléments de béton préfabriqués, qui peut entraîner des épaufrures, des fissures et des ruptures,
- la mauvaise réalisation de la couche d'étanchéité, qui favorise la pénétration des agents agressifs,
- etc.



Photo n° 49 : rupture par corrosion d'une armature de précontrainte extérieure au béton engendrée par la présence « d'eau fossile » liée à une injection mal exécutée (crédit photo D. Poineau)

3.4.8.3 Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs de gestion

- mauvaise organisation de la surveillance des ouvrages,
- absence d'entretien préventif, en particulier de tous les éléments qui permettent de maîtriser l'action des eaux sur les structures (chape d'étanchéité, systèmes de drainage...),
- augmentation des charges permanentes (par exemple : sur un pont, le rechargement de la couche de roulement sans un rabotage préalable, augmentation des charges permanentes pour satisfaire les besoins de certains concessionnaires de voirie...),
- non-prise en compte de l'évolution des **charges d'exploitation** qui deviennent de réelles surcharges,
- etc.



Photo n° 50 : conséquences de l'absence d'une étanchéité sous trottoir et d'une non-réfection de celle-ci en temps utile (crédit photo D. Poineau)

3.4.8.4 Désordres et dégradations à caractère structural causés par des actions accidentelles non prises en compte lors de la conception

De nombreuses actions peuvent entraîner des **désordres mécaniques** dans une structure en béton armé ou précontraint en service avec apparition de fissures, fractures, épaufrures, **ruptures partielles ou totales** d'éléments, ou de la totalité de la construction.

Certains désordres sont d'origine **accidentelle** bien qu'un ouvrage doit, normalement, avoir été conçu pour résister aux **actions accidentelles prévisibles** (existence et intensité) pendant sa construction et pendant son existence. Cependant, une action accidentelle :

- pouvait être inconnue à l'époque de la réalisation de l'ouvrage, c'est souvent le cas des ouvrages anciens ;
- peut avoir de nos jours une intensité beaucoup plus importante qu'à l'époque de la réalisation de la construction (majoration des effets du vent par effet venturi dus à des modifications du terrain avec la réalisation de constructions créant des obstacles importants, modification des règles parasismiques...)
- a pu être négligée du fait d'une probabilité infime de se produire (choc de bateau sur une pile située en dehors de la passe navigable) ;
- a pu ne pas être prise en compte volontairement à cause du surcoût que cela entraînerait...

La liste suivante, non limitative, donne les actions accidentelles les plus courantes pouvant affecter des ouvrages en service, celles qui peuvent se produire en cours de construction ne sont pas traitées :

- les chocs (véhicules lourds, bateaux, contre les ouvrages d'art (appuis et tabliers), voire sur certains bâtiments ;
- les effets des éboulements rocheux, des avalanches, des glissements de terrain... ;
- les effets de phénomènes naturels tels que les crues, le vent, les séismes, les raz-de-marée ;
- les explosions et les incendies ;
- les tassements de fondations lors de travaux à proximité d'un ouvrage ;
- etc.



Photo n° 51 : conséquences sur le tablier d'un pont du choc de bateau n'ayant pas respecté le gabarit de navigation (crédit photo du CÉTÉ de Lyon)

3.4.8.5 Désordres et dégradations à caractère structural causés par des erreurs lors de travaux de réparation ou de renforcement

Des désordres peuvent se produire lors de travaux de réparation ou de renforcement d'une structure existante. Les causes de ces erreurs peuvent être liées, comme pour les ouvrages neufs, à la conception ou aux travaux. Deux types de causes classiques sont à souligner :

- l'absence ou l'insuffisance des **investigations** lors des études préalables, en particulier, sur les fondations anciennes ;
- le non-respect des **procédures** lors des travaux.

Les désordres peuvent se manifester immédiatement pendant les travaux comme le montrent les figures et photos ci-après ou, au contraire, apparaître plusieurs années après la fin des travaux.

C'est souvent le cas lorsque les réparations concernent le traitement d'armatures de béton armé corrodées. En effet, des réparations effectuées sur des parties de structures présentant des désordres dus à la corrosion sans études préalables ou mal exécutées ont une durée de vie réduite et les désordres et dégradations vont de nouveau se manifester et peuvent avoir un **caractère structural** (se reporter à l'article 3.4.6.3.4 ci-dessus).

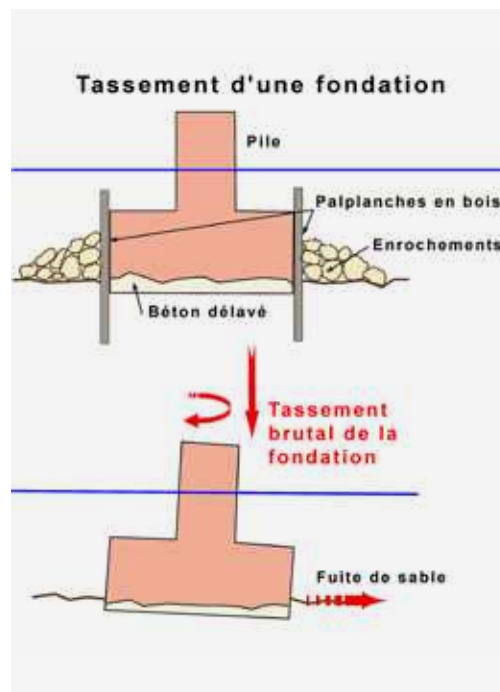


Figure n° 35 : tassement d'une fondation ancienne supposée sur pieux faute d'investigations lors du remplacement des palplanches en bois



Photo n° 52 : conséquences structurales sur le tablier (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 53 : procédure de sciage d'une partie d'un encorbellement d'un pont en béton précontraint non portée à la connaissance du chargé de l'opération (Crédit photo D. Poineau)



Photo n° 54 : conséquences 6 câbles de précontrainte sectionnés dans la poutre de rive (crédit photo D. Poineau)

3.5.1 GÉNÉRALITÉS

Les articles 3.4.3 à 3.4.8 ci-devant ont explicité les **principales causes de dégradation** des structures en béton. Le présent article présente les **principales méthodes de réparation, renforcement et protection** à mettre en œuvre pour remédier à un **désordre identifié** parmi ceux susvisés. Les solutions présentées sont basées sur la **cause des désordres** mais aussi sur leur **importance quantifiée par les investigations**.

Avertissement : si les **causes (origines) des désordres** conditionnent normalement le choix de la ou des **méthodes de réparation, renforcement et/ou protection** à mettre en œuvre, **l'importance des désordres, le coût des travaux et les exigences du maître de l'ouvrage** jouent également dans ce choix. Il appartient donc au **concepteur du projet de la réparation** de faire la synthèse de toutes ces contraintes pour proposer la ou les **solutions optimales et parfois, la démolition-reconstruction**.

Cette partie du présent document, qui décrit les **solutions de réparation, renforcement et protection**, doit être considérée comme un **guide et non comme un livre de recettes prêtes à l'emploi**. Elle n'a pas pour but de se substituer au **concepteur du projet de réparation** dont l'action est indispensable pour finaliser une solution de réparation efficace et durable sachant qu'une structure peut présenter des désordres dus à **plusieurs causes dont les effets se combinent** comme le montre l'exemple ci-après :

*Prenons le cas d'une pile d'un pont en béton impactée par un **choc accidentel** suivi d'un **incendie de moyenne importance**. Les investigations mises en œuvre pour évaluer l'importance des dégâts causés par le choc et l'incendie peuvent également montrer que les **armatures de la pile présentent une corrosion avancée** causée par les **projections d'eau chargée en sels de déneigement** dues au trafic routier. Dans un tel cas, la réparation devra combiner **plusieurs des techniques de réparation explicitées ci-après**. Éventuellement, si les désordres combinés sont très importants, la réparation sera à comparer à une **solution de démolition reconstruction**. **Le rôle du concepteur reste donc fondamental**.*

Il est absolument nécessaire que les **études préalables** à l'origine d'un **projet de réparation ou de renforcement** aient permis de s'assurer qu'une telle opération est réalisable techniquement et financièrement et assurera la **durée d'utilisation du projet** souhaitée par le **maître de l'ouvrage** pour que le **marché** impose le dit **projet**.

Il est à noter qu'une même méthode de réparation (au sens de la **norme NF EN 1504-9**) comme par exemple : la mise en œuvre de mortier ou de béton manuellement ou mécaniquement, peut être utilisée pour pallier aux désordres d'un élément en béton dus à différentes causes comme par exemple : une délamination engendrée par une corrosion locale d'armatures de BA, une érosion superficielle, un choc....

Il est donc possible d'affirmer que la **méthode de réparation**, qui porte sur **l'ajout de mortier ou de béton et/ou le remplacement du béton existant endommagé ou pollué**, doit être considérée comme **fondamentale** car elle permet de satisfaire en grande partie aux principaux **principes** visés par la **norme NF EN 1504-9** (se reporter au Tableau n° 2 ci-devant). En effet, elle s'applique lors :

- de la restauration du béton d'un élément d'une structure (principe 3) ;
- du renforcement structural de ce même élément (principe 4) ;
- de l'augmentation de résistance physique ou chimique de ce même élément (principes 5 et 6) ;
- de la préservation et la restauration de la passivité des armatures de ce même élément (principe 7).

Cependant, cette **méthode de réparation par ajout ou remplacement de mortier ou béton** doit normalement être combinée à diverses opérations préalables :

- l'élimination du béton désorganisé, pollué ou carbonaté ;
- le remplacement des armatures endommagées et déformées ;
- l'ajout des armatures éventuellement nécessaires (armatures principales, secondaires et de couture) ;
- la préparation puis le nettoyage du support béton pour rendre le support adhérent et éliminer poussières et salissures avant de pouvoir ajouter le mortier ou le béton ;
- l'élimination de la rouille des armatures ;
- le traitement, si besoin est, des armatures apparentes contre la corrosion ;
- dans certains cas, la mise en œuvre d'une barbotine ou d'une colle pour augmenter l'adhérence du produit de réparation ;
- etc.

Note : les méthodes de préparation du support béton et des armatures sont développées à l'article 5.2 ci-dessous.

Dans certains cas peut être nécessaire la mise en place d'un **étalement** pour assurer la sécurité de la structure (par exemple : enlèvement du béton sur de fortes épaisseurs, dégagement des armatures sur de grandes longueurs ...).

L'ajout de mortier ou de béton ou le remplacement du béton existant désorganisé ou pollué peut être complété par d'autres **méthodes de réparation** ou de renforcement, comme le collage d'armatures en matériaux composites, la mise en œuvre d'armatures actives additionnelles, la mise en place d'une protection cathodique...

Certaines structures présentant des désordres structuraux n'ont pas besoin d'un ajout de mortier ou de béton ou d'un remplacement du béton désorganisé ou pollué mais nécessitent une injection de leurs fissures, le collage d'armatures en matériaux composites, la mise en œuvre d'armatures actives additionnelles... dans le cadre d'un **renforcement structural** (principe 4).

Note de rappel : le présent **GUIDE** développe essentiellement la **restauration du béton** (principe 3), le **renforcement structural** par ajout de mortier ou béton et d'armatures passives (principe 4) et la **préservation ou la restauration de la passivité des armatures** (principe 7). Il détaille également des méthodes de réparation ou de renforcement, qui ne sont pas traitées dans les autres guides de la collection **FABEM** comme la protection cathodique... Bien entendu, il renvoie aux **autres guides FABEM** lorsque les désordres constatés sur une structure en béton le nécessitent.

Contrairement à la **norme NF P95-101**, qui ne traite que des **réparations de surface**, c'est-à-dire limitées à la couche de béton d'enrobage des premiers lits d'armatures (moins d'une dizaine de centimètres), le **présent GUIDE** traite des **réparations à caractère structural**.

Une fois la **réparation** (ou le **renforcement**) d'éléments en béton d'une structure achevée, il peut être nécessaire :

- de mettre en œuvre un **revêtement de protection** sur l'élément ayant fait l'objet de la réparation, voire sur l'ensemble de la pièce afin d'assurer une **protection contre toute pénétration** (principe 1) et/ou de supprimer l'aspect « **peau de léopard** » inesthétique en cas de « **ragréages** » discontinus ;
- de protéger la structure contre les **effets des eaux** de pluie et de ruissellement (réparation ou remplacement de la chape d'étanchéité, remise en état des dispositifs de drainage...) qui relèvent d'opérations non visées par la **norme NF EN 1504-9**.

Le tableau ci-après rappelle la correspondance entre normes françaises de la série **NF P95-100** relatives aux méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages en béton et les guides du **STRRES** de la série **FABEM**.

Normes NF P95-100	Guide du STRRES
NF P95-101 (réparations de surface des bétons)	FABEM 1 et FABEM 7
NF P95-102-1 (mortier et béton projeté)	FABEM 1 et FABEM 5
NF P95-103 (traitement des fissures et protection du béton)	FABEM 1, FABEM 2, FABEM 3 et FABEM 4
NF P95-104 (spécification relatives à la technique de précontrainte additionnelle)	FABEM 1 et FABEM 8
NF P95-105 (réparations par composites collés en projet)	FABEM 1 et FABEM 5

Tableau n° 14 : correspondance entre les normes de la série **NF P95-100** et les **GUIDES FABEM**

> **Les différentes méthodes de réparation, renforcement et protection visées ci-après concernent les cas suivants :**

- désordres et dégradations des bétons dus à des défauts mineurs d'exécution ;
- désordres et dégradations des bétons d'origine physique dus aux effets :
 - du gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage,
 - d'un incendie,
 - des différents retraits
 - de l'érosion et des chocs répétés ;
- désordres et dégradations des bétons d'origine chimique externe dus aux effets :
 - des eaux pures et acides,
 - des eaux alcalines,
 - des solutions salines ou de certains sols,
 - de l'eau de mer,
 - d'attaques biochimiques,
 - d'attaques d'autres agents agressifs ;
- désordres et dégradations des bétons d'origine chimique interne dus aux effets :
 - de l'alcali réaction,
 - des réactions sulfatiques internes ;
- désordres et dégradations des bétons dus aux effets de la corrosion électrochimique des armatures de béton armé ;
- désordres et dégradations des structures en béton dus aux effets de la corrosion électrochimique des armatures de précontrainte ;
- désordres et dégradation des bétons à caractère structurel dus aux effets :
 - des erreurs de conception,
 - des erreurs d'exécution,
 - des erreurs de gestion,
 - des actions accidentelles non prises en compte lors de la conception,
 - des erreurs lors de travaux de réparation ou renforcement.

3.5.2 CAS DES DÉFAUTS MINEURS D'EXÉCUTION – MÉTHODES DE RÉPARATION ET PROTECTION

3.5.2.1 Généralités

Conformément aux principes de l'assurance de la qualité, sur le chantier, les désordres et dégradations à caractère superficiel identifiées comme des **non-conformités** doivent faire l'objet d'une des deux solutions suivantes :

- la réparation conformément à une procédure existante ou à créer ;
- l'acceptation en l'état.

Note : une troisième solution existe à savoir la démolition reconstruction qui ne concerne normalement pas les désordres superficiels. Sauf si ces défauts concernent un parement d'un ouvrage faisant l'objet d'une exigence architecturale forte.

L'acceptation en l'état est généralement accompagnée d'une réfaction de prix dans le cas où la reprise des défauts est plus préjudiciable que le maintien en l'état, à la condition que cela ne nuise pas à la durabilité de la structure.

3.5.2.2 Cas des défauts de planéité, des flaches, des épaufrures superficielles et autres défauts assimilables – Méthodes de réparation

> La reprise de ces défauts superficiels est traitée dans la norme NF P95-101 comme suit :

La méthode de réparation à mettre en œuvre est la **méthode 3.1** (application manuelle de mortier) sachant que deux options sont possibles :

- application manuelle de mortier de **type PC** (à base de résines synthétiques) après une préparation de surface, sachant que la réalisation d'engravures n'est pas forcément nécessaire à cause de l'adhérence d'un tel mortier,
- application manuelle de mortier de **type CC ou PCC** (à base de liants hydrauliques sans ou avec résines synthétiques) après une préparation de surface et la réalisation d'engravures.

La **préparation de surface** a pour but de rendre la surface adhérente et propre. Les méthodes de préparation figurent à l'article 6.2 de la norme susvisée (préparation des supports) et dans le **présent GUIDE**.

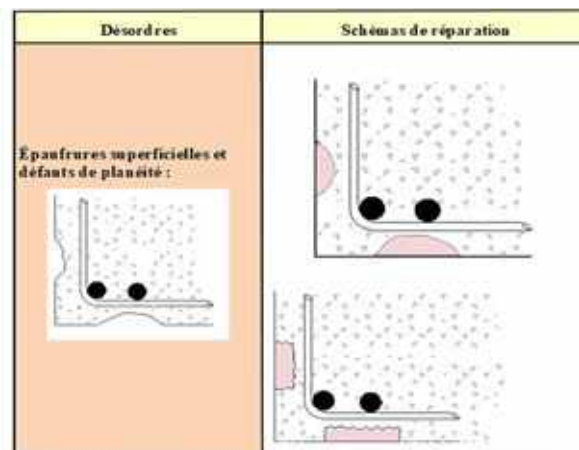


Tableau n° 15 : reprise des épaufrures superficielles et des défauts de planéité

3.5.2.3 Cas des épaufrures superficielles d'un béton non armé ou armé n'atteignant pas les armatures – Méthodes de réparation

> La reprise de ces défauts superficiels est traitée dans la norme NF P95-101 comme suit :

Les méthodes de réparation à mettre en œuvre sont les méthodes 3.1 (application manuelle de mortier), 3.2 (coulage de béton ou de mortier) ou 3.3 (projection de mortier ou de béton) :

- application manuelle de mortiers de type **PC**, **CC** ou **PCC** après un repiquage du béton sans atteindre les armatures,
- coulage de mortier ou de béton de type **PC**, **CC** ou **PCC** après un repiquage du béton sans atteindre les armatures,
- projection de mortier ou de béton de type **CC** ou **PCC** après un repiquage du béton sans atteindre les armatures (la surface à traiter doit être importante).

Le **repiquage du béton** a pour but d'enlever le béton endommagé peu adhérent et de rendre la surface adhérente et propre. Les méthodes de préparation figurent à l'article 6.2 de la norme susvisé (préparation des supports) et dans le **présent GUIDE**.

ATTENTION, la norme NF P95-101 comporte une erreur, les produits de type PC ne sont pas projetables.

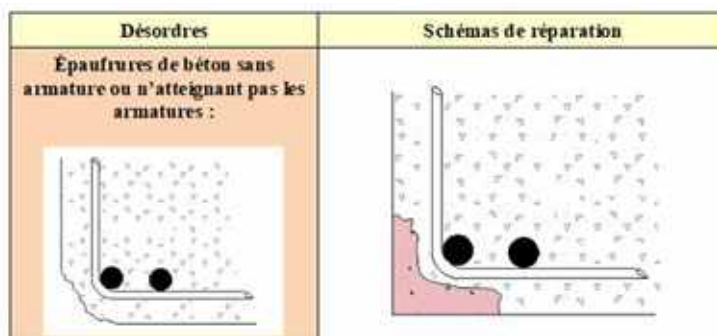


Tableau n° 16 : reprise d'une épaufrure d'angle

3.5.2.4 Cas des défauts superficiels entraînant des défauts d'aspect ou pouvant nuire à la durabilité de la partie de structure concernée – Méthodes de protection

Dans le cas où un parement présente un défaut d'aspect ou a dû subir une réparation liée à un défaut de planéité ou une épaufrure, il est possible d'appliquer sur le parement un **revêtement à caractère esthétique** de type peinture pour béton.

Dans le cas où le béton ne présente pas les performances suffisantes (défaut de perméabilité aux gaz ou à l'eau, insuffisance d'enrobage des armatures) pour assurer la durabilité exigée, il est possible d'appliquer un **revêtement de protection** ou une **imprégnation hydrophobe** (non utilisable si l'agent agressif est un gaz ou en cas de risque de stagnation d'eau). Il est également possible d'augmenter l'épaisseur de l'enrobage par l'ajout d'une couche de mortier ou béton.

En présence de fissures à caractère non structural, leur injection ou la mise en œuvre d'un revêtement sont les traitements usuels.

La réalisation de telles opérations relève de la norme NF P95-103 et des GUIDES FABEM 2, 3 et 4.

3.5.3 CAS DES DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS D'ORIGINE PHYSIQUE – MÉTHODES DE RÉPARATION, RENFORCEMENT ET PROTECTION

3.5.3.1 Généralités

Les différentes méthodes envisageables dans les divers cas de désordres d'origine physique sont développées dans les articles qui suivent, en fonction de l'origine des désordres, de leur importance qui peut être différente en différents points, des risques qu'ils présentent, des caractéristiques de l'ouvrage, des classes d'exposition, des exigences du maître d'ouvrage.... Lorsque plusieurs solutions sont envisageables, elles sont décrites et détaillées puis synthétisées dans un tableau synoptique.

ATTENTION, les informations contenues dans tous les tableaux qui suivent sont à appliquer avec « précautions ». Il est rappelé que le présent GUIDE n'a pas pour but de se substituer au concepteur de la réparation qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.

3.5.3.2 Cas d'un béton dégradé par les effets du gel-dégel (en surface ou à cœur) avec ou sans sels de déverglaçage - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.4.1 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent et leurs causes. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis à d'autres agressions physiques ou chimiques...

- **l'écaillage du béton** : ce phénomène concerne la peau du béton mais, si le phénomène perdure, il poursuit sa progression en profondeur ;
- **le gel interne**, qui provoque des dégradations à cœur.

Lorsque l'ouvrage se trouve soumis aux **sels de déneigement**, aux agressions physiques se superpose une **agression chimique avec la diffusion de chlorures dans le béton et la corrosion des armatures** qui peut en résulter. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres agressions physiques ou des attaques chimiques...

Les deux articles suivants explicitent les méthodes de réparation, de renforcement et de protection envisageables. Le tableau qui suit synthétise les méthodes à mettre en œuvre.

3.5.3.2.1 Cas d'un béton dégradé par le phénomène de l'écaillage - Méthodes de réparation, renforcement et protection

> **Deux cas se présentent :**

- **cas 1** : le phénomène est récent et seule la surface du béton est concernée ;
- **cas 2** : le phénomène est plus ancien, les armatures peuvent être dénudées, corrodées et le béton est pollué par les chlorures.

> **Dans le cas 1, l'opération de restauration du béton dégradé uniquement superficiellement comprend :**

- **une préparation de surface** pour éliminer le béton dégradé afin d'obtenir un support adhérent ;
- **la reconstitution** éventuelle de la peau du béton dans les zones où la profondeur de l'attaque est plus importante à l'aide d'un produit de réparation de type PC (mortier ou béton à base de polymère) seul produit utilisable en faible épaisseur ;

- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection sur toutes les surfaces concernées par le phénomène pour éviter le retour des désordres. Se reporter au **guide FABEM 4 consacré à la protection des bétons** ;
 - la protection de la structure réparée contre les effets des eaux par la remise en état des dispositifs d'évacuation des eaux si besoin est.
- > Dans le cas 2, l'opération de restauration du béton est identique à celle pratiquée en cas de gel interne en présence de sels de déneigement développée ci-après.



Photo n° 55 : application d'un revêtement de protection sur la corniche d'un pont (crédit photo LCPC)

3.5.3.2.2 Cas d'un béton dégradé par le gel interne éventuellement combiné à un phénomène d'écaillage - Méthodes de réparation, renforcement et protection

ATTENTION, un béton gélif après réparation reste gélif s'il absorbe de l'eau, puisqu'en cas de gel, faute de bulles d'air en quantité suffisante, la glace formée dans les pores internes ne pourra s'expanser sans provoquer la fissuration du béton.

En conséquence, si l'expertise montre que la désorganisation du béton due au gel est relativement lente (gel faible ou modéré) et qu'il est possible de bien protéger le béton contre les venues d'eau, voire le gel, une réparation est possible. Dans le cas contraire, il est souvent préférable de s'orienter vers **une solution de démolition-reconstruction (remplacement)**.

De plus, quand il y a gel, il y a souvent utilisation de fondants. Le béton se trouve donc souvent **pollué par les chlorures** et les armatures sont souvent attaquées par la **corrosion**.

Les méthodes **de restauration du béton** d'une partie ou de la totalité d'une structure dégradée par le gel interne sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés** :

1. **Si les désordres sont peu importants** (intervention dès l'apparition des premiers désordres), ou importants (intervention trop différée). Dans les deux cas, **le béton gélif conservé doit être mis à l'abri de l'eau**. L'opération comprend :
 - une préparation de surface avec, d'une part, l'élimination du béton dégradé par l'écaillage et le gel et aussi du béton pollué (présence de chlorures) et, d'autre part, le traitement des armatures touchées par la corrosion (article 5.2 ci-dessous) ;
 - la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs si nécessaire :
 - avec un produit de réparation (mortier ou béton) satisfaisant aux dispositions de la **norme NF EN 1504-3** en particulier la tenue aux effets du gel-dégel. Le produit de réparation doit être adapté aux classes d'exposition auxquelles est soumis l'ouvrage (se reporter à la **norme NF P95-101** qui explicite le choix des produits, leur mise en œuvre...),
 - avec un mortier ou un béton adapté aux classes d'exposition auxquelles est soumis l'ouvrage. Il peut être mis en place par coulage, par injection sous pression ou par projection ;

- la mise en œuvre, le plus souvent obligatoire, d'un revêtement de protection du béton de l'eau afin d'éviter le retour des désordres sur toutes les surfaces concernées par le phénomène. Il faut aussi très souvent remplacer la chape d'étanchéité ;

Note : dans le premier exemple ci-après, le hourdis existant désorganisé a été démoli puis reconstruit et une chape d'étanchéité a été mise en œuvre. Cet ensemble assure la protection des poutres en béton gélif. Dans un tel cas, un revêtement de protection sur les poutres n'est pas forcément nécessaire.

- la protection de la structure réparée contre les effets des eaux par la remise en état des dispositifs d'évacuation des eaux (drainage), si besoin est.
- 2. si les désordres sont importants, voire très importants** (intervention trop tardive) avec un béton désorganisé en profondeur et fortement chargé en chlorures, l'opération de restauration de l'élément ou de la structure en béton concernée peut consister :
- soit à procéder à l'élimination totale du béton gélif et pollué (hydrodémolition) ce qui permet de conserver le ferrailage passif encore en état. Ensuite, à reconstituer le ferrailage endommagé, si besoin est, avec le remplacement des armatures trop endommagées et le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé. Puis de procéder à la reconstitution de la géométrie de l'élément ou de la structure par un béton adapté à la classe d'exposition comme ci-dessous qui peut être, soit coulé dans un coffrage, soit mis en œuvre par projection.
 - soit à procéder à une **démolition totale et à une reconstruction** (remplacement de l'élément ou de l'ouvrage). Dans un tel cas, comme pour un ouvrage à construire, la formule du béton à mettre en place doit satisfaire à la classe d'exposition du béton à l'environnement existant :
 - attaques gel-dégel sans agent de déverglaçage : XF1 saturation en eau modérée ou XF3 forte saturation en eau,
 - attaques gel-dégel avec agent de déverglaçage : XF2 saturation en eau modérée ou XF4 forte saturation en eau.

Note : la formulation d'un béton soumis aux effets du gel-dégel et des sels de déverglaçage est développée dans le fascicule 65 du CCTG qui modifie les recommandations de décembre 2003 du LCPC qui restent un document de référence pour comprendre les phénomènes et les solutions à mettre en œuvre pour obtenir un béton résistant au gel quelle que soit sa technique de mise en œuvre (coulage, projection...). Un nouveau guide doit paraître, normalement fin 2021 ou début 2022.



Photo n° 56 : recommandations des LPC pour la formulation des bétons durcis soumis au gel (2003)

3.5.3.2.3 Tableau synoptique

Note importante : ce tableau, qui donne les méthodes de protection, réparation ou renforcement à mettre en œuvre, a été établi en supposant que l'élément considéré de l'ouvrage ou l'ouvrage était affecté uniquement par des désordres dus à l'écaillage et/ou au gel du béton.

La note susvisée est applicable à tous les tableaux qui suivent : chaque tableau concerne une seule cause de désordre à la fois. En fonction des résultats des investigations et s'il y a plusieurs causes impliquées, en superposant les tableaux correspondants, il est possible d'obtenir un nouveau tableau dans lequel sont indiquées par les cases ainsi modifiées les techniques de protection, de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre.

Constatations	Béton dégradé par les effets du gel/dégel avec ou sans écaillage				
	Écaillage de surface	Écaillage en profondeur	Gel avec ou sans écaillage	Gel avec ou sans écaillage	Gel avec ou sans écaillage
Désordres (importance)	Superficiels concernant le béton d'enrobage	Importants au-delà du béton d'enrobage	Peu importants concernant le béton d'enrobage	Importants au-delà du béton d'enrobage	Très importants
Caractère structural (St) ou non (NS)	NSt	NSt	NSt	St	St
Risques	Évolution	Désordres structuraux	Évolution	Désordres structuraux	Ruine locale ou générale
Cas à considérer (1, 2a, 2b ou 3)	1	2a	2a	2b	3
Méthodes de réparation, renforcement et protection					
Préparation des supports (béton) et, si nécessaire, des armatures	0	0	0	0	SB
1 Protection contre toute pénétration du béton par : M1.1 et M1.3 : imprégnation hydrophobe et/ou revêtement armé ou non (FABEM 4) M1.8 : application de membranes	Ob 0	Ob 0	Ob (béton gélif) 0 Ou	Ob (béton gélif) 0 Ou	
Chape d'étanchéité (FAEQ 1)	SB	SB	SB	SB	SB
réfection des dispositifs de drainage	SB	SB	SB	SB	SB
2 Protection des fissures contre toute pénétration par : M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par calfeutrement ou pontage) (FABEM 2) M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par protection localisée ou généralisée) (FABEM 4) M1.5 : remplissage (colmatage) des fissures par injection ou autre procédé avec un produit (rigide (a), souple (b) ou expansif (c)) (FABEM 3) M6.1 transformation des fissures en joints (FABEM 21)	NR	NR	NR	NR	NR

Constatations	Béton dégradé par les effets du gel/dégel avec ou sans écaillage				
	Écaillage de surface	Écaillage en profondeur	Gel avec ou sans écaillage	Gel avec ou sans écaillage	Gel avec ou sans écaillage
3 La restauration du béton : M3.1 à 3 : ajout de mortier ou de béton M7.2 : remplacement du béton endommagé ou pollué M3.4 : remplacement d'éléments	Ob O (surface)	Ob O	Ob O	Ob O	Ob O
4 Le renforcement structural par : M4.1 : ajout ou remplacement d'armatures passives intérieures (FABEM 7) M4.2 : scellement d'armatures de BA M4.3 : ajout d'armatures passives extérieures (FABEM 7) M4.4 : ajout de mortier ou béton adhérent M4.5 : injection des fissures par un produit rigide (FABEM 3) et (FABEM 7) M4.7 : ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures (FABEM 8)	NR	NR	NR	Ob SB SB SB SB (voir3) NR NR	SB
5 Augmentation de la résistance physique	NR	Ob	Ob	Ob	Ob
6 Augmentation de la résistance chimique	NR	SB	SB	SB	SB
7 Préservation ou restauration de la passivité : M7.1 : augmentation du recouvrement des armatures par du mortier ou du béton (FABEM 4) M7.2 : remplacement du béton armé carbonaté ou contaminé M7.3 et M7.5 : extraction des chlorures et réalcalinisation du béton M10.1 : application d'un potentiel (courant) électrique (protection cathodique) M11.1 : revêtement actif sur les armatures		Ob O (voir3) SB SB	Ob O (voir3) SB SB	Ob O (voir3) SB SB	SB

Tableau n° 17 : méthodes de réparation des désordres dus au dégel/dégel et écaillage

LÉGENDE COMMUNE À TOUS LES TABLEAUX SYNTHÉTISANT LES RÉPARATIONS, RENFORCEMENTS, PROTECTIONS :

■ **M.x.y** : numéro de la méthode de protection, réparation ou renforcement mise en œuvre conformément au Tableau n° 2 situé au début du guide.

> Cas à considérer :

- **Cas 1** : désordres peu importants concernant le béton d'enrobage
- **Cas 2** : désordres importants : **(2a)** au-delà du béton d'enrobage nécessitant une réparation et **(2b)** au-delà du béton d'enrobage et endommagement des armatures nécessitant un renforcement
- **Cas 3** : désordres très importants imposant le remplacement **(3)** de tout ou partie de l'élément, voire de l'ouvrage présentant des désordres
- **NR** : sans objet dans la réparation proposée pour le désordre à traiter
- **Oui** : principe (fonction) inclus dans la réparation proposée

Ob : réparation obligatoire

O : réparation classique à retenir après étude

Ou : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer (un choix est nécessaire)

Ad : réparations à combiner si besoin est

SB : réparation à mettre en œuvre si besoin est

SF : protection contre les effets du feu si besoin est

SE : protection contre l'érosion si besoin est

> Cas d'une réparation de fissures par injection :

(a) : produit d'injection de type F rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton

(b) : produit d'injection souple pour boucher les fissures (produit de type D ductile ou de type S expansif)

3.5.3.2.4 Exemples de réparations

- **Premier cas** : remplacement de la totalité du hourdis du pont à béquilles de La Neuville près de Reims dont le béton gélif était presque totalement désorganisé par le gel. Cet ouvrage était constitué de cinq portiques à trois articulations réunis par le hourdis et des entretoises.

Un trou de moins d'un mètre de diamètre s'était formé dans la dalle de couverture de ce pont. Ce désordre paraissait de faible importance mais avant toute réparation, il fallait en déterminer les causes. Les premières investigations effectuées lors de l'inspection détaillée ont montré que le béton du hourdis présentait en sous-face une dégradation d'une grande partie de sa surface comme l'indique la figure ci-après et le confirme la photo suivant prise quelques temps après l'inspection.

L'ouvrage a été coupé au trafic routier (construction d'un pont provisoire), puis un cintre partiel (maintien de la circulation des péniches sous le tablier) a été mis en place et, ensuite, le hourdis a été entièrement démolé, mais, les poutres porteuses¹¹, non atteintes par le gel, ont été conservées. Le nouveau ferrailage du hourdis a été mis en place et lié à celui des poutres puis un nouvel hourdis a été coulé. Ces travaux ont été complétés par la mise en place d'une chape d'étanchéité et de nouveaux équipements.

¹¹ L'articulation centrale de toutes les poutres était très endommagée à cause de la percolation des eaux au travers du joint de dilatation non étanche. Le joint a été supprimé en rendant les cinq poutres du tablier continues au droit de l'articulation par soudure des armatures existantes et coulage d'un noyau de béton armé.

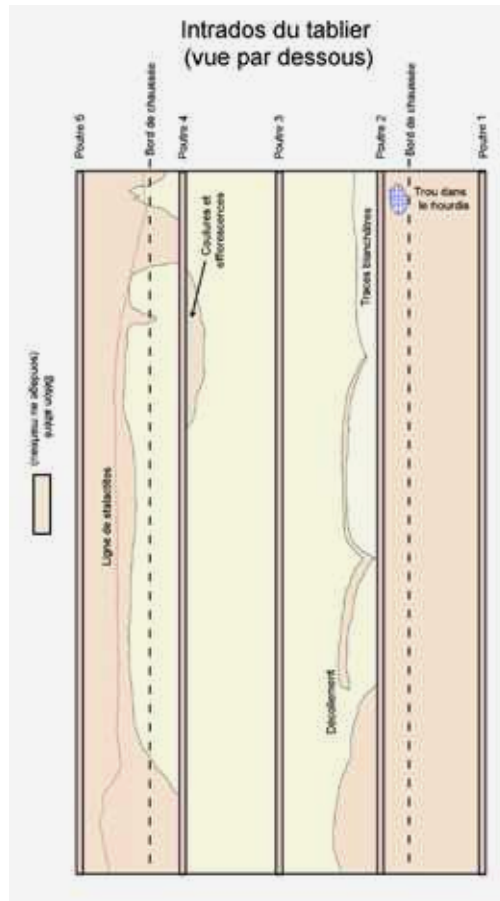


Figure n° 36 : relevé des désordres de l'intrados du tablier



Photo n° 57 : état de désorganisation du béton du hourdis (crédit photo D. Poineau)

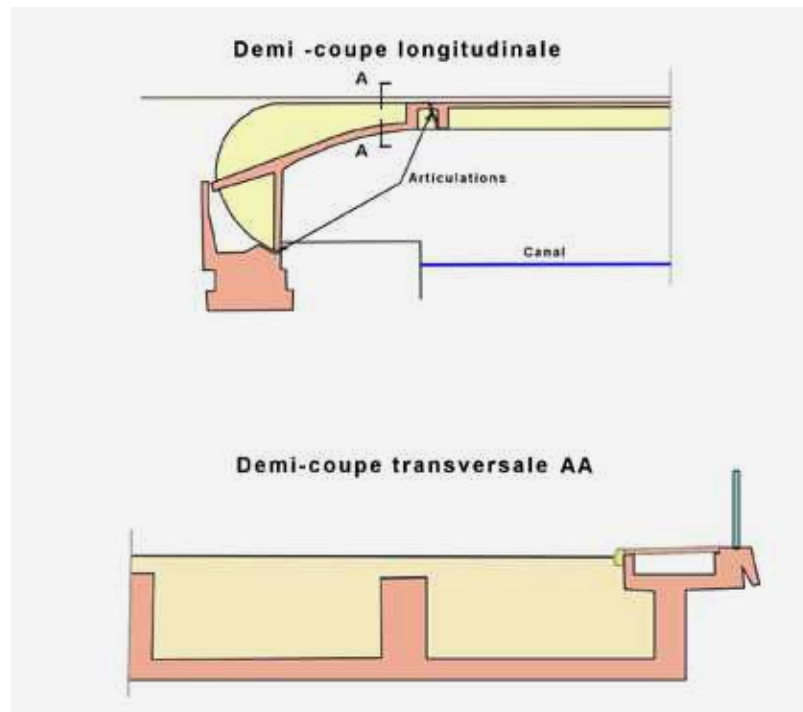


Figure n° 37 : demi-coupe longitudinale et demi coupe transversale du pont de La Neuville



Photo n° 58 : le tablier sur cintre partiel après démolition du hourdis (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 59 : le tablier après reconstitution du ferrailage du hourdis et avant bétonnage (crédit photo D. Poineau)

- **Deuxième cas** : réparation locale des bandeaux de l'arc du pont de la Caille (partiellement détruits par les effets du gel, l'eau de pluie s'infiltrant dans le béton poreux de l'arc) par un béton projeté après repiquage du béton désorganisé et scellement d'armatures de couture. L'extrados de l'arc a ensuite été entièrement protégé des eaux par un revêtement d'étanchéité à base de polyuréthane qui, mis en place dans de mauvaises conditions thermo-hygrométrique, a dû être remplacé par une chape d'étanchéité sous forme d'une feuille d'étanchéité non adhérente.



Photo n° 60 : vue générale du pont de la Caille en hiver (crédit photo DDE 74)



Photo n° 61 : état du béton d'un des bandeaux de l'arc (crédit photo DDE 74)

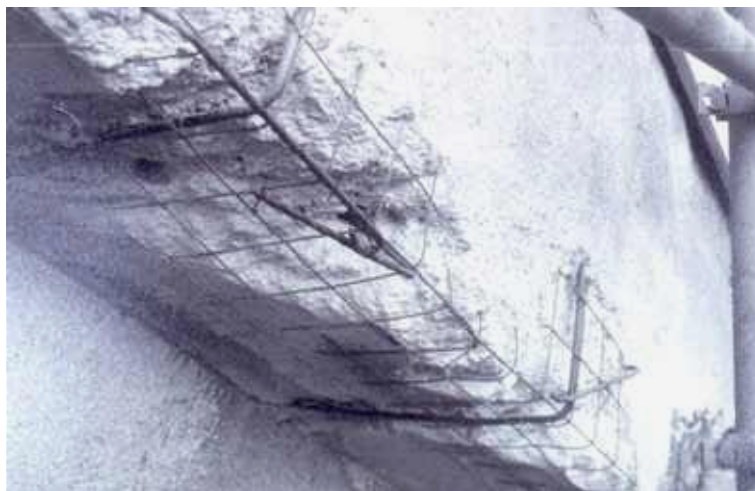


Photo n° 62 : bandeau après purge du béton désorganisé, scellement de nouvelles armatures et avant bétonnage par projection (crédit photo DDE 74)



Photo n° 63 : vue de l'arc après projection et avant mise en place d'une chape d'étanchéité (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 64 : vue de l'arc avec sa chape d'étanchéité non adhérente
(crédit photo D. Poineau)

Faute d'une déviation disponible, les travaux ont été exécutés sous trafic routier. La chape d'étanchéité n'a pu être reconstituée correctement. Ce défaut a favorisé une forte pénétration de chlorures dans le béton des encorbellements sous les trottoirs. La solution de réhabilitation a consisté à reconstruire totalement les encorbellements après sciage des existants.

3.5.3.3 Cas d'un béton dégradé par les effets thermiques d'un incendie - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.4.2 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité de l'incendie. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres agressions physiques ou des attaques chimiques...

L'article suivant explicite les méthodes de réparation, de renforcement et de protection envisageables. Le tableau qui suit synthétise les méthodes à mettre en œuvre.

3.5.3.3.1 Diverses méthodes de renforcement, réparation et protection

Les méthodes de restauration du béton d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant l'importance des désordres constatés (en surface et profondeur) lors des études préalables (se reporter à la classification explicitée dans l'article 3.4.4.2 ci-dessus) :

3.5.3.3.1.1 Cas des désordres de classe 1 (superficiels) - Méthodes de réparation et protection

- une préparation de surface avec l'élimination des dépôts de suie, voire des faibles couches de béton dégradé par la chaleur ;
- si nécessaire, la reconstitution localement de la peau du béton par un ragréage manuel avec l'aide d'un produit de réparation applicable en couche mince ;
- enfin, si besoin est, la mise en œuvre d'un revêtement à caractère esthétique sur les surfaces traitées, voire la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre les effets du feu si l'expertise a montré que les risques de récurrences sont élevés ;

3.5.3.3.1.2 Cas des désordres de classe 2 (écaillage limité et fissures) - Méthodes de réparation et protection

- une préparation de surface avec l'élimination des dépôts de suie, du béton écaillé, voire du béton fissuré par la chaleur (cas des fissures peu profondes). Si les fissures sont plus profondes, elles peuvent contenir des agents agressifs (cas d'un feu dégageant des produits chlorés). Il faut alors faut considérer que l'élément endommagé est en classe 3 et procéder à l'enlèvement du béton pollué ;
- la reconstitution de la peau du béton manuellement ou mécaniquement (projection) ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection si besoin est, qui peut aussi avoir un caractère esthétique sur les surfaces traitées, voire la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre les effets d'un incendie si l'étude préalable a montré que les risques de récives sont élevés.

3.5.3.3.1.3 Cas des désordres de classe 3 (désorganisation du béton d'enrobage, présence d'un feuilletage du béton) - Méthodes de réparation, renforcement et protection

- une préparation du support béton comprenant l'élimination du béton dégradé par la chaleur, le traitement des armatures apparentes à condition qu'elles ne soient pas déformées et que leurs caractéristiques mécaniques ne soient pas altérées, ce qui correspondrait à des désordres de classe 4 ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce avec un béton mis en place manuellement ou mécaniquement (projection ou coulage en place) ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection, si besoin est, qui peut aussi avoir un caractère esthétique sur les surfaces traitées, voire la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre les effets du feu si l'étude préalable a montré que les risques de récives sont élevés.

3.5.3.3.1.4 Cas des désordres de classe 4 (désorganisation du béton sur une grande profondeur, armatures déformées, structure pouvant présenter des déformations...) - Méthodes de réparation, renforcement et protection

> Ces désordres importants peuvent être localisés sur une partie de la structure ou généralisés, la structure elle-même peut être partiellement ou totalement effondrée. Deux solutions sont envisageables :

- a) une solution de réparation renforcement et protection qui comporte :
 - la mise sur un étaieement provisoire si nécessaire ;
 - une préparation du support comprenant l'élimination totale du béton dégradé par la chaleur ainsi que les armatures trop déformées ou ayant perdu leurs performances mécaniques ; dans certains cas, il faut entièrement reconstituer l'élément ayant subi l'incendie ;
 - la restauration du ferrailage qui comporte le remplacement des armatures de béton armé endommagées (leur continuité avec les armatures conservées peut être assurée par soudure ou recouvrement) et la mise en place d'armatures de couture qui sont à sceller dans les parties de béton intactes ;
 - la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs par bétonnage en place ou projection. Si nécessaire, le béton ajouté est à formuler pour mieux répondre aux risques d'incendie ;
 - la mise en charge lors du décintrement des parties réparées, si besoin est ;
 - si besoin est, la mise en œuvre d'un revêtement de protection qui peut aussi avoir un caractère esthétique sur les surfaces traitées, voire la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre les effets d'un incendie si l'étude préalable a montré que les risques de récives sont élevés.

- **b) une solution de remplacement de l'élément ou de la structure qui consiste à :**
 - démonter ou détruire entièrement l'élément ou la structure ;
 - construire un nouvel élément ou une nouvelle structure avec, si nécessaire, une protection contre les effets d'un incendie si les risques de récurrences sont élevés.

Dans certains cas, la réparation doit faire appel aux **méthodes de réparation structurales** décrites dans divers articles précédents ou suivants.

3.5.3.3.2 Tableau synoptique

Constatations	Béton dégradé par les effets d'un incendie			
	Dépôt de suie, microfissures	Écaillage superficiel et fissures	Destruction de l'enrobage et feuilletage	Béton sans cohésion, armatures déformées
Désordres (importance (classes de l'IFSTTAR))	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Caractère structural (St) ou non (NS)	NSt	NSt	NSt	St
Risques	Aspect esthétique évolution	Évolution	Évolution	Désordres Rupture locale ou générale
Cas à considérer (1, 2a, 2b ou 3)	1	2a	2a à 2b	3
Méthodes de réparation, renforcement et protection				
Préparation des supports (béton et, si nécessaire, des armatures)	Ob (nettoyage)	Ob	Ob	Ob
1 Protection contre toute pénétration du béton par : M1.1 et M1.3 : imprégnation hydrophobe et/ou revêtement armé ou non (FABEM 4) M1.8 : application de membranes	SB (esthétique)	SB	SB	SB
Chape d'étanchéité (FAEQ 1)	SB	SB	SB	SB
Réfection des dispositifs de drainage	SB	SB	SB	SB
2 Protection des fissures contre toute pénétration par : M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par calfeutrement ou pontage) (FABEM 2) M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par protection localisée ou généralisée) (FABEM 4) M1.5 : remplissage (colmatage) des fissures par injection ou autre procédé avec un produit (rigide (a), souple (b) ou expansif (c)) (FABEM 3) M6.1 transformation des fissures en joints (FABEM 2)	NR	NR	NR	NR
3 La restauration du béton : M3-1 à 3 : ajout de mortier ou de béton M7.2 : remplacement du béton endommagé ou pollué M3.4 : remplacement d'éléments	SB O (surface)	SB O (surface) SB	Ob O	Ob Ou Ou

Constatations	Béton dégradé par les effets d'un incendie			
	Dépôt de suie, microfissures	Écaillage superficiel et fissures	Destruction de l'enrobage et feuilletage	Béton sans cohésion, armatures déformées
4 Le renforcement structural par : M4.1 : ajout ou remplacement d'armatures passives intérieures (FABEM 7) M4.2 : scellement d'armatures de BA M4.3 : ajout d'armatures passives extérieures (FABEM 7) M4.4 : ajout de mortier ou béton adhérent M4.5 : injection des fissures par un produit rigide (FABEM 3) et (FABEM 7) M4.7 : ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures (FABEM 8)	NR	NR	NR	Ob O SB O (voir 3) SB
5 Augmentation de la résistance physique : ajout d'une protection feu	SB	SB	SB	SB
6 Augmentation de la résistance chimique	NR	NR	NR	NR
7 Préservation ou restauration de la passivité : M7.1 : augmentation du recouvrement des armatures par du mortier ou du béton (FABEM 4) M7.2 : remplacement du béton armé carbonaté ou contaminé M7.3 et M7.5 : extraction des chlorures et réalcalinisation du béton M10.1 : application d'un potentiel (courant) électrique (protection cathodique) M11.1 : revêtement actif sur les armatures	NR	SB (si contamination) SB	Ob O (voir3) SB	Ob O (voir3) SB

Tableau n° 18 : méthodes de réparation des désordres dus à un incendie

LÉGENDE COMMUNE À TOUS LES TABLEAUX SYNTHÉTISANT LES RÉPARATIONS, RENFORCEMENTS, PROTECTIONS :

- **M.x.y** : numéro de la méthode de protection, réparation ou renforcement mise en œuvre conformément au Tableau n° 2 situé au début du guide.

> Cas à considérer :

- **Cas 1** : désordres peu importants concernant le béton d'enrobage
- **Cas 2** : désordres importants : **(2a)** au-delà du béton d'enrobage nécessitant une réparation et **(2b)** au-delà du béton d'enrobage et endommagement des armatures nécessitant un renforcement
- **Cas 3** : désordres très importants imposants le remplacement **(3)** de tout ou partie de l'élément, voire de l'ouvrage présentant des désordres
- **NR** : sans objet dans la réparation proposée pour le désordre à traiter
- **Oui** : principe (fonction) inclus dans la réparation proposée

Ob : réparation obligatoire

O : réparation classique à retenir après étude

Ou : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer (un choix est nécessaire)

Ad : réparations à combiner si besoin est

SB : réparation à mettre en œuvre si besoin est

SF : protection contre les effets du feu si besoin est

SE : protection contre l'érosion si besoin est

> **Cas d'une réparation de fissures par injection :**

(a) : produit d'injection de type F rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton

(b) : produit d'injection souple pour boucher les fissures (produit de type D ductile ou de type S expansif)

3.5.3.3.3 Exemple de réparation

Les photos qui suivent montrent les travaux de réparation dans **deux parcs automobiles** qui ont subi des dégradations suite à un incendie de véhicules

Après mise en place des étaitements éventuellement nécessaires, le béton endommagé a été purgé avec l'aide de procédés mécaniques (marteau-piqueur et/ou hydrodémolition).



Photo n° 65 : repiquage du béton endommagé au marteau-piqueur (crédit photo Freyssinet)



Photo n° 66 : purge du béton endommagé en cours (crédit photos Freyssinet)



Photo n° 67 : purge terminée (crédit photo Freyssinet)

Si besoin est de nouvelles armatures peuvent être mises en place. Ensuite, après nettoyage et humidification du support, un béton est mis en place par projection en une ou plusieurs couches pour enrober les armatures.



Photo n° 68 : projection de béton sur une paroi verticale (crédit photo Freyssinet)



Photo n° 69 : projection de béton en sous-face d'une dalle
(crédit photo Freyssinet)

Après projection, il est procédé aux travaux de finition avec, ici, un dressage à la règle.



Photo n° 70 : travaux de finition des parements à la règle (crédit photo Freyssinet)



Photo n° 71 : vue de la sous-face d'une dalle reconstituée (crédit photo Freyssinet)

3.5.3.4 Cas d'un béton dégradé par les effets des différents retraits (endogène, thermique, dessiccation) - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.4.3 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent et leurs causes (les différents retraits) :

- d'auto-dessiccation ;
- thermique ;
- endogène ;
- de séchage au jeune âge puis durant la vie de l'ouvrage.

Les fissures qui en résultent, si leur ouverture n'est pas maîtrisée (formule du béton inadaptée, armatures de peau insuffisantes, réalisation des reprises de bétonnage sans précautions, cure du béton négligée...), exposent le béton à la pénétration des différents agents agressifs donc à la corrosion des armatures. Les ouvertures des fissures peuvent atteindre 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, voire plus. De telles fissures nuisent aussi à l'aspect des parements et peuvent conduire à une insuffisance structurale lorsque la pénétration des agents agressifs entraîne la corrosion, voire la rupture des armatures.

Les articles suivants explicitent les méthodes de réparation, de renforcement et de protection envisageables **uniquement** dans le cas où la fissuration n'est pas accompagnée de désordres induits par la corrosion des armatures (cas traité dans la suite du **présent GUIDE**) ou par une insuffisance structurale. Le tableau qui suit synthétise les méthodes à mettre en œuvre.

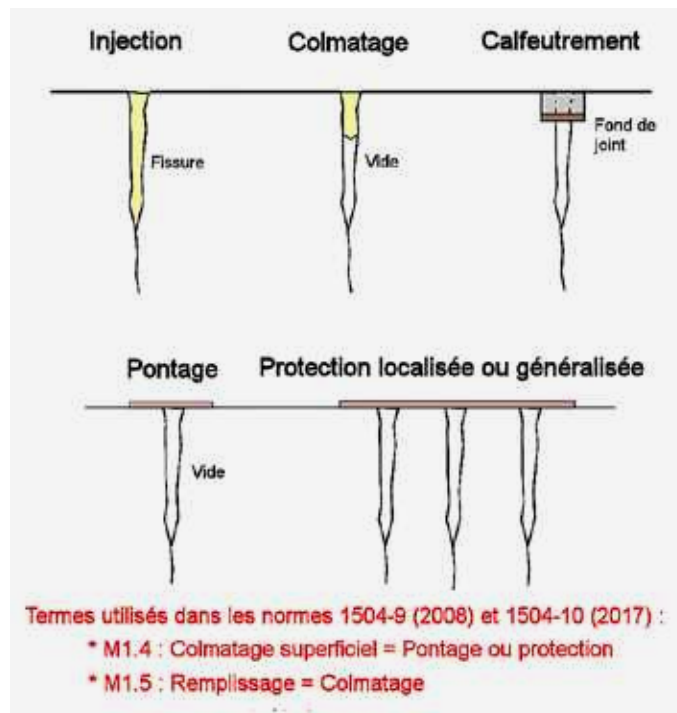


Figure n° 38 : Rappel différentes techniques de traitement des fissures

Les méthodes de restauration du béton d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant l'importance des désordres constatés (en surface et profondeur) lors des études préalables (se reporter à la classification explicitée dans l'article 3.4.4.2 ci-dessus).

3.5.3.4.1 Cas où les ouvertures des fissures respectent les ouvertures limites et que la fissuration a uniquement un impact esthétique (faïençage, microfissures, fissures fines) - méthodes de réparation et protection

- une préparation de la surface fissurée (suivant le cas l'opération concerne une face ou les deux) ;
- la mise en œuvre d'un revêtement à **caractère esthétique**, voire **de protection** (par exemple si des défauts d'enrobage ont été relevés...).

3.5.3.4.2 Cas où les ouvertures des fissures respectent les ouvertures limites mais sont soumises à une circulation d'eau – Méthodes de réparation et protection**a) Dans le cas où les deux faces fissurées sont accessibles :**

- si la **totalité de la surface** de l'élément à réparer est fissurée :
 - une préparation de la surface de la face exposée à l'eau,
 - la mise en œuvre sur la face exposée à l'eau d'une protection généralisée (revêtement combiné ou non avec une imprégnation hydrophobe) pouvant avoir aussi un caractère esthétique, voire d'étanchéité. Si besoin est, la protection doit résister à la pression de l'eau ;
- s'il s'agit de **fissures très localisées** (cas d'une fissure au niveau d'une reprise de bétonnage...) :
 - la réalisation d'une protection localisée côté exposé à l'eau (pontage ou calfeutrement de la fissure). Si besoin est, la protection doit résister à la pression de l'eau,
 - ou le remplissage de la ou des fissures côté exposé à l'eau (par injection ou un autre procédé) avec un produit souple à mettre en œuvre lorsque la fissure est largement ouverte. En présence d'eau en permanence, un produit expansif peut être employé.

b) Dans le cas où une seule des faces fissurées est accessible :

- si la **totalité de la surface** de l'élément à réparer est fissurée :
 - le remplissage des fissures (par injection ou un autre procédé) avec un produit souple à mettre en œuvre lorsque la fissure est largement ouverte. En présence d'eau en permanence, un produit expansif peut être employé,
 - une préparation de surface de la face accessible,
 - la mise en œuvre d'un revêtement à caractère esthétique, voire de protection sur la face accessible ;

Note : la mise en œuvre d'une protection résistant à la sous-pression est aussi envisageable (se reporter aux GUIDES FABEM 2, 3 et 4 et aux recommandations de l'AFTES relatives aux traitements des arrêts d'eau dans les ouvrages souterrains de 2016 élaborées par le GT9R1F3/A1).

- s'il s'agit de **fissures très localisées** (cas d'une fissure au niveau d'une reprise de bétonnage...) :
 - le remplissage de la ou des fissures (par injection ou un autre procédé) avec un produit souple à mettre en œuvre lorsque la fissure est largement ouverte (hiver) ; sinon il peut se produire des ruptures d'adhérence entre le produit et les parois de la fissure ou dans le produit mis en traction. En présence d'eau en permanence, un produit expansif peut être employé ;

3.5.3.4.3 Cas où la structure ne présente pas d'insuffisance structurale mais où les ouvertures des fissures ne respectent pas les ouvertures limites et sont soumises ou non à des circulations d'eau – Méthodes de réparation et protection**a) Dans le cas où les deux faces fissurées sont accessibles :**

- si la **totalité de la surface** de l'élément à réparer est fissurée :
 - une préparation de surface des deux faces fissurées,

- la mise en œuvre sur les deux faces exposées ou non à l'eau d'une protection généralisée (revêtement combiné ou non avec une imprégnation hydrophobe) pouvant avoir un caractère esthétique, voire d'étanchéité. Si besoin est, la protection doit résister à la pression de l'eau ;
- s'il s'agit de **fissures très localisées** (cas d'une fissure au niveau d'une reprise de bétonnage...) :
 - la réalisation d'une protection localisée côté exposé à l'eau (pontage ou calfeutrement de la fissure). Si besoin est, la protection doit résister à la pression de l'eau,
 - ou le remplissage de la ou des fissures (par injection ou un autre procédé) avec un produit souple à mettre en œuvre lorsque la fissure est largement ouverte (hiver) ; sinon il peut se produire des ruptures d'adhérence entre le produit et les parois de la fissure ou dans le produit mis en traction. En présence d'eau en permanence, un produit expansif peut être employé,
 - une préparation de surface de la face accessible,
 - la mise en œuvre d'un revêtement à caractère esthétique, voire de protection sur la face accessible ;



Photo n° 72 : revêtement de protection et d'étanchéité après réparations locales (crédit photo Parexlanko)

b) Dans le cas où une seule des faces fissurées est accessible :

- si la **totalité de la surface** de l'élément à réparer est fissurée :
 - le remplissage des fissures (par injection ou un autre procédé) avec un produit souple (Classe D) à mettre en œuvre lorsque la fissure est largement ouverte (hiver) sinon il peut se produire des ruptures d'adhérence entre le produit et les parois de la fissure ou dans le produit mis en traction. En présence d'eau en permanence, un produit expansif (Classe S) peut être employé ;
 - une préparation de surface de la face accessible ;
 - la mise en œuvre sur la face accessible d'une protection généralisée (revêtement combiné ou non avec une imprégnation hydrophobe) pouvant avoir un caractère esthétique. Cette protection devant pouvoir résister à la pression ou sous-pression de l'eau.

- s'il s'agit de **fissures très localisées** (cas d'une fissure au niveau d'une reprise de bétonnage...) :

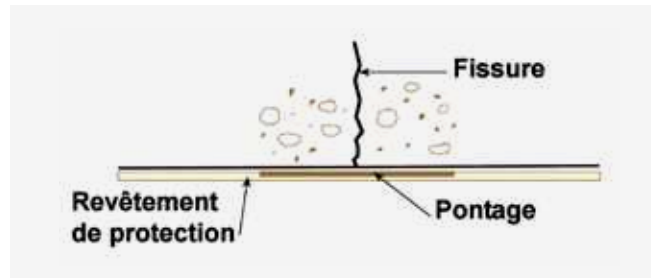


Figure n° 39 : principe de réalisation du pontage d'une fissure

- le remplissage des fissures (par injection ou un autre procédé) avec un produit souple (classe D) à mettre en œuvre lorsque la fissure est largement ouverte. En présence d'eau en permanence, un produit expansif (classe S) peut être employé,

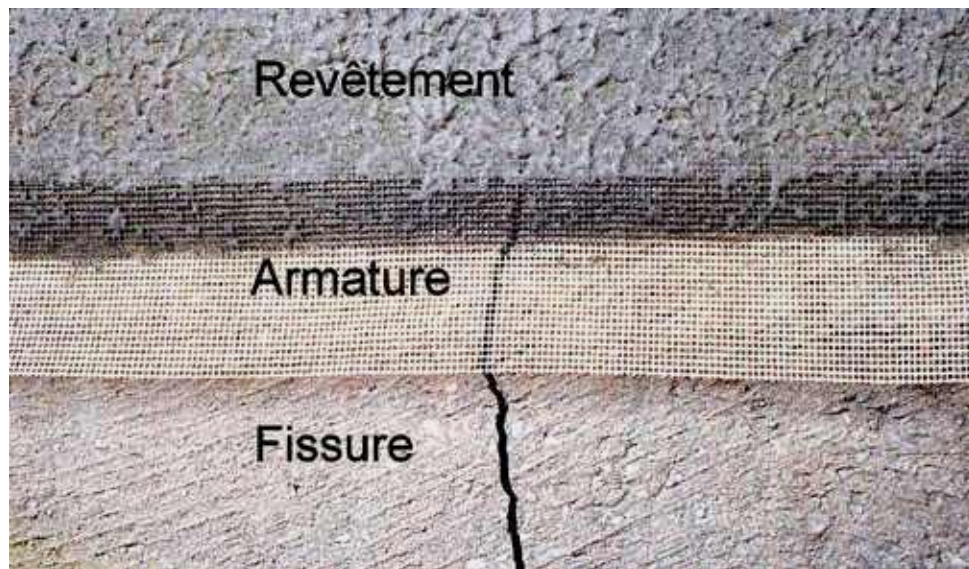


Photo n° 73 : revêtement armé assurant une protection localisée d'une fissure (crédit photo SIKA)

3.5.3.4.4 Cas où la structure présente des fissures liées à une insuffisance structurale – Méthodes de réparation, renforcement et protection

Parfois l'étude préalable montre (par exemple, par un essai de chargement, des recalculs) que les fissures perturbent le fonctionnement de l'ouvrage (insuffisance de capacité portante). Dans un tel cas, l'opération de restauration d'un élément, d'une partie ou de la totalité de la structure peut faire appel :

- à la transformation de la fissure en joint de dilatation. Se reporter au guide **FABEM 2**,
- aux méthodes de réparation et renforcement à caractère structural développées dans les parties ci-après consacrée aux réparations des désordres d'origine mécanique.

3.5.3.4.5 Tableau synoptique

Le tableau ne traite pas du cas où l'ouvrage présente des insuffisances structurales, se reporter traitements de ces insuffisances développés dans la suite présent **GUIDE**.

Constatations	Béton dégradé par les effets des retraits		
	Ouverture des fissures conforme sans venues d'eau	Ouverture des fissures conforme avec venues d'eau	Ouverture des fissures non-conforme avec ou sans venues d'eau
Désordres (importance)	Peu importants	Plus importants	Importants à très importants
Caractère structural (St) ou non (NS)	NSt	NSt	NSt
Risques	aspect esthétique	Pénétration entraînant des désordres et aspect esthétique	Pénétration entraînant des désordres et la corrosion et aspect esthétique
Cas à considérer	1	2a	2b
Méthodes de réparation, renforcement et protection	Ob	Ob	Ob
Préparation des supports (béton et si nécessaire des armatures)	O	O	O
1 Protection contre toute pénétration du béton par : M1.1 et M1.3 : imprégnation hydrophobe et/ou revêtement armé ou non (FABEM 4) M1.8 : application de membranes		SB (béton perméable)	SB (béton perméable)
Chape d'étanchéité (FAEQ 1)	SB	SB	SB
Réfection des dispositifs de drainage	SB	SB	SB
2 Protection des fissures contre toute pénétration par : M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par calfeutrement ou pontage) (FABEM 2) M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par protection localisée ou généralisée) (FABEM 4) M1.5 : remplissage (colmatage) des fissures par injection ou autre procédé avec un produit (rigide (a), souple (b) ou expansif (c)) (FABEM 3) M6.1 transformation des fissures en joints (FABEM 2))	Ob Ou (esthétique et/ou protection)	Ob Ou fissures très localisées Ou (protection, voire esthétique) Ou [(a) ou (b)] fissures très localisées	Ob Ou fissures très localisées Ou (protection, voire esthétique) Ou [(a) ou (b)] fissures très localisées
3 La restauration du béton : M3-1 à 3 : ajout de mortier ou de béton M7.2 : remplacement du béton endommagé ou pollué M3.4 : remplacement d'éléments	NR	NR	NR
4 Le renforcement structural par : M4.1 : ajout ou remplacement d'armatures passives intérieures (FABEM 7) M4.2 : scellement d'armatures de BA M4.3 : ajout d'armatures passives extérieures (FABEM 7) M4.4 : ajout de mortier ou béton adhérent M4.5 : injection des fissures par un produit rigide (FABEM 3) et (FABEM 7) M4.7 : ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures (FABEM 8)	NR	NR	NR

Constatations	Béton dégradé par les effets des retraits		
	Ouverture des fissures conforme sans venues d'eau	Ouverture des fissures conforme avec venues d'eau	Ouverture des fissures non-conforme avec ou sans venues d'eau
5 Augmentation de la résistance physique	NR	NR	NR
6 Augmentation de la résistance chimique	NR	NR	NR
7 Préservation ou restauration de la passivité : M7.1 : augmentation du recouvrement des armatures par du mortier ou du béton (FABEM 4) M7.2 : remplacement du béton armé carbonaté ou contaminé M7.3 et M7.5 : extraction des chlorures et réalcalinisation du béton M10.1 : application d'un potentiel (courant) électrique (protection cathodique) M11.1 : revêtement actif sur les armatures	NR	NR	SB

Tableau n° 19 : dégradations dues aux effets des différents retraits

LÉGENDE COMMUNE À TOUS LES TABLEAUX SYNTHÉTISANT LES RÉPARATIONS, RENFORCEMENTS, PROTECTIONS :

- **M.x.y** : numéro de la méthode de protection, réparation ou renforcement mise en œuvre conformément au Tableau n° 2 situé au début du guide.

> Cas à considérer :

- **Cas 1** : désordres peu importants concernant le béton d'enrobage
- **Cas 2** : désordres importants : **(2a)** au-delà du béton d'enrobage nécessitant une réparation et **(2b)** au-delà du béton d'enrobage et endommagement des armatures nécessitant un renforcement
- **Cas 3** : désordres très importants imposant le remplacement **(3)** de tout ou partie de l'élément, voire de l'ouvrage présentant des désordres
- **NR** : sans objet dans la réparation proposée pour le désordre à traiter
- **Oui** : principe (fonction) inclus dans la réparation proposée

Ob : réparation obligatoire :

O : réparation classique à retenir après étude

Ou : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer (un choix est nécessaire)

Ad : réparations à combiner si besoin est

SB : réparation à mettre en œuvre si besoin est

SF : protection contre les effets du feu si besoin est

SE : protection contre l'érosion si besoin est

> Cas d'une réparation de fissures par injection :

(a) : produit d'injection de type F rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton

(b) : produit d'injection souple pour boucher les fissures (produit de type D ductile ou de type S expansif)

3.5.3.4.6 Exemples de réparation

> Premier cas : fissuration d'une poutre-caisson

Une poutre-caisson, en cours de construction, avait été bétonnée en trois phases (le hourdis inférieur – les âmes inclinées – le hourdis supérieur) séparées de plusieurs mois et sans précautions particulières (absence de renfort du ferrailage longitudinal ou de mise en tension de quelques armatures de précontrainte). De plus, le coffrage, qui avait été laissé en place, bridait les déformations.

La réparation des âmes fissurées a consisté à injecter les fissures de retrait gêné (ouverture apparente de 1 à 2 mm) avec un **produit rigide (classe F au sens de la norme NF EN 1504-5)** indispensable pour assurer la continuité de la matière. L'injection a eu lieu avant la mise en tension des câbles de la précontrainte longitudinale qui n'avaient pas encore été tendus.

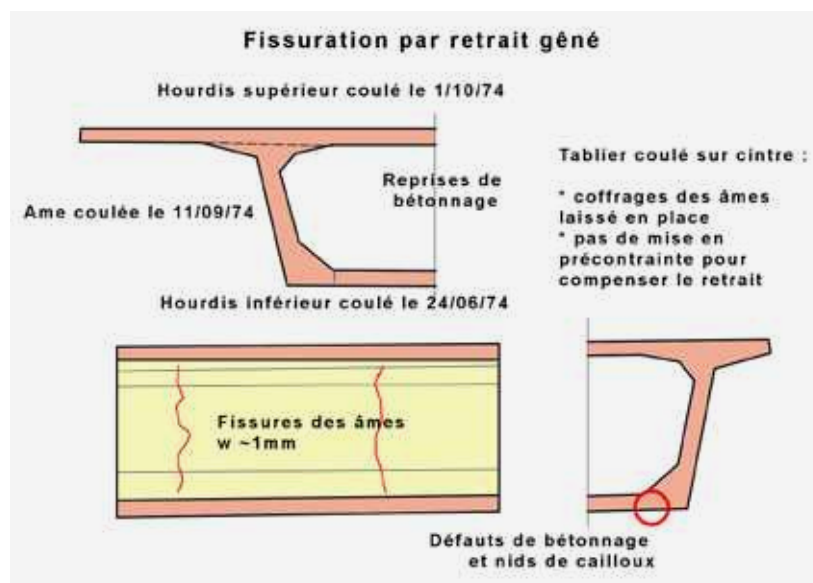


Figure n° 40 : fissuration d'une poutre-caisson sous les effets des retraits

> Deuxième cas : piles du pont de Brotonne

1. Description de l'ouvrage :

Le pont de Brotonne d'une longueur totale de 1278,40 m, permet le franchissement de la Seine par la RD 490. Il a été réceptionné en 1977. Il est constitué de plusieurs ouvrages :

- un ouvrage principal haubané à tablier précontraint d'une longueur de 814 m qui comporte une travée centrale de 320 m encadrée par deux travées latérales de 143,50 m, deux travées partielles d'équilibrage et deux travées d'accès à la rive droite. Au total de 7 travées, dont une liée par un appui cantilever. Cet ouvrage dégage un tirant d'air de 50 m et ne comporte aucun appui dans la Seine,
- un viaduc d'accès rive gauche à tablier précontraint d'une longueur de 464,40 m qui comporte une travée de 38,90 m, sept travées de 58,50 m et une console d'articulation de 16 m. Au total, il y a 9 travées, dont une en encorbellement servant d'appui à l'extrémité du viaduc principal.
- deux pylônes de 125 m de hauteur,
- des piles creuses de hauteur variable à huit faces (4 planes et 4 courbes) avec des parois de 0,25 m d'épaisseur et des goussets d'angles.

2. Description des désordres affectant les piles :

Les visites d'inspection de l'ouvrage effectuées périodiquement ont mis en évidence une évolution de la **fissuration verticale extérieure** de certaines piles par rapport aux visites précédentes. Une visite intérieure réalisée sur les piles P 8, P 11 et P 12, puis P 9, P 10 et P 13 a permis de constater que **certaines fissures sont traversantes** avec des ouvertures maximales de l'ordre de 1 mm à l'extérieur pour 3 mm à l'intérieur. Les ouvertures sont maximales dans une zone située vers la mi-hauteur du fût et diminuent vers leurs extrémités.

Des fissures non traversantes (verticales et horizontales) ont également été identifiées sur les différentes faces des piles.

Lors des inspections, des **éclats de béton** avec ou sans fer apparent corrodé, ont été repérés en faces extérieures et intérieures des piles.

3. Origine probable des fissures :

Les études réalisées par le CETE (en 2002) et le Bureau d'Études COREDIA (en 2006 et 2010) pour expliquer les origines de fissuration des piles 8, 11 et 12 ont conclu que le faible ferrailage horizontal des piles (réalisé avec des **HA 8 espacées de 33 cm** sur les deux faces de la pile) ne permettait pas de reprendre les efforts engendrés par les gradients thermiques sollicitant les piles du pont.

4. Consistance des travaux de confortement des piles :

- réalisation de **nervures de renforcement** des parois intérieures des piles. Il s'agit de poutres en béton armé de section carrée 0,40 mx0,40 m espacées d'environ 4,50 mètres dans le sens de la hauteur. La réalisation de ces poutres nécessite le forage et le scellement d'aciers de reprise dans les voiles existants ;
- réalisation d'anneaux de renforcement à l'aide de **bandes d'un matériau composite collé** à base de fibres de carbone à l'intérieur et l'extérieur des piles, avec un espacement maximum de 1,00 m. Auxquels s'ajoutent, y compris à l'intérieur de la pile, de dispositifs d'ancrage des tissus contre la poussée au vide au niveau des angles ;
- traitement par **injection et couture** (armatures de BA scellées) des fissures principales traversantes ;
- **réparation localisée des zones**, où le béton est endommagé, comprenant : repiquage, dégagement des armatures corrodées ragréage des bétons endommagés avec utilisation d'un mortier spécifique de réparation sans application d'un passivant ;
- ravalement de toute la surface extérieure des piles avec la mise en œuvre d'un **revêtement de protection** sous la forme d'un système de peinture admis à la **marque ACQPA** ;
- mise en place de **nouveaux appareils d'appui** identiques à l'existant nécessitant le vérinage du tablier.

5. Contraintes et difficultés rencontrées sur ce chantier :

■ Nervures en béton armé :

Les nervures devant être connectées aux voiles des piles cela a imposé le forage et le scellement d'aciers de reprise dans ces voiles après un repérage préalable des aciers existants à l'aide d'un matériel adapté.

Pour réduire des effets des **retraits du béton des nervures**, les scellements des aciers de solidarisation des nervures aux voiles de la pile ont été différés et un contrôle de la valeur résiduelle de retrait du béton des nervures a été effectué. Pendant la phase provisoire, les nervures ont été maintenues et suspendues par le biais de consoles et de tiges métalliques. Des réservations avaient été prévues dans les nervures pour permettre les scellements définitifs.

La densité de ferrailage des nervures de certaines piles a nécessité une adaptation de la mise en œuvre des aciers, le recours à l'emploi de coupleurs ainsi qu'une étude spécifique de la formule du béton,



Photo n° 74 : début de mise en place des coffrages d'une nervure et scellement d'armatures de BA dans les parois (crédit photo du Département de la Seine Maritime)



Photo n° 75 : détail du ferrailage d'une nervure – à noter le coupleur limitant le nombre des recouvrements (crédit photo du Département de la Seine Maritime)



Photo n° 76 : armatures de jonction entre les parois de la pile et la nervure scellées dans des réservations de la nervure (crédit photo du Département de la Seine Maritime)

■ Tissu de fibre de carbone :

Les bandes de renforcement sont constituées d'un tissu de fibres de carbone de 50 à 300 mm de largeur. La préparation du support béton a nécessité un ponçage de la surface béton.

La mise en œuvre du renforcement composite a été effectuée en respectant scrupuleusement les **conditions d'application suivantes** :

- $5^{\circ}\text{C} < \text{Température du support} < 45^{\circ}\text{C}$,
- $\text{Température du support} > T^{\circ} \text{ point de rosée} + 3^{\circ}\text{C}$,
- $5^{\circ}\text{C} < \text{Température ambiante} < 50^{\circ}\text{C}$,

De plus, le gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur de la pile a été suivi en permanence et est resté inférieur à 5°C .



Photo n° 77 : renfort en tissu de fibres de carbone (crédit photo du Département de la Seine Maritime)



Photo n° 78 : vue des nervures et des renforts en tissu de fibres de carbone collés équipés de dispositifs anti poussée au vide (crédit photo du Département de la Seine Maritime)

■ Couture des fissures :

Sur l'ensemble des fissures reconnues comme traversantes, des « **goujons** » permettant de mobiliser le frottement entre les lèvres des fissures principales ont été mis en œuvre. Il s'agit de deux aciers HA 25 par mètre, scellés en biais évitant les armatures existantes. Une **couture** entre les lèvres des fissures a ainsi été réalisée.



Photo n° 79 : injection des fissures (crédit photo du Département de la Seine Maritime)

■ Principales contraintes :

Les principales contraintes rencontrées sur ce chantier ont été les suivantes :

- les moyens spécifiques à mettre en œuvre pour installer un **échafaudage** à l'intérieur de piles dont la géométrie est particulière,
- les moyens mis en œuvre pour effectuer le coffrage des **nervures**, le coulage du béton en hauteur dans la pile ainsi que ceux nécessaires pour assurer une **liaison provisoire** entre les nervures et les parois des piles avant de procéder au clavage définitif,
- la difficulté de la **mise en œuvre du tissu de fibres de carbone** avec une structure d'échafaudage très proche de la paroi de béton.
- l'obligation de réaliser : l'injection des fissures principales, la mise en œuvre des bandes de tissus en fibre de carbone, le clavetage des nervures sous un contrôle et une **limitation des gradients thermiques**.

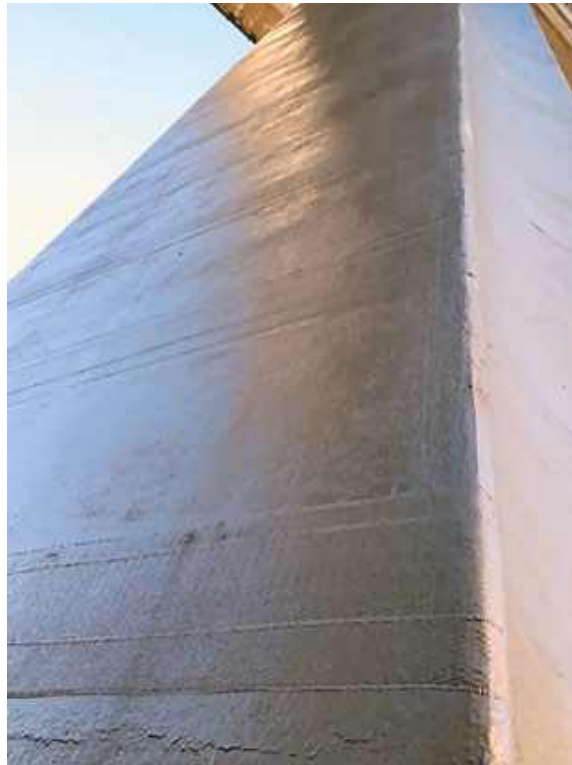


Photo n° 80 : revêtement de protection après mise en œuvre sur le parement d'une pile (crédit photo du Département de la Seine Maritime)

3.5.3.5 Cas d'un béton dégradé par les effets d'une érosion et/ou de chocs répétés - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.4.4 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions physiques (érosions et/ou chocs). L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres agressions physiques ou des attaques chimiques...

L'article suivant explicite les méthodes de réparation, de renforcement et de protection envisageables suivant l'**importance des désordres constatés**. Le tableau qui suit synthétise les méthodes à mettre en œuvre.

3.5.3.5.1 Cas où les désordres sont superficiels et si les armatures n'ont pas été touchées – Méthodes de réparation et protection

- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé par l'érosion ou les chocs ;
- la reconstitution de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection avec un produit de réparation : mortier ou béton). La formulation du matériau de réparation doit être adaptée aux risques d'érosion ou d'usure. Les produits de réparation doivent répondre aux exigences fixées au **marché** basées sur les **méthodes d'essais de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR)** ;
- la réparation peut s'accompagner de la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre l'érosion ou les chocs ou la mise en place de protections en bois, en métal si l'expertise a montré que les risques d'érosion ou de chocs sont importants.

3.5.3.5.2 Cas où les désordres sont importants - Méthodes de réparation, renforcement et protection

- une préparation de surface du béton avec l'élimination du béton dégradé par l'érosion ou les chocs, voire carbonaté ou contaminé ainsi que le traitement des armatures existantes corrodées ;
- le remplacement des armatures déformées. Le scellement d'armatures de couture dans les parties de béton conservées complète, en tant que de besoin, le ferrailage reconstitué. Des armatures supplémentaires sont éventuellement nécessaires ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des **surépaisseurs** par bétonnage en place ou tout autre méthode ; le béton ajouté devant être formulé pour mieux répondre aux risques d'érosion et de chocs.
- les produits de réparation doivent répondre aux exigences fixées au marché basées sur les méthodes d'essais de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ;
- la réparation peut s'accompagner de la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre l'érosion ou les chocs si l'expertise a montré que les risques d'érosion ou de chocs sont importants. Le choix de tels revêtements relève d'une étude spécifique lorsque les agressions sont intenses (érosion et chocs hydrauliques...). D'autres solutions sont envisageables, comme la réalisation d'un platelage d'usure en bois, métallique...).

3.5.3.5.3 Tableau synoptique

Constatations	Béton dégradé par les effets de l'érosion et/ou de chocs répétés		
	Endommagement du béton d'enrobage	Endommagement du béton et des armatures	Endommagement du béton et des armatures
Désordres (importance)	Superficiels	Importants	Très importants
Caractère structural (St) ou non (NS)	NSt	St	St
Risques	Évolution vers des désordres structurels	Augmentation des désordres structurels	Augmentation des désordres structurels, voire ruptures
Cas à considérer	1	2a à 2b	3
Méthodes de réparation, renforcement et protection	Ob	Ob	Ob
Préparation des supports (béton et si nécessaire des armatures)	0	0	0
1 Protection contre toute pénétration du béton par : M1.1 et M1.3 : imprégnation hydrophobe et/ou revêtement armé ou non (FABEM 4) M1.8 : application de membranes			

Constatations	Béton dégradé par les effets de l'érosion et/ou de chocs répétés		
	Endommagement du béton d'enrobage	Endommagement du béton et des armatures	Endommagement du béton et des armatures
Chape d'étanchéité (FAEQ 1)			
Réfection des dispositifs de drainage			
2 Protection des fissures contre toute pénétration par : M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par calfeutrement ou pontage) (FABEM 2) M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par protection localisée ou généralisée) (FABEM 4) M1.5 : remplissage (colmatage) des fissures par injection ou autre procédé avec un produit (rigide (a), souple (b) ou expansif (c)) (FABEM 3) M6.1 transformation des fissures en joints (FABEM 2)	NR	NR	NR
3 La restauration du béton : M3-1 à 3 : ajout de mortier ou de béton M7.2 : remplacement du béton endommagé ou pollué M3.4 : remplacement d'éléments	Ob SB O	Ob SB O	Ob SB Ou Ou
4 Le renforcement structural par : M4.1 : ajout ou remplacement d'armatures passives intérieures (FABEM 7) M4.2 : scellement d'armatures de BA M4.3 : ajout d'armatures passives extérieures (FABEM 7) M4.4 : ajout de mortier ou béton adhérent M4.5 : injection des fissures par un produit rigide (FABEM 3) et (FABEM 7) M4.7 : ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures (FABEM 8)	NR	Ob O O O (voir 3)	Ob O O O (voir 3)
5 Augmentation de la résistance physique	Ob	Ob	Ob
6 Augmentation de la résistance chimique	NR	NR	NR
7 Préservation ou restauration de la passivité : M7.1 : augmentation du recouvrement des armatures par du mortier ou du béton (FABEM 4) M7.2 : remplacement du béton armé carbonaté ou contaminé M7.3 et M7.5 : extraction des chlorures et réalcalinisation du béton M10.1 : application d'un potentiel (courant) électrique (protection cathodique) M11.1 : revêtement actif sur les armatures	NR	SB	SB

Tableau n° 20 : dégradations dues aux effets de l'érosion et/ou des chocs

LÉGENDE COMMUNE À TOUS LES TABLEAUX SYNTHÉTISANT LES RÉPARATIONS, RENFORCEMENTS, PROTECTIONS :

■ **M.x.y** : numéro de la méthode de protection, réparation ou renforcement mise en œuvre conformément au Tableau n° 2 situé au début du guide.

> **Cas à considérer :**

■ **Cas 1** : désordres peu importants concernant le béton d'enrobage

■ **Cas 2** : désordres importants : **(2a)** au-delà du béton d'enrobage nécessitant une réparation et **(2b)** au-delà du béton d'enrobage et endommagement des armatures nécessitant un renforcement

■ **Cas 3** : désordres très importants imposant le remplacement **(3)** de tout ou partie de l'élément, voire de l'ouvrage présentant des désordres

■ **NR** : sans objet dans la réparation proposée pour le désordre à traiter

■ **Oui** : principe (fonction) inclus dans la réparation proposée

Ob : réparation obligatoire :

O : réparation classique à retenir après étude

Ou : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer (un choix est nécessaire)

Ad : réparations à combiner si besoin est

SB : réparation à mettre en œuvre si besoin est

SF : protection contre les effets du feu si besoin est

SE : protection contre l'érosion si besoin est

> **Cas d'une réparation de fissures par injection :**

(a) : produit d'injection de type F rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton

(b) : produit d'injection souple pour boucher les fissures (produit de type D ductile ou de type S expansif)

3.5.3.5.4 Exemple de réparations

Le radier de la prise d'eau de la chute des Bois sous la mer de glace à Chamonix été fortement érodé par les eaux de fonte du glacier qui entraînent les pierres de la moraine. La réparation a été effectuée par un béton à base d'agrégats métalliques (densité comprise entre 4,6 et 4,9) ayant une résistance à la compression comprise entre 160 et 220 MPa et une résistance à l'abrasion légèrement supérieure à celle du granit¹².



Photo n° 81 : érosion hydraulique du radier de la chute des Bois près de Chamonix (crédit photo Weargrit)

¹² Consulter la présentation sur le site Le Pont.



Photo n° 82 : réparation du radier de la chute des Bois près de Chamonix (crédit photo Weargrit)

3.5.4 CAS D'UN BÉTON DÉGRADÉ PAR DES EFFETS CHIMIQUES (AGENTS EXTERNES) - MÉTHODES DE RÉPARATION, RENFORCEMENT ET PROTECTION

L'article 3.4.5 ci-dessus décrit les désordres, qui se produisent suivant la fréquence des actions chimiques extérieures et la nature et la teneur des agents chimiques incriminés (eaux pures, acides, séléniteuses, de mer...), sols agressifs (gypseux, marécageux...) milieux gazeux (anhydrides sulfureux, sulfure d'hydrogène...). L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

Les articles suivants explicitent les **méthodes de réparation, de renforcement et de protection** envisageables en fonction de l'agent agressif et de l'importance des désordres constatés et analysés. Lorsque les **armatures passives et actives** sont soumises à des **corrosions à caractère électrochimique**, il faut se reporter aux articles 3.5.6 ci-dessous et 3.5.7 ci-dessous.

Bien entendu, dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, la **solution « 3 » de démolition-reconstruction** s'impose.

3.5.4.1 Cas d'un béton dégradé par les effets des eaux pures, voire acides (eaux industrielles) - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.5.2.1 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions chimiques. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

Les méthodes de **renforcement, réparation et protection du béton** d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés**.

1. Si les désordres sont superficiels, c'est-à-dire que les dégradations sont **localisées ou généralisées** (toute la surface) mais que leur profondeur est inférieure ou égale à l'épaisseur du béton d'enrobage (par exemple, intervention dès l'apparition des premiers désordres dus à la dissolution des éléments calciques limitée au niveau de la peau du béton), l'opération de **restauration du béton** comprend :

- le captage des eaux à l'origine des dégradations (par exemple, mise en place d'un système de drainage) pour rendre possible les travaux ;
- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé par l'attaque chimique. Le lavage du béton pour éliminer toute trace acide peut être nécessaire ;
- la reconstitution de la peau (enrobage des armatures) manuellement ou mécaniquement (coulage ou projection) avec un produit de réparation (mortier ou béton). La formulation du matériau de réparation doit être adaptée à l'agent agressif en cause (classes d'exposition). La réparation peut concerner la totalité de l'élément endommagé ou une partie seulement ;
- **si la réparation est localisée**, il peut être nécessaire de prévoir en sus la mise en œuvre d'un **revêtement de protection** puisque la **formulation du béton existant** ne satisfait pas aux **classes d'exposition** de la **norme NF EN 206/CN** et aux prescriptions du fascicule de documentation **FD P18-011** (par exemple, eaux acides dans les milieux industriels). Ce revêtement peut aussi avoir un **caractère esthétique** (la réparation créant un effet « peau de léopard »),
- **si la réparation est généralisée** (totalité de la surface de la partie de la structure endommagée), un **revêtement de protection** peut aussi être nécessaire si le **produit de réparation** ne peut satisfaire aux **classes d'exposition** de la **norme NF EN 206/CN** et aux prescriptions du fascicule de documentation **FD P18-011** ;
- la rénovation des dispositifs de protection de la structure réparée contre les effets des eaux (dispositifs de recueil et d'évacuation des eaux, couvertines, chape d'étanchéité...).

2. Si les désordres sont importants ou très importants (profondeur supérieure à l'épaisseur du béton d'enrobage), **sont localisés ou généralisés** (par exemple, intervention tardive) et que certaines armatures sont mises à nu, l'opération a un **caractère structural** : elle porte sur la réparation, voire le renforcement de l'élément ou de la structure (béton) et comprend :

- le captage des eaux à l'origine des dégradations (par exemple, par un drainage) pour permettre les travaux ;
- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé. Le lavage du béton pour éliminer toute trace acide peut être nécessaire ;
- une injection des vides provoqués dans le corps de la pièce par les circulations d'eau qui provoquent la dissolution des éléments calciques, sous réserve que l'expertise ait permis de mesurer la porosité du béton et la possibilité de communications entre les vides ;
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et l'ajout d'armatures supplémentaires ;

- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs (pour augmenter l'enrobage des armatures) par bétonnage en place ou par injection sous pression ou par projection :
 - si la réparation est localisée, il peut être nécessaire de prévoir en sus la mise en œuvre d'un revêtement de protection puisque la formulation du béton existant ne satisfait pas aux classes d'exposition de la norme NF EN 206/CN et aux prescriptions du fascicule de documentation FD P18-011 (par exemple, eaux acides dans les milieux industriels). Ce revêtement peut avoir un caractère esthétique (la réparation créant un effet « peau de léopard »),
 - si la réparation est généralisée (totalité de la surface de la partie de la structure endommagée), un revêtement de protection peut aussi être nécessaire si le produit de réparation ne peut satisfaire aux classes d'exposition de la norme NF EN 206/CN et aux prescriptions du fascicule de documentation FD P18-011.

Rappel, lorsque les armatures sont corrodées, voire fortement endommagées ou détruites, il faut se reporter aux articles 3.5.6 et 3.5.7 ci-dessous.

3.5.4.1.1 Tableau synoptique (concerne la réparation des effets des attaques dues aux eaux pures et acides, voire d'autres attaques chimiques)

Note : ce tableau qui concerne les eaux pures ou acides est également applicable si l'ouvrage est soumis à des attaques, soit d'eaux ou de sols contenant des sels agressifs (sulfates, nitrates...), soit d'eaux de mer ou biocides. Cependant d'autres effets comme des actions physiques... peuvent accompagner ces attaques. La mise en œuvre de mesures de protection, réparation ou renforcement complémentaires peuvent être nécessaires. Le lecteur est invité à se reporter aux articles concernés ci-après.

Désordres (importance)	Béton dégradé par des causes chimiques			
	Eau pure ou acides			
	Endommagement du béton d'enrobage	Endommagement du béton et localement atteinte des armatures	Endommagement du béton et des armatures	Endommagement très important du béton et des armatures
Caractère structural (St) ou non (NS)	NSt	St	St	St
Risques	Évolution	Augmentation des désordres	Évolution vers une rupture	Rupture
Cas à considérer (1, 2a, 2b ou 3)	1	2a	2b	3
Méthodes de réparation, renforcement et protection	Ob	Ob	Ob	Ob
Préparation des supports (béton et, si nécessaire, des armatures)	O	O	O	O
1 Protection contre toute pénétration du béton par :	Ob	Ob	Ob	Ob
M1.1 et M1.3 : imprégnation hydrophobe et/ou revêtement armé ou non (FABEM 4)	O	O	O	O
M1.8 : application de membranes	SB	SB	SB	SB
Chape d'étanchéité (FAEQ 1)	SB	SB	SB	SB
Réfection des dispositifs de drainage	SB	SB	SB	SB

Désordres (importance)	Béton dégradé par des causes chimiques			
	Eau pure ou acides			
	Endommagement du béton d'enrobage	Endommagement du béton et localement atteinte des armatures	Endommagement du béton et des armatures	Endommagement très important du béton et des armatures
2 Protection des fissures contre toute pénétration par : M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par calfeutrement ou pontage) (FABEM 2) M1.4 : Colmatage superficiel des fissures (par protection localisée ou généralisée) (FABEM 4) M1.5 : remplissage (colmatage) des fissures par injection ou autre procédé avec un produit (rigide (a), souple (b) ou expansif (c)) (FABEM 3) M6.1 transformation des fissures en joints (FABEM 2)	NR	NR	SB	SB
3 La restauration du béton : M3-1 à 3 : ajout de mortier ou de béton M7.2 : remplacement du béton endommagé ou pollué M3.4 : remplacement d'éléments	Ob O	Ob SB O	Ob SB O	Ob O
4 Le renforcement structural par : M4.1 : ajout ou remplacement d'armatures passives intérieures (FABEM 7) M4.2 : scellement d'armatures de BA M4.3 : ajout d'armatures passives extérieures (FABEM 7) M4.4 : ajout de mortier ou béton adhérent M4.5 : injection des fissures par un produit rigide (FABEM 3) et (FABEM 7) M4.7 : ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures (FABEM 8)			Ob O O O (voir 3)	SB
5 Augmentation de la résistance physique	SB (érosion et chocs)	SB (érosion et chocs)	SB (érosion et chocs)	SB (érosion et chocs)
6 Augmentation de la résistance chimique	Ob	Ob	Ob	Ob
7 Préservation ou restauration de la passivité : M7.1 : augmentation du recouvrement des armatures par du mortier ou du béton (FABEM 4) M7.2 : remplacement du béton armé carbonaté ou contaminé M7.3 et M7.5 : extraction des chlorures et réalcalinisation du béton M10.1 : application d'un potentiel (courant) électrique (protection cathodique) M11.1 : revêtement actif sur les armatures		SB SB (voir 3) O (voir 3) SB	SB SB (voir 3) O (voir 3) SB	SB

Tableau n° 21 : méthodes de réparation des désordres d'origine chimique (eaux pures ou acides)

LÉGENDE COMMUNE À TOUS LES TABLEAUX SYNTHÉTISANT LES RÉPARATIONS, RENFORCEMENTS, PROTECTIONS :

■ **M.x.y** : numéro de la méthode de protection, réparation ou renforcement mise en œuvre conformément au Tableau n° 2 situé au début du guide.

> Cas à considérer :

- **Cas 1** : désordres peu importants concernant le béton d'enrobage
- **Cas 2** : désordres importants : **(2a)** au-delà du béton d'enrobage nécessitant une réparation et **(2b)** au-delà du béton d'enrobage et endommagement des armatures nécessitant un renforcement
- **Cas 3** : désordres très importants imposant le remplacement **(3)** de tout ou partie de l'élément, voire de l'ouvrage présentant des désordres
- **NR** : sans objet dans la réparation proposée pour le désordre à traiter
- **Oui** : principe (fonction) inclus dans la réparation proposée

Ob : réparation obligatoire

O : réparation classique à retenir après étude

Ou : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer (un choix est nécessaire)

Ad : réparations à combiner si besoin est

SB : réparation à mettre en œuvre si besoin est

SF : protection contre les effets du feu si besoin est

SE : protection contre l'érosion si besoin est

> Cas d'une réparation de fissures par injection :

(a) : produit d'injection de type F rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton.

(b) : produit d'injection souple pour boucher les fissures (produit de type D ductile ou de type S expansif)

3.5.4.1.2 Exemple de réparation

La restauration d'un des **massifs de fondation de l'arc du pont de la Caille** endommagé par les effets du gel à cause d'un béton gélif imbibé d'eau par les précipitations atmosphériques et les **circulations d'eau dans le sol** :

- une étude a été menée d'une part, pour déterminer la porosité du béton (prélèvement de carottes) et, d'autre part, pour s'assurer que les vides internes étaient communicants, donc injectables (utilisation de traceurs radioactifs) ;
- la protection contre les eaux de pluie et la neige avait été assurée quelques années plutôt par la réalisation d'une couverture en béton armé (voir la photo) ;
- La peau du béton a été protégée par une couche de béton mise en place par projection ;
- les eaux du sol ont été captées par un système de drains subhorizontaux forés,
- les vides à l'intérieur du massif ont été injectés par un coulis de ciment...



Photo n° 83 : un des deux massifs de fondation du pont de la Caille avant mise en œuvre du béton projeté (crédit photo DDE 74)



Photo n° 84 : travaux en cours sur un des deux massifs de fondation du pont de la Caille (crédit photo DDE 74)

3.5.4.2 Cas d'un béton dégradé par les effets des eaux alcalines - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.5.3 décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions chimiques. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

Un béton classique à base de ciment Portland résiste aux eaux alcalines. Les seuls cas de réparation concernent :

- les bétons de structure à base de ciment alumineux, qui perd toute résistance au contact des eaux basiques. Les méthodes de réparation visées ci-devant en cas d'attaques acides peuvent être reprises sous réserve que les produits de réparation soient formulés pour résister à ces eaux basiques et soient compatibles avec le béton à base de ciment alumineux ;
- les bétons à base de ciment Portland qui présentent des efflorescences importantes (lorsqu'une face de la pièce est en contact permanent avec des eaux alcalines). Là encore, les méthodes de réparation applicables en cas d'attaques acides sont utilisables ;

Il est rappelé qu'un excès d'alcalins peut déclencher des **réactions de gonflement internes (RGI)**. Les méthodes de réparation actuellement envisageables sont présentées à l'article 3.5.5 ci-dessous.

3.5.4.3 Cas d'un béton dégradé par les effets des sols contenant des sels (sulfates, chlorures, nitrates, sulfures...) - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.5.3.1 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions chimiques. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

Les méthodes de réparation décrites dans le cas des attaques acides sont applicables aux attaques des solutions salines. Bien entendu, le béton endommagé ou pollué doit être éliminé puis lavé pour éliminer les agents agressifs. Le produit de réparation (mortier ou béton) doit être formulé pour résister aux agents agressifs en cause.

Lorsqu'en plus, les **armatures passives et actives** sont soumises à des **corrosions à caractère électrochimique**, il faut se reporter aux **articles 3.5.6 et 3.5.7** ci-dessous.

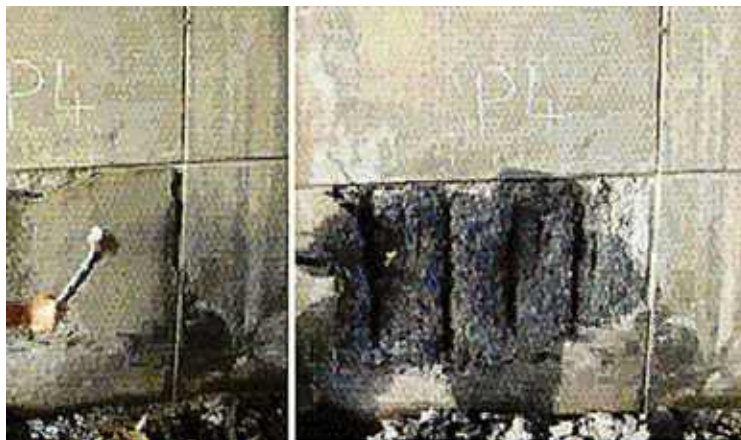


Photo n° 85 : attaque du béton par des eaux agressives (crédit photo Freyssinet)

3.5.4.4 Cas d'un béton dégradé par les effets de l'eau de mer - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.5.3.2 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions chimiques et mécaniques causées par l'eau de mer. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

Les attaques par l'eau de mer concernent surtout les parties exposées au marnage et aux projections sous les effets des deux principaux agents agressifs que sont les **sulfates et les chlorures**. Les méthodes de réparation pour traiter des agressions des eaux contenant certains sels dissous et décrites dans les **articles ci-devant** sont applicables aux attaques dues à l'eau de mer.

Comme il y a présence de **chlorures**, il y a lieu de traiter aussi la **corrosion des armatures**. Il faut se reporter aux **articles 3.5.6 et 3.5.7** ci-dessous.

Les vagues qui brassent du sable et des galets peuvent provoquer des désordres par **abrasion et chocs**. Se reporter à l'**article 3.5.3.5** ci-dessus qui détaille les méthodes de réparation, renforcement et protection envisageables.

Aux attaques par l'eau de mer peuvent être associées les **effets du gel** et des **attaques biologiques**. Se reporter aux **articles 3.5.3.2 et 3.5.4.5** du présent GUIDE.

3.5.4.5 Cas d'un béton dégradé par les effets d'attaques biochimiques - Méthodes de réparation, renforcement et protection

L'article 3.4.5.3.3 décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions biochimiques. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis à d'autres attaques chimiques et à des agressions physiques...

> Cas des attaques sulfo-bactériennes :

Ce cas relève des méthodes de réparation des bétons soumis à des attaques acides et sulfatiques développées dans les articles 3.5.4.1 et 3.5.4.3 ci-dessus.

> Cas des attaques dues à l'activité des moisissures, mousses, algues... :

Les méthodes de **restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant l'**importance des désordres constatés** :

1. Si les désordres sont superficiels (intervention dès l'apparition des premiers désordres au niveau de la peau du béton), l'**opération de restauration** du béton comprend :

- une préparation de surface avec l'enlèvement des dépôts de mousses, algues, moisissures par brosse et lavage à l'eau sous pression ;
- la mise en œuvre d'un produit biocide autorisé pour éliminer les agents biologiques, suivie quelques heures après d'un lavage soigné ;
- la mise en œuvre d'un produit protecteur contre les agents biologiques qui devra être renouvelé périodiquement pour assurer une protection de longue durée ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux.

2. Si les désordres sont plus importants (intervention tardive), l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface avec l'enlèvement des dépôts de mousses, algues, moisissures par brosse et lavage à l'eau sous pression ;
- la mise en œuvre d'un produit biocide autorisé pour éliminer les agents biologiques, suivie quelques heures après d'un lavage soigné ;
- l'élimination de la totalité du béton dégradé ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce manuellement ou mécaniquement. Le mortier ou le béton de réparation peut être traité dans la masse par un produit biocide.
 - **si la réparation est localisée**, il est nécessaire de prévoir la mise en œuvre d'un **revêtement de protection** si l'attaque biochimique ne peut être supprimée et si la formulation du béton existant n'assure pas une résistance à cette attaque. Ce revêtement peut avoir un caractère esthétique (la réparation créant un effet « peau de léopard »),
 - **si la réparation est généralisée** (totalité de la surface de la partie de la structure endommagée), un **revêtement de protection** peut aussi être nécessaire si le produit de réparation ne peut résister à l'attaque biocide ;
- le produit protecteur (contre les agents biologiques) qui devra être renouvelé périodiquement pour assurer une protection de longue durée ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux.

3.5.5

CAS DES DÉSORDRES D'ORIGINE CHIMIQUE INTERNE – RÉACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE (RGI) - MÉTHODES DE RÉPARATION, RENFORCEMENT ET PROTECTION

L'article 3.4.5.4 ci-dessus décrit les désordres qui se produisent suivant l'intensité des actions chimiques. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis à d'autres attaques chimiques et à des agressions physiques...

ATTENTION, dans une RGI, tant que les produits nécessaires à la réaction sont présents au cœur du béton (eau libre, alcalins, sulfates...), **la réaction de gonflement se poursuit**. À ce jour, il n'existe pas de technique de réparation qui permette de stopper ce processus. Parmi les méthodes utilisées jusqu'à présent, certaines sont **inefficaces** mais d'autres permettent de **prolonger plus ou moins longtemps la vie des ouvrages malades** (les réparations effectuées étant relativement récentes, leur efficacité à long terme est inconnue sauf, bien entendu, la **solution ultime** qui est la démolition-reconstruction). Il est indispensable d'évaluer le gonflement potentiel à venir qui joue sur l'efficacité et la durée de vie de la réparation.

Les différentes méthodes envisageables dans les cas de désordres dus à des réactions de gonflement interne sont résumées sur le tableau suivant (y compris celles qui ne sont pas développées par le présent GUIDE et qui sont indiquées en italiques). Ces méthodes de réparation avec leur niveau d'efficacité sont extraites du guide méthodologique 2003 du LCPC d'aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne. Il est indispensable de se référer à ce guide avant d'entreprendre la moindre action sur un ouvrage touché par une telle pathologie. De plus, le conseil de spécialistes est capital, compte tenu de la complexité de l'expertise et de la difficulté de la mise au point des solutions de réparation.

3.5.5.1 Tableau synoptique

Méthodes de réparation	Efficacité	Observations
Pontage ou injection des fissures (FABEM 2) ou (FABEM 3)	0	Cette technique n'empêche pas les échanges hydriques avec l'extérieur.
Peinture film de 200 à 300 µm au maximum (FABEM 4)	0	Cette technique n'empêche pas les échanges hydriques avec l'extérieur.
Revêtement étanche à l'eau et à la vapeur d'eau (FABEM 4)	+	Le revêtement réduit les échanges hydriques, donc la quantité d'eau disponible pour la réaction. Seule l'eau interne au béton est disponible pour alimenter les réactions.
Réalisation d'un frettage de la pièce par : des méthodes de réparation applicables aux désordres d'origine mécanique, traitées ci-après ou dans d'autres guides de la série. Il faut, de plus, réduire les échanges hydriques.		
Enrobage de la structure par un voile en béton armé formant une sorte de sarcophage (FABEM 1) et (FABEM 7)	++	<ul style="list-style-type: none"> d'une part, les armatures du voile reprennent une partie des efforts d'expansion ce qui soulage d'autant les armatures de la structure ; d'autre part, les échanges hydriques avec l'extérieur sont ralentis par le voile.

Méthodes de réparation	Efficacité	Observations
Mise en œuvre d'armatures extérieures au béton par collage de composites (fibres de verre ou de carbone) (FABEM 4) (FABEM 7).	++	<ul style="list-style-type: none"> d'une part, les armatures extérieures reprennent une partie des efforts d'expansion ce qui soulage d'autant les armatures de la structure ; d'autre part, les échanges hydriques avec l'extérieur sont ralentis par l'armature (si la pièce est totalement enrobée sinon prévoir un revêtement d'étanchéité).
Création d'une précontrainte, si possible, tridimensionnelle : contrainte de 3 à 10 MPa suivant l'importance de l'expansion résiduelle estimée lors de l'expertise (FABEM 4) et (FABEM 8)	+++	L'étreinte triaxiale empêche l'expansion (si l'étreinte n'est que bidirectionnelle l'expansion dans le sens non précontraint n'est pas bloquée). Réparation à combiner ou non avec un voile en béton ou un revêtement d'étanchéité.
Création d'un joint : (la libération des contraintes par sciage fait partie des méthodes de réparation des désordres d'origine mécanique) (FABEM 2)	++	Applicable à certaines structures (par exemple, les barrages poids). Réparation à combiner avec le calfeutrement des coupures, un revêtement d'étanchéité...
Démolition-reconstruction	Efficacité totale	Solution de type « 3 » coûteuse mais qui, parfois, s'impose.

Tableau n° 22 : méthodes de réparation des désordres dus à des RGI

Légende :

0 : traitement inefficace.

+ : traitement permettant de prolonger la vie de l'ouvrage (cas d'un ouvrage endommagé mais évoluant peu) ou en combinaison avec des méthodes listées dans la suite du tableau.

++ : traitement qui peut être efficace mais seulement à moyen terme (+++ seule la précontrainte tridimensionnelle semble en mesure de confiner la réaction).

Les traitements des désordres dus aux réactions de gonflement interne, faute d'un recul suffisant, restent, à ce jour, du domaine expérimental. Il n'a donc pas été jugé utile de les décrire par le détail dans le présent document (se reporter au guide méthodologique de 2003 du LCPC).

3.5.5.2 Exemple de réparation provisoire

■ La réparation provisoire des pylônes du pont suspendu de Térénez dans le Finistère affectés par une **alcali-réaction** en attendant la construction d'un nouvel ouvrage (pont à haubans courbe) achevé maintenant depuis plusieurs années.

Cette RGI provoquait leur fissuration dans le sens vertical à cause des effets du gonflement transversal (dans le plan horizontal sachant que la forte compression empêchant le développement des fissures horizontales).

La réparation a été effectuée par **ceinturage des mâts des pylônes** par des tissus composites à base de fibre de carbone et par une **ceinture précontrainte** de la base des pylônes.

Observation : le confinement des pylônes par des ceintures en matériaux composites étant discontinu n'a été que peu efficace.

Un confinement par un caisson en tôle soudée avec injection de l'interface entre le béton et le caisson ou un confinement par un matériau composite collé n'est efficace que si le dimensionnement a été fait en se basant sur la déformation et non sur la contrainte limite des matériaux mis en œuvre. En effet, les ceintures de confinement se déforment lors de leur mise en charge et il faut limiter au maximum la déformation pour qu'elles soient efficaces. Ce problème n'existe pas avec des ceintures précontraintes calculées pour comprimer la structure.



Photo n° 86 : importance de la fissuration (crédit photo Freyssinet)

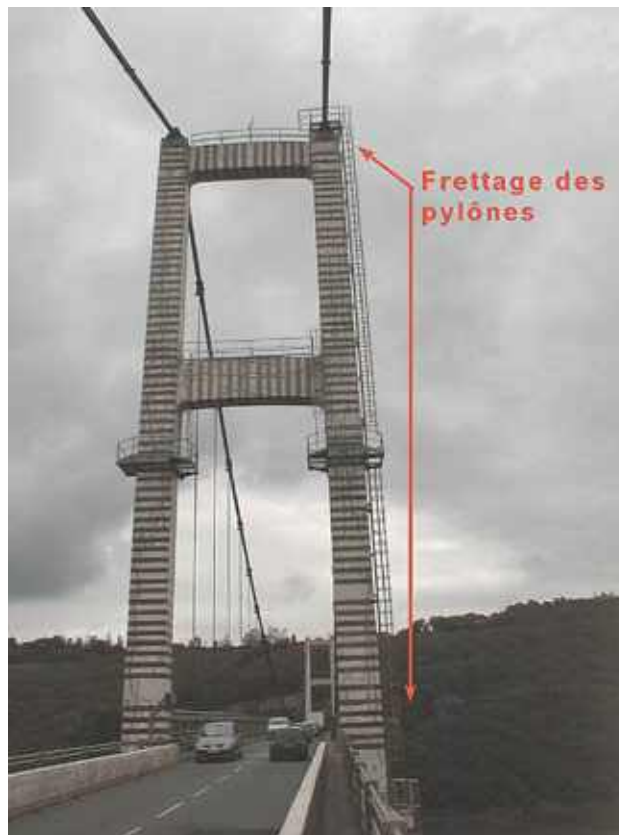


Photo n° 87 : ceinturage des pylônes par des bandes de tissu composite (crédit photo Freyssinet)



*Photo n° 88 : ceinturage de la base des pylônes en cours de bétonnage par projection
(crédit photo Freyssinet)*



Photo n° 89 : détail du ceinturage (crédit photo Freyssinet)

3.5.5.3 Exemple d'une démolition-reconstruction

- Le remplacement du chevêtre du pont de Fozières sur la RN 9 atteint par une réaction sulfatique interne.

Le tablier a été mis sur des appuis provisoires, le chevêtre a été découpé en morceaux qui ont été évacués et enfin, un nouveau chevêtre a été réalisé par bétonnage en place.

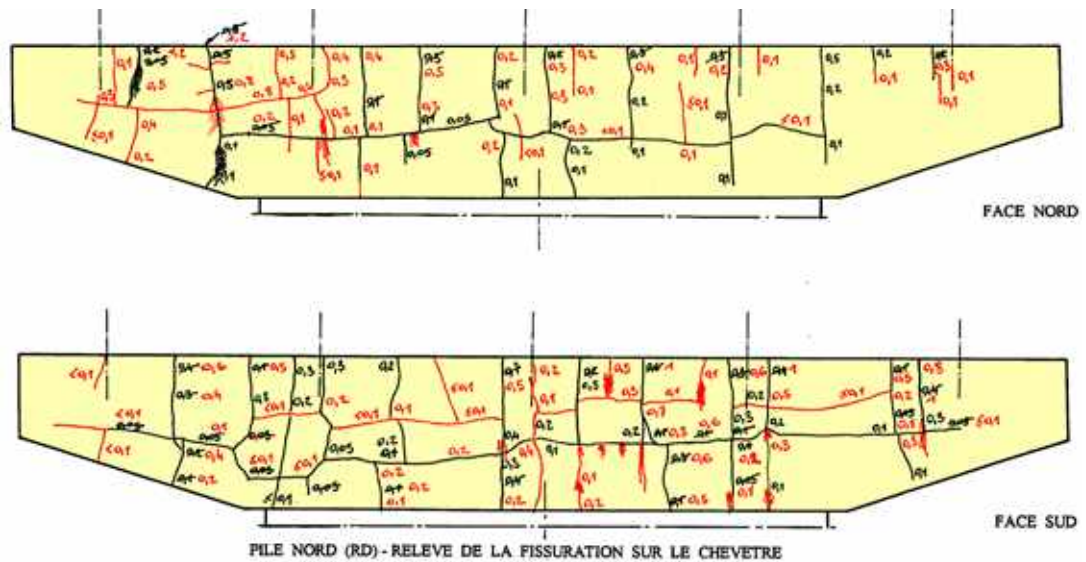


Figure n° 41 : relevé de la fissuration du chevêtre (crédit photo CÉTÉ d'Aix-en-Provence - M. Broquet)



Photo n° 90 : étaieage des deux travées reposant sur le chevêtre (crédit photo CÉTÉ d'Aix-en-Provence - M. Broquet)



Photo n° 91 : mise en place du ferrailage du nouveau chevetre
(crédit photo CÉTÉ d'Aix-en-Provence - M. Broquet)

3.5.6

DÉSORDRES ET DÉGRADATIONS DUS À LA CORROSION DES ARMATURES DE BÉTON ARMÉ – MÉTHODES DE PRÉSERVATION DES ARMATURES DE LA CORROSION ET MÉTHODES DE TRAITEMENT DES ARMATURES CORRODÉES

3.5.6.1 Généralités

Le présent texte s'applique aux **armatures passives** des constructions en **béton armé** comme à celles des constructions en **béton précontraint** mais, pour ces dernières, avec quelques réserves sur l'utilisation de certains **procédés de traitement électrochimiques**. Le cas des **armatures actives** (les armatures de précontrainte) est traité à l'article 3.5.7 ci-dessous. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

Le présent **GUIDE** s'appuie sur la norme **NF P95-101** pour les **réparations de surface** des bétons (réparations limitées aux premiers lits d'armatures) auxquelles cette norme est limitée (son tableau 1 vise et détaille uniquement les méthodes de réparation **M3.1 à M3.3 et M7.2** de la norme **NF EN 1504-9** bien qu'elle vise dans son tableau 2 les **méthodes pouvant être associées** comme celles du principe P 4 : renforcement structural, etc.).

Le présent **GUIDE** est beaucoup plus étendu, il traite aussi des **réparations à caractère structural**, de la **préservation de la passivité** par les méthodes électrochimiques de réalcalinisation ou d'extraction des chlorures...

Pour bien comprendre certains termes utilisés ci-après, tels que ceux de **contrôles anodique et cathodique**, il faut se reporter à l'article 3.4.6.2 ci-devant qui traite de la **corrosion électrochimique** et des diverses réactions qui se produisent.

Les méthodes de réparation applicables aux armatures passives doivent satisfaire aux deux objectifs suivants :

1. la préservation des armatures non encore touchées par la corrosion ;
2. la restauration de la passivation des armatures touchées par la corrosion, voire le remplacement des armatures endommagées ou détruites.

Très important, lors du choix d'une méthode de réparation contre les effets de la corrosion, il faut s'assurer que cette méthode n'entraînera pas des effets pervers comme ceux listés ci-dessous :

- certaines méthodes électrochimiques peuvent fragiliser les armatures de précontrainte vis-à-vis de la corrosion fissurante sous tension, ou rendre le béton sensible à une alcali-réaction (augmentation de l'alcalinité du béton) ;
- les méthodes de réduction de l'humidité peuvent entraîner une augmentation de la vitesse de carbonatation¹³ ;
- une méthode de contrôle anodique, comme la mise en œuvre d'un revêtement étanche sur les armatures (produit à base d'une résine synthétique), impose que l'armature soit totalement revêtue. Dans le cas contraire, il risque de se former au contact des agents agressifs et au droit d'une blessure du revêtement une corrosion par piqûre qui se développera vers l'intérieur sous forme de corrosion dite « caverneuse » (pile d'aération différentielle) et qui entraînera la destruction rapide par dissolution de l'armature sous le revêtement de protection...



Photo n° 92 : corrosion d'une armature de béton armé revêtue d'époxy (extrait d'une revue US)

De plus, la méthode de réparation contre les effets de la corrosion retenue doit être compatible avec la méthode retenue pour réparer les désordres d'origine physique, chimique ou mécanique qui se superposent, éventuellement, à ceux créés par la corrosion.

Enfin, après la plupart des réparations nécessaires à juguler une corrosion, il faut protéger la structure contre les agents agressifs présents dans son environnement pour empêcher le développement d'une nouvelle corrosion. Une bonne partie des méthodes développées dans 3.5.6.3.2 ci-dessous peuvent assurer la protection exigée. Se reporter également aux GUIDES du STRRES FABEM 2, 3 et 4 et aux normes NF P95-103 et NF P95-102-1.

Bien entendu, dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, la solution de démolition-reconstruction s'impose.

¹³ La carbonatation est inexistante dans une atmosphère parfaitement sèche ou totalement saturée mais est maximale pour un taux d'humidité d'environ 60%.

Pour de plus amples informations sur les traitements préventifs et curatifs de la corrosion, il est loisible de consulter le **guide de juillet 2004 de l'AFGC** relatif à la **maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction**.

Le **fascicule 65 du CCTG** a introduit des modifications sur les valeurs exigées pour la perméabilité, la porosité...

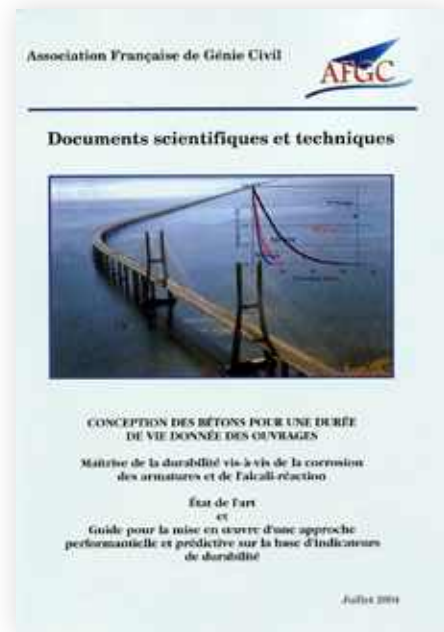


Photo n° 93 : guide de l'AFGC de juillet 2004
(crédit photo AFGC)

Dans les articles qui suivent sont détaillées, d'une part, les **méthodes de préservation de la passivité des armatures**, qui ont un caractère **préventif** et, d'autre part, les **méthodes de restauration de la passivité des armatures** qui ont un caractère **curatif**.

Le choix des méthodes va dépendre de la profondeur de pénétration des agents agressifs et de leur dosage ainsi que de l'importance du développement de la corrosion comme le montre les figures ci-après représentant les différentes conséquences de l'évolution d'une **carbonatation** puis d'une carbonatation généralisée sur un élément d'une structure ainsi que dans le cas de l'évolution d'une **chloruration**.

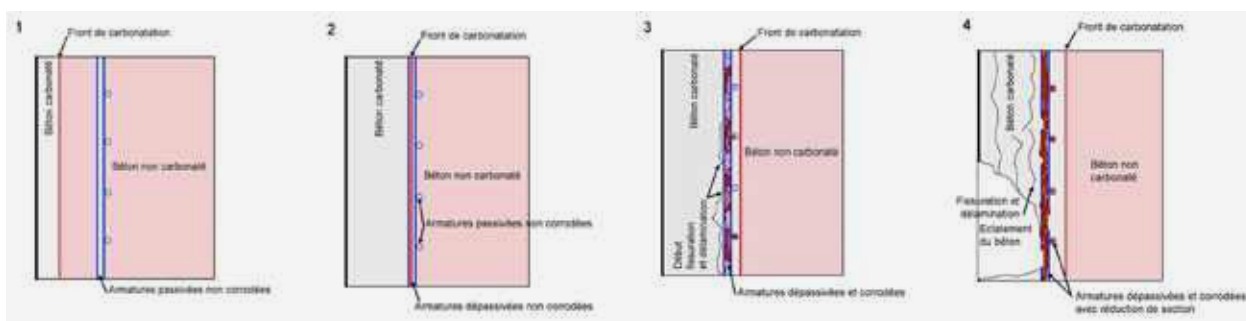


Figure n° 42 : les quatre cas à considérer pour le choix de la méthode de réparation la mieux adaptée (ici dans le cas d'une carbonatation)

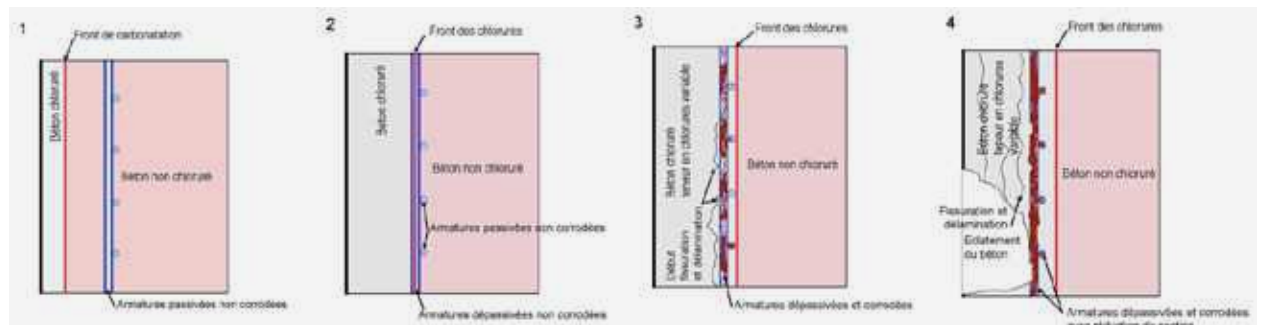


Figure n° 43 : les quatre cas à considérer pour le choix de la méthode de réparation la mieux adaptée (ici dans le cas d'une chloruration)

ATTENTION, ce n'est pas toujours aussi simple car la pénétration des agents agressifs n'est pas toujours homogène (présence de nids de cailloux, perméabilité variable, zones de coulures, expositions différentes...) et les enrobages ne sont pas toujours respectés comme le montre l'image ci-dessous. Dans ce cas les désordres qui apparaissent sont localisés et nécessitent le plus souvent le recours aux méthodes de réparation curatives décrites ci-après.

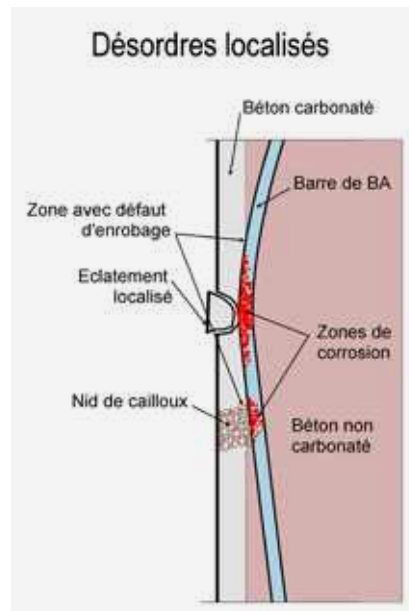


Figure n° 44 : désordres localisés

3.5.6.2 Méthodes (préventives) de préservation de la passivité des armatures non encore touchées par la corrosion

Le cas se présente, par exemple, lorsque le béton d'enrobage des armatures n'est pas entièrement carbonaté ($\text{pH} > 9$) et/ou pollué et présente un taux de chlorures ou d'autres halogénures et produits nettement inférieur au **seuil critique**. Dans ce cas, les armatures restent passivées et se trouvent en **période dite d'incubation**.

La figure ci-après montre le cas d'un béton où le béton est chloruré sensiblement uniformément mais sur une faible épaisseur.

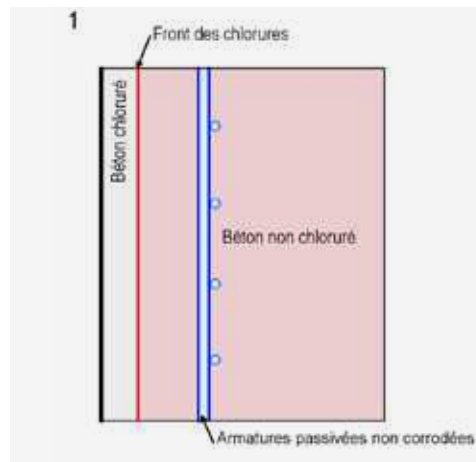


Figure n° 45 : schéma illustrant le recours aux méthodes préventives

Dans la pratique, pour qu'un tel cas puisse se présenter, il faut que l'ouvrage soit soumis à une **surveillance spécifique** prévoyant, à intervalles réguliers, des mesures telles que celles de la profondeur de pénétration des agents agressifs et de leur dosage.

Les méthodes de réparations préventives, listées ci-après, sont **beaucoup moins coûteuses** que les méthodes curatives décrites dans l'article 3.5.6.3 ci-dessous. Elles sont à rattacher à l'**entretien préventif** qui devrait être « le credo » des maîtres d'ouvrages.

Le guide de juillet 2004 de l'AFGC relatif à la maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction décrit dans son annexe A 15.4 comment mettre en place des **éléments témoins et mesurer les indicateurs de durabilité** que sont : l'enrobage des armatures, la porosité et la perméabilité du béton ainsi que l'évolution des profils de carbonatation et des chlorures. Les contrôles périodiques permettent de savoir à quel moment intervenir pour mettre en œuvre une des méthodes préventives décrites ci-après.

Les méthodes spécifiques (1 à 6) de préservation de la passivité disponibles pour répondre à cet objectif sont essentiellement :

1. les méthodes de protection contre la pénétration des agents agressifs sous forme liquide (eau de mer...) et/ou gazeuse (gaz carbonique...). Ces méthodes font appel à la mise en œuvre :
 - si besoin est, des diverses techniques de traitement des fissures (injection, calfeutrement et pontage),
 - d'une imprégnation hydrophobe de surface bouchant les pores du matériau béton vis-à-vis de l'eau liquide mais pas des gaz,
 - d'un revêtement de protection étanche à l'eau liquide, à la vapeur d'eau et/ou aux gaz,
 - d'une membrane étanche... ;
2. les méthodes de contrôle ou de limitation de l'humidité laquelle sert d'électrolyte aux réactions de corrosion. La réduction de l'humidité en provenance de l'extérieur permet d'augmenter la résistivité du béton, qui s'oppose au développement des piles de corrosion. Ce contrôle peut être obtenu par la mise en œuvre des trois méthodes précédentes plus une c'est-à-dire :
 - aux diverses techniques de traitement des fissures (injection, calfeutrement et pontage),
 - à une imprégnation de surface hydrophobe bouchant les pores du matériau béton contre l'absorption de l'eau,
 - à un revêtement de protection étanche à l'eau liquide et/ou sous forme de vapeur,

- à un traitement électrochimique¹⁴ qui s'oppose à la circulation de l'eau dans le béton (par exemple, un tel traitement peut empêcher les remontées d'eau dans un mur) ;

Note : Le traitement électrochimique susvisé correspond à une électro-osmose technique normalement non utilisée dans le domaine des ouvrages d'art.

- 3. les méthodes d'augmentation de la résistivité** analogues à celles du **contrôle de l'humidité**. Cette augmentation est obtenue par la mise en œuvre :

- d'une imprégnation de surface hydrophobe,
- d'un revêtement de protection ;

- 4. les méthodes de contrôle cathodique qui s'oppose à l'arrivée de l'oxygène sur les zones cathodiques.** Ces méthodes font appel à la mise en œuvre à une des méthodes précédentes c'est-à-dire essentiellement à la mise en place :

- d'un revêtement de protection étanche aux gaz ;

ATTENTION, la mise en œuvre d'un **revêtement étanche** à l'eau bloque les **transferts de vapeur d'eau** ce qui peut poser des problèmes dans le domaine de l'habitat. De plus, le revêtement doit être généralisé à toutes les faces de l'élément sinon les agents agressifs peuvent pénétrer par une des faces non protégée (cas d'un mur de soutènement...).

Remarque : la liste des méthodes ci-dessus montre que **certaines des techniques** (par exemple, les revêtements de protection¹⁵) peuvent être appliquées pour assurer au béton aussi bien sa protection contre la pénétration d'agents agressifs que contre l'humidité et la pénétration de l'oxygène, voire tout en le protégeant contre des attaques chimiques. En effet, certains **revêtements de protection peuvent être qualifiés d'universels** car ils peuvent avoir, à la fois, une faible perméabilité aux gaz, à la vapeur d'eau et à l'eau liquide... En revanche, les imprégnations hydrophobes restent perméables aux gaz et ne sont pas compatibles pour la protection des zones où l'eau peut stagner. Il convient de se référer aux **fiches techniques des produits** pour choisir le produit le mieux adapté sans oublier de consulter la **norme NF EN 1504-2** et les **déclarations de performances (DdP)**.

ATTENTION, si le **taux de chlorures est très élevé** dans les premiers centimètres de l'enrobage et si on réalise, pour empêcher la pénétration des chlorures extérieurs, un revêtement à la surface du béton en pensant ainsi éviter la corrosion des armatures, il faut savoir que les chlorures prisonniers vont continuer à se répartir dans le béton par diffusivité et arriver au contact des armatures où ils peuvent atteindre le seuil critique pouvant entraîner leur corrosion. Dans un tel cas, la solution est, soit l'appel à la **prévention cathodique**, soit le recours aux **méthodes curatives** ci-après.

- 5. les méthodes augmentant la couche d'enrobage des armatures.** Ces méthodes font appel essentiellement à la mise en place :

- d'un mortier ou d'un béton à la surface de l'élément ou de la structure.

Le mortier ou le béton induisent une « certaine réalcalinisation » du béton dans le cas où celui-ci est carbonaté (méthode 7.4 du tableau 1 de la **norme NF EN 1504-9**). Bien entendu, les produits de réparation mis en œuvre doivent présenter une perméabilité et une porosité faible pour réduire la pénétration des agents agressifs.

- 6. les méthodes faisant appel à une « prévention cathodique » :**

La figure ci-après montre le cas limite où une **prévention cathodique** est envisageable (technique moins lourde que la protection cathodique). Ces techniques sont développées dans l'article 3.5.6.3.3.1 ci-dessous.

¹⁴ Des essais préliminaires sont indispensables pour s'assurer que le traitement ne risque pas de provoquer la corrosion des armatures ou le déclenchement d'une alcali-réaction (présence de granulats potentiellement réactifs).

¹⁵ Se reporter au guide technique de 2002 du LCPC, au guide de l'AFNOR GA P 18-902 et au GUIDE FABEM 4.

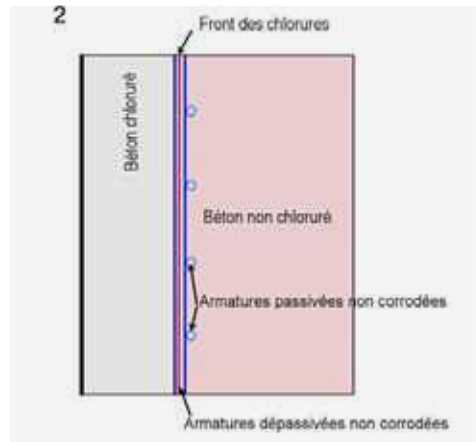


Figure n° 46 : exemple de cas limite

La protection cathodique sous ses diverses formes peut aussi être utilisée pour préserver de la corrosion les armatures d'un ouvrage neuf ou en service.

Cette démarche peut être envisagée dès le stade du projet lorsque l'environnement est très agressif ou lorsque la surveillance d'un ouvrage existant montre que la corrosion peut se développer plus rapidement que prévu (environnement plus agressif que prévu ou béton trop poreux ou trop perméable...) avec, par voie de conséquence, une réduction drastique de la période d'incubation et de la durée de vie souhaitée de l'ouvrage...).

3.5.6.3 Méthodes (curatives) destinées à restaurer la passivité des armatures touchées par la corrosion

3.5.6.3.1 Généralités

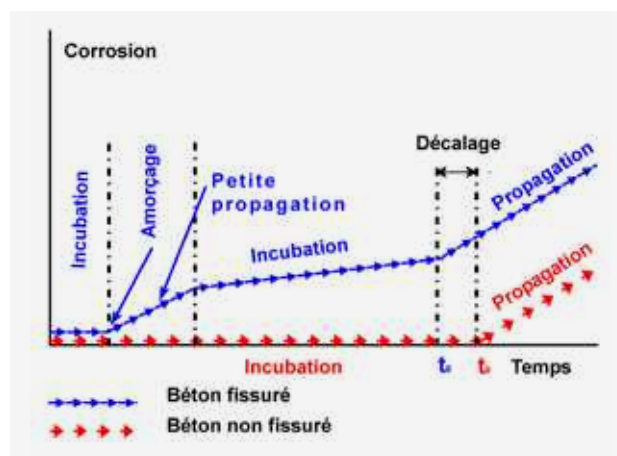


Figure n° 47 : rappel : évolution de la corrosion des armatures suivant que le béton est ou non fissuré

Très important, les méthodes curatives de traitement de la corrosion sauf la protection cathodique, qui protège en permanence la structure, ne peuvent empêcher la corrosion de se manifester à nouveau après un nouveau cycle d'incubation si des agents agressifs peuvent encore venir au contact du béton de la structure. Il faut donc prévoir, en supplément et obligatoirement, la mise en œuvre d'une protection de la surface du béton, voire d'autres travaux (par exemple, la réfection de la chape d'étanchéité, la remise en état des dispositifs de drainage des eaux...).

Les quatre méthodes curatives spécifiques de restauration de la passivité disponibles pour répondre à cet objectif sont essentiellement :

1. le remplacement du béton carbonaté, pollué et/ou désorganisé complété, si nécessaire, par divers traitements de protection des armatures ;
2. l'extraction électrochimique des chlorures et la réalcalinisation électrochimique ;
3. la protection cathodique ;
4. la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton.

Le choix de la méthode de réparation à adopter dépend, en particulier, du niveau de propagation de la corrosion :

- la corrosion peut être localisée à certaines parties (zones de défaut d'enrobage) ou généralisée à toutes les armatures. Le cas des désordres localisés est illustré par la Figure n° 44 ;
- les armatures peuvent être simplement rouillées ou profondément attaquées, voire même totalement détruites ce qui peut entraîner un risque de rupture de l'élément concerné, voire de la structure. Il s'agit des cas 3 et 4 illustrés par la Figure n° 42 et la Figure n° 43. Ici le béton est plus ou moins désorganisé (délaminations internes, fissurations plus ou moins ouvertes, éclatements, chute de blocs...) ;
- les armatures peuvent être encore intactes ou légèrement corrodées. Dans ce cas, le béton d'enrobage paraît intact mais est déjà fortement carbonaté ou pollué. Il s'agit du cas 2 illustré par la Figure n° 42 et la Figure n° 43.

Une même méthode de réparation (par exemple : la purge du béton pollué et désorganisé puis sa reconstitution) peut être utilisée pour réparer les **désordres dus à la corrosion** à divers stades de leur évolution (par exemple, depuis l'amorçage de la corrosion jusqu'à la corrosion totale des armatures).

Le tableau ci-après synthétise le domaine d'application de chaque méthode de réparation (**les critères de choix**) en prenant le **degré d'avancement de la corrosion** comme repère. Ce tableau est complété par un second tableau qui précise les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes de réparation.

Rappel : après la mise en œuvre d'une restauration de la passivité des armatures, la réalisation d'un **revêtement de protection** peut être nécessaire.

ATTENTION, les informations contenues dans ces tableaux ne doivent pas être appliquées sans un minimum de réflexion. Il est rappelé que le présent **GUIDE n'a pas pour but de se substituer au concepteur de la réparation** qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.

À la suite de ces deux tableaux les **quatre méthodes de réparation sont décrites** et leur domaine d'emploi explicité.

Le lecteur pourra se reporter, pour de plus amples détails sur **les différentes techniques de réparation** proposées, au **guide de novembre 2003 de l'AFGC** sur la réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion ainsi qu'aux normes :

- **NF EN ISO 12696 de février 2017** : Protection cathodique de l'acier dans le béton ;
- **NF EN 14038-1 de mai 2016** : Réalcalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures – Partie 1 : réalcalinisation ;
- **PR NF EN 14038-2 de décembre 2019** : Réalcalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures – Partie 2 : extraction des chlorures de décembre 2019.

Méthodes curatives de restauration de la passivation des armatures										Traitements complémentaires après réparation
Description des méthodes		Début de la propagation de la corrosion sans désorganisation interne du béton. Désordre local ou généralisé		Propagation avec désorganisation locale du béton (à cause d'un défaut d'enrobage, d'un nid de cailloux...)		Propagation avec désorganisation locale ou généralisée du béton mais faible réduction de la section des armatures		Propagation avec désorganisation locale ou généralisée du béton et des armatures (perte de section partielle ou totale)		1) Mise en œuvre d'une protection contre toute pénétration 2) Augmentation de la couverture des armatures avec du béton ou mortier (***)
		Solutions	Observations	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Protection + Finition
1 ^{ère} méthode	(a) Remplacement du béton pollué ou carbonaté	Ou	Voir aussi les autres méthodes	O	Réparation locale nécessaire	O	Réparation ± généralisée nécessaire	O Ou	Nécessaire ou. Démolition reconstruction en variante (**)	O Protection conseillée
	(b) Remplacement des armatures	NR		SB	Rarement	SB	Parfois	SB	Souvent (SB : armatures inoxydables, en matériaux composites)	
	(c) Protection des armatures par un revêtement actif (NF EN 1504-7) (*)	SB	Voir les limites d'emploi dans les articles ci-après	SB	Voir les limites d'emploi dans les articles ci-après	SB	Voir les limites d'emploi dans les articles ci-après	SB	Voir les limites d'emploi dans les articles ci-après	
2 ^{ème} méthode	(d) Extraction électrochimique des chlorures par anode active	Ou	Remplace les méthodes 1, 3 et 4 Domaine d'emploi limité	Ad 1	méthode 1 nécessaire Domaine d'emploi limité	EP	Limites d'emploi article 3.5.6.3.3 ci-dessous	EP	Limites d'emploi 3.5.6.3.3 ci-dessous	O Protection conseillée
	(e) Réalcalinisation par anode active									O Protection conseillée
	(f) Extraction électrochimique par courant imposé	Ou	Remplace les méthodes 1, 3 et 4 Domaine d'emploi limité	Ad 1	méthode 1 nécessaire Domaine d'emploi limité	EP	Limites d'emploi article 3.5.6.3.3	EP	Limites d'emploi article 3.5.6.3.3	O Protection conseillée
	(g) Réalcalinisation par courant imposé									O Protection conseillée

Méthodes curatives de restauration de la passivation des armatures										Traitements complémentaires après réparation
Description des méthodes	Début de la propagation de la corrosion sans désorganisation interne du béton. Désordre local ou généralisé		Propagation avec désorganisation locale du béton (à cause d'un défaut d'enrobage, d'un nid de cailloux...)		Propagation avec désorganisation locale ou généralisée du béton mais faible réduction de la section des armatures		Propagation avec désorganisation locale ou généralisée du béton et des armatures (perte de section partielle ou totale)		1) Mise en œuvre d'une protection contre toute pénétration 2) Augmentation de la couverture des armatures avec du béton ou mortier (***)	
	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Protection + Finition	
3 ^{ème} méthode	(h) Protection cathodique par anodes actives	Ou	Remplace les méthodes : 1, 2 et 4. Durée de vie liée au type d'anodes	Ad 1	Réparation locale nécessaire avant mise en œuvre Durée de vie liée au type d'anodes	Ad 1	Réparation nécessaire avant mise en œuvre Durée de vie limitée des anodes	Ad 1	Réparation nécessaire avant mise en œuvre Durée de vie limitée des anodes	NR sauf nécessité esthétique
	(i) Protection cathodique par courant imposé	Ou	Remplace les méthodes : 1, 2 et 4. Durée de vie liée au type d'anodes	Ad 1	Réparation locale nécessaire avant mise en œuvre Durée de vie liée au type d'anodes	Ad 1	Réparation nécessaire avant mise en œuvre Durée de vie liée au type d'anodes	Ad 1	Réparation nécessaire avant mise en œuvre Durée de vie liée au type d'anodes	NR sauf nécessité esthétique
4 ^{ème} méthode	(j) Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton	Ou	Se substitue aux méthodes : 1, 2 et 3 Domaine d'emploi expérimental	Ad 1	Complément possible mais uniquement à la méthode 1 Domaine d'emploi expérimental	Ad 1	Complément possible mais uniquement à la méthode 1 Domaine d'emploi expérimental	Ad 1	Complément possible mais uniquement à la méthode 1 Domaine d'emploi expérimental	O Protection conseillée

Tableau n° 23 : méthodes curatives de restauration de la passivité des armatures

Légende :**EP** : méthode de réparation nécessitant une étude préalable**O** : réparation à retenir**Ou** : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer un choix est nécessaire**Ad** : réparation à combiner avec une ou des autres méthodes**SB** : si besoin est**NR** : réparation non requise**(*)** : La norme **NF P95-101** n'impose la mise en place d'un produit de protection sur les armatures après leur décapage que dans certains cas. **Le DTU 42.1** l'impose dans tous les cas. **ATTENTION**, un tel revêtement est détruit si le béton est mis en place par projection, en particulier, par voie sèche.**(**)** : La démolition reconstruction d'un élément ou d'une structure relève de la méthode 3.4 (remplacements d'éléments) méthode visée par la norme **NF EN 1504-9**.**(***)** : La mise en œuvre d'une couche de mortier ou de béton en surépaisseur n'est possible que si l'élément et la structure peuvent supporter la charge supplémentaire ainsi apportée.

Avantages et inconvénients des méthodes de réparation curatives

Méthodes	Description	Avantages	Inconvénients
1 ^{ère} méthode	Remplacement du béton	<ul style="list-style-type: none"> • méthode classique • applicable dans presque tous les cas • indispensable pour la réparation du béton et des armatures avant tout autre traitement • coût, le plus souvent, compétitif 	<ul style="list-style-type: none"> • destructive donc traumatisante pour la structure si la technique d'enlèvement du béton carbonaté ou pollué et de dégagement des armatures est agressive. • durabilité de la réparation aléatoire : <ul style="list-style-type: none"> - si appliquée seule sans respect rigoureux de la procédure ; - si la réparation provoque une inversion de polarité ; - s'il n'y a pas de travaux complémentaires pour préserver la passivité des armatures en dehors des zones traitées (mise en place de produits de protection, mise en œuvre d'une réalcalinisation, d'une protection cathodique...).
2 ^{ème} méthode	a) Extraction des chlorures à anode active	<ul style="list-style-type: none"> • méthode non traumatisante pour la structure • élimination rapide des chlorures • déchloruration et réalcalinisation simultanées possibles 	<ul style="list-style-type: none"> • délicate d'application (spécialistes) • domaine d'application réduit (profondeur de la carbonatation et/ou des chlorures limitée) • risque de favoriser l'alcali-réaction • l'extraction des chlorures n'est pas totale (50 à 80%) • la restauration des zones présentant des délaminations est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas à être restauré) • protection du béton après traitement nécessaire • coût
	b) Réalcalinisation à anode active	<ul style="list-style-type: none"> • méthode non traumatisante pour la structure • régénération rapide du pH et de la passivation des armatures • déchloruration et réalcalinisation simultanées possibles 	
	c) Extraction des chlorures à courant imposé	<ul style="list-style-type: none"> • méthode non traumatisante pour la structure • élimination rapide des chlorures 	
	d) Réalcalinisation à courant imposé	<ul style="list-style-type: none"> • méthode non traumatisante pour la structure • régénération rapide du pH et de la passivation des armatures 	
3 ^{ème} méthode	a) Protection cathodique à anode active	<ul style="list-style-type: none"> • méthode universelle à la fois préventive ou curative mais gestion de l'installation moins contraignante que celle la méthode b) 	<ul style="list-style-type: none"> • délicate d'application (spécialistes) • la norme ne s'applique pas aux structures enterrées et immergées • la restauration des zones présentant des délaminations est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas à être restauré) • tous les objets métalliques électriquement isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit • vérifier l'absence de risque de corrosion fissurante sous tension pour les armatures de BP • risque de favoriser l'alcali-réaction si les exigences de la norme ne sont pas respectées • doit être précédée par la méthode 1 lorsqu'il y a désorganisation du béton et des armatures • nécessite un béton de résistivité pas trop élevée • surveillance nécessaire • coût

Avantages et inconvénients des méthodes de réparation curatives			
Méthodes	Description	Avantages	Inconvénients
3 ^{ème} méthode	b) Protection cathodique à courant imposé	<ul style="list-style-type: none"> • méthode universelle à la fois préventive et curative • s'applique même si la résistivité du béton est élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • délicate d'application (spécialistes) • la norme actuelle ne s'applique pas aux structures enterrées et immergées • la restauration des zones présentant des délaminations est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas à être restauré) • tous les objets métalliques électriquement isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit • normalement, il n'y a pas de risque de corrosion fissurante sous tension pour les armatures de BP mais il est conseillé de procéder à des tests • risque de favoriser l'alcali-réaction si les exigences de la norme ne sont pas respectées • contrôle indispensable lors de l'exploitation • coût d'installation et d'exploitation
4 ^{ème} méthode	Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton	<ul style="list-style-type: none"> • méthode non traumatisante pour la structure • coût 	<ul style="list-style-type: none"> • domaine d'application réduit (par exemple, faible teneur en chlorures et béton carbonaté car un pH élevé bloque l'effet des inhibiteurs) • controverses sur l'efficacité de certains inhibiteurs • manque de méthodes de validation de l'efficacité du traitement • protection du béton après traitement nécessaire

Tableau n° 24 : avantages et inconvénients des différentes méthodes curatives de restauration de la passivité des armatures

3.5.6.3.2 Première méthode curative - Le remplacement du béton pollué et/ou désorganisé et les divers traitements de protection des armatures

3.5.6.3.2.1 Généralités

ATTENTION, cette méthode risque d'être vouée à l'échec dans les deux cas suivants :

1. si la réparation est limitée aux seules zones où la corrosion se manifeste visuellement par des désordres. En effet, si les armatures dans les autres parties de la structure en sont au début de la période de propagation (faible corrosion donc avec une faible expansion de la rouille n'endommageant pas le béton), de nouveaux désordres vont apparaître par inversion de polarité (l'ancienne anode se transforme en cathode et vice et versa), même si un revêtement de protection est mis en œuvre à la fin du traitement.

Dans un tel cas, il faut, soit procéder au remplacement total du béton carbonaté et/ou pollué, soit appliquer en complément du traitement local une des méthodes électrochimiques décrites ci-après ;

2. dans le cas où les armatures corrodées ne sont pas dégagées totalement de leur gangue de béton pollué ou carbonaté (se reporter à l'article 5.2.1.2.3 ci-après qui décrit la méthode de préparation des armatures) et ce pour les mêmes raisons que précédemment (bien entendu, si les armatures ne présentent aucune trace de corrosion sur tout leur périmètre, ce dégagement n'est pas nécessaire).



Photo n° 94 : corrosion par inversion de polarité après réparation (crédit photo Freyssinet)

3.5.6.3.2.2 Le remplacement du béton pollué

Note : cette méthode comporte au plus huit (8) phases. Seules les phases 2, 4 et 6, voire 5 doivent obligatoirement être mise en œuvre, les autres sont applicables si besoin est.

1^{ère} phase : si besoin est, la structure est mise sur cintre. Le cas se présente lorsque la stabilité et/ou la résistance de la structure risquent d'être mises en jeu par les travaux de la seconde phase (par exemple, dégagement des armatures sur de grandes longueurs, enlèvement de la totalité du béton de certaines parties de la structure...);

2^{ème} phase : les armatures corrodées sont débarrassées de la gangue de béton qui les entoure au moyen de divers procédés et en respectant certaines précautions décrits dans la suite du présent GUIDE ;

3^{ème} phase : si besoin est (cas de corrosion avec réduction de section notable), certaines armatures doivent être remplacées, ce qui peut imposer le scellement de nouvelles d'armatures, des soudures bout à bout..., afin de redonner à l'ossature sa capacité portante ;

Note : dans le cas où un renforcement est nécessaire, il faut prévoir, soit l'ajout d'armatures de béton armé, soit le collage d'armatures composites ou une précontrainte additionnelle...

4^{ème} phase : les armatures sont obligatoirement débarrassées de toute trace de corrosion manuellement ou mécaniquement lorsque le procédé d'enlèvement du béton de la deuxième phase n'assure pas cette fonction. Cette phase (ou la seconde phase) est suivie d'un nettoyage pour éliminer toutes les souillures, les poussières et débris...

5^{ème} phase : dans certains cas, un revêtement de protection des armatures est à appliquer immédiatement après la quatrième phase. Cette mise en place peut être nécessaire comme l'explique l'article qui suit ;

6^{ème} phase : le béton d'enrobage des armatures est reconstitué de façon à retrouver la géométrie de la structure (manuellement ou mécaniquement au moyen d'un mortier ou béton qui peut être coulé, injecté, projeté...). Il est aussi possible d'augmenter le recouvrement des armatures, ce qui réalcalinise le béton et augmente sa résistivité ;

Note : la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion (mélangés au matériau de réparation ou appliqués à la surface du béton) peut être associée aux travaux de remplacement du béton pollué. Se reporter à l'article 3.5.6.3.3.2 ci-dessous.

7^{ème} phase : la structure est décintrée après durcissement du matériau de réparation du béton d'enrobage ;

8^{ème} phase : si besoin est, une protection de surface est mise en œuvre. Elle a pour but de protéger contre la pénétration de produits polluants les parties adjacentes à la zone réparée, à ponter la fissure pouvant se produire entre la partie réparée et le reste de l'élément et également d'améliorer l'aspect en évitant l'effet « peau de léopard »

Note : de plus, un traitement permanent des armatures de béton armé contre la corrosion, tel qu'une protection cathodique, peut être nécessaire dans certains cas.

Les principales phases d'une opération de remplacement du béton pollué ou carbonaté, ici manuelle, font l'objet des photographies qui suivent.



Photo n° 95 phases 1 et 2 d'une réparation par enlèvement du béton pollué (crédit photo Parexlanko)

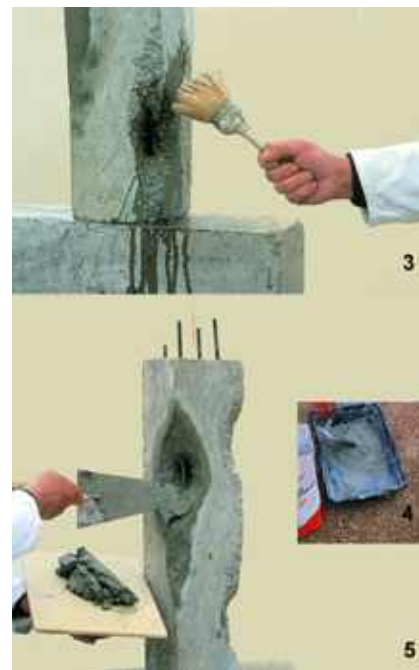


Photo n° 96 phases 3, 4 et 5 d'une réparation par enlèvement du béton pollué (crédit photo Parexlanko)



Photo n° 97 réparation par enlèvement du béton pollué terminée
(crédit photo Parexlanko)

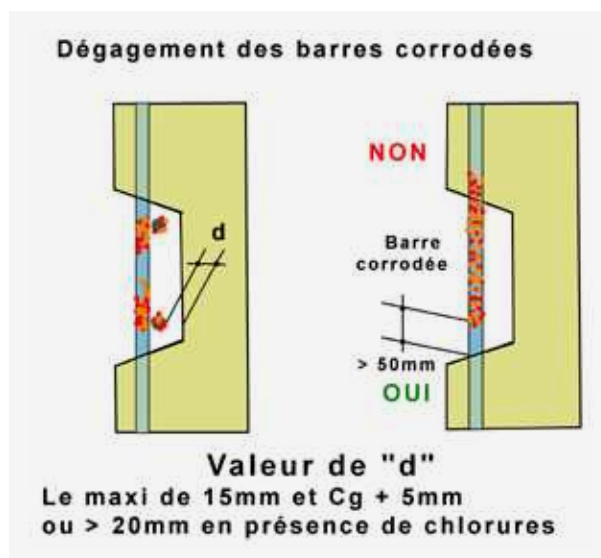


Figure n° 48 : principe à suivre pour le détournage et le décapage
des armatures corrodées

3.5.6.3.2.3 Les divers traitements de protection des armatures :

Il y a lieu de rappeler que le béton pollué ou carbonaté doit être éliminé et que les **armatures doivent être débarrassées de toute trace de corrosion**, en particulier **lorsque la réparation est localisée et principalement** à la jonction entre les parties à reconstituer et les parties laissées intactes.



Photo n° 98 : résultats d'un décapage des armatures au moyen d'abrasifs au pont de Limay (crédit photo D. Poineau)

Dans le cas contraire, la **partie réparée**, qui était une **zone anodique** (soumise à une dissolution), en bénéficiant du pH élevé (12 à 13) du produit de réparation (mortier ou béton à base de liant hydraulique), peut devenir une **zone cathodique** et **risque de former une pile de corrosion très réactive** avec la partie encore corrodée de l'armature mais enrobée d'un béton au faible pH, voire en plus pollué ou carbonaté. La figure ci-après montre la création de macro-piles de corrosion.

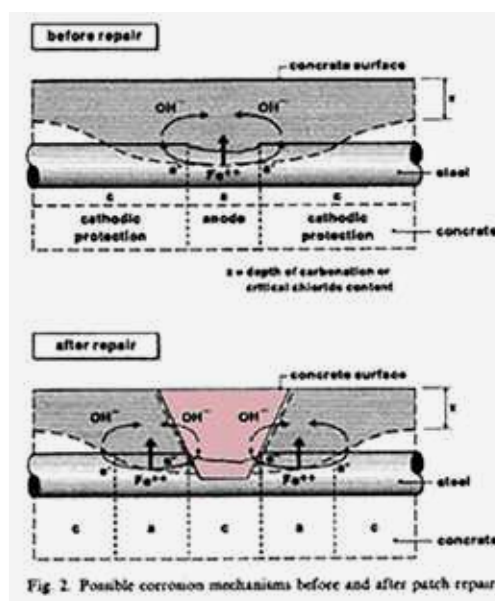


Fig. 2. Possible corrosion mechanisms before and after patch repair.

Figure n° 49 : image extraite d'une communication du Professeur Raupach de l'Université d'Aix-la-Chapelle

Une question se pose : faut-il appliquer sur les armatures un revêtement de protection ?

Certaines techniques de reconstitution d'enrobage, comme le **béton projeté**, en particulier par voie sèche, sont incompatibles avec la mise en œuvre d'un **traitement de protection des armatures contre la corrosion**. En effet, la puissance d'impact de la projection détruit le traitement.

> **La norme NF P95-101 dans le domaine des ouvrages d'art et du génie civil ne recommande pas la mise en place d'un revêtement de protection sur les armatures sauf dans certains cas parce que :**

- la mise en œuvre d'un produit de protection spécifique est très délicate, **toute la surface doit être recouverte**, certains produits nuisent à l'adhérence s'ils débordent sur le béton ou s'ils sèchent avant leur ré-enrobage et, enfin, à l'interface avec le béton existant, il subsiste, le plus souvent, une petite zone non revêtue ;
- l'interface entre le béton existant et le mortier ou le béton de réparation subit une fissuration plus ou moins importante suivant l'importance du retrait du produit de réparation, le soin apporté à la cure... Par cette fissure, les produits agressifs peuvent de nouveau arriver au contact des armatures juste dans la petite zone mal protégée susvisée qui va devenir une nouvelle anode ;
- les **produits de réparation** (mortier ou béton) qui ont un **pH élevé** suffisent à passiver les armatures ;
- la mise en œuvre sur la surface de l'élément réparé d'un **revêtement de protection du béton** est efficace pour ralentir la pénétration des agents agressifs.

> **La norme NF P95-101 prévoit cependant la mise en place d'un revêtement de protection sur les armatures dans les trois cas suivants :**

- si les armatures une fois dérouillées risquent de subir une **nouvelle corrosion** avant la mise en œuvre du mortier ou du béton de réparation (par exemple, si la structure est soumise à des embruns marins...) ;
- si l'épaisseur de la couche de mortier ou du béton qui va enrober les armatures lors de la phase B, ne respecte pas l'enrobage minimum lié à la classe d'exposition, et qu'il n'est pas possible de l'augmenter (problème d'encombrement géométrique, de poids...), la mise en œuvre d'un revêtement de protection des armatures est à prévoir, voire un revêtement de protection de la surface de l'élément concerné ;
- lorsque le produit de réparation ne peut apporter le pH indispensable au maintien de la passivation des armatures. C'est le cas des mortiers de réparation à base de résines synthétiques (type PC) qui ont un pH voisin de 7 (produits utilisés généralement pour des réparations de faible épaisseur compte tenu de leur fort pouvoir adhésif).

Au contraire l'**annexe B (normative)** de la **norme NF DTU 42.1** dans le **domaine du bâtiment** impose systématiquement un **revêtement de protection** quel que soit le type de produit ou système de réparation (CC, PCC ou PC).

Note : lorsque l'enrobage ne peut être respecté sur une grande partie d'une pièce ou lorsque la pièce est exposée à un environnement particulièrement agressif (par exemple, les corniches d'un pont en montagne), il est aussi possible de prévoir le remplacement des armatures concernées par des armatures galvanisées ou des armatures en acier inoxydable d'une nuance adaptée à l'environnement (se reporter à l'article 4.2.5.8 ci-dessous), voire des armatures à base de matériaux composites. Bien entendu il est aussi possible de mettre en œuvre une protection cathodique par anodes solubles (attention à leur durée de vie et il convient de s'assurer de leur efficacité lors des essais).

> **Lorsqu'il faut mettre en œuvre une protection des armatures avant reconstitution de l'enrobage, elle peut être assurée par l'application sur la totalité de la circonférence de l'armature d'un revêtement actif au sens de la norme NF EN 1504-7, c'est-à-dire d'un revêtement contenant des pigments actifs permettant un contrôle des zones anodiques :**

- inhibiteurs anodiques (il existe une controverse sur leur effet à long terme),
- pigments métalliques ayant un potentiel d'électrode plus faible que l'acier et qui se sacrifient à son profit en cas de corrosion,
- voire, tout simplement d'une barbotine de ciment...

Note : les fiches techniques des produits de réparation (mortiers) indiquent souvent quels produits peuvent être utilisés.



Photo n° 99 : application d'un revêtement anticorrosion sur des armatures de BA
(crédit photo Weber et Broutin)

Il est rappelé que l'application sur la totalité de la circonférence de l'armature d'un **revêtement étanche** au sens de la norme NF EN 1504-7, c'est-à-dire d'un revêtement isolant l'armature de l'eau interstitielle et empêchant ainsi « les cations Fe » de s'échapper et « les anions » entrants de se décharger (revêtements à base de résines synthétiques) **n'est normalement pas utilisable sur un chantier de réparation**. En effet, la mise en œuvre d'un **revêtement étanche** sur les armatures (produit à base d'une **résine synthétique**) impose que l'armature soit **totale**ment revêtue sur toute sa longueur y compris ses extrémités. Dans le cas contraire (mauvaise application ou blessure sur le chantier), il peut se former au droit d'une solution de continuité une **corrosion par piqûre** qui se développera vers l'intérieur par une **corrosion dite « caverneuse »** (pile d'aération différentielle) et qui entraînera la destruction accélérée de l'armature sous le revêtement de protection (se reporter à l'article 3.5.6.1 ci-dessus).

3.5.6.3.3 Deuxième méthode curative – L'extraction électrochimique des chlorures et la réalcalinisation électrochimique

La réalcalinisation électrochimique a pour but de restaurer le pH du béton. L'extraction électrochimique des chlorures a pour but d'extraire les chlorures du béton. Ces deux types de traitement sont temporaires, d'une durée d'application de quelques semaines (2 à 3 pour une réalcalinisation et 4 à 5 pour une déchloruration).

ATTENTION, si le béton est entièrement pollué (par exemple, pollution par des chlorures lors de la fabrication du béton...) seul le **béton chloruré entre la surface du béton et environ 3 cm derrière la première nappe d'armatures peut être traité**.

Si, au-delà de la première nappe d'armatures, il y a une forte concentration de chlorures (ordre de grandeur > 0,4%, voire plus du dosage en ciment), par diffusion, ils vont migrer vers le parement sous l'effet du gradient de concentration (lois de Fick) d'où une nouvelle attaque des armatures est certaine.

Lors du projet, doit être étudié le **rééquilibrage des chlorures** : dans le cas où, après traitement, le dosage en chlorures risque de dépasser 0,4%, voire 0,5% **la technique n'est pas à préconiser**. Dans ce cas, il faut envisager une **protection cathodique par anodes solubles ou par courant imposé**.

> **Ces opérations peuvent être réalisées :**

- **1^{er} procédé** : au moyen d'une **anode active** directement reliée à l'armature (création d'un courant galvanique). Dans un tel cas, la **déchloruration** et la **réalcalinisation** peuvent être effectuées en même temps ;
- **2^{ème} procédé** : au moyen d'un **générateur électrique** qui impose un courant continu circulant de l'anode vers l'armature. Dans un tel cas, la déchloruration et la réalcalinisation sont effectuées l'une après l'autre.

Il n'existe pas de texte à caractère normatif sur l'utilisation des **anodes actives**. L'intensité du courant qui circule entre l'anode (borne +) et les armatures (borne -) est beaucoup plus faible que celle développée par un générateur électrique ce qui doit permettre de ne pas retenir, sous réserve de vérifications, les **limites d'emploi** du procédé à courant imposé développées ci-après.

Note : si le dimensionnement de l'installation est optimum et si les conditions d'humidité et de température sont optimales, l'intensité du courant peut atteindre $2\text{mA}/\text{m}^2$ d'armatures valeur utilisée en prévention cathodique et très inférieure à celle fixée ($2\text{A}/\text{m}^2$) dans la norme relative aux procédés à courant imposé.



Connexion aux armatures

Sablage HP du parement béton
et pose des baguettes

Application de la pâte
« régébéton »



Photo n° 100 : extraction et réalcalinisation par anode active phase 1
(crédit photo Ifsttar / Freyssinet)



Pose de l'anode en aluminium
Système d'humidification
Boîtiers de contrôles

Photo n° 101 : extraction des chlorures et réalcalinisation par anode active phase 2 (crédit photo Ifsttar / Freyssinet)

La réalcalinisation par courant imposé fait l'objet de la norme NF EN 14038-1.

Le domaine d'application de cette norme ne concerne pas le béton contenant des **aciers de précontrainte** qui peuvent subir une **fragilisation due à l'hydrogène naissant** lors de la réalcalinisation, ni le béton contenant des **armatures revêtues époxy ou galvanisées** ; elle ne s'applique pas non plus lorsque la contamination par les chlorures contribue à la corrosion des armatures.

Elle précise cependant que, dans le cas du béton précontraint par post-tension, les torons menacés peuvent être protégés par des gaines contre la polarisation indésirable et/ou excessive dans le domaine cathodique et contre la réduction de l'eau associée.

Note : dans un tel cas, les têtes d'ancrage doivent également être électriquement isolées.

L'extraction électrochimique des chlorures par courant imposé fait l'objet de la norme NF EN 14038-2.

Ce procédé nécessite les **mêmes précautions d'emploi** que celui à appliquer lors d'une réalcalinisation vis-à-vis des armatures de précontrainte.

L'expérience montre que l'extraction électrochimique des chlorures n'est jamais totale : seuls 50 à 80% des chlorures peuvent être éliminés. C'est suffisant si le taux en chlorures passe en dessous du seuil critique (environ 0,1% du poids de ciment). Dans le cas contraire une autre campagne s'impose

Le domaine d'emploi de l'extraction électrochimique des chlorures est le même que celui de la réalcalinisation vis-à-vis des risques de fragilisation des aciers de précontrainte...

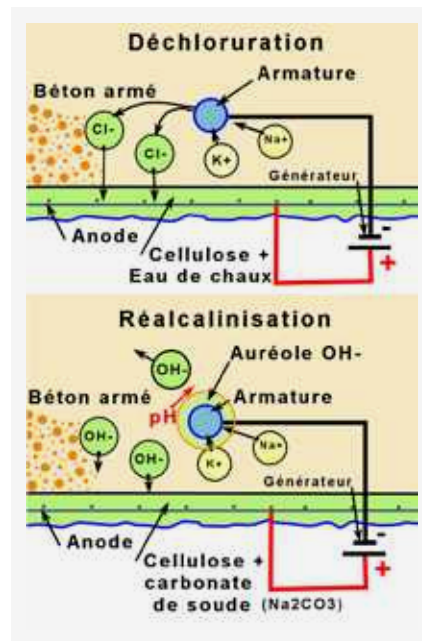


Figure n° 50 : principes de la déchloruration et de la réalcalinisation par courant imposé

ATTENTION, pour obtenir un traitement satisfaisant (réalcalinisation ou extraction des chlorures) par **courant imposé**, il faut délivrer une **quantité de courant** suffisante pendant l'opération soit au **minimum 200 Ah/m² d'armatures**. Pour obtenir cette quantité de courant, il est possible de jouer sur **deux variables** : l'intensité « i » et le temps du traitement « t ». Augmenter exagérément l'intensité peut conduire au dégagement d'**hydrogène naissant** autour des armatures et d'**acide chlorhydrique** au voisinage de l'anode avec les **conséquences néfastes** que cela provoque.



Photo n° 102 : extraction électrochimique des chlorures par courant imposé – Mise en œuvre du matériel (crédit photo Ifsttar)



Photo n° 103 : extraction électrochimique des chlorures par courant imposé – Connecteurs et dispositifs de contrôle (crédit photo Ifsttar)

Dans les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une **solution électrolyte adaptée** est appliquée sur la surface de la pièce à traiter (elle doit être humidifiée périodiquement pour permettre la circulation du courant électrique). **L'anode** (grille métallique) est reliée aux armatures de la structure à traiter (cette jonction passe par l'intermédiaire du générateur de courant continu dans le second procédé).

Les traitements doivent être **obligatoirement précédés de la restauration** des zones présentant des délaminations avec enlèvement de la calamine et de la rouille non adhérentes. **Le mortier ou le béton utilisé pour la réparation** doit présenter une **résistivité** proche de celle du béton support afin de permettre une circulation homogène du courant.

La continuité électrique de toutes les armatures et pièces métalliques de la zone à traiter doit être assurée et tous les objets métalliques électriquement isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit.

ATTENTION, les deux procédés ne sont efficaces que dans la zone comprise entre l'anode et les lits d'armatures, qui y sont reliés. Ils ne concernent pas les zones au-delà qui peuvent être carbonatées ou polluées¹⁶. De plus, la déchloruration n'est pas possible si le béton est totalement saturé en sel.

Si le béton contient **des granulats potentiellement réactifs (PR ou PRP)** vis-à-vis de l'**alcali-réaction**, il est fortement déconseillé d'utiliser ces procédés sans essais préalables.

¹⁶ En cas de réalcalinisation, si la profondeur de carbonatation dépasse les armatures proches de la surface, le traitement doit prendre en compte les armatures plus profondes (profondeur maximale ≤ 20 cm).

Après une déchloruration, non suivie d'une réalcalinisation, pour permettre la restauration de la passivité des armatures, il faut que le béton puisse sécher dans une atmosphère où le degré d'humidité (HR) ne dépasse pas 50%. Le traitement doit être fait en période favorable à cet assèchement.

ATTENTION, après réparation, il est, le plus souvent, indispensable de **protéger le béton par un revêtement** puisque les agents agressifs peuvent de nouveau pénétrer dans le béton après l'arrêt des traitements électrochimiques.

3.5.6.3.3.1 Troisième méthode curative – La protection cathodique

La **protection cathodique** consiste à abaisser le potentiel d'une armature de façon à ce que sa **vitesse de corrosion** devienne négligeable. Elle fait l'objet de la **norme NF EN ISO 12696**. Cette norme concerne uniquement les **bétons exposés à l'atmosphère**. Cependant, la suite du **présent GUIDE** indique les solutions possibles dans le cas des **bétons immergés ou au contact d'un sol**.

Le **domaine d'emploi** concerne la protection de l'acier dans le béton des structures nouvelles et existantes, y compris les **armatures de précontrainte** noyées dans le béton. Il concerne aussi les **armatures en acier revêtues** par un revêtement organique ou **non revêtues**. Les structures pouvant être exposées à **l'atmosphère, enterrées, immergées ou soumises à la marée**.

La norme peut aussi concerner la protection de l'acier dans d'autres matériaux à base de ciment comme des structures anciennes à parement de maçonnerie, de brique et de terre cuite.

La norme indique que, pour les structures enterrées et immergées, il est souvent plus économique d'utiliser des **ensembles anodiques spécifiques** plutôt que ceux adaptés à la protection des aciers dans le béton exposé à l'atmosphère. Cependant, les critères de performance de la protection cathodique de l'acier dans le béton sont définis, dans la présente norme, pour tous les types d'exposition.

Note : il existe d'autres normes sur la protection cathodique (par exemple la norme NF EN 12496 relative aux anodes galvaniques destinées à la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines...). Se reporter à l'article de M. Roche du 11 mars 2015 pour le CEFRACOR et des informations détaillées sont disponibles sur le site : www.protectioncathodique.net/.

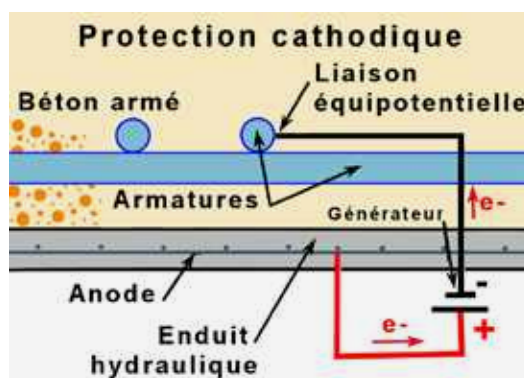


Figure n° 51 : principe de réalisation d'une protection cathodique par courant imposé (mal placée)

Cette norme ne traite pas de la **conception d'une installation de protection cathodique**, elle a uniquement un caractère d'exigence des résultats.

La protection cathodique peut être appliquée sur des ouvrages neufs ou des ouvrages existants qui ne présentent aucune corrosion. Dans ce cas, la protection cathodique a pour rôle la **préservation de la passivité des armatures**. Dans le cas contraire, si la corrosion est développée, la protection cathodique a pour rôle la **restauration et le maintien de la passivité des armatures**.

Cette technique, en particulier par **courant imposé**, à cause des **contraintes d'entretien et de surveillance** qu'elle impose ainsi que de l'importance de son coût de mise en œuvre, n'est utilisée que pour des structures importantes par exemple :

- les piles du viaduc d'accès à l'île de Noirmoutier ;
- le tablier d'un pont d'accès au tunnel du Mont-Blanc).

Note : au pont de Noirmoutier, la protection cathodique n'a pas donné les résultats escomptés ; des travaux de réhabilitation ont dû être effectués.

Des exemples de réalisations plus récentes par **courant imposé et anodes sacrificielles** peuvent être trouvées dans les présentations effectuées lors de la **journée technique de 2018 de l'IMGC** (Ingénierie de Maintenance du Génie Civil) :

- Viaduc de Saint-Cloud ;
- Viaduc de Chavanon ;
- Viaduc de Sylans (A 40) ;
- Corniche Kennedy à Marseille ;
- Estacade de Cerbère ;
- Tranchée couverte de Guéthary ;
- Parkings à Monaco et Sète...

> La protection cathodique peut être réalisée :

- **par protection galvanique (anciennement appelé protection par anodes sacrificielles)**, c'est-à-dire au moyen d'une **anode active**, en général en zinc, placée sur le parement (par exemple, film de zinc sur la totalité de la surface de la pièce à protéger) ou dans l'enrobage (sous forme de pastilles) et reliée directement à l'armature (création d'un courant galvanique) ;

La mise en œuvre d'**anodes sacrificielle internes** impose de créer des **cavités pour les y loger** et la **durée de vie de ces anodes** est limitée dans le temps (environ une vingtaine d'années). Il faut alors les remplacer.



Photo n° 104 : protection galvanique (crédit photo Fosroc)

- **par courant imposé au moyen d'un générateur électrique** qui impose un courant circulant de l'anode (classiquement un treillis en titane disposé sur toute la surface de la pièce à protéger et enrobé dans un matériau à base de liants hydrauliques) vers l'armature reliée électriquement à l'anode.

Note : en simple prévention cathodique (armatures non encore touchées par la corrosion), la densité de courant nécessaire varie entre 0,2 mA/m² et 2 mA/m². En protection cathodique, elle varie entre 2 mA/m² et 20 mA/m².

La protection cathodique au moyen d'un **générateur électrique**, qui est réglable, est plus facile à maîtriser que la protection cathodique au moyen d'**anodes actives**, puisque la circulation du courant dépend de la **résistivité du béton** qui varie aussi en fonction des conditions atmosphériques (humidité ou sécheresse).

> **La méthode visée par la norme NF EN ISO 12696 s'applique sous réserve de respecter les exigences suivantes :**

- une **restauration obligatoire** des zones présentant des délaminations et l'enlèvement de la calamine et de la rouille non adhérentes (le béton intact, même carbonaté ou chloruré, n'a pas à être restauré). Il faut s'assurer que le produit de réparation présente une **résistivité proche de celle du béton existant** (voir la norme) ;
- la continuité électrique de toutes les armatures de la zone à traiter doit être assurée ;
- tous les objets métalliques électriquement isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit ;
- des essais préalables (consulter un laboratoire spécialisé) pour vérifier l'absence **de risque de fragilisation des aciers par l'hydrogène naissant** des structures précontraintes ;

> **Elle ne s'applique pas :**

- aux structures métalliques (par exemple des pieux) enterrées et immergées (voir la suite du texte) ;
- si une **alcali-réaction** a été détectée, la protection cathodique risquant d'accélérer le phénomène mais, normalement, le traitement ne déclenche pas une alcali-réaction **si les exigences de la norme** sont respectées.

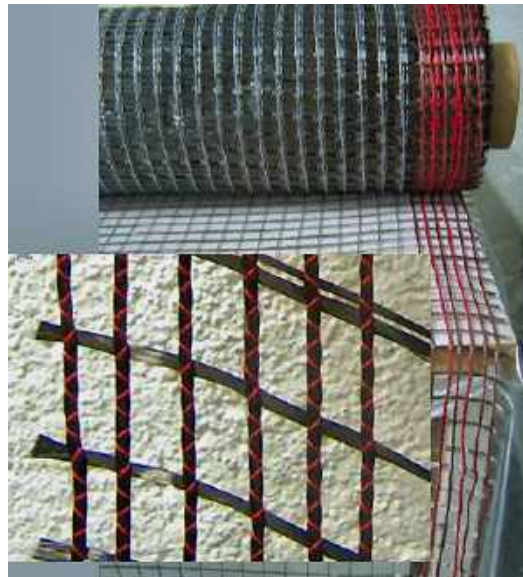


Photo n° 105 : anode en carbone (crédit photo Carbocath)

> **La norme classe les anodes, appelées « ensembles anodiques », en deux catégories :**

- les ensembles anodiques à revêtements conducteurs :
 - de types organiques : revêtements conducteurs à base de fibres de carbone auxquels s'ajoutent les conducteurs (anodes primaires) intégrés aux revêtements ou fixés à leur surface,
 - de types métalliques : revêtements sous forme de films de zinc mis en œuvre par métallisation auxquels sont reliés les conducteurs par des plaques de fixation ;

- les ensembles anodiques en titane activé :
 - sous forme d'un treillis placé à la surface du béton et enrobés dans un mortier à base de liants hydrauliques,
 - sous forme de bandes pleines ou maillées placées dans des rainures pratiquées à la surface du béton et qui sont ensuite rebouchées au moyen d'un mortier à base de liants hydrauliques,
 - sous forme :
 - d'anodes intégrées dans la structure, dans des trous forés dans le béton puis rebouchés par un mortier à base de liants hydrauliques,
 - d'anodes avec un enrobage conducteur à base de graphite (carbone),
 - d'anodes noyées dans le béton de réparation.

Note : d'autres ensembles anodiques peuvent être utilisés mais ne sont pas d'un usage courant. Se reporter à l'annexe C informative de la norme.

Cette classification des ensembles anodiques n'est pas liée aux notions d'anode sacrificielle ou de courant imposé.

Il y a lieu d'attirer l'attention des maîtres d'œuvre et des entrepreneurs sur les durées de vie estimées des différents systèmes anodiques figurant dans l'annexe informative C de la norme.

Types d'ensembles anodiques	Durée de vie potentielle
Revêtements organiques conducteurs	5 à 15 ans
Revêtements métalliques	5 à 15 ans
Titane activé	25 à 100 ans

Tableau n° 25 : durées de vie des différents systèmes anodiques

> Cas des structures métalliques immergées ou enterrées :



Photo n° 106 : anode extérieure sur un pieu métallique (crédit photo Grimaldi)

La protection cathodique de telles structures est possible comme suit :

- Par anodes solubles :
 - dans les zones d'éclaboussures et de marnage, seules les anodes internes ou les anodes extérieures protégées par une coque peuvent être utilisées,
 - dans les zones immergées, une anode extérieure peut être mise en place ;

■ Par courant imposé :

- dans toutes les zones (d'éclaboussures, de marnage et immergées), ce type de protection est applicable.

3.5.6.3.3.2 Quatrième méthode curative - La mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton

Les **inhibiteurs de corrosion** sont, en général, utilisés dans le **béton frais** lors de la construction d'ouvrages neufs. Ils peuvent être appliqués **à la surface des armatures** de béton armé débarrassées de la rouille avant de mettre en œuvre un mortier de ragréage comme indiqué dans l'**article 3.5.6.3.2.3 ci-dessus** relatif aux divers traitements de protection des armatures.

Cependant, certains produits peuvent aussi être déposés à la surface des bétons et migrer vers les armatures assurant ainsi la protection contre la corrosion sans nécessiter au préalable la réalcalinisation du béton, voire sa déchloration.

Les **inhibiteurs de corrosion** appartiennent, d'après le **guide de novembre 2003 de l'AFGC, aux trois groupes suivants**, en fonction de leur mode d'action :

- **les inhibiteurs anodiques** (inhibiteurs de type passivant dits aussi oxydants), qui diminuent le courant de corrosion à la surface de l'armature sur la partie anodique (zone de corrosion) en transformant l'oxyde ferreux en une couche d'oxyde ferrique, créant sur celle-ci une couche compacte d'oxyde de fer (le produit est entièrement consommé lors de la réaction). Il est nécessaire que le produit soit présent en **quantité suffisante au niveau de l'armature**, sinon le film n'est pas assez épais et il peut se produire une corrosion localisée. Ces produits sont utilisés couramment comme additif dans le béton frais, mais sont d'application délicate sur le béton durci ;
- **les inhibiteurs cathodiques**, qui sont subdivisés, par d'autres auteurs, en deux catégories :
 - les inhibiteurs d'adsorption, qui réduisent le courant au niveau de la cathode en formant une couche adhérente à la surface de l'armature. Ils ne bloquent pas totalement la corrosion mais ne provoquent pas de corrosion localisée. Ces produits sont généralement des composés organiques,
 - les inhibiteurs non oxydants, qui augmentent la surtension cathodique et réduisent ainsi le courant de corrosion (sorte de barrière électrochimiques d'ions). Ils sont souvent complétés par un produit minéral qui forme un film à la surface de l'armature par adsorption (par exemple, une phosphatation) ;
- **les inhibiteurs mixtes**, qui ont les propriétés des deux inhibiteurs susvisés.

Avant de mettre en œuvre un tel traitement, il est indispensable de vérifier (lors des investigations préalables) que la corrosion des armatures n'a pas commencé à provoquer, par gonflement de la rouille, des décollements entre les aciers et le béton (délamination). Dans un tel cas, il faut commencer par remplacer le béton carbonaté ou pollué et traiter les armatures.

Les inhibiteurs appliqués à la surface du béton nécessitent une préparation de surface préalable destinée à enlever tout revêtement de peinture existant, mais aussi, à enlever la laitance présente en surface de façon à ouvrir les pores du béton pour faciliter la pénétration du produit. De plus, au fur et à mesure de leur mise en œuvre, la **pénétration des produits doit être contrôlée**. Il est rappelé qu'un béton non carbonaté bloque la pénétration des inhibiteurs.

Il y a donc lieu de faire un **essai de convenue** pour mettre au point le traitement de surface et les conditions d'application du produit.



Photo n° 107 : application d'un inhibiteur de corrosion à la surface du béton (crédit photo Parexlanko)

Enfin un tel traitement doit être complété par la **mise en œuvre d'un revêtement de protection** pour limiter la pénétration des agents agressifs toujours présents dans l'environnement de l'ouvrage.

Il convient, en outre, de signaler que, s'il est possible de s'assurer de la pénétration des inhibiteurs par un prélèvement destructif, **il n'y a pas à ce jour d'essai pour mesurer l'efficacité de ces produits et la durée de leur action**. En effet, les différents essais, visés par le **guide d'application de l'AFNOR GA P 18-902 de septembre 2014** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil, ne permettent pas de caractériser les effets de ces produits. La série des normes européennes **NF EN 1504-**** ne couvre pas l'utilisation des inhibiteurs. **En résumé, il n'existe aucune norme européenne ou française ni d'Avis Technique traitant de ce sujet.**

> Les principales conclusions provisoires des études effectuées dans le cadre du programme européen de recherche COST 521 sont les suivantes :

- il n'est pas évident que les inhibiteurs puissent réduire de façon significative la vitesse de corrosion des armatures en **présence de chlorures** dans le béton (lorsque la concentration en chlorures d'un béton est élevée le développement de la corrosion peut même s'accélérer) ;
- en présence de carbonatation, les résultats des essais sont plus prometteurs.

> La Commission Construction Bâtiment du CEFRAFOR (www.concretcorrosion.net) n'a pu émettre un avis motivé sur l'efficacité des inhibiteurs de corrosion dans le béton armé. Dans son avis de janvier 2006, elle a simplement émis les recommandations suivantes en cas d'utilisation de ces produits :

- l'essai de convenance sur site doit comporter **trois planches d'essais avec trois concentrations de produits** ;
- des prélèvements doivent être effectués pour connaître la **concentration du produit** autour des armatures...



Photo n° 108 : guide du LCPC sur la protection des bétons de 2002 (crédit photo LCPC)

Durée des responsabilités et garanties : il convient de se reporter au **guide technique de 2002 du LCPC** qui fixe, pour ces produits, une **durée de garantie de 10 ans**. Un suivi sur plusieurs années des effets du produit utilisé sur l'évolution de la corrosion des armatures est donc à prévoir (se reporter à l'article 6.4.3.5.4 qui traite des contrôles d'exécution).

En conclusion : lorsque l'utilisation d'un inhibiteur est envisagée, il est indispensable de prendre l'avis d'un **conseil compétant** et de prévoir, d'une part, une **qualification de l'état du support** avec essais chimiques sur un béton carbonaté et/ou un béton chloruré à divers taux et, d'autre part, un **essai de convenance** permettant de s'assurer de la pénétration du produit... Une telle réparation reste du domaine expérimental.

> De plus, il convient de se rappeler que :

- les inhibiteurs à base de nitrites ne sont pas utilisables sur des bétons soumis au gel/dégel ;
- si la teneur en chlorures du béton dépasse un certain seuil (au-delà de 0,6 à 0,8% du poids de ciment), certains inhibiteurs peuvent devenir inactifs, voire accélérer la corrosion.

ATTENTION, après réparation, il est souhaitable de **protéger le béton par un revêtement** puisque les agents agressifs peuvent à nouveau pénétrer dans le béton. Se reporter au **guide FABEM 4**.

3.5.7 CAS DE LA CORROSION DES ARMATURES ACTIVES – MÉTHODES DE PRÉSERVATION DES ARMATURES DE LA CORROSION ET MÉTHODES DE TRAITEMENT DES ARMATURES CORRODÉES – REMPLACEMENT DES ARMATURES

3.5.7.1 Généralités

L'article 3.4.7 décrit les désordres qui se produisent et leurs causes. L'ouvrage peut aussi se trouver soumis en sus à d'autres attaques chimiques ou à des agressions physiques...

> Il est rappelé que les armatures de précontrainte de pré ou post-tension peuvent subir deux types de corrosions :

- une corrosion classique dite par dissolution analogue à celle des armatures de béton armé qui, progressivement, réduit la section résistante des armatures ;
- une corrosion dite « fissurante sous tension » qui entraîne à terme une rupture fragile des armatures.

Le traitement de la corrosion des armatures de précontrainte et celui des insuffisances structurales, qui en résultent, est détaillé :

- dans le guide FABEM 8 qui traite dans le détail de l'expertise jusqu'au traitement des désordres avec de nombreuses illustrations. Ce guide s'appuie, en partie, sur les règles BPEL ;
- dans la nouvelle norme NF P95-104, qui s'appuie en partie sur le guide FABEM 8 mais aussi sur les règles de l'Eurocode 2 parties 1.1 et 2 et leurs évolutions récentes (par exemple, sur le dimensionnement des clouages prenant en compte des coefficients de frottement spécifiques). La partie de cette nouvelle norme consacrée au choix des matériaux et produits s'appuie sur le fascicule 65 du CCTG avec les mises à jour qui s'imposent.

3.5.7.2 Démontage et remplacement des armatures de précontrainte

Si les techniques de démontage d'une armature de précontrainte intérieure ou extérieure, adhérente ou non sont traitées dans le chapitre 12 du guide FABEM 8 et par l'article 442 de la norme NF P95-104, récemment une autre technique a été mise en œuvre et présentée lors de la journée de l'IMGC de septembre 2019.

Le texte qui suit fait la synthèse des informations disponibles et rappelle que les interventions sur les armatures de précontrainte extérieures au béton sont délicates compte tenu des conséquences sur les personnes, la structure et les réseaux que peut engendrer la rupture d'une armature protégée par un coulis de ciment. Trois méthodes de démontage des armatures extérieures au béton et décrites ci-après sont envisageables.

> Critères de choix de la méthode de démontage d'une armature de précontrainte extérieure au béton et injecté au coulis de ciment en vue de son remplacement :

1. Premier cas : si les investigations préalables ont détecté une corrosion importante pouvant déclencher une rupture brutale de l'armature pendant les travaux, il est impératif de limiter au maximum la présence humaine dans la zone à risques. Dans ce cas, sont mises en œuvre les deux méthodes déjà décrites dans le guide FABEM 8 :



Photo n° 109 : effets de la détension brutale de câbles extérieurs longs protégés par un coulis de ciment (crédit photo D. Poineau)

- la détension brutale, obtenue par la coupe du câble laquelle est effectuée normalement au milieu de son tracé afin de réduire au maximum l'énergie libérée comme expliqué ci-dessous,

L'énergie libérée lors de la coupe d'un câble supposée au niveau d'un de ses ancrages vaut :

$$E = \frac{1}{2} \Delta l . A_p . \sigma_p$$

Dans cette expression :

Δl est l'allongement total du câble (somme des allongement aux deux extrémités)

A_p la section du câble

σ_p la contrainte dans le câble

Si la coupe a lieu milieu du câble l'énergie libérée est divisée par 2 ($\Delta l/2$).

- la détension avec utilisation d'amortisseurs élasto-plastiques (brevet IFSTAR) dans le cas où l'énergie libérée pourrait endommager certains éléments de la structure ou certains équipements des réseaux des concessionnaires (canalisations, câbles...).



Photo n° 110 : amortisseurs élasto-plastiques (crédit photo Freyssinet)

2. **Second cas** : si la corrosion est limitée et non susceptible d'entraîner une rupture de l'armature pendant les travaux, il est possible de mettre en œuvre une **détension contrôlée** nécessitant la présence d'un **personnel qualifié** :

- dans la zone de coupe, le câble est mis à nu (enlèvement de la gaine et destruction du coulis de ciment),
- sur chaque extrémité de la zone de coupe est mise en place une « mordache » bloquée sur le câble et ces deux mordaches sont reliées par des barres de précontrainte,
- lors de la coupe du câble, sa tension se reporte sur les barres qui sont ensuite détendues classiquement au moyen de vérins.

Note : l'utilisation des mordaches est classique lors des interventions sur les câbles des ponts suspendus et à haubans, des remontées mécaniques...

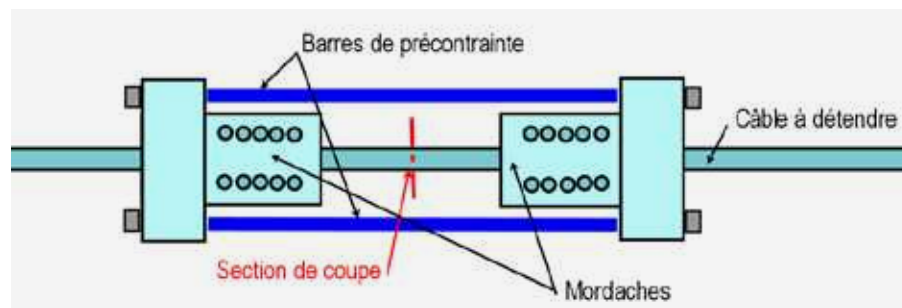


Figure n° 52 : principe du dispositif de détension dite contrôlée

Dans les trois méthodes de détension, la coupe du câble est effectuée avec une tronçonneuse à disques ou une scie à câble avec fil diamanté, voire un chalumeau.

■ Dans le premier cas (détension brutale, voire avec amortisseurs), la trajectoire du câble peut être guidée par :

- des profilés métalliques (par exemple : tubes d'échafaudage). De plus, si la longueur de câble est importante (supérieure à une quarantaine de mètres), il faut prévoir des profilés de section adaptée dans les deux zones de fouettement à proximité des ancrages, fouettement causé par le flambement de la colonne constituée par le câble et son conduit injecté ;
- des sangles faiblement espacées entourant les autres câbles...



Dispositifs de guidage par sangles et portiques métalliques

Photo n° 111 : dispositifs de guidage (crédit photo L. Labourie du CEREMA)

- À l'extrémité du câble, la tête d'ancrage peut être éjectée lors de la coupe. Pour limiter les effets de l'impact de la tête d'ancrage sur certains éléments de la structure ou certains équipements, il est possible de mettre en place :
 - des éléments rigides (madriers, traverses de chemin de fer) ;
 - des blocs amortisseurs en mousse...

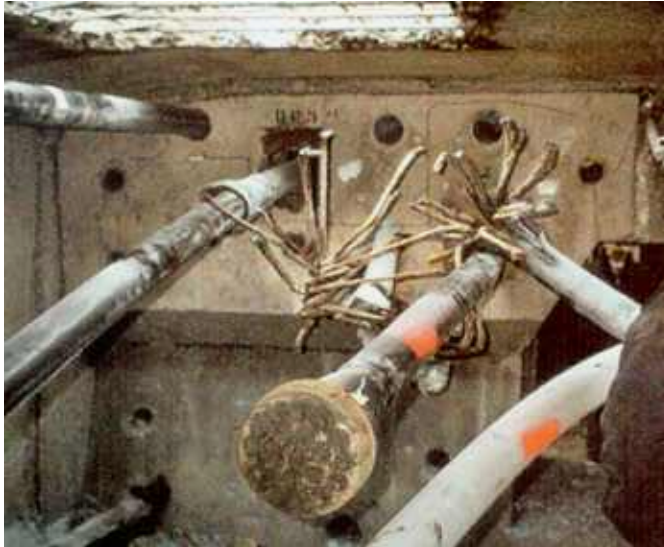


Photo n° 112 : exemple d'éjections de têtes d'ancrage (crédit photo D. Poineau)

3.5.8 CAS DES DÉSORDRES STRUCTURAUX D'ORIGINE MÉCANIQUE (ERREURS DE CONCEPTION, DE CALCUL, D'EXÉCUTION OU DE GESTION ET ACTIONS ACCIDENTELLES) - MÉTHODES DE RÉPARATION, RENFORCEMENT ET PROTECTION

3.5.8.1 Généralités

L'importance des réparations et renforcements ainsi que des protections à mettre en œuvre doit être adaptée à la **structure concernée** (bâtiment, pont, réservoir...), au matériau constitutif de la structure (béton armé ou béton précontraint) et, enfin, à l'**importance des désordres**, qui vont de la simple épaufrure à l'effondrement partiel ou total de la structure.

Il n'est donc pas possible de décrire toutes les solutions de réparation pour chaque type de **structure** ; aussi, dans la suite de l'article, seront décrits les **principaux types de réparation** et essentiellement ceux liés à la restauration du béton en surface comme en profondeur, en mettant bien en évidence les réparations permettant de traiter les cas où la capacité portante de la structure est mise en cause et les cas où elle ne l'est pas.

Il convient de remarquer ici que les méthodes de réparation relatives aux **désordres d'origine mécanique** ont été liées aux manifestations des désordres (fissures, déformations ...) et non aux **causes** de ceux-ci, qui peuvent être multiples.

Aux désordres d'origine mécanique peuvent se superposer des **désordres ou des risques de désordres d'autres origines** (par exemple, les effets du gel...) et surtout ceux dus à la **corrosion des armatures**. Le choix des méthodes de réparations à utiliser doit donc faire la synthèse entre les méthodes développées dans le présent article et celles développées dans l'article 3.5 ci-devant.

Les **méthodes de réparation** décrites ci-après peuvent, avec quelques adaptations, être utilisées pour le **renforcement des structures**, comme cela est explicité à la fin de cet article dans la partie 3.5.8.1.3.

Les **différentes méthodes envisageables** dans les cas de **désordres d'origine mécanique** sont résumées sur les deux tableaux suivants (y compris celles qui ne sont pas développées dans le présent **GUIDE** et qui sont indiquées en italiques). Dans ce tableau, les **méthodes de réparation** ont été associées aux **désordres** et non aux **causes des désordres** comme dans les tableaux précédents.

ATTENTION, les informations contenues dans ces tableaux sont à appliquer avec « **précautions** ». Il est rappelé que le présent **GUIDE** n'a pas pour but de se substituer au concepteur de la réparation qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.

> **Ces méthodes de réparation sont à associer, si nécessaire, à une démolition partielle de certaines parties de la structure à réparer ou à renforcer. Par exemple :**

- pour accéder à l'intérieur de la structure et y amener le matériel nécessaire aux travaux (cas d'une poutre-caisson aux accès étriqués...);
- lorsque les parties les plus désorganisées sont irréparables (cas d'un choc important...);
- pour réaliser et lier des parties nouvelles à la structure existante (cas du remplacement d'un élément...);
- etc.

Bien entendu, dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, la solution de **démolition-reconstruction** s'impose.

Les différentes méthodes de réparation peuvent se rattacher aux familles suivantes :

Famille	Techniques de mise en œuvre
Restauration ou reconstitution de la surface du béton	Mise en place manuelle ou mécanisée de mortier ou béton (norme NF 95-101) Projection de mortier ou béton (FABEM 5 et norme NF P95-102-1)
Restauration ou reconstitution du béton à cœur	Bétonnage en place ou sous pression (fascicule 65) Projection de mortier ou béton (FABEM 5 et norme NF P95-102-1) Injection (fissures ou vides du béton) (FABEM 3 et norme NF P95-103)
Renforcement par ajout de béton	Bétonnage en place ou sous pression (fascicule 65) Projection de mortier ou béton (FABEM 5 et norme NF P95-102-1) Béton contrecollé (FABEM 1)
Renforcement par ajout d'armatures passives intérieures au béton	Mise en place de nouvelles armatures (fascicule 65) Scellement d'armatures (FABEM 7) + compléments (FABEM 1) dus aux insuffisances de la norme NF EN 1504-6
Renforcement par ajout d'armatures passives extérieures béton et collées	Tôles collées (FABEM 7). Uniquement dans le cas où des de tôles collées de renforcement d'un élément ou d'une structure présentent des désordres localisés Matériaux composites (fibres de verre, de carbone... enrobées de résines (FABEM 7 et norme NF P95-105)
Renforcement par ajout de forces	Déformations imposées (dénivellation d'appui, réglage de poussée...) (FABEM 8) Précontrainte intérieure ou extérieure au béton (FABEM 8 et norme NF P95-104)
Mise en œuvre d'une protection (si besoin est)	Revêtement de protection et/ou d'aspect (FABEM 4 et norme NF P95-103)

Tableau n° 26 : familles de réparations

Tableau synoptique :

Les méthodes de réparation à appliquer en fonction des désordres constatés et ayant pour conséquences des désordres structuraux ou non sont données par le tableau suivant :

Désordres	Fissures			Épaufrures (chocs)		Éclatements fractures... (chocs)	Cavités, vides	
	NSt	St	St	NSt	NSt		St	St
Incidences structurales (St) ou non-structurales (NSt)	NSt	St	St	NSt	NSt	St	St	St
Structure en BA et/ou BP	BA/BP	BA	BP/BA	/	/	BA/BP	BA/BP	BA/BP
Autres informations type de désordres (internes ou externes)	/	/	/	Éclat intacts	Éclat endommagés	/	Externes	Internes
Méthodes de réparation								
Collage :								
- béton durci sur béton durci	/	/	/	O	/	/	/	/
- béton ou mortier frais sur béton durci	/	/	/		SB	/	/	/
Mise en œuvre de mortier ou béton :								
- manuellement (ragréage)	/	/	/	/	O	/	/	/
- par coulage en place ou par projection	/	/	/	/	/	O	O	/
- par injection (coulis, mortier...)	/	/	/	/	/	SB	/	O
Ajout d'armatures :								
- passives intérieures (posées ou scellées)	/	/	/	/	SB	/	SB	SB
- passives extérieures	/	O	SB	/	/	SB	SB	SB
- actives intérieures ou extérieures	/	/	O	/	/	SB	SB	SB
Injection rigide ou souple : calfeutrement ou Pontage : revêtement localisé armé ou non : création d'un joint	Ou (b) Ou	O (a) /	O (a) /	/	/	SB	/	/
	Ou	/	/	/	/		/	/
	Ou	/	/	/	/		/	/
	SB	SB	SB					
Revêtement de protection généralisé	Ou	SB Esthétique	SB Esthétique	O Protection ou Esthétique	O Protection ou Esthétique	O Protection ou Esthétique	O	/

Tableau n° 27 : méthodes de réparation des désordres d'origine mécanique

Légende :

Ob : réparation obligatoire :

O : réparation classique à retenir après étude

Ou : plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer (un choix est nécessaire)

SB : réparation à mettre en œuvre si besoin est

> Cas d'une réparation de fissures par injection :

(a) : produit d'injection de type F rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton

(b) : produit d'injection souple pour boucher les fissures (produit de type D ductile ou de type S expansif)

3.5.8.1.1 Cas des actions de faible importance ne mettant pas en cause la capacité portante de la structure

Il s'agit d'actions telles que des chocs de faible importance, des variations dimensionnelles gênées... qui peuvent provoquer des épaufrures, des petites fissures à caractère non-structural. Le but des réparations est de reconstituer la géométrie de la pièce et d'empêcher la pénétration des agents agressifs.

1. Cas des épaufrures :

- **premier cas**, si le morceau de béton éjecté est intact et si les armatures ne sont pas apparentes, un simple collage avec un produit de collage spécifique « béton durci sur béton durci » est parfaitement adapté ;
- **deuxième cas**, si le morceau de béton éjecté est détruit, il faut s'orienter vers une réparation localisée (ragréage ou reconstitution) qui comporte :
 - une préparation de surface pour éliminer les restes de béton dégradé,
 - si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place de nouvelles armatures,
 - la reconstitution de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel ou mécanisé à l'aide d'un produit de réparation ou un mortier ;
- **dans le premier cas**, la réparation peut être complétée par la mise en œuvre d'un revêtement de protection ou d'aspect ;
- **dans le second cas**, le revêtement de protection est nécessaire.

2. Cas des fissures :

- **plusieurs solutions de traitement des fissures à caractère non-structural sont envisageables :**
 - **l'injection des fissures** par un **produit souple** qui peut s'adapter au souffle des fissures sous les variations thermiques et hygrométriques journalières et saisonnières ou rigide pour assurer la continuité de la matière (se reporter à la **norme NF EN 1504-5** et au **guide FABEM 3**),
 - **le calfeutrement ou le pontage des fissures** qui jouent le même rôle que l'injection souple. (se reporter au **guide FABEM 2**),
 - la mise en place d'un **revêtement de protection** capable de ponter (avec ou sans armature) le souffle des fissures (se reporter au **guide FABEM 2** ou au **guide FABEM 4**),

Dans le cas où la continuité du matériau doit être absolument rétablie (le désordre présente un **caractère structural**), l'injection avec un **produit d'injection devenant rigide après durcissement** s'impose. **La création d'un joint de dilatation** est aussi envisageable.

3.5.8.1.2 Cas des actions mettant en cause la capacité portante de la structure

Il s'agit, d'une part, d'actions telles que des chocs importants, des variations dimensionnelles gênées, des tassements d'appui, des excès de charges... et, d'autre part, des erreurs de conception ou de réalisation... qui peuvent provoquer des fissures, des éclatements du béton, des déformations....

ATTENTION, une structure peut présenter tous ces désordres à la fois !

Le but des réparations est alors de reconstituer la **géométrie** et la **capacité portante** de l'élément désorganisé, voire de la totalité de la structure, et aussi d'empêcher la pénétration des agents agressifs dans les parties reconstituées et/ou restées intactes, tout en sauvegardant l'aspect de l'ouvrage si cela est possible.

L'opération de réparation peut imposer la mise sur cintre de la structure si la réparation doit équilibrer à la fois les charges permanentes et d'exploitation, mais une dénivellation d'appui ou le réglage de la poussée d'un arc...peuvent jouer le même rôle. Le choix est fonction des mesures effectuées in situ sur l'ouvrage et des résultats de calculs sur la répartition des contraintes dans la structure lors de l'expertise et de l'étude du projet de réparation.

3.5.8.1.2.1 Cas des épaufrures, des cavités, des trous...

> Première solution de réparation des éclatements, fractures, cavités et trous... sans ajout de force :

Elle est applicable aux structures en béton armé, voire à certaines parties de structures en béton précontraint mais dont le fonctionnement est celui d'une pièce en béton armé. Elle comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivie d'un réglage de la géométrie souhaitée, par exemple par vérinage (en cas de déformations excessives, de rupture partielle),
 - la démolition du béton endommagé suivie d'une préparation de surface,
 - si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
 - la reconstitution de la géométrie de la pièce, le béton pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection,
 - la réalisation d'une injection périphérique pour améliorer le collage,
 - la mise en place d'armatures extérieures passives si un renforcement s'avère nécessaire,
 - si besoin est, la mise en charge de la structure réparée (enlèvement du cintre...),
 - la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection ;
- adaptations possibles de la première solution :
 - dans le cas où la cavité est interne au béton (par exemple, défaut de bétonnage). Le remplissage de la cavité se fait par injection au moyen d'un coulis de ciment ou à l'aide d'un produit d'injection,
 - dans le cas où il faut réduire au maximum les effets du retrait (par exemple, réfection d'un dé d'appui au-dessous ou au-dessus d'un appareil d'appui). Il faut utiliser un mortier de calage à retrait compensé qui peut être injecté ;

Remarque : *l'utilisation des mortiers à retrait compensé, voire fibrés est également intéressante pour limiter au maximum la fissuration à l'interface entre l'ancien et le nouveau béton, ce qui assure une meilleure répartition des contraintes au droit de la zone réparée.*

Exemple de réparation :

- Lors des travaux de réparation des fondations de piles du **pont d'œuilly** (remplacement des palplanches en bois par des palplanches métalliques), une des piles a tassé de 15 centimètres, entraînant une rupture partielle des poutres du tablier et de leur dalle de couverture¹⁷. Après mise du tablier sur des palées provisoire, la zone de béton désorganisée a été démolie puis, par vérinage, le tablier a été repositionné en altitude. Ensuite, après mise en place des armatures nécessaires, un béton a été coulé pour reconstituer la géométrie de la zone démolie (poutres et hourdis). Enfin, la chape d'étanchéité a été réparée ainsi que les superstructures et les équipements endommagés.

17 Cette rupture aurait pu être évitée par une reconnaissance préalable de l'état des fondations laquelle aurait permis de révéler la présence d'une couche de sable à la base de la fondation (délavage du béton de chaux de la semelle de fondation lors de son coulage au 19^e siècle).

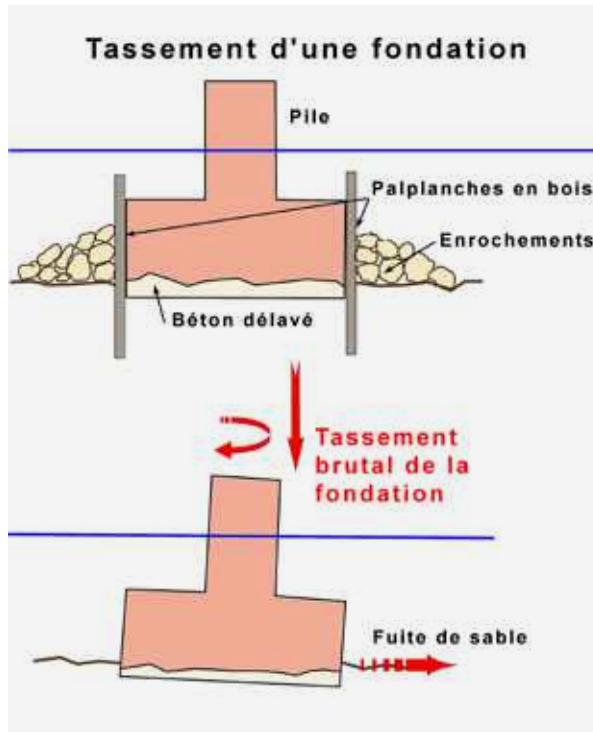


Figure n° 53 : cause du tassement de la pile du pont d'Euilly



Photo n° 113 : rupture d'une des poutres en béton armé du pont d'Euilly (crédit photo D. Poineau)

> **Seconde solution de réparation des épaufrures, cavités et trous... avec ajout de force :**

Elle est applicable aux structures en **béton précontraint** et parfois aux structures en **béton armé** (cas où un ajout de force est nécessaire). Elle comporte :

- la démolition du béton endommagé suivi d'une préparation de surface,
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, le béton pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection,
- l'injection périphérique pour améliorer le collage,
- la mise en charge de la structure réparée par ajout de forces (normalement, par précontrainte, voire dénivellation d'appui),
- la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection.

*Remarques : la mise sur cintre d'un pont en béton précontraint peut être envisagée, par exemple, lors d'une opération de remplacement de câbles (il s'agit d'une **opération délicate** nécessitant l'intervention d'un bureau d'études). La mise en place d'une précontrainte extérieure provisoire est également envisageable.*

Les mortiers à retrait compensé, voire fibrés peuvent aussi être utilisés pour les réparations des structures précontraintes.

Exemple de réparation :

- Lors de la construction par encorbellements successifs du pont de Montereau, au moment de la mise en tension des câbles de continuité de la travée centrale disposés dans les goussets du hourdis inférieur, le béton en plusieurs endroit du hourdis a été littéralement désorganisé sous la poussée au vide exercée par ces câbles de forte puissance (19 T15)¹⁸. Les câbles tendus ont été détendus, le béton désorganisé a été enlevé, les armatures passives déformées ont été ôtées, il en a été de même pour les gaines des câbles écrasées. Ensuite, de nouvelles gaines et de nouvelles armatures passives ont positionnées. Enfin, après mise en place d'un coffrage étanche, le béton a été reconstitué par injection d'un mortier à retrait compensé.



Photo n° 114 : désordres du hourdis inférieur dus à une poussée au vide locale (crédit photo D. Poineau)

¹⁸ Les gaines des câbles avaient été seulement ligaturées sur le ferrailage avec le même fil de fer recuit ayant été utilisé pour attacher les armatures de béton armé. Normalement, elles auraient dû être fixées sur des armatures support spécifiques qui sont imposées par les règles d'exécution du BP et qui figuraient d'ailleurs sur les plans d'exécution.

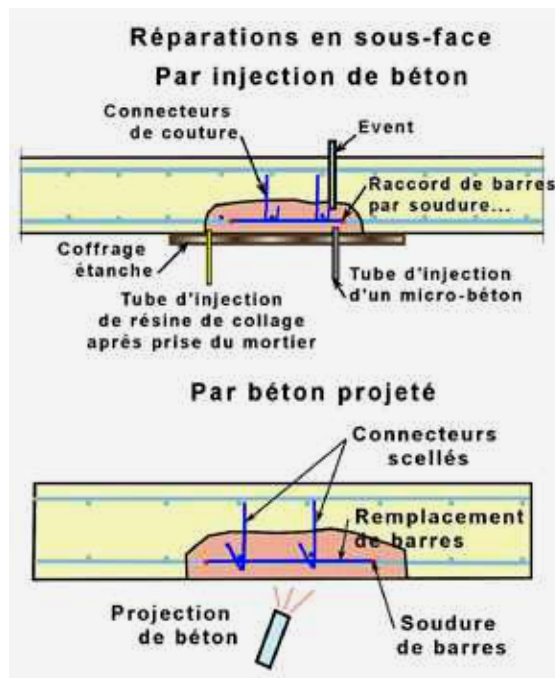


Figure n° 54 : principes de réparation d'un hourdis inférieur par injection de béton ou par béton projeté

3.5.8.1.2.2 Cas des fissures de flexion, d'effort tranchant, de torsion...

> Première solution de réparation des fissures sans ajout de force :

Elle est applicable aux structures en béton armé. Elle comporte :

- l'injection des fissures par un produit rigide pour assurer la continuité de la matière (se reporter à la norme NF EN 1504-5 et au guide FABEM 3),
- la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles (composites collés, voire tôles collées ou plats collés boulonnés), (se reporter à la norme NF P95-105 et au guide FABEM 7).

> Seconde solution de réparation des fissures avec ajout de force :

Elle est applicable aux structures en béton précontraint mais également aux structures en béton armé. Elle comporte :

- l'injection des fissures par un produit rigide pour assurer la continuité de la matière (se reporter à la norme NF EN 1504-5 et au guide FABEM 3),
- la mise en œuvre d'armatures de précontrainte additionnelles (se reporter à la norme NF P95-104 et au guide FABEM 8).

Remarques :

- Dans les années 75, on a mis en œuvre des armatures passives de type tôles collées pour réparer des tabliers de ponts en béton précontraint qui présentaient une nette insuffisance de résistance à la flexion, marquée par des fissures actives. Les réparations n'ont pas permis de réduire, comme espéré, le souffle des fissures (en effet, pour que les tôles se mettent en traction, le film de colle doit subir une certaine déformation). La mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle a permis de résoudre le problème. On ne dispose pas de retour d'expérience significatif à propos du remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites mais, le même phénomène de déformation de la colle est probable ;

- En revanche, le renforcement d'un ouvrage en béton précontraint non fissuré au moyen d'armatures passives extérieures au béton (tôles ou composites) est parfaitement possible ;
- Les tôles collées ont cependant été utilisées avec succès pour renforcer des parties de structures en béton précontraint fonctionnant en béton armé, comme des hourdis de tabliers de ponts.

Note : la réparation ou le renforcement par tôles collées est une **technique devenue obsolète** à cause du développement de l'utilisation des matériaux composites collés dont la mise en œuvre est moins contraignante mais obligatoirement par une entreprise spécialisée.

La création d'un joint de dilatation est aussi envisageable dans certains cas se reporter au guide FABEM 2 qui explicite une telle solution.

Exemple de réparation :



Photo n° 115 : renforcement en tissu composite des abouts des poutres du pont sur la Drôme (crédit photo RCA - M. Trouillet)

La surveillance et les nombreuses investigations effectuées sur les deux tabliers de type VIPP du pont de l'autoroute A 7 sur la Drôme construits en 1965 (tabliers composés de travées indépendantes constituées par des poutres préfabriquées post-contraintes réunies par un hourdis coulé en place et précontraint transversalement) ont révélé l'existence de câbles corrodés, dont certains étaient rompus, ainsi que de gros défauts d'injection avec la présence d'eau fossile (décantation du coulis d'injection) dans les conduits.

En attendant les conclusions des études entreprises pour savoir s'il fallait (et comment) réparer ou remplacer les deux tabliers, une **réparation provisoire** pour mettre les **poutres en sécurité** vis-à-vis d'une **rupture de type flexion-effort tranchant à proximité de leur about**¹⁹ a été réalisé en enveloppant les abouts par un tissu composite à base de fibres de carbone.

Note : les études ont conduit à une solution de démolition-remplacement précédée de la mise en place de deux tabliers provisoires pour assurer le maintien de la circulation.

¹⁹ À proximité de l'about d'une poutre VIPP, les câbles étant relevés, la résistance vis-à-vis de l'amorçage d'une fissure de flexion-effort tranchant pouvant causer la rupture brutale de la poutre est relativement faible en cas de rupture par corrosion d'un, voire de plusieurs, des câbles disposés les plus près de la fibre inférieure d'autant que les sections des armatures transversales (étriers) des poutres construites dans les années 60 étaient dimensionnées au plus juste.

3.5.8.1.3 Cas des éléments ou des structures dont la capacité portante après expertise a été jugée insuffisante**> Le problème du renforcement d'un ouvrage se pose lorsqu'il :**

- change d'affectation (par exemple, réalisation d'une ligne de tramway ou passage d'un convoi exceptionnel sur un pont ou transformation d'un bâtiment avec modification de l'ossature porteuse) ;
- doit résister à des actions accidentelles (par exemple, chocs de véhicules, séisme...) et pour lesquelles il n'a pas été prévu ;
- n'a pas la capacité portante souhaitée à cause d'erreurs de conception ou de réalisation...

Le but d'un renforcement est de donner la **capacité portante** nécessaire à la structure concernée, normalement, par **ajout de matière et/ou de forces**. À ces travaux peuvent s'ajouter certaines réparations visées par le **présent GUIDE** (par exemple, en cas de désordres dus au gel, à la corrosion des armatures) mais, aussi, des travaux connexes non visés dans le **présent GUIDE**, tels que la mise en place de nouveaux équipements...

L'opération de renforcement peut imposer la mise sur cintre de la structure si le renforcement doit équilibrer à la fois les charges permanentes et d'exploitation, mais une dénivellation d'appui ou le réglage de la poussée d'un arc...peuvent jouer le même rôle. Le choix est fonction des mesures effectuées in situ sur l'ouvrage et des résultats de calculs sur la répartition des contraintes dans la structure lors de l'évaluation de l'ouvrage et de l'étude du projet de renforcement.

3.5.8.1.3.1 Solutions de renforcement par ajouts de béton et d'armatures passives intérieures au béton**> Première solution de renforcement par ajout de béton et d'armatures passives intérieures au béton :**

Elle est applicable à une poutre, une dalle, une pile ou un poteau en béton armé...

Cette solution comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple, par vérinage),
 - la démolition du béton d'enrobage pour dégager les armatures, si besoin est, suivi d'une préparation de surface,
 - le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
 - la réalisation de la nouvelle géométrie de la pièce, le béton ajouté pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection (le béton est mis en place classiquement dans le cas d'un plancher),
 - si besoin est, une injection périphérique pour améliorer le collage,
 - la mise en charge de la structure renforcée par décintrement ou par ajout de force, en général par déformation imposée (vérinage, réglage de poussée...),
 - la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection.



Photo n° 116 : renforcement des poutres de la passerelle du barrage de Pizançon (crédit photo Freyssinet)

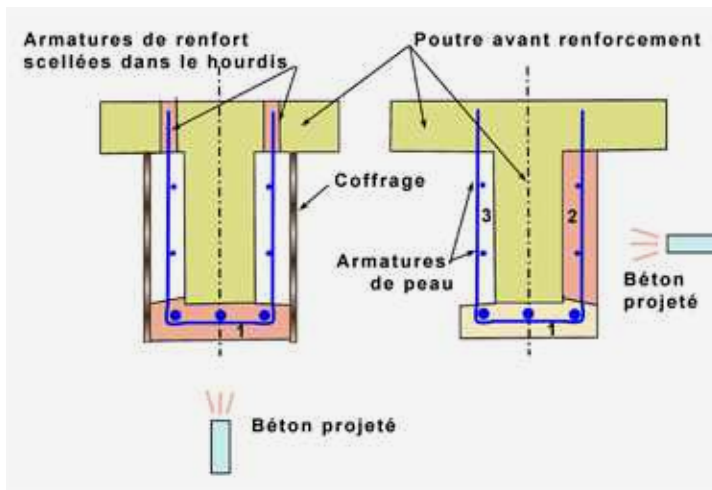


Figure n° 55 : principe de renforcement d'une poutre par ajout de béton et d'armatures

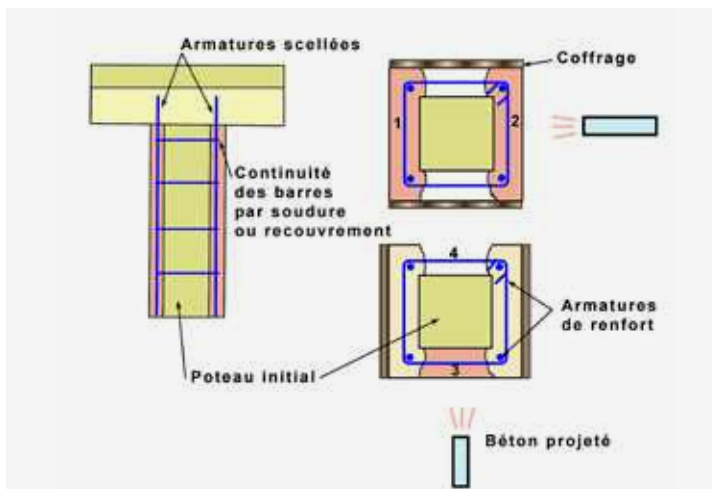


Figure n° 56 : principe de renforcement d'un poteau, vis-à-vis des charges d'exploitation seules, par ajout de béton et armatures

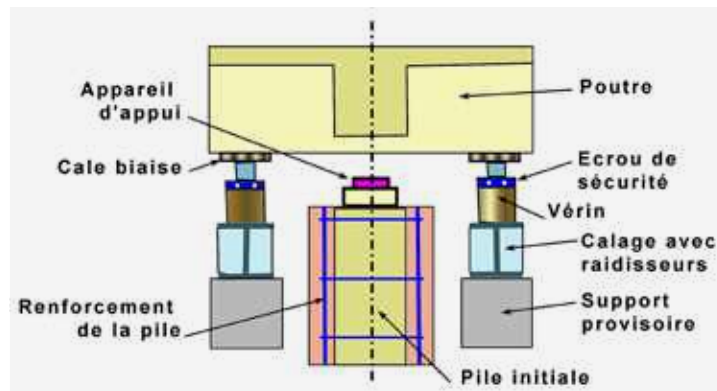


Figure n° 57 : principe de renforcement d'une pile, vis-à-vis des charges permanentes et d'exploitation, avec mise en charge par vérinage

> Seconde solution de renforcement par ajout de béton et d'armatures passives intérieures au béton :

Ce renforcement appelé, « **béton contrecollé** » pourrait être assimilé à la méthode de réparation visée par le principe (fonction) 4 dans le tableau 1 de la **norme NF EN 1504-10** (collage de mortier ou de béton). Cependant cette notion de collage ne se retrouve pas dans le tableau 1 de la **norme NF EN 1504-9**. Un tel renforcement est applicable à une dalle de couverture, un plancher...

Le coulage sur une dalle existante d'une couche de béton armé permet **d'augmenter le bras de levier des armatures** y compris celui des poutres qui la supportent et, par voie de conséquence, **le moment résistant** qu'elles peuvent équilibrer. L'augmentation du moment résistant compense, normalement, largement le supplément de poids propre dû à la couche de béton additionnelle. Il est donc possible d'admettre des **charges d'exploitation plus élevées**.

Dans le cas où la dalle est soumise à des **vibrations** et des **sollicitations dynamiques**, afin d'éviter une rupture dans le plan de reprise de bétonnage sous l'action des cisaillements qui s'y développent, les règles de calcul du béton armé imposent de mettre des **armatures de couture**. Il faut donc forer dans la dalle un nombre très important de trous pour y sceller les armatures de couture, ce qui rend la solution très onéreuse et, de plus, transforme la dalle en un véritable « **gruyère** » préjudiciable à sa résistance, en particulier, lorsque la résistance du béton de la dalle n'est pas très élevée... Cette solution classique de renforcement d'une dalle n'est donc pas envisageable dans tous les cas.

Le **béton contrecollé** a été mis au point par **L'HERMITE** pour renforcer la capacité portante des **planchers du CNIT à la Défense**. Après divers travaux préparatoires, l'extrados des planchers a été enduit d'une colle époxyde sur laquelle a été coulée une surépaisseur de béton armé. **Le collage** permet de considérer que le **hourdis de la dalle ainsi renforcée a été coulé en une seule phase**. Il permettrait donc théoriquement de supprimer les armatures de couture.

Dans la pratique, il faut mettre en place **deux types d'armatures de couture scellées ou connecteurs** :

- **des connecteurs répartis** (quelques connecteurs au m²) chargés d'éviter, en cas d'un défaut de collage local, un décollement (délamination) du plan de reprise de bétonnage ;
- **des connecteurs à la périphérie de la dalle** pour équilibrer les cisaillements développés par le **retrait différentiel** entre les deux bétons d'âges très différents (la méthode de calcul de ces armatures est voisine de celle utilisée pour le dimensionnement des connecteurs des **ponts mixtes acier-béton** nécessaires pour reprendre les efforts développés par retrait à l'interface entre le béton et l'ossature métallique.

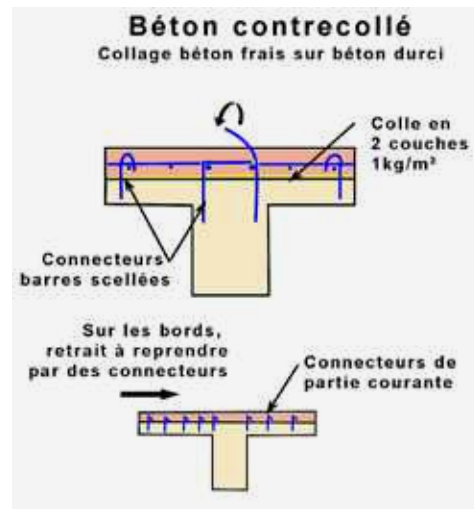


Figure n° 58 : principe de réalisation d'un renforcement d'une dalle et d'une poutre par béton contrecollé

Cette solution comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple, par vérinage),
- la démolition du béton d'enrobage pour dégager les armatures, si besoin est, suivie d'une préparation de surface,
- le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
- la mise en place d'une colle « béton frais sur béton durci »,
- la réalisation de la nouvelle géométrie de la pièce, le béton ajouté étant mis en place classiquement,
- la mise en charge de la structure renforcée par décintrement.

> Premier exemple renforcement d'un pont en BA :



Photo n° 117 : renforcement du hourdis supérieur du pont de Guignicourt par béton contrecollé (crédit photo D. Poineau)

Remarque : ces deux méthodes de renforcement (première et seconde susvisées) peuvent être appliquées à une structure précontrainte. Cependant, une opération supplémentaire est à prévoir, à savoir la mise en place d'armatures de précontrainte extérieures longitudinales, voire verticales (étriers actifs).

> **Deuxième exemple renforcement d'un pont en BP :**

Les nouvelles contraintes du plan de circulation autour de l'agglomération nantaise ont conduit à **élargir un des deux tabliers du pont de Bellevue sur la Loire**. L'élargissement a été obtenu entre connectant sur le hourdis existant un nouvel hourdis plus large en respectant un phasage rigoureux pour limiter, en particulier, les effets des retraits différentiels. Cet élargissement a été accompagné d'un renforcement longitudinal par précontrainte additionnelle afin d'équilibrer le supplément de charges permanentes et d'exploitation. De plus, un renforcement des âmes par une précontrainte verticale additionnelle a été également nécessaire. Pendant tous les travaux, le trafic a pu être maintenu sur l'ouvrage grâce à un tablier métallique provisoire dégageant localement la zone de travail nécessaire au coffrage, ferrailage et bétonnage de chaque plot du nouvel hourdis.



Photo n° 118 : tablier provisoire pour le maintien de la circulation et ferrailage de l'élargissement du pont de Bellevue (crédit photo CÉTÉ de l'Ouest - M.D. Guillot)



Photo n° 119 : bétonnage du dernier plot de l'élargissement du pont de Bellevue (crédit photo CÉTÉ de l'Ouest - M. D. Guillot)

3.5.8.1.3.2 Solutions de renforcement par ajouts d'armatures passives extérieures au béton (se reporter au guide FABEM 7)

ATTENTION, l'article 5.2.2 du **guide FABEM 7** : « bases et principes de dimensionnement » n'est pas clair dans la présentation du dimensionnement du renfort en matériaux composites suivant l'hypothèse retenue : **phasage ou adaptation**. C'est le cas dans la partie consacrée à la justification et dimensionnement vis-à-vis de l'ELU d'une section en flexion simple.

Par exemple, prenons le cas d'une section d'une poutre en BA pour laquelle le dimensionnement du renfort s'appuie sur l'**Eurocode 2**. La justification du renforcement peut se faire suivant les deux hypothèses suivantes :

1. **Soit à considérer le phasage des chargements** c'est-à-dire que les déformations de la section non renforcée (béton comprimé ε_{c0} et armatures passives ε_{s0}) sous les **charges permanentes** sont ajoutées aux déformations de la **section renforcée par le composite** développées sous les **charges d'exploitation**. Pour chaque matériau, la somme des déformations doit rester inférieure à leur déformation limite de la règle de calcul prise en compte ;

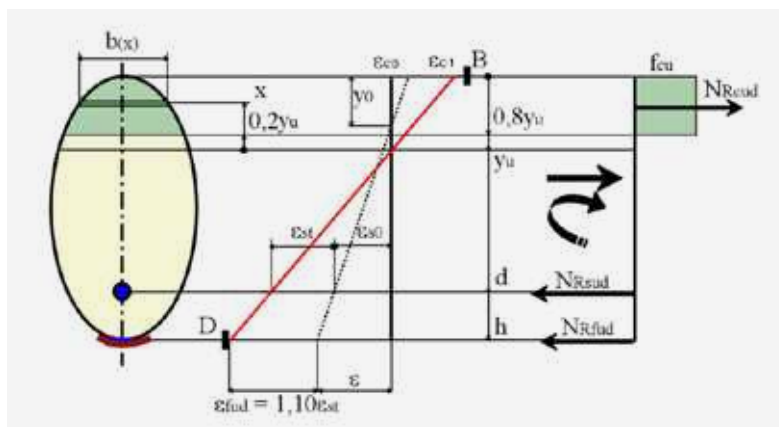


Figure n° 59 : diagramme des déformations dans le cas d'un phasage (section en BA)

2. **Soit à considérer qu'il y a adaptation** c'est-à-dire que la totalité des charges permanentes et d'exploitation est appliquée à la **section renforcée par le composite**. Pour chaque matériau, la déformation doit rester inférieure à sa déformation limite de la règle de calcul prise en compte.

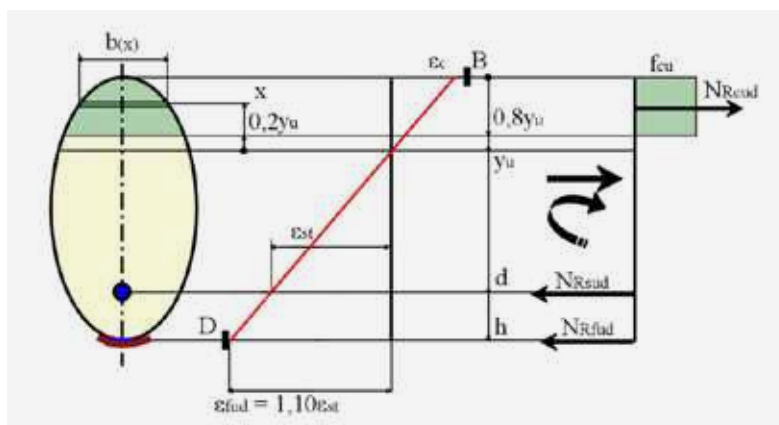


Figure n° 60 : diagramme des déformations dans le cas d'une adaptation (section en BA)

- > Première solution de renforcement par collage de tôles ou de matériaux composites (tissus ou plaques) sous forme d'armatures extérieures au béton :



Photo n° 120 : renforcement de poutres fléchies par plaques de composites (pultrudés) (crédit photo VSL)

Ce renforcement est applicable à des **pièces fléchies et/ou cisailées**, telles qu'une poutre, une dalle en béton armé... Il comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple par vérinage),
- la préparation de surface du béton (ponçage, ragréage, nettoyage),
- l'encollage en double face (le béton et l'armature additionnelle),
- la mise en place de l'armature (avec mise sous pression dans le cas des tôles collées),
- si besoin est, la mise en charge de la réparation par décintrement,
- la mise en place d'un revêtement de protection de l'armature extérieure (par exemple, peinture anticorrosion pour les tôles collées, revêtement anti-UV sur les produits organiques [matériaux composites à base de résines], revêtements de protection contre l'incendie...).



Photo n° 121 : renforcement de poutres en béton armé à l'effort tranchant PI A 6 à Arcueil (crédit photo VSL – M. Loubeyre)

Exemple de réparation par matériaux composites collés :

Se reporter au renforcement des piles du pont de Brotonne développé dans l'article 3.5.3.4.6 ci-dessus.

> **Seconde solution de renforcement par collage de tôles ou de matériaux composites (tissus ou plaques) sous forme d'armatures extérieures au béton :**



Photo n° 122 : frettage de poteaux par composites (crédit photo Freyssinet)

Ce renforcement est applicable à des **pièces comprimées, voire fléchies et comprimées** telles qu'une pile ou un poteau en béton armé...

La réalisation des travaux est identique à ceux de la solution n°1. Seul le mode de fonctionnement de l'armature, qui entoure la pièce comprimée et y exerce un **effort de frettage**, change. Un tel renforcement est utilisé, par exemple, pour des poteaux et des piles non dimensionnés pour des séismes...

3.5.8.1.3.3 Solutions de renforcement par ajouts d'armatures de précontrainte intérieure ou extérieure au béton (se reporter au guide FABEM 8)

> Première solution de renforcement par armatures de précontraintes intérieures au béton :

Ce type de renforcement (étriers actifs) est applicable, par exemple, à l'âme d'une poutre présentant une **insuffisance de résistance à l'effort tranchant**... Il comporte :

- l'implantation très soignée de la position des forages pour ne pas sectionner les armatures passives et actives existantes,
- le forage de l'âme sur toute sa hauteur avec un carottier pour réaliser le conduit dans lequel sera introduite l'armature de précontrainte (barre ou monotoron),
- la mise en tension de l'armature en respectant une procédure spécifique et en effectuant des contrôles très spécifiques,
- l'injection du conduit et la réalisation des cachetages pour assurer la protection des armatures et des ancrages).

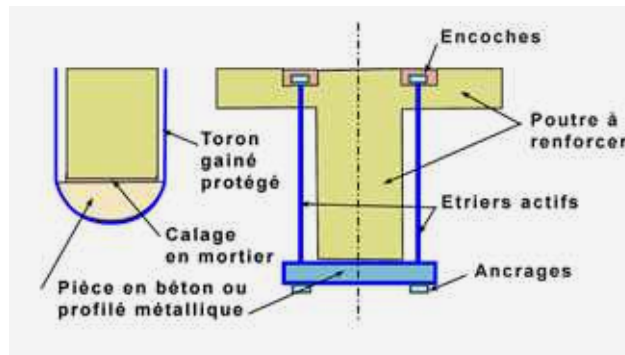


Figure n° 61 : principes de renforcement d'une poutre à l'effort tranchant par étriers actifs extérieurs

Remarque : l'étrier actif peut aussi être placé à l'extérieur de l'âme de la poutre comme cela est explicité par la figure ci-après. Dans un tel cas, il est préférable de disposer les renforts de part et d'autre de l'âme pour limiter les flexions parasites de celle-ci.

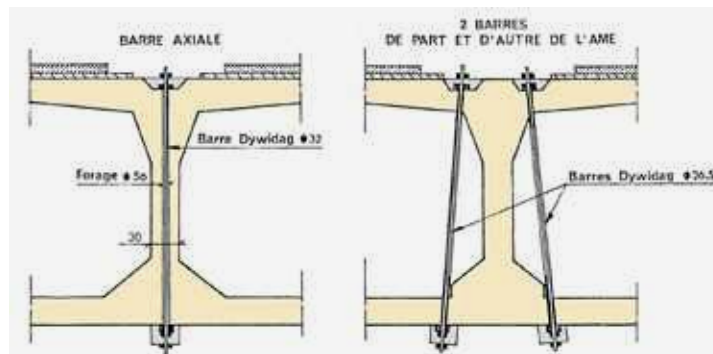


Figure n° 62 : principes de renforcement de l'âme d'une poutre-caisson par des barres de précontrainte internes et extérieures



Photo n° 123 : renforcement à l'effort tranchant par étriers actifs en acier inoxydable du pont de Labéraudie (crédit-photo D. Poineau)

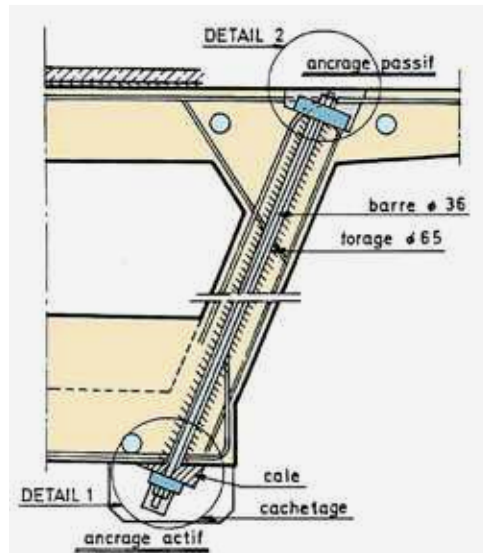


Figure n° 63 : principe de renforcement à l'effort tranchant du viaduc de Saint-Isidore (autoroute A 8)

> **Seconde solution de renforcement par armatures de précontraintes extérieures au béton :**

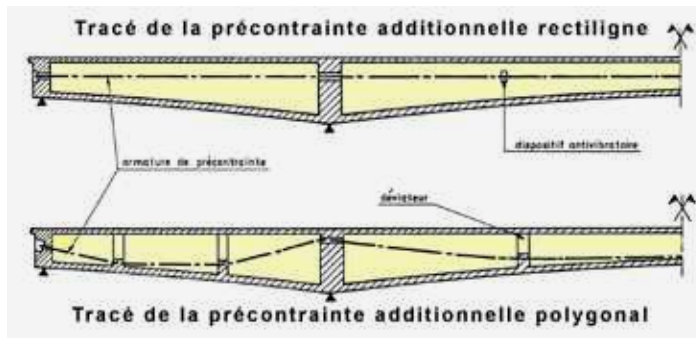


Figure n° 64 : principes de renforcement d'une poutre par précontrainte additionnelle longitudinale

Ce type de renforcement est applicable, par exemple, à une poutre présentant une **insuffisance de résistance vis-à-vis de la flexion**... Il comporte :

- l'implantation soignée de la position des différents éléments à réaliser,
- la réalisation des pièces d'ancrage et de déviation, ce qui impose des forages, des scellements d'armatures, la mise en place d'armatures et de coffrages et enfin le bétonnage des pièces. Ces différents éléments, une fois réalisés, vont permettre de mettre en place les armatures de précontrainte à l'intérieur d'un conduit (gaine),
- la mise en tension de l'armature en respectant une procédure et en effectuant des contrôles très spécifiques,
- l'injection du conduit et la réalisation des cachetages pour assurer la protection des armatures et des ancrages).



Photo n° 124 : renforcement par précontrainte additionnelle d'un ouvrage de la corniche à Marseille (crédit photo Communauté Urbaine de Marseille)

Note : en précontrainte additionnelle extérieure au béton sous gaine en PEHD, la protection des armatures fait appel à une injection à la cire pétrolière. Il est aussi possible d'utiliser des monotorons gainés-graissés sous une gaine en PEHD injectée au coulis de ciment avant mise en tension des monotorons.

Ce type de renforcement est aussi applicable à l'âme d'une poutre présentant une **insuffisance de résistance à l'effort tranchant**. La composante verticale due à l'inclinaison de la précontrainte longitudinale assure une réduction de l'effort tranchant qui peut être suffisante pour ne pas avoir à prévoir des étriers actifs.

4

Préparation générale de l'opération

- 4.1 Généralités
- 4.2 Choix des produits, systèmes et procédés de réparation, de renforcement et de protection
- 4.3 Conditionnement des produits
- 4.4 Transport et stockage des produits
- 4.5 Matériels à utiliser

L'entrepreneur fait mettre en place les **moyens d'accès et les équipements d'hygiène et de sécurité** sur le lieu où la mise en œuvre d'un produit ou d'un système de réparation, renforcement ou protection du béton est prévue, en respectant les dispositions du **marché**, la législation en vigueur et les consignes du chargé des ouvrages provisoires (COP) et du coordonnateur sécurité et protection de la santé (coordonnateur SPS).



Figure n° 65 : la préparation d'une opération de réparation par l'entrepreneur

L'entrepreneur doit prendre connaissance et disposer en permanence des documents de la liste suivante non limitative :

- **les normes en vigueur et les autres documents de référence qui sont cités dans le présent GUIDE** (se reporter en annexe aux tableaux des textes de référence et, en particulier aux principaux textes suivants qui traitent des produits et systèmes de réparation et protection et des méthodes de réparation (génie civil et bâtiment) :
 - **Norme NF EN 1504-9** relative aux principes généraux d'utilisation des produits et systèmes (notions de principes et méthodes de réparation) ;
 - **Normes de la série NF EN 1504-2 à 7** relatives aux produits de réparation ;
 - **Norme NF EN 1504-10** relative à l'application sur le site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux (norme trop générale et pas assez opérationnelle pour être visée dans un marché) ;
 - Normes françaises révisées de la **série NF P95-101 à 104 et NF P95-105** (en cours d'élaboration) qui traitent de la mise en œuvre d'un certain nombre de méthodes de réparation.
- **les normes NF DTU et les DTU relatifs aux produits et systèmes et méthodes de réparation (bâtiment) :**
 - **la norme NF DTU 42.1** relatif à la réfection des façades par revêtements d'imperméabilité à base de résines (l'annexe B de ce document traite de la réparation du béton armé).

Le **domaine d'application de la plupart des NF DTU et normes-DTU** indique que ces documents traitent de **travaux neufs**, rarement de **travaux sur existants**. Dans la pratique, en l'absence de textes spécifiques, la **réalisation de travaux de réparation** peut s'appuyer sur un texte visant uniquement des travaux neufs à la condition que le support béton ait été remis en état.

- **les ÉTE, voire les ATE transformés en ÉTE**, qui sont des documents européens, ainsi que les **agrément techniques Atec et les documents techniques d'application DTA du CSTB** relatifs à des produits et systèmes de réparation (génie civil et/ou bâtiment) :
 - les ÉTE relatif aux chevilles de fixation qui sont basées sur plusieurs DÉE (le n°330232-00-0601 : généralités, le n°330499-00-0601 : ancrages injectés). Précédemment il s'agissait d'ATE basés sur le Guide d'Agrément Technique Européen GATE 001 (ETAG 001),
 - les ÉTE relatifs aux systèmes de précontrainte anciens basés sur le Guide d'Agrément Technique Européen GATE 013 (ETAG 013),
 - les ÉTE relatifs aux systèmes de précontrainte récents basés sur les documents d'évaluation européen DÉE (EAD) liés au RPC,
 - les Atec du CSTB relatifs aux matériaux composites collés.

Note : les Atec concernent des procédés non normalisés. L'obtention de l'agrément permet à ces procédés de pouvoir être mis en œuvre et bénéficier de la garantie décennale. Les DTA concernent les produits ou systèmes relevant d'un ATE, ÉTE DÉE qui pour pouvoir bénéficier de la responsabilité décennale doivent satisfaire à certaines exigences, en particulier, d'une durée de projet suffisante.

Le procédé de précontrainte utilisé lors d'une réparation ou d'un renforcement doit être marqué **CE** par un organisme notifié tel que l'**ASQPE** et fait l'objet d'une **Évaluation Technique Européenne (ÉTE)**.

- le Document d'Évaluation Européen (DÉE) n°160004-00-0301 de septembre 2016 traite des procédés de précontrainte,
- le Document d'Évaluation Européen (DÉE) n°160027-00-0301 de septembre 2016 traite des produits d'injection

Pour les **anciens procédés de précontrainte** qui faisaient déjà l'objet d'un ATE et qui font désormais l'objet d'une ÉTE, deux situations pourraient coexister de manière définitive (les ÉTE n'ont pas de durée de validité) :

- l'**ATE** a été remplacé par une **ÉTE** mais il est toujours basé sur l'**ETAG 13** ;
- l'**ATE** a été remplacé par une **ÉTE** basé sur le **DÉE** susvisé.

ATTENTION, le simple marquage **CE** ne permet pas de garantir le respect de toutes les performances exigées par le fascicule 65 du CCTG et le DÉE car ce marquage peut ne concerner qu'une partie des exigences. Il faut s'assurer que la **déclaration des performances (DdP)** couvre bien tous les aspects souhaités.

ATTENTION, dans certains cas, des **adaptations des procédés sont nécessaires** pour réaliser une réparation (réutilisation d'un ancrage existant pour mettre en œuvre une précontrainte additionnelle...). Ces adaptations doivent respecter les principes du procédé et sont définies par le détenteur de l'ÉTE. Le **marché** doit être rédigé en conséquence.

- **les documents élaborés, les investigations effectuées et les essais réalisés** durant l'opération préalable d'**expertise** et de **diagnostic** de l'ouvrage affecté par des désordres à la charge du **maître de l'ouvrage** avec les résultats des investigations et le **rapport de diagnostic** ;
- **les différents documents relatifs à l'exécution des travaux de protection, réparation ou renforcement** à fournir conformément aux dispositions du **marché** (se reporter aux fascicules du CCTG et, en particulier, le **fascicule 65, voire le NF DTU** concerné) :
 - *le plan de contrôle global, rédigé par le maître d'œuvre et validé par le maître de l'ouvrage, organise pour l'opération la coordination et la complémentarité des opérations de contrôle intérieur des différents intervenants et de contrôle extérieur,*
 - *le Plan Qualité (PQ) ou Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ) qui complète le Schéma Directeur de la Qualité (SDQ) et le Schéma Organisationnel du Plan d'Assurance de la Qualité (SOPAQ) remis par le soumissionnaire avec son offre,*
 - *les propositions des origines et la nature des matériaux extérieurs au chantier,*
 - *les propositions concernant les produits et systèmes à mettre en œuvre sur le chantier :*
 - les fiches techniques (ou notices d'emploi) des différents produits et/ou systèmes à utiliser,
 - les données de performance (DdP ou DoP) des produits bénéficiant du marquage CE dans le cadre du RPC,
 - *les fiches de données sécurité (FDS) des différents produits, fiches dont la présence sur le chantier est imposée par la réglementation en vigueur,*
 - *le programme d'exécution des travaux et son calendrier,*
 - *le Plan de Respect de l'Environnement (PRE) qui complète la Notice de Respect de l'Environnement (NRE) établie par le maître de l'ouvrage et le Schéma Organisationnel du Plan de Respect de l'Environnement (SOPRE) remis par le soumissionnaire avec son offre,*
 - *le PPSPS ou le PPSPS simplifié si requis pour le chantier,*
 - *les plans et notes de calculs des ouvrages provisoires nécessaires à l'exécution des travaux,*

- *les résultats et l'interprétation des éventuelles investigations à la charge de l'entrepreneur y compris à la suite de la réalisation des relevés contradictoire avec le maître d'œuvre prévus au marché, voire la réalisation d'essais lors d'épreuves d'étude prévues au marché. Toutes ces informations doivent être prises en compte et être intégrées dans les mises à jour du projet de protection, réparation ou renforcement,*
- *la procédure des études et les études d'exécution relatives aux travaux de protection, réparation ou renforcement (plans et notes de calculs validés),*
- *les procédures d'exécution des travaux et les cadres des documents de suivi des travaux puis les documents de suivi rédigés lors des opérations du contrôle interne,*
- *les fiches techniques et les carnets d'entretien des différents matériels nécessaires (par exemple, outils de mélange des produits, moyens de pesée, outils de mise en œuvre des produits, etc.),*
- les conditions de gardiennage fixées par le marché (une telle disposition peut éviter des destructions accidentelles ou volontaires...) ;
- etc.

Note : l'ensemble des normes relatives aux produits et systèmes et techniques de réparation et de renforcement figurent dans un recueil de l'AFNOR.

L'entrepreneur doit organiser, exécuter et contrôler toutes les opérations suivantes :

- la surveillance du chantier pendant les travaux (se reporter à l'article 35 du CCAG et au Code Civil) ;
 - celles relatives à l'assurance de la qualité ;
 - l'amenée et la mise en place des **moyens d'accès, des ouvrages provisoires et des équipements d'hygiène et de sécurité** ;
 - l'approvisionnement des **matériaux et produits et systèmes** nécessaires ;
 - l'amenée et la mise en place des **matériels** nécessaires à l'opération ;
 - la réalisation du ou des **relevé(s) contradictoire** avec le **maître d'œuvre de l'état** :
 - soit du support, état qui est à reporter sur un plan avec les fissures éventuelles à traiter (numérotation, longueur, ouverture, activité ou non, etc.), les épaufrures, les armatures apparentes... Un tel relevé s'impose lorsque les réparations à effectuer concernent des désordres superficiels,
 - soit de tout ou partie de la structure, si les réparations à effectuer concernent des désordres structuraux. Dans un tel cas, le relevé des désordres doit être complété par les dispositions à prendre lors des travaux pour mettre en sécurité l'ouvrage (par exemple, le phasage des diverses opérations de démolition et de réparation, les étaitements provisoires...) ;
 - celles qui concernent le respect des **classes d'exposition** fixées dans le **marché** ;
 - celles qui concernent le suivi des **conditions météorologiques** sur le chantier (incidences sur les conditions de mise en œuvre des produits, systèmes...) ;
 - celles qui doivent précéder l'**application des produits et/ou systèmes** nécessaires aux travaux à effectuer ;
 - celles qui mettent en œuvre les **produits et/ou systèmes** ;
 - celles qui doivent suivre l'application des **produits ou systèmes de réparation** ;
 - celles relatives aux interventions du **laboratoire** chargé de certaines **épreuves** et de certaines **mesures** dans le cadre du **contrôle interne ou extérieur**. Les contrôles demandés doivent être adaptés, si nécessaire, à la technique de traitement retenue en l'absence de norme spécifique ;
 - la mise en œuvre des **moyens de mesure** destinés à contrôler l'**efficacité du traitement** de la dégradation mais aussi, si besoin est, les **moyens de contrôle** de la **stabilité de l'ouvrage** en cours de travaux ;
- etc.

Rappel : la remise au maître d'œuvre des **procédures** et des **cadres des documents de suivi** conditionne le levé d'un **POINT D'ARRÊT**.



Photo n° 125 : moyens d'accès nécessaires pour l'exécution des travaux (crédit photo Parexlanko)

4.2.1 GÉNÉRALITÉS

Cet article traite des produits et systèmes concernant, d'une part, la **fonction de réparation non structurale** et la **fonction de réparation structurale (avec ou sans renforcement)** et, d'autre part, la **fonction de préservation ou de restauration de la passivité des armatures**.

Bien que certains produits et systèmes puissent assurer les trois fonctions à la fois, pour des raisons pratiques, un sous-article est consacré aux deux premières fonctions et un autre à la troisième.

Cet article est constitué de sous-articles traitant des points suivants :

1. *des normes harmonisées – exigences de performance – marquage CE... ;*
2. *des généralités ;*
3. *des critères de choix communs à tous les produits et systèmes de réparation ;*
4. *des critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de réparation structurale et non structurale,*
5. *des critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de préservation ou de restauration de la passivité des armatures,*
6. *des exigences concernant les constituants des produits et systèmes de réparation et des produits connexes,*
7. *de l'épreuve d'étude.*

Lors de certaines réparations et encore plus lors des renforcements, il y a lieu de mettre en œuvre des produits (mortiers et bétons) qui doivent satisfaire aux exigences du **maître de l'ouvrage** (la construction d'un ouvrage neuf pose les mêmes problèmes). Par exemple, les exigences peuvent porter sur les points suivants :

- *la durabilité vis-à-vis des **classes d'exposition** ;*
- *la résistance à des attaques physiques (érosion, chocs...) ou chimiques (eaux acides, séléniteuses, de mer...) ;*
- *la durabilité vis-à-vis des effets du gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage ;*
- *la durabilité vis-à-vis des facteurs de corrosion ;*
- *l'absence de réactions de gonflement internes (alcali-réaction [AR] ou réaction sulfatique interne [RSI]) ;*
- *la prise en compte des effets des différents retraits (thermique, endogène, de dessiccation au jeune âge ou à long terme) pour éviter la fissuration ;*
- *l'obtention des propriétés mécaniques (résistance, module de déformation, coefficient de fluage...)* ;
- *l'obtention de la qualité spécifiée des parements (homogénéité de teinte, absence de ressuage et de nids de cailloux...)*...

L'expérience montre que toutes ces exigences peuvent avoir des effets contradictoires, ce qui peut entraîner, soit des retards sur le chantier à cause des délais nécessaires pour trouver des solutions, soit l'apparition de désordres ultérieurs dans les bétons et/ou les armatures s'il s'avère impossible de prendre le temps nécessaire aux études.

Par exemple, la résistance d'un béton au gel-dégel peut être obtenue en adoptant un fort dosage en ciment, ce qui peut entraîner le maintien du béton à température élevée pendant sa prise et son durcissement ; or, la température est le facteur principal d'un possible développement ultérieur d'une RSI si :

- *le ciment est fortement exothermique ;*
- *le bétonnage a lieu par temps chaud ou un traitement thermique est appliqué ;*
- *la pièce est massive (parfois sur des pièces de moins de 0,50 m x 0,50 m de section, en cas d'un bétonnage par temps très chaud ou d'un traitement thermique sévère).*

Pour empêcher la réaction de se développer, l'**ajout de cendres volantes** serait bénéfique, mais il est en fait fortement déconseillé à cause du gel.

Des solutions sont cependant possibles pour satisfaire les deux exigences susvisées, mais leur mise en œuvre peut nécessiter des délais d'études importants (par exemple, six à huit mois sont nécessaires pour effectuer des **essais de gonflement** dits de performance).

Il est donc indispensable, dans de tels cas, que le **marché** prévoit une **période de préparation des travaux** suffisamment longue pour pouvoir effectuer toutes les études nécessaires afin de satisfaire les exigences potentiellement contradictoires.

Pour résumer, le principe suivant doit être respecté : il faut s'assurer lors du choix des produits et systèmes **qu'ils sont compatibles** avec le béton et les armatures de la structure existante.

4.2.2 NORMES HARMONISÉES – EXIGENCES DE PERFORMANCE – MARQUAGE CE – NIVEAU D'EVCP – NIVEAU DE RÉACTION AU FEU - CERTIFICATION VOLONTAIRE

Cet article rappelle les principes qui s'appliquent aux divers produits de construction et, en particulier ceux visés par les normes harmonisées comme celles de la série NF EN 1504-** et les ÉTE.

Le terme de « **propriétés ou caractères spécifiés** » s'applique à un produit qui doit satisfaire à des **exigences de performances** (par exemple, résistance, adhérence, perméabilité aux liquides ou aux gaz...) imposées par une **norme**, un **guide**, le **marché**... Par exemple, c'est le cas des bétons à **caractères ou propriétés spécifiés (BCS ou BPS)** mais pas des bétons à **composition prescrite**.

***Note** : depuis au moins deux décennies, la tendance est au développement d'une « **approche performantielle ou performancielle** » pour les spécifications concernant la **durabilité des bétons**. Cette approche spécifique est explicitée dans la suite du présent article consacré au choix des produits et systèmes de protection. Des développements sur ces notions figurent dans le **guide de l'AFGC de juillet 2004** susvisé, dans la **norme NF EN 206/CN** et dans la partie du **fascicule 65 du CCTG** consacrée aux bétons et opérations de bétonnage.*

Le terme de « **recette** » ou de « **composition prescrite** » s'applique à un produit dont le dosage et les caractéristiques des composants sont fixés par une **norme**, un **guide**, le **marché**... Le respect de la composition permet d'obtenir un produit qui présente un **niveau de performance suffisant pour l'usage prévu** (par exemple, résistance minimale, durabilité assurée pour la classe d'exposition retenue...).

4.2.2.1 Normes harmonisées – Marquage CE

***Note** : se reporter à l'article 1.1.2 ci-dessus qui détaille la normalisation européenne.*

Les **normes harmonisées** relatives aux produits de construction sont basées sur un **mandat** de la **Commission Européenne**. Elles permettent le **marquage CE** de ces produits. Actuellement les conditions du **marquage CE** et de l'**étiquetage**, qui sont obligatoires, sont définies dans l'**article 9 du Règlement Produits de Construction ou RPC** (nom et coordonnées du fabricant, performances des produits, numéro de l'organisme certifié...).

Le **marquage CE** d'un produit s'appuie sur l'**annexe ZA de la norme harmonisée**. Dans le cadre du **RPC**, cette **annexe ZA** comporte trois parties :

1. la partie ZA1 : fixe le domaine d'application et liste les caractéristiques fondamentales applicables au **marquage CE** (valeurs seuils, valeurs déclarées...);

2. la partie ZA2 : traite en quelques lignes du système d'Évaluation et de Vérification de la Constance des Performances (EVCP) ;

3. la partie ZA3 : attribue les tâches d'EVCP :

- à la charge du fabricant,
- à la charge de l'organisme notifié de certification et de contrôle de la production en usine.

Note : l'annexe ZA et ses trois parties existent depuis la mise en application de la DPC. Le RPC a introduit en 2015 une **modification de l'annexe ZA** laquelle ne traite plus dans sa partie ZA 3 du **marquage CE** avec un modèle d'étiquette et le sigle CE.

Le fabricant établit une **Déclaration de Performance (DdP ou DoP)** encadrée par le **niveau du système d'EVCP (1+, 1, 2+...)** qui permet le **marquage CE**.

L'attention des prescripteurs est attirée sur le fait que les **caractéristiques fondamentales « qualifiantes »** pour obtenir le marquage ne recouvrent pas forcément :

1. **toutes les caractéristiques de performance**, définies dans la norme pour les **différentes utilisations prévues**, qui permettent de satisfaire à un ou **plusieurs principes** et à **certaines fonctions**. Le niveau de performance peut être, suivant la politique du fabricant, égal ou supérieur à la **valeur seuil** ou appartenir à une des **classes prévues** par la norme (ces utilisations sont classées en deux catégories : « **toutes les utilisations prévues** » (repérées, le plus souvent, dans les tableaux par le symbole ■) et « **certaines des utilisations prévues** » (repérées dans les tableaux par le symbole □) ;

ATTENTION, un produit ou un système bénéficiant du **marquage CE** peut ne pas être qualifié vis-à-vis de toutes les **caractéristiques fondamentales (ex-essentielles)**, qui figurent dans l'**annexe ZA**, en effet, certaines peuvent être considérées comme **non pertinentes** pour l'usage prévu (sigle **NPD**). Cette décision est du ressort du **fabricant**.

De plus, le **niveau de performance déclaré** d'une **caractéristique fondamentale** (essentielle) peut être **insuffisant** dans le cadre d'un projet donné.

2. **toutes les exigences de performance** pour des « **applications particulières** » qui sont, si elles existent, visées dans une **annexe informative** à la norme ;

3. **toutes les caractéristiques pertinentes** et les **exigences de performance** applicables à un **projet particulier**, compte-tenu des conditions relatives : à l'environnement, au climat, à la compatibilité avec les matériaux en place, etc. Dans un tel cas, elles sont fixées dans le **marché** et **peuvent nécessiter la réalisation d'épreuves d'étude** à définir.

Par exemple, sauf exception, les produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton doivent donc, au **minimum**, présenter les caractéristiques exigées par la série des normes **NF EN 1504-****. De plus, leur **système d'EVCP au sens du RPC (attestation de conformité au sens de la DPC)** doit appartenir :

- soit à la classe 4, qui concerne les produits et systèmes avec des exigences de performance peu élevées ;
- soit à la classe 2+ dans le cas contraire (cas des ouvrages de génie civil sauf exception).

En outre, ils doivent satisfaire à une **réglementation en matière de réaction au feu** pour laquelle leur **système d'attestation de conformité** ou **d'EVCP** doit appartenir, suivant niveau de performance nécessaire, aux **classes 1, 3 ou 4**.

L'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les produits et systèmes capables de satisfaire les exigences du **marché**. Les produits et systèmes ne sont définitivement retenus qu'au vu des résultats de **l'épreuve d'étude** éventuelle et de **l'épreuve de convenance**.

4.2.2.2 Caractéristiques de performance

ATTENTION, les performances d'un produit ou système une fois mis en place sur le support (béton existant) peuvent être **différentes** de celles annoncées par la **DdP** à cause de la **technique de mise en œuvre**.

C'est le cas de la **projection**, si on veut utiliser des produits de réparation du béton conformes à la **norme NF EN 1504-3** car si les essais de qualification de la norme sont réalisés sur des éprouvettes obtenues par coulage dans un moule).

La fixation des niveaux de performance requis peut donc nécessiter la réalisation **d'essais complémentaires spécifiques, voire de mettre au point des procédures d'exécution particulières**.

Par exemple, pour les **produits et systèmes de réparation du béton**, il est indispensable de consulter en premier la **norme NF P95-101** puis, si nécessaire, la norme relative au produit de la série **NF EN 1504-3** et son **annexe ZA** ainsi que les **normes de référence NF EN 1504-9** et **NF EN 1504-10** avant de fixer les performances auxquelles doit satisfaire le produit ou système à mettre en œuvre pour satisfaire aux diverses exigences ainsi qu'aux résultats des études et investigations préalables.

4.2.2.3 Niveau du système d'EVCP (rappel)

De même, le **niveau du système d'EVCP** (ex-attestation de conformité de la **DPC**) des produits et systèmes est à fixer dans le **marché**. Il s'agit normalement du **niveau 2*** pour les **ouvrages de génie civil** comme l'indique les **normes de la série NF P95-1****, qui exigent des produits et systèmes de hautes performances, sauf disposition contraire du **contrat (le marché)**.

4.2.2.4 Niveau de réaction au feu (rappel)

La tenue au feu des produits et systèmes concerne en premier le **domaine du bâtiment** ; cependant, certains ouvrages de **génie civil** comme les tunnels, les tranchées couvertes sont également concernés.

Lorsque ces produits et systèmes sont soumis à une **réglementation en matière de réaction au feu**, ils font l'objet **d'EVCP** de plusieurs niveaux en fonction de la performance exigée. Il appartient au **marché** de fixer les niveaux d'attestation de conformité exigés.

Lorsqu'elle est requise, pour des ouvrages visés par une **réglementation de sécurité incendie** (cas des tunnels par exemple), une attestation **d'EVCP** (ex-attestation de conformité) complémentaire de **niveau 3** est à fournir.

La **réglementation française** en matière de comportement au feu des produits s'est adaptée au dispositif **européen harmonisé** compte tenu des **six exigences essentielles de la « DPC »** remplacées en 2013 par les **sept exigences fondamentales du « RPC »**, dont celle concernant la tenue au feu des éléments porteurs d'un ouvrage.

Produits	Classes	Cas des planchers
Peu ou très peu combustibles	A1 et A2	A1FL et A2FL
Combustibles mais dont la contribution à un embrasement généralisé est très limitée, limitée ou significative	B, C et D	BFL, CFL et DFL
Combustibles et dont la contribution à un embrasement généralisé est très importante	E et F	EFL et FFL

Tableau n° 28 : comparaison des classes françaises et européennes de tenue au feu

Vis-à-vis du feu, un **matériau**, une fois mis en œuvre dans un élément d'une construction, doit présenter les **deux caractéristiques** suivantes :

1. **sa réaction au feu** qui définit sa capacité à prendre part au feu y compris par sa propre combustion ;
2. **sa résistance au feu** qui définit la **capacité de l'élément de construction** à conserver son rôle pendant l'incendie (force portante, durée de coupe-feu, isolation thermique [limitation du transfert de la chaleur]).

Se reporter aux textes réglementaires en vigueur sur la **tenue au feu** (arrêtés du 21 novembre 2002 et du 22 mars 2004 publiés aux journaux officiels du 31 décembre 2002 et du 1^{er} avril 2004, l'arrêté de 2004 a été modifié par l'arrêté du 14 mars 2011...). Les classes françaises **MO, M1, M2, M3 et M4** sont remplacées par les classes européennes du tableau ci-dessus (l'indice **FL** s'applique aux planchers [floor]).

Bien entendu, il appartient au **maître d'ouvrage**, pour un ouvrage donné, de fixer, dans le cadre du **marché**, ses exigences en matière de réaction au feu.

4.2.2.5 Certification volontaire – Marques de qualité

Il est rappelé qu'il ne faut pas confondre une **marque de certification** et le **marquage CE**²⁰. Se reporter au **GUIDE 0 (guide GÉNÉRAL)** qui explicite les règles du jeu.

Note : avant l'apparition des normes européennes, compte tenu de l'existence en France d'une série complète de normes sur les produits de réparation (normes de la série **P18-8****), l'**AFNOR** avait créé une marque spécifique « **Marque NF-Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique** ». Le **règlement NF 030** de cette marque a été adapté aux normes **NF EN 1504 - parties 3 à 7**.

De même, le **CSTB délivre des Avis techniques (Atec)** et des **Documents Techniques d'Application (DTA)**.

Un **marché** peut imposer que les produits fassent l'objet d'une **certification volontaire** comme la **marque NF** (produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique). **Des marques équivalentes** peuvent coexister avec la **Marque NF**, sous réserve que l'équivalence soit démontrée, les produits sont alors recevables. Il est à noter que l'exigence d'un produit bénéficiant du droit d'usage d'une marque n'est pas imposée par les textes réglementaires comme le **Code des marchés publics**.

Dans le domaine de la **protection généralisée**, il est possible depuis janvier 2017 de se référer à la **marque ACQPA** « Revêtement par peinture des bétons de génie civil » dont le **référentiel technique** traite à la fois des fonctions esthétiques et de protection de surface des bétons (marquage CE au sens de la norme **NF EN 1504-2 en liaison avec le niveau 2 du guide GA P18-902**²¹.

ATTENTION, cette **marque ACQPA** concerne uniquement des **systèmes de peintures sans solvant, avec solvant organique ou en phase aqueuse**. Les **lasures et les produits de type imprégnations de surface (imprégnations et imprégnations hydrophobes au sens de la norme EN 1504-2)** ne sont pas concernés par la certification. Ces produits aux performances élevées permettent d'assurer la fonction principale de base au sens du **GA P18-902** : **protection contre les risques de pénétration d'eau, de CO₂, de la vapeur d'eau et des chlorures et par voie de conséquence le contrôle de l'humidité et l'augmentation de la résistivité**. La plus grande partie des **classes d'exposition à l'environnement** sont prises en compte (XCO à 4, XD1 à 3, XF1 à 4, XS1 à 3 sont exclues les classes XA). Elle assure aussi certaines **fonctions optionnelles** : **résistance à la lessivabilité...**

En conclusion, le **marché** doit fixer les **caractéristiques exigées des produits et systèmes** et leurs **niveaux de performance**, les **niveaux des systèmes d'attestation de conformité** ou **d'EVCP** ainsi que les **niveaux de performance en matière de réaction au feu** et les **diverses contraintes imposées au chantier**.

²⁰ Les annexe ZA des normes européennes harmonisées fixent rarement la classe (le niveau de performance) que doit respecter un produit ou un système pour bénéficier du marquage CE lorsque la partie normative prévoit plusieurs classes. C'est la **DoP**, la fiche technique et l'étiquette qui renseignent sur la classe de performance de la norme que respecte le produit.

²¹ Ne pas confondre le **niveau de performance 2** visé par le **guide GA P18-902** avec le **niveau 2+** du système d'évaluation et de vérification de la constance des performances (**EVCP** du **RPC**) ou du système d'attestation de conformité (**DPC**).

4.2.3 GÉNÉRALITÉS

Les deux critères communs, la spécificité du travail à exécuter d'une part, et la protection de la santé, le respect des règles de sécurité, la protection de l'environnement d'autre part, sont relatifs au choix des produits et systèmes de réparation structurale ou non et de conservation ou de restauration de la passivité des armatures. Ils sont développés ci-après dans les deux articles 4.2.4.1 et 4.2.4.2 ci-dessous.

Il existe également des critères de choix spécifiques. En effet, pour une fonction de réparation ou de renforcement exigée, plusieurs types de produits et de systèmes peuvent être utilisés. Par exemple, la norme européenne NF EN 1504-4 relative au collage structural distingue plusieurs types de collage faisant chacun appel à des produits spécifiques, qui peuvent avoir, pour une caractéristique donnée, plusieurs niveaux de performance :

- le collage des plaques extérieures en acier ou tout autre matériau approprié ;
- le collage de béton durci sur béton durci ;
- le collage de béton frais sur béton durci.

Il appartient au marché de fixer la ou les familles de produits et systèmes utilisables, les caractéristiques et les niveaux de performance auxquelles doivent satisfaire ces produits et systèmes ainsi que les contraintes d'exécution de l'opération.

L'entrepreneur propose à l'acceptation du maître d'œuvre les produits ou systèmes capables de satisfaire les exigences du marché. Les produits et systèmes ne sont définitivement retenus qu'au vu des résultats satisfaisants de l'épreuve d'étude et de convenance. L'acceptation des produits admis à une marque de certification est développée à l'article 6.2.2.1 ci-dessous relatif aux contrôles d'exécution.

Les rédacteurs du présent GUIDE se sont posé la question suivante : faut-il traiter séparément les domaines du bâtiment et du génie civil ? L'examen des textes de référence a permis de faire les propositions suivantes compte tenu des deux articles qui suivent concernant le domaine du bâtiment et celui des ouvrages d'art.

> A. DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT

À cause des obligations d'assurance, les procédures de mise en œuvre des différents produits dans le domaine du bâtiment doivent, soit satisfaire aux dispositions des DTU, qui ont été transformés en normes NF DTU depuis quelques années, soit faire l'objet d'exigences dans le cadre d'un cahier des prescriptions techniques du CSTB complétées par des Avis Techniques (Atec) et des Documents Techniques d'Application (DTA). Ce principe est applicable aussi bien pour la réalisation des ouvrages neufs que pour la réhabilitation et les réparations sous réserve que les textes existent et que l'opération prévue s'inscrive bien dans le domaine d'application couvert par ces différents documents.

Par exemple, dans le domaine de la reprise des bétons dégradés, le nouveau DTU 42.1 (norme NF P 84-404) dans son annexe B (normative) ne traite que des réfections locales des bétons éclatés par suite de l'oxydation des armatures à caractère non structural. Il faut donc séparer les domaines du bâtiment et du génie civil sur les points suivants :

- les ragréages de type bouche-pores visés par l'article 6.2.1 du DTU ;
- les ragréages de défauts de surfaces visés par l'article n°6.1.1 qui n'ont pas pour objet de corriger les défauts de planéité (sauf clause particulière dans les Documents Particuliers du Marché ou DPM) ;
- les ragréages lorsqu'une adhérence $\geq 0,3$ MPa est exigée ;
- les réparations faisant suite à l'oxydation des armatures.

En revanche, il n'est pas nécessaire de faire la séparation pour le domaine des réparations et des renforcements structuraux qui ne sont pas visés par les DTU, NF DTU ou les avis techniques.

Par exemple, dans le domaine de la précontrainte en travaux neufs comme en réparation, il n'y a aucun DTU ou NF DTU. Dans un tel cas, le fascicule 65 du CCTG et la norme NF P95-104 sont applicables.

En conclusion, les DPM peuvent, en s'inspirant du présent GUIDE, compléter, en tant que de besoin, par exemple les clauses du DTU 42.1. Il convient cependant de prendre en compte certaines contraintes spécifiques au bâtiment telles que le niveau de tenue au feu, sans oublier les obligations liées aux assurances...

ATTENTION, en France, la loi 78-12 du 4 janvier 1978 dite « loi Spinetta » relative à la responsabilité et à l'assurance des travaux de bâtiment dans le domaine de la construction consacre le principe de présomption de responsabilité du constructeur (entrepreneur, promoteur immobilier, maître d'œuvre...) à l'égard du maître d'ouvrage... concernant les dommages qui compromettent la solidité de l'ouvrage ou le rendent impropre à sa destination. (Cf. les articles 1792 du Code Civil). Ce régime de responsabilité décennale nécessite la souscription à une assurance (la dommage ouvrage ou DO) couvrant les dommages susvisés aux ouvrages neufs ou existants (cas des travaux de réparations ou de renforcements et rénovations importantes hors travaux d'entretien courants).

Pour les assurances, les travaux de bâtiment sont classés en deux catégories :

* Travaux normalement garantis, c'est-à-dire les travaux décrits dans les :

- NF DTU et DTU,
- Normes homologuées,
- Règles professionnelles acceptées,
- Atec et DTA sans mise en observation...

* Travaux nécessitant une déclaration préalable de la part de l'entreprise.

&&&&&&

Le maître d'ouvrage souscrit une assurance dommage-ouvrage permettant de préfinancer les dommages de nature décennale. La compagnie d'assurance fournissant cette garantie peut ensuite se retourner contre le ou les responsables des désordres constatés.

Les Avis Technique (Atec) et les Documents Techniques d'Application (DTA) du CSTB relèvent de l'arrêté du 21 mars 2012 et du règlement intérieur de la Commission d'aptitude à l'emploi des produits ou procédés ne faisant pas l'objet d'un marquage CE du 18 juin 2012

Les Atec portent sur l'aptitude à l'usage des ouvrages réalisés avec un produit ou un procédé innovant sans marquage CE. Il porte sur le domaine d'emploi, la mise en œuvre, la durabilité et l'entretien...

Les DTA remplacent les Atec lorsque la demande porte sur les conditions de mise en œuvre d'un produit ou d'un système faisant l'objet d'un marquage CE c'est-à-dire relevant d'une norme harmonisée ou d'une ÉTE sous le RPC (ATE sous la DPC).

Le domaine du génie civil est également soumis au régime de la responsabilité décennale mais il n'y a point d'obligation d'assurance sauf prescription contraire du marché ou choix du constructeur.

Notes :

- l'intérêt du DTA apparait pour certains produits ou systèmes qui bénéficient d'un marquage CE. En effet, la norme, le Document d'Évaluation Européenne (DÉE) ou le guide d'ATE peut faire référence à plusieurs classes de performance dont certaines (trop basses) peuvent être incompatibles avec la garantie décennale. C'est le cas de certains systèmes d'étanchéité pour toitures-terrasses et inclinées relevant de l'ETAG 005 qui, dans sa partie « domaine d'application », retient trois durées de vie possibles : 5 ans (incompatible avec la décennale), 10 ans et 25 ans ;
- dans certains DTU, apparait le terme Document d'Application à la place de Document Technique d'Application ;
- le texte encadré ci-dessus ne concerne que les dommages de nature décennale et les responsabilités ou garanties associées. Il existe d'autres garanties comme celle de parfait achèvement... Il est conseillé au lecteur de consulter le Code Civil, celui des Assurances et les différents textes réglementaires existants car il existe des exceptions, des jurisprudences...

> B. DANS LE DOMAINE DU GÉNIE CIVIL

Le nouveau fascicule 65 du CCTG s'applique aux ouvrages neufs de génie civil en béton armé ou précontraint.

Les imperfections et des non-conformités, voire leur traitement sont visés par les articles suivants :

- 3 : termes et définitions qui précise que la fiche de **non-conformité** traite des causes, du traitement et des actions correctives à mener ;
- 4.2.2 : le **PAQ** qui traite de l'adaptation des non-conformités dans plusieurs sous-articles (4.2.2.1, 4.2.2.3) ;
- 4.3.5 : management de la qualité et actions en cas de non-conformité ;
- 5.1.5 : maîtrise de la conformité des ouvrages provisoires ;
- 5.8 : maîtrise de la conformité des parements, parois et surfaces non-coffrées ;
- 6.6 : maîtrise de la conformité des armatures de BA ;
- 7.5.2.7 : conduite à tenir en cas d'anomalies à la mise en tension ;
- 8.6 : opérations après bétonnage renvoie à l'article 4.3.5 en cas de non-conformité ;
- 8.8.4.2 : réparation d'imperfections et de non-conformités vise la norme NF P95-101 ;
- 9.1.4 : maîtrise de la conformité des éléments préfabriqués.

*Note : on peut regretter certaines clauses de l'ancien fascicule 65 qui, d'une part, distinguait les **non-conformités** pouvant porter atteinte à la **qualité structurale** et celles relatives à l'aspect et, d'autre part, les positions que pouvait prendre le **maître d'œuvre** sur les **propositions de reprise des non-conformités** (acceptation avec ou sans réfaction de prix ou refus).*

En conclusion, en cas de désordres sur un ouvrage en cours de construction puisque le fascicule 65 du CCTG ne donne aucune solution détaillée pour la reprise des défauts structuraux et d'aspect, l'entrepreneur et le maître d'œuvre peuvent se référer au **CCAG** pour les règles contractuelles et au **présent GUIDE** et aux **normes de la série NF P95-1**** pour la technique. Les autres **GUIDES** du **STRRES** assurent le même rôle que le **présent GUIDE**.

Dans la suite de ce document, pour les **deux domaines** que sont le **bâtiment** et le **génie civil**, les **fonctions spécifiques** sont donc explicitées, les **textes de référence** sont cités et l'incidence de la **normalisation européenne** est abordée dans le détail...

4.2.4 CRITÈRES DE CHOIX COMMUNS À TOUS LES PRODUITS ET SYSTÈMES DE RÉPARATION, DE RENFORCEMENT ET DE PROTECTION

4.2.4.1 Critères de choix liés aux spécificités du travail à exécuter

Le produit ou le système de réparation, de renforcement ou de protection doit être adapté aux **spécificités du travail à exécuter**. Les normes de référence listées ci-après n'étant pas forcément très explicites sur ce sujet, il faut les décrypter afin de fixer les exigences ad hoc dans le **marché** :

4.2.4.1.1 Cas des normes françaises

Les normes françaises traitant de l'exécution des travaux de réparation font référence aux normes européennes de la **série 1504** mais pas uniquement (par exemple, la **norme NF P95-101** relative aux réparations de surface vise les mortiers ou bétons de réparation à caractère industriel mais aussi sur ceux fabriqués sur chantier ou en centrale contrairement à la norme **NF EN 1504-3** qui ne traite que des produits industriels relevant du marquage CE).

Ces normes ont un fort caractère opérationnel que ne présente pas la **norme NF EN 1504-10** (Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux).

- la **norme homologuée NF P 95-101** vise essentiellement l'exécution des réparations des dégradations superficielles. Elle traite des points suivants :
 - des trois étapes des études et investigations préalables à la consultation des entreprises qui sont également développées dans la norme NF EN 1504-9 et le présent GUIDE dans l'article 3.3 ci-dessus,
 - du choix des produits et matériaux, qui peuvent être industriels et relever du marquage CE ou fabriqués sur chantier ou en centrale,

Contrairement à la **norme NF EN 1504-3**, la **norme NF 95-101** propose la prise en compte des **classes d'exposition** de la norme bétons **NF EN 206/CN** dans son **annexe A informative** qu'il faut rendre contractuelle dans le **marché**. Ces classes sont reprises par le **fascicule 65 du CCTG**.

Le marché, doit aussi rendre contractuelles les classes d'exposition pour le béton projeté.

- des techniques de mise en œuvre qui détaillent :
 - des moyens d'accès et des échafaudages,
 - de la préparation du support avec les techniques d'élimination du béton pollué ou carbonaté et celles de préparation des armatures dégagées,
 - du transport, du stockage, de la préparation et de la mise en œuvre des produits,
- **des essais, contrôles et réception des travaux qui détaillent :**
 - des épreuves d'étude et de convenance,
 - de la réception des produits,
 - des contrôles d'exécution des travaux portant sur la préparation du support (béton et armatures), sur les matériels à utiliser, sur la préparation des produits, sur la mise en œuvre des produits et la réception des travaux,
- **de l'hygiène et de la sécurité ainsi que du respect de l'environnement,**
- **des responsabilités et garanties.**

Cette norme renvoie aux autres normes de la série pour les réparations à caractère structural, à savoir la **NF P 95-103** (traitement des fissures et protection du béton) et la **NF P 95-104** (précontrainte additionnelle). À ces deux normes, traitant à la fois des produits et de l'exécution, il convient d'ajouter la norme **NF P 95-102-1** (béton projeté) en cours de révision et la norme **NF P 95-105** (armatures passives additionnelles) en cours de création.

Deux normes de la série P 18-8 encore en vigueur concernent aussi les produits de réparation :**

- **NF P 18-821 d'août 2013** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de liants hydrauliques – Caractères normalisés garantis ;
- **NF P 18-822 de décembre 2009** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de résines synthétiques – Caractères normalisés garantis.

4.2.4.1.2 Cas des normes européennes

Dans le domaine de la réparation, il s'agit des normes de la série **NF EN 1504-2 à 7** relatives aux produits et systèmes de réparation à caractère industriel listées ci-après et qui fixent dans leur annexe « **ZA** » les conditions du marquage « **CE** ». Il est rappelé, que lorsqu'une réglementation en matière de **réaction au feu** est applicable aux produits et systèmes, les classes de performance doivent être fixées par le **marché**. Ces classes figurent explicitement sur le **marquage CE**.

Même si le **RPC** l'impose, désormais, pour les produits de construction, les **étiquettes**, les **DdP** et les **fiches techniques** ne fournissent pas forcément les **valeurs réelles et chiffrées des performances**. Par exemple, pour un produit de réparation (**NF EN 1504-3**) elles indiquent :

- R4 (≥ 45 MPa) pour la classe de résistance en compression du produit (alors que la résistance réelle de certains produits industriels atteint la classe B80) ;
- ≥ 2 MPa pour l'adhérence c'est-à-dire le respect de la valeur plancher de la norme ;
- etc.

En aucun cas ces normes européennes ne donnent des conseils sur le choix des produits.

Le marché se doit d'imposer que les **performances réelles des produits** soient fournies pour pouvoir retenir le produit adapté à un **projet donné et aux caractéristiques du béton support**.

- la norme **NF EN 1504-2**, qui traite des produits et systèmes **pour la protection de surface pour béton**, complète en tant que de besoin la **norme NF EN 1504-3** si la réparation nécessite la mise en œuvre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs, une résistance physique ou chimique...

Cette norme ne donnant aucune information sur le choix des produits ou systèmes et de leurs performances, il faut se reporter d'une part, au guide de l'**AFNOR GA P18-902** et à la **norme NF P95-103**.

ATTENTION, cette norme, comme les autres normes de la série, vise les performances requises pour « **toutes les applications prévues** » (tous les produits doivent satisfaire à ces exigences de base) et les performances requises pour « **certaines applications prévues** » (certains produits peuvent présenter en plus une résistance aux cycles de gel-dégel, une réaction au feu d'un niveau donné, une résistance à la fissuration...). Il faut donc fixer avec soin les exigences à satisfaire compte tenu de leur incidence sur le choix des produits et systèmes.

RAPPEL : les exigences pour « **toutes les applications prévues** » sont identifiées par le symbole : ■ et celles pour « **certaines applications particulières prévues** » par le symbole □ (le fabricant peut s'imposer que son produit satisfasse ou non à une ou plusieurs des **applications particulières** de la norme). Pour des **applications spéciales**, il est possible pour le **maitre d'œuvre** de fixer des **exigences spécifiques** nécessitant une **épreuve d'étude en liaison avec le fabricant**.

- la norme **NF EN 1504-3**, qui vise à la fois les **produits et systèmes industriels** destinés aux **réparations structurales et non structurales**, fixe dans son tableau 1 :
 - les caractéristiques de performances requises pour toutes les applications prévues (de base) auxquelles doivent satisfaire tous les produits et systèmes destinés à la restauration du béton ou à son renforcement ou à la préservation ou la restauration de la passivité (5 ou 6 caractéristiques sont concernées suivant l'usage). Les caractéristiques et classes de performance chiffrées sont données par le tableau 3,
 - des caractéristiques de performance complémentaires à exiger par le marché pour certaines utilisations prévues, donc pour des usages particuliers (compatibilité thermiques [cycles de gel-dégel...], module d'élasticité [obligatoire en renforcement], la résistance au glissement [zones circulables], le coefficient de dilatation thermique [produits à base de résines de synthèse], absorption capillaire [limitation de la perméabilité à l'eau, en particulier pour empêcher la pénétration des chlorures]). Les caractéristiques et classes de performance chiffrées sont données par le tableau 3 ;

ATTENTION, la norme **NF EN 1504-3** vise aussi, dans son annexe « **B** » informative, des « **applications spéciales** » (dans le sens de **particulières**) qui imposent des essais pour satisfaire à des **caractéristiques non obligatoires** pour les produits et systèmes de réparation conventionnels (se reporter au Tableau n° 29 ci-dessous).

Propriété	Méthode d'essai	Béton témoin	Commentaires
Pénétration d'ions chlorure	EN 13396		Valeur déclarée (Non requis lorsqu'un système de protection de surface est spécifié)
Fluage en compression ^{a)}	EN 13584		Valeur déclarée
Résistance chimique	EN 13529 ou ISO 2812-1		Valeur déclarée (Non requis lorsqu'un système de protection de surface est spécifié)
Application en sous-face (par exemple, réparation en sous-face de madriers de ponts)	EN 13395-4	MC (0,40)	Il convient que la contrainte d'adhérence satisfasse à l'exigence de la ligne 3 du Tableau 3, en fonction de la classe.

a) Pour les mortiers PCC utilisés dans les applications structurales, cet essai n'est pas requis si on utilise comme critère de dimensionnement 60 % de la résistance à la compression à 28 jours.

Tableau n° 29 : photocopie du tableau B.1 de l'annexe B de la norme EN 1504-3
(noter la traduction inappropriée)

ATTENTION : une mise en place en sous-face est considérée comme une application spéciale or, ce type d'application est très courante en réparation. Il est donc indispensable que le marché l'impose si besoin est.

Le tableau n°3 de la norme NF EN 1504-3 sépare les produits et systèmes de réparation pour deux types de réparations (structurales et non structurales). En outre, il fixe deux classes de caractéristiques de performance²² pour chacun des deux types de réparation. Il est donc nécessaire de choisir dans les quatre colonnes du tableau (classes R4 et R3 à caractère structural et R2 et R1 à caractère non-structural) les caractéristiques de performance à imposer dans le marché ;

RAPPEL, suivant le type de réparation, la classe d'environnement..., il faut adapter le marché. Se reporter à l'article 4.2.4.1.3 ci-dessous.

- la norme NF EN 1504-4, qui traite des produits et systèmes pour le collage structural, complète en tant que de besoin la norme NF EN 1504-3 si la réparation nécessite le collage d'un mortier (frais ou durci) ou d'un béton (frais ou durci) sur du béton ou le collage d'armatures passives extérieures (plaques ou tissus) sur du béton.

Cette norme vise pour certaines applications prévues la mise en œuvre des produits sur des surfaces verticales, horizontales ou en sous-faces sachant que le support béton peut être humide et les conditions thermiques particulières (température basse ou élevée) et dans son annexe A (informative) des applications particulières, ce qui peut avoir une incidence sur les clauses du marché et le choix des produits et systèmes ;

- la norme NF EN 1504-5, qui traite des produits et systèmes pour l'injection du béton (fissures et vides), complète en tant que de besoin la norme NF EN 1504-3 si la réparation nécessite une injection de fissures ou de vides ou l'injection de l'interface entre le produit de réparation et/ou de renforcement et le béton de la structure par des produits de classe F capables de transmettre des efforts.

Cette norme vise pour certaines applications prévues des propriétés particulières que doivent présenter les produits à base de résines synthétiques.... Dans son annexe B (informative) des applications particulières mais qui ne concernent pas les produits de classe F ;

²² Il est rappelé que le marquage CE fixe des valeurs seuils, des valeurs déclarées mais n'impose pas de classe de performance sauf en matière de réaction au feu.

- la norme **NF EN 1504-6**, qui traite des produits et systèmes pour l'**ancrage des armatures de béton armé**, complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** si la réparation nécessite le scellement d'armatures de béton armé. Cette norme ne vise que des **applications prévues** et il n'y a pas d'**application particulière** en annexe ;

Note : cette norme présente des **niveaux d'exigence de performances insuffisants**. Ce point avec ses conséquences sur le **fascicule de documentation FD P18-823** (produits de scellement à base de liants hydrauliques ou à base de résines – *Recommandations pour la conception et le dimensionnement des scellements de barres d'armatures dans le béton armé et précontraint*) est développé dans la suite du **présent GUIDE**.

Rappel : les produits de scellement peuvent aussi bénéficier du **marquage CE** par l'intermédiaire d'une **ÉTÉ** s'ils satisfont aux exigences de Documents d'Évaluation Européen comme les **DÉE** ou **EAD** suivants : le n°**330087-00-0601** de mai 2018, qui a remplacé la **partie 5.1.2 de l'ETAG 001**, et le n°**331522-00-0601** de juillet 2018 concernant les scellements en zone sismique.

- la norme **NF EN 1504-7**, qui traite des produits et systèmes pour la **protection contre la corrosion des armatures**, complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** s'il est nécessaire de **préserver ou restaurer la passivité des armatures** (la norme NF P95-103 ne l'impose pas dans tous les cas). Les revêtements des armatures étant, soit actifs, soit étanches. Cette norme ne vise que des applications prévues et il n'y a pas d'application particulière en annexe ;
- la norme **NF EN 1504-8**, qui traite de la **maîtrise de la qualité et de l'évaluation de la conformité**, vise essentiellement l'**assurance de la qualité de la fabrication des produits et systèmes**. Elle ne traite pas des spécificités du travail à exécuter et de leurs incidences sur le choix des produits et systèmes ;
- la norme **NF EN 1504-9**, qui traite des **principes généraux d'utilisation des produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton**, explicite les différents principes concernant la **protection et la réparation** et les **méthodes** utilisables pour satisfaire les principes. Ces **méthodes** peuvent être utilisées, soit pour traiter des **défauts du béton** (6 principes en cause), soit pour traiter la **corrosion des armatures** (5 principes en cause).

Note : bien entendu, si la plupart des **méthodes** sont reprises dans le **présent GUIDE**, elles n'y sont pas forcément détaillées. Par exemple, pour le traitement des fissures, il faut se reporter au **guide FABEM 3...**

Cette norme traite également dans son article 5.3 des **facteurs** à prendre en compte lors du choix des actions à entreprendre après l'expertise de la structure telles que : ne rien faire, réparer, renforcer, démolir et reconstruire... Parmi les **facteurs** qui relèvent des **spécificités du travail à exécuter**, il est possible de citer :

- facteurs généraux : les propriétés et les méthodes de préparation du support, l'aspect de la structure après travaux,
- facteurs liés à la santé et à la sécurité : l'impact de l'opération sur les usagers, les tiers et l'environnement,
- facteurs structuraux : l'impact des actions appliquées à la structure pendant les travaux (déformations et vibrations...),
- facteurs environnementaux : l'impact des intempéries, des agents agressifs... dont il convient de se protéger durant les travaux...

- la norme **NF EN 1504-10**, qui traite de l'**application sur site** des produits et systèmes et du **contrôle de la qualité des travaux**, vise dans ses **exigences générales des articles 5 et 8** la nécessité de prendre en compte : l'état chimique, électrochimique et physique du support, les contaminants éventuels, la capacité de la structure à supporter les charges, les vibrations, les conditions ambiantes (température, humidité de l'air, précipitations, vent, ensoleillement...), etc. Elle ne traite pas dans le détail des **spécificités du travail à effectuer** et de leurs incidences sur le choix des produits et systèmes. De plus, la partie consacrée aux contrôles reste très générale. Il convient donc de se reporter aux **normes de la série NF P95-100**.

ATTENTION, le tableau ci-dessous liste pour l'ensemble des **normes de la série NF EN 1504-**** relatives aux produits (1504-2 à 1504-7) les caractéristiques qu'ils doivent présenter pour **certaines applications prévues** (les essais de performance ne sont requis que si les produits sont formulés pour ces applications) et pour des **applications particulières**, ces dernières nécessitent des essais de performance spécifiques non imposés par les normes (essais à prévoir, par exemple, lors de **l'épreuve d'étude**).

Il est possible dans un **marché** d'imposer :

- **des niveaux d'exigences plus sévères** que ceux de la norme, par exemple dans le cas où les conditions thermiques sur le chantier diffèrent des valeurs retenues par la norme ;
- **des exigences particulières**, par exemple dans le cas où un produit doit être appliqué sous l'eau...

norme	Certaines applications prévues	Applications particulières	Norme d'essai pour les applications particulières	
1504-2 Systèmes de protection	Se reporter au tableau n°1 de la norme impossible à synthétiser	RAS		
1504-3 Réparations structurales et non structurales	Se reporter au tableau n°1 de la norme impossible à synthétiser	Tableau B1		
		Pénétrations d'ions chlorure (présence de chlorures en l'absence d'un revêtement de protection adapté)	NF EN 13396	
		Fluage en compression pour les produits PCC en applications structurales et un taux de travail > 60% f_{c28}	NF EN 13584	
		Résistance chimique en l'absence d'un revêtement de protection	NF EN 13529 ou NF EN ISO 2812-1	
1504-4 Collage structural	Se reporter au tableau n°1. Le module d'élasticité en flexion (NF EN ISO 178) concerne le collage structural des armatures additionnelles extérieures ou des bétons (frais sur durci ou durci sur durci)	Application en sous-face	NF EN 13395-4	
		RAS	Fatigue sous charges dynamiques en phase de durcissement	NF EN 13894-1
		RAS	Fatigue sous charges dynamiques après durcissement	NF EN 13894-2

norme	Certaines applications prévues	Applications particulières	Norme d'essai pour les applications particulières
1504-5 Produits et systèmes d'injection	Produits de classe F de type (H) ou (P) transmettant un effort, se reporter au tableau n°1a		
	Produits (P) de remplissage ductile se reporter au tableau n°1b	En contact avec des inserts en polymères	NF EN 12637-3
	Produits (P) de remplissage expansif se reporter au tableau n°1c	Soumis à des cycles thermiques, des cycles d'humidification et de séchage, voire au gel	NF EN 12618-1 ou NF EN 13687-3
		En contact avec des inserts en polymères	NF EN 12637-3
1504-6 Ancrage des armatures en acier	Tableau 1, cas des produits à base de polymères :	RAS	RAS
	Température de transition vitreuse		
	Fluage en traction		
1504-7 Protection contre la corrosion des armatures	Tableau 1 :	RAS	RAS
	Protection contre la corrosion pour les revêtements étanches		
	Température de transition vitreuse pour les produits à base de résines de synthèse		
	Adhérence par cisaillement (acier revêtu sur béton)		

Tableau n° 30 : tableau récapitulatif de certaines applications prévues et des applications particulières

- La norme NF EN 206/CN ne traite pas des produits de réparation mais bien entendu des bétons conformes à cette norme peuvent être utilisés pour une réparation. De plus, elle fixe les classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement qui n'apparaissent pas dans la série des normes NF EN 1504 ! (voir également le fascicule 65 du CCTG).

Rappel, cette norme vise une durée d'utilisation du projet de 50 ans. Le fascicule 65 du CCTG vise une durée de 100 ans.

4.2.4.1.3 Conclusions sur les critères de choix des produits

Il est nécessaire que le choix du produit ou système de réparation, de renforcement ou de protection prenne en compte, suivant le cas :

- Critères généraux :
 - le contexte : bâtiment ou ouvrage de génie civil, qui impose des niveaux de performances plus ou moins élevés, parfois des méthodes de réparations, des exigences réglementaires de tenue au feu, des durées des responsabilités et garanties ... ;
 - le caractère structural ou non de la réparation, sachant qu'un renforcement a toujours un caractère structural ;

Note : un ragréage d'épaisseur supérieur à l'enrobage et/ou de surface importante dans une zone soumise à des contraintes importantes **peut avoir un caractère structural**. Si le béton de la structure présente une résistance élevée, les produits ou systèmes à utiliser visés par la norme NF EN 1504-3 seront choisis dans les classes R3 ou R4 qui relèvent du **caractère structural**.

■ **Critères particuliers :**

- l'état du support béton et ses caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques (le produit de réparation doit présenter des caractéristiques voisines de celles du béton support),
- les épaisseurs et surfaces à traiter (réparations de surface ou profondes),
- la quantité de produits qu'il est prévu de mettre en place (petite ou grande) peut orienter, à cause des coûts, vers des produits qui sont prêts à l'emploi (produits industriels) ou fabriqués sur chantier,
- l'agressivité de l'environnement suivant la classe d'exposition de l'ouvrage en service,
- la présence d'eau avec ou sans pression (travaux souterrains, travaux sous-marins...),
- l'orientation du support, qui impose un travail au plafond, sur une surface verticale ou inclinée, sur un plan horizontal...,
- la technique de mise en œuvre du produit de réparation (manuellement ou mécaniquement, le béton ou le mortier pouvant être coulé ou projeté),
- l'ajout d'armatures internes ou externes passives avec ou sans scellement,
- l'ajout d'armatures actives additionnelles, qui peut imposer des produits et systèmes performants pour résister aux sollicitations apportées par la précontrainte additionnelle,
- le collage, si nécessaire, entre le mortier ou le béton ajouté et le support (béton contrecollé avec ou sans couture),
- les sollicitations développées par les retraits (thermique, endogène, au jeune âge, à long terme...), qui jouent pour les réparations importantes en surface et épaisseur,
- la réalisation de calages, ce qui implique un produit ou un système au retrait compensé,
- l'incidence du maintien ou de la restauration de la passivation des aciers, qui peut faire appel à différents produits et systèmes, voire procédés : extraction des chlorures, réalcalinisation, protection cathodique, revêtement actif ou passif des armatures, inhibiteurs de corrosion ;
- etc.

À cela, il ne faut pas oublier l'**incidence des exigences du maître de l'ouvrage** (ou du gestionnaire) qui sont à prendre en compte aussi bien lors de la conception de la réparation que lors de son exécution :

- la période des travaux et les conditions climatiques sur le site qui en résultent, jouent sur le choix des produits et le déroulement des travaux (nécessité de moyens de protection, d'appareils de chauffage...);
- le maintien du trafic, surtout celui des poids lourds, qui peut provoquer des vibrations néfastes à l'adhérence des produits de réparation donc à la pérennité de la réparation ;
- les délais imposés à la durée des travaux. Une remise en service de l'ouvrage trop rapide risque d'être incompatible avec les délais à respecter entre les phases d'application de certains produits... ;
- l'aspect esthétique souhaité après traitement ;
- etc.

4.2.4.2 Critères de choix liés à la santé, la sécurité, la protection de l'environnement, etc.

Les critères de choix doivent prendre en compte les dangers et les inconvénients pour la santé, la sécurité, l'agriculture, la nature et l'environnement, à cause de la nocivité et de la toxicité de certains composants :


- il faut choisir les produits en tenant compte des risques qu'ils présentent par l'intermédiaire de leur étiquetage et de leur **fiche de données de sécurité (FDS)** ;
- il faut mettre en œuvre les procédés d'application générant le moins de nuisances ;
- pour la **protection des personnels**, l'entrepreneur doit s'assurer du respect de la législation du travail en matière d'hygiène et de sécurité et fournir à son personnel les **équipements de protection individuelle (ÉPI)** nécessaires ;
- pour la **protection des personnes et de l'environnement**, l'entrepreneur doit tenir compte dans le choix des produits d'injection des **exigences réglementaires** lors de l'utilisation des produits et lors du traitement des déchets.

Remarque : les normes de produits ne donnent, en général, aucune indication sur les précautions à prendre en matière d'hygiène et de sécurité. Il faut se reporter aux **fiches de données de sécurité (FDS)** des produits qui fixent les règles à suivre et les **équipements de protection individuelle (ÉPI)** à utiliser. La réglementation impose la présence des fiches sur le chantier.

En ce qui concerne certains procédés tels que la réalcalinisation, qui font appel à l'énergie électrique, il convient de rappeler que l'entrepreneur doit prendre en compte les risques qu'ils présentent pour assurer la sécurité de son personnel et des tiers.

La classification de cette préparation a été exécutée conformément à la directive dite «Toutes Préparations» 1999/45/CE et de ses adaptations. A aussi été pris en compte la directive 2001/59/CE portant 28^{ème} adaptation à la directive 67/548/CEE (Substances dangereuses).

Classement de la Préparation :



Nocif

Contient du :
604-001-00-2 PHENOL
812-059-00-5 3,3-DIAZAOCTANE-1,8-DIAMINE

Risques particuliers attribués à la préparation et conseils de prudence:

R 43	Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
R 36/38	Irritant pour les yeux et la peau.
R 21/22	Nocif par contact avec la peau et par ingestion.
S 36/37	Porter un vêtement de protection et des gants appropriés.
S 26	En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
S 39	Porter un appareil de protection des yeux/du visage.
S 60	Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
S 41	En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.

Tableaux des maladies professionnelles selon le Code du Travail:
Tableau N° 65 - Possibilité de lésions eczématiformes de mécanisme allergique (A vérifier selon la liste du décret en vigueur).
Tableau N° 49 - Affections cutanées provoquées par les amines aliphatiques, alcydliques ou les éthanolamines.
Surveillance médicale spéciale selon l'arrêté du 11 juillet 1977 pour le phénol et les naphols.
Surveillance médicale spéciale selon l'arrêté du 11 juillet 1977 pour les dérivés halogénés, nitrés et aminés des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Figure n° 66 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko

4.2.5

CRITÈRES DE CHOIX SPÉCIFIQUES AUX PRODUITS ET SYSTÈMES DE RÉPARATION STRUCTURALE ET NON STRUCTURALE

Note : dans le présent article, le terme de **réparation structurale** sous-entend aussi la notion de **renforcement**.

4.2.5.1 Généralités

Les fonctions auxquelles un produit ou un système de réparation structurale (avec ou sans renforcement) ou non structurale doit répondre sont fixées par le marché et contrôlées, si nécessaire, par une épreuve d'étude²³.

Le présent article porte sur les produits et systèmes suivants :

1. *produits et systèmes destinés aux réparations de surface des bétons et donc appliqués en faibles épaisseurs : techniques traitées par la norme NF P95-101 et le présent GUIDE (par exemple, le plus souvent sous la forme d'un mortier mis en œuvre manuellement ou mécaniquement) ;*
2. *produits et systèmes destinés aux réparations et aux renforcements des bétons à caractère structural et qui sont souvent appliqués en fortes épaisseurs : techniques traitées par le présent GUIDE (par exemple, le plus souvent, sous la forme d'un béton coulé en place ou projeté...) ;*
3. *produits et systèmes destinées au collage des bétons (béton frais sur béton durci, béton durci sur béton durci, voire d'armatures de renfort externes au béton [plats métalliques ou plaques et tissus composites]) ;*
4. *produits et systèmes destinés à l'injection ou au remplissage des vides et fissures : techniques traitées par la norme NF P95-103 et le guide FABEM 3 ;*
5. *produits et systèmes destinés au scellement d'armatures de béton armé : techniques traitées par le guide FABEM 7 ;*
6. *produits et systèmes destinés au calage d'éléments ;*
7. *armatures de béton armé : en acier normal, en acier galvanisé, en acier inoxydable, voire non métalliques de type polymère renforcé de fibres (PRF) ;*
8. *armatures passives extérieures au béton et collées : plats métalliques, plaques et tissus composites pour le renfort des structures en béton : techniques traitées par la norme NF P95-105 (en cours de rédaction) et le guide FABEM 7 ;*
9. *armatures, procédés de précontrainte et produits d'injection des conduits : techniques traitées par la norme NF P95-104 et le guide FABEM 8 ;*
10. *produits et systèmes d'ajout de forces par déformations imposées.*

Afin d'éviter une « usine à gaz », dans chacun des articles qui suivent, seuls les produits et systèmes et la méthode de réparation ou de renforcement qui s'y rapporte, sont traitées. Il n'est pas fait référence aux autres principes et méthodes de réparation pouvant être associées et qui figurent dans le Tableau n° 2 ci-devant. En cas de besoin, cette association doit être faite si le projet l'exige.

²³ Les caractéristiques d'un produit normalisé même bénéficiant d'une marque de certification ou du marquage CE, ne permettent pas toujours d'assurer les fonctions recherchées pour la réparation d'une structure donnée. Des essais complémentaires sont parfois nécessaires.

Note : les différents constituants et produits connexes (granulats, ciments...) utilisés pour la fabrication des produits de réparations sont visés à l'article 4.2.7 ci-après.

Les termes de faible épaisseur et de forte épaisseur ne sont pas définis dans les normes européennes. Ils apparaissent dans la norme NF P95-101 où apparaît la notion de **réparation de surface** et aussi dans les documentations techniques de divers fabricants de produits à caractère industriel.

Pour les fabricants, les limites correspondantes ne sont pas identiques et ces limites varient aussi avec le type de produit (mortier de surfacage, de ragréage, de réparation...), avec la composition du produit (liants hydrauliques ou organiques), voire avec la technique de mise en œuvre (manuellement, ou par projection voie sèche ou mouillée...).

À titre indicatif, il a été relevé dans certaines fiches techniques que l'épaisseur maximale de certains mortiers hydrauliques peut atteindre ou dépasser 100 mm avec une mise en place manuelle en plusieurs couches alors que l'épaisseur maximale des mortiers à base de résines de synthèse ne dépasse que rarement les 40 ou 50 mm.

Dans le présent GUIDE, la faible épaisseur correspond à la profondeur des premiers lits d'armatures conformément à la norme NF P95-101. Le terme réparation de surface est alors utilisé.

Les deux tableaux qui suivent permettent de bien distinguer les différences entre les réparations de surface et les réparations structurales,

Principes de réparation	Méthodes de réparation	Commentaires
Principes et méthodes relatifs aux défauts dans le béton		
Principe 3 – Restauration du béton	3.1 Application manuelle de mortier 3.2 Nouveau béton ou mortier coffré 3.3 Projection de béton ou de mortier	Méthode 3.3 : le terme « pulvérisation » utilisé dans la norme NF EN1504-9 est inapproprié.
Principes et méthodes relatifs à la corrosion de l'armature		
Principe 7 – Préservation ou restauration de la passivité	7.2 Remplacement du béton pollué ou carbonaté	L'expression « béton pollué » signifie béton pollué par les chlorures, les sulfates d'origine externe, etc.

Tableau n° 31 : principes et méthodes de réparations visés par la norme NF P95-101

Les réparations de surface des bétons concernent les défauts ou dégradations listés ci-après et synthétisés, ensuite, dans le tableau ci-après :

1. faïençage et fissuration superficielle,
2. bullage, nids de cailloux, trous et cavités,
3. défauts d'alignement des coffrages, défauts importants de planéité,
4. porosité excessive entraînant une carbonatation,
5. usure superficielle du béton (abrasion, érosion),
6. épaufrures sans armatures apparentes,
7. épaufrures avec armatures (passives ou actives) apparentes,
8. dégradation superficielle du béton due à l'environnement,
9. trous dans le béton avec armature apparente (défaut de bétonnage),
10. éclatements localisés du béton avec armatures apparentes corrodées ou non.

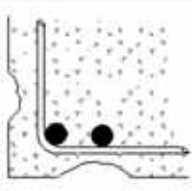
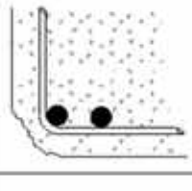
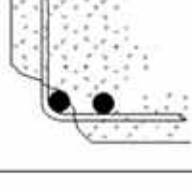
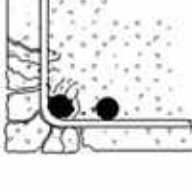
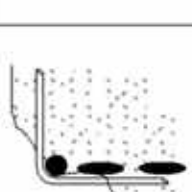
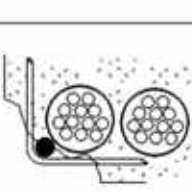
N° de cas	Schéma associé	Description	Commentaires
1		Épaufures superficielles et défauts de planéité	Conséquence de défauts de décoffrage, petits chocs, balèvres, écaillage du béton... Affecte essentiellement l'état de surface. Traitement pour éviter la stagnation d'eau, avant application d'un revêtement ou pose de renforts extérieurs collés...
2		Épaufures de béton n'atteignant pas les armatures (ou épaufures d'un béton non armé)	Conséquence de défauts de décoffrage, d'un choc ou d'une purge d'un nid de cailloux, écaillage du béton, abrasion par exemple. Traitement pour reconstitution de forme, d'enrobage. Nécessite rarement la mise en œuvre des principes et méthodes associés.
3		Épaufures de béton touchant les armatures	Conséquence de défauts de décoffrage, d'un choc ou d'une purge d'un nid de cailloux, écaillage du béton, abrasion par exemple. Traitement pour reconstitution de forme, d'enrobage. Nécessite la mise en œuvre de principes et méthodes associés en fonction de l'état du béton et des épaisseurs d'enrobage.
4		Fissures ou épaufures de béton provoquées par la corrosion des armatures Le phénomène peut être localisé ou généralisé.	Conséquence du foisonnement de l'oxyde de fer dû à la corrosion. Traitement pour reconstitution de forme, d'enrobage et immunité locale des armatures. Nécessite la mise en œuvre de principes et méthodes associés localisés (pouvant aller jusqu'au remplacement d'armatures) ou généralisés pour se prémunir de la corrosion (pouvant aller jusqu'à la mise en place d'une protection cathodique).
5		Épaufures de béton touchant les armatures de précontrainte par pré-tension	Conséquence de défauts de décoffrage, d'un choc ou d'une purge d'un nid de cailloux, écaillage du béton, abrasion par exemple. Traitement pour reconstitution de forme, d'enrobage. Nécessite la mise en œuvre de principes et méthodes associés en fonction de l'état du béton et des épaisseurs d'enrobage.
6		Épaufures de béton touchant les conduits des armatures de précontrainte par post-tension	Conséquence de défauts de décoffrage, d'un choc ou d'une purge d'un nid de cailloux, écaillage du béton, abrasion par exemple. Traitement pour reconstitution de forme, d'enrobage. Nécessite la mise en œuvre de principes et méthodes associés en fonction de l'état du béton et des épaisseurs d'enrobage.

Tableau n° 32 : tableau issu de la norme NF P95-101

Rappel : avant mais, le plus souvent, après une **réparation structurale ou non structurale** (combinée ou non avec une **préservation de la passivité des armatures**), il peut être nécessaire de réaliser :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes ou potentielles (fissures qui se forment à l'interface entre le béton existant et le produit de réparation) dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, pour le choix des produits et systèmes, à la norme NF P95-103 et au guide FABEM 2 ;

- une protection supplémentaire, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité du béton et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... Se reporter, pour le choix des produits et systèmes, à la norme NF P95-103 et au guide FABEM 4.

4.2.5.2 Choix des produits et systèmes de réparation structurale et non-structurale des bétons

4.2.5.2.1 Introduction

Que la réparation soit structurale ou non, les trois catégories de produit visées ci-après peuvent être utilisées :

- sous forme de pâtes, de mortiers, voire de bétons dans le cas des réparations de surface ;
- sous forme de mortiers ou de bétons dans le cas des réparations structurales.

Dans les deux cas la mise en œuvre peut être manuelle ou mécanisée.

Il est donc inutile séparer les produits en deux catégories suivant le type de réparation à effectuer.

À la fin de l'article sont traités des produits spécifiques comme les BHP, BAP, BFUP... utilisables pour certaines réparations du béton.

4.2.5.2.2 Composition des produits et systèmes de réparation des bétons

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés peuvent être subdivisés en trois catégories listées ci-après :

1. les produits et systèmes à base de liants hydrauliques désignés par le sigle CC ;
2. les produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés par ajout d'un polymère organique chimiquement réactif ou non désignés par le sigle PCC.

Les systèmes à base de liants hydrauliques modifiés étaient appelés Liants Hydrauliques Modifiés (LHM) dans le guide technique de 1996 édité par le LCPC et le Sétra. Ils sont désignés actuellement par le sigle PCC dans les normes européennes NF EN 1504-1 et 1504-3 mais qui restent floues sur le pourcentage entre les liants organiques réactifs et les ajouts organiques chimiquement inertes incorporés aux produits.

Note : plus la teneur en liants organiques réactifs sera faible plus le produit sera rigide et vice-versa

3. les produits et systèmes à base de résines synthétiques, désignés par le sigle PC dans la norme européenne, sont assez différents les uns des autres selon les transformations physiques et chimiques qui se produisent au cours de leur mise en œuvre et selon la structure du polymère obtenu finalement (linéaire : polymère thermoplastique ; réticulé ; polymère thermodurcissable). Ce sont essentiellement les thermodurs et principalement les résines époxydes qui sont utilisés en réparation.

ATTENTION, les produits de type PC ne peuvent être mis en œuvre par projection contrairement à ce qu'indique la norme NF P95-101 dans le tableau B1 de son annexe B.



Photo n° 126 : le guide technique sur la réparation des bétons d'août 1996 (crédit photo LCPC-Sétra)

Tous ces produits ou systèmes peuvent être :

- **industriels prêts à l'emploi** (concerne tous les produits et systèmes **CC**, **PC** et **PCC**). Les mélanges sont livrés **prêts à gâcher** (ajout d'un volume fixé d'eau au moment du malaxage) ou **prédosés** (tous les constituants sont fournis, seul le mélange est à effectuer par le malaxage). Il s'agit :
 - de produits de réparation bénéficiant du **marquage CE** dans le cadre de la **norme NF EN 1504-3**,
 - de produits **ne bénéficiant pas du marquage CE** et qui doivent être considérés comme des produits fabriqués en centrale ou sur le chantier ;
- **non industriels fabriqués en centrale** (concerne surtout les produits et systèmes **CC**, voire **PCC**) ;
- **non industriels fabriqués sur chantier** concerne surtout les produits et systèmes **CC**.

Pour les applications visées dans le présent article du guide, les produits à utiliser sont :

- **de type 1** : des produits industriels relevant du **marquage CE** et de classe **R3** ou **R4** au sens de la **norme NF EN 1504-3**. Le marché fixe les **performances** à obtenir des produits en se basant sur les **tableaux 3 et B 1** de la **norme** et sur l'**annexe A** de la **norme NF P95-101** (prise en compte **obligatoire** des **classes d'exposition**).

Il peut aussi fixer pour des **applications spéciales** des **exigences complémentaires** pour s'assurer que les produits, par exemple :

- peuvent être mis en place par projection,
- peuvent être appliqués compte tenu de la technique de mise en œuvre prévue (en particulier l'application en sous-face des poutres et dalles (norme NF EN 13395-4 de décembre 2002 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la maniabilité - Partie 4 : application de mortier de réparation en sous-face),
- présentent une résistance suffisante aux chocs et à l'abrasion,
- etc.

Note : nombre de ces produits sont des **mortiers** (diamètre du plus gros granulat $\leq 0,4$ mm). Cependant certains produits industriels sont des **bétons**, qui relèvent à la fois de la **norme NF EN 206-1** et de la **norme NF EN 1504-3**, voire d'autres normes comme la **norme NF P95-102** d'avril 2002 (actuellement **partiellement obsolète et en révision**).

■ **de type 2 : des bétons ou mortiers** de classe granulaire adaptée aux épaisseurs à mettre en place dont la composition et les caractéristiques de performance se conforment à la **norme NF EN 206/CN**, voire au **fascicule 65 du CCTG** (exigences plus sévères) et tiennent compte des **classes d'exposition** auxquelles est soumis l'ouvrage. Ils ne peuvent bénéficier du **marquage CE** ; aussi, leur formulation doit être basée sur un **programme d'essais** de validation défini au **marché**. Cette formulation doit inclure les essais pertinents des **tableaux 3 et B 1 de la norme NF EN 1504-3** et, pour des **applications spéciales**, les essais nécessaires pour s'assurer que les bétons et mortiers, par exemple :

- peuvent être appliqués compte tenu de la technique de mise en œuvre prévue (cas de la mise en œuvre par projection...),
- présentent une résistance aux chocs et à l'abrasion,
- etc.

Ces bétons peuvent être des **produits industriels** ou des **produits fabriqués en centrale ou sur le chantier**.

ATTENTION, les **produits industriels** livrables en sacs, big-bags... qui s'appuient sur la **norme NF EN 206/CN** et/ou sur les normes relatives au béton projeté (**NF EN 14487-1 et 2** et **NF P95-102-1**) ...et qui ne s'appuient pas également sur la **norme NF EN 1504-3** ne peuvent être considérés comme des **produits de réparation** au sens de cette norme même si certains présentent des performances suffisantes et peuvent donc être utilisés. Ils doivent être considérés comme les produits de type 2 susvisés et être soumis aux mêmes essais de **validation (épreuves d'étude et de convenance)** allégés ou non.

ATTENTION, dans le cas où un **mortier ou un béton de réparation** doit être mis en place par **projection**, il doit satisfaire aussi aux dispositions des **normes NF EN 14487-1 et NF EN 14487-2**. De plus, ses performances de **durabilité et de performance mécanique** doivent être mesurées sur le mortier ou le béton une fois projeté et durci ce qui peut imposer d'effectuer des **essais spécifiques** complémentaires de ceux visés pour les **produits des types 1 et 2**. Se reporter aux articles 4.2.5.2.3.3 et 4.2.5.2.3.4 dans les sous-articles relatifs à la projection.

Liste de normes :

- **NF EN 14487-1 de mars 2006 : Béton projeté – Partie 1 : définition, spécification et conformité ;**
- **NF EN 14487-2 d'août 2007 : Béton projeté – Partie 2 : exécution.**

4.2.5.2.3 Critères de choix des produits et systèmes de réparation des bétons

4.2.5.2.3.1 Généralités

Le présent article aborde le **choix des produits** à partir de la **fonction principale recherchée** dans les domaines du **bâtiment** et du **génie civil**. Dans la majorité des cas, le produit doit également satisfaire à **d'autres fonctions**.

Il est rappelé que deux produits dont la composition comporte le même liant peuvent avoir des **niveaux de performances différents**. Il faut donc consulter les **fiches techniques des produits**, qui doivent être renseignées sur les niveaux de performances (classes) par références aux normes en vigueur et, en particulier, la **norme NF EN 1504-3**.

Le choix se déroule en deux phases :

- **première phase** : le choix d'une famille de produit (CC, PCC ou PC) qui repose sur deux critères ne faisant pas intervenir de valeurs numériques :
 - premier critère : les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques,
 - **second critère** : les aptitudes aux conditions de mise en œuvre et d'utilisation ;
- **deuxième phase** : le choix du produit qui peut être :
 - **de type 1** : un produit industriel prêt à l'emploi bénéficiant du **marquage CE**, voire de la **marque NF 030** (produits spéciaux) et conforme à la **norme NF EN 1504-3** qui sera définitivement validé par une épreuve de convenance, voire des essais complémentaires (par exemple, pour satisfaire aux **classes d'environnement** mais aussi avoir une **composition** ne contenant pas de composants susceptibles de provoquer des réactions internes dommageables,

Note : l'article 4.2.5.2.3.3 ci-dessous relatif aux **produits de réparation industriels** fixe les dispositions à respecter concernant la **composition** et les **classes d'exposition**.

- **de type 2** : un mortier ou un béton fabriqué sur le chantier ou en centrale, voire en usine, dont les performances devront satisfaire aux dispositions de la **norme NF EN 206/CN** ou du **fascicule 65 du CCTG** portant sur leur **composition**, leur adaptation aux **classes d'exposition** et aussi de la **norme NF EN 1504-3** et, si nécessaire, à des **essais complémentaires** ; il sera accepté après une **épreuve d'étude** et définitivement validé par une **épreuve de convenance**.

Si le produit, fibré ou non, doit être mis en œuvre par projection, ses performances doivent aussi satisfaire aux **normes NF EN 14487-1 et 2** et **NF P95-102-1**.

4.2.5.2.3.2 Première phase

Le choix des familles de produits utilisables pour réparer les différents défauts constatés dépend essentiellement des deux critères suivants :

- **Premier critère** : chaque famille de produits ou systèmes (CC, PCC et PC) présente des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques plus ou moins élevées. Elles sont indiquées dans le tableau ci-dessous (adhérence, effet passivant, résistance à la fissuration...). À partir du moment où les **caractéristiques recherchées** pour la réparation sont fixées, le tableau permet de sélectionner la **famille la mieux adaptée**.

CARACTÉRISTIQUES	PCC	PC		
	(ex LHM) (1)	EP	PUR	EP-C
Adhérence sur support sec	+	+++	++ (2)	++
Adhérence sur support humide	++	+	- (3)	++
Adaptation à la fissuration du support	+	+	++ ou +++	-
Effet passivant	+++	0 (4)	0 (4)	++ ou +++
Module d'élasticité	élevé	Moyen	faible	Moyen
Compatibilité thermique (5)	+++	+	+	++
Résistance à l'abrasion (6)	++	+++	++	++
Résistance à la pénétration des liquides sous pression	++	+++ (7)	+++ (7)	++
Fluage à 20 °C	faible	Moyen	élevé	moyen
Fluage à 50 °C	faible	Elevé	élevé	moyen
Retrait	moyen	Faible	faible	moyen

Tableau n° 33 : extrait du guide technique SETRA-LCPC de 1996

Légende :

PCC : produit à base de liants hydrauliques modifiés par ajout de polymère organique non réactif,

EP : produit à base de résine époxyde (sigle PC dans la norme NF EN 1504-1),

PUR : produit à base de polyuréthane (sigle PC dans la norme NF EN 1504-1),

EP-C : produit mixte à base de résine époxyde et de ciment hydraulique (sigle PC dans la norme NF EN 1504-1),

+++ : plus le nombre de + est élevé, mieux le produit est adapté à la caractéristique recherchée,

- : non recommandé,

O : le produit ne répond pas à la question posée.

Notes :

- (1) Dans le domaine des ouvrages d'art, la plupart des produits à base de liants hydrauliques effectivement utilisés sont des PCC (sigle LHM dans le guide STRA-LCPC). Les mortiers hydrauliques classiques sont en revanche très largement employés dans le bâtiment
- (2) Dans le cas où le support est très alcalin, il peut être nécessaire d'utiliser un primaire approprié et il convient de le vérifier auprès du fabricant du produit.
- (3) Les polyuréthanes peuvent être utilisés sur support humide avec un primaire approprié
- (4) Pour obtenir un effet passivant il est possible d'utiliser un primaire passivant (Cf. la norme NF EN 1504-7).
- (5) La compatibilité thermique est envisagée dans le cas présent pour les mortiers en épaisseur supérieure à 2 cm. C'est la capacité à suivre les déformations thermiques du béton.
- (6) La comparaison de la résistance à l'abrasion est donnée en supposant que les granulats sont identiques pour toutes les familles de produits.
- (7) Le pourcentage en masse de la résine est au moins de 20 %.

Il faut noter que les **mortiers de type PC** (époxydes, polyuréthanes...) ont un **module de déformation** nettement plus faible que celui des bétons et un **module de dilatation** beaucoup plus élevé que celui des bétons. De plus, ils sont totalement insolubles dans l'eau. Ils n'ont aucune action passivante vis-à-vis de l'acier comme les mortiers hydrauliques. Ils ne protègent donc les armatures de l'action de l'eau que par leur propre épaisseur. Ils ne sont, en conséquence, utilisés que dans des cas particuliers à savoir : **réparations de surface en couche très mince** sachant que leur adhérence n'impose pas la réalisation d'une engravure à bords francs. Enfin, ils ne peuvent être projetés.

Les **mortiers de type PCC** sont utilisés dans la majorité des cas, de préférence aux mortiers traditionnels, du fait de leurs meilleures performances (thixotropie, montée en résistance, adhérence...). Cependant dans le cas où les surfaces à réparer sont importantes, les mortiers de type CC, avec une mise en place par exemple, par projection, deviennent compétitifs (rapport performances/coût).

Note : pour les petites réparations et surtout dans le domaine du bâtiment, peuvent être utilisés des produits fabriqués sur le chantier à base de liants hydrauliques et de polymères (latex) comme suit :

- mélange de ciment et d'un polymère dilué dans l'eau pour constituer une barbotine d'accrochage,
- gâchage du mortier avec un polymère dilué dans l'eau.

■ **Deuxième critère : chaque famille de produits ou systèmes** (CC, PCC et PC) présente des **aptitudes aux conditions de mise en œuvre et d'utilisation plus ou moins élevées**. Elles sont indiquées dans le **tableau ci-dessous** (durée pratique d'utilisation [DPU], résistance aux UV, résistance aux cycles gel/dégel...). À partir du moment où les aptitudes recherchées pour la réparation sont fixées, le tableau permet de sélectionner la famille la mieux adaptée.

CARACTÉRISTIQUES	PCC		PC	
Aptitudes	PCC	EP	PUR	EP-C
DPU (durée pratique d'utilisation)	À vérifier auprès des fournisseurs et s'assurer de sa compatibilité avec les exigences du chantier			
Température du support (°C) (1)	5-35	8-35	5-35	5-50
Température ambiante (°C) (1)	5-50	8-50	5-50	5-50
HR ambiante (2) (humidité relative)	jusqu'à 100 %	jusqu'à 85 %	jusqu'à 75 %	jusqu'à 100 %
Préparation du support	Indispensable en fonction du produit et des conditions imposées par le chantier			
Age du support	indifférent	> 28 jours	> 28 jours	indifférent
Aptitude à l'application : Horizontale (au sol) verticale	sans problème – de préférence choisir un produit autolissant pour chaque famille utiliser des produits thixotropes			
Aptitude au nettoyage (entretien)	+	+++	+++	++
Compatibilité avec le produit déjà en place	À étudier au cas par cas			
Résistance aux agressions chimiques	+	+++	++	++
Résistance aux UV	+++	+	++/+++	++
Résistance aux cycles gel/dégel	++	+++	+++	++
Rapidité de mise en service	++	+++	++	++
Faiblesse du coût (3)	+++	+	+	++

Tableau n° 34 : extrait du guide technique SETRA-LCPC de 1996

Notes

- (1) Il faut être vigilant lorsqu'on s'approche des températures extrêmes indiquées,
 (2) En ambiance sèche, il faut utiliser un produit de cure,
 (3) En se plaçant dans l'hypothèse d'un ragréage, avec des quantités de produits identiques et une épaisseur à respecter, les produits peuvent être classés du moins cher au plus cher : le moins cher est le PCC (LHM), puis l'EP-C (mélange de résine, ciment et granulats) et enfin l'EP (mélange de résine et granulats) et le PUR (polyuréthane).

Note : certaines des indications du tableau peuvent être légèrement différentes de celles que l'on peut trouver dans les documents plus récents. Ce peut être le cas par exemple des fourchettes relatives à la température ambiante.

Il y a lieu de rappeler que la **durée pratique d'utilisation** ou **DPU** d'un produit ou d'un système (synonymes : délai maximal d'utilisation, durée de vie en pot, délai d'utilisation, temps d'utilisation et temps ouvert) est mesurée en **laboratoire**, sur des quantités de composants du mélange réduites et dans des conditions thermiques d'intensités limitées. **Elle n'est donc pas représentative de la DPU observée sur le chantier** laquelle doit être mesurée lors d'une épreuve de convenance à renouveler en cas de modification des **conditions climatiques**.

Les produits et systèmes de type **PC** ne sont guère adaptés aux **réparations structurales ou non**, en particulier, en fortes épaisseurs. En effet, leur coefficient de dilatation est plus élevé que celui des bétons, ayant un **pH neutre**, ils ne restaurent pas la passivité, leur coût de fourniture est élevé...

4.2.5.2.3.3 Deuxième phase – Cas des produits de type 1 industriels relevant du marquage CE dans le cadre de la norme NF EN 1504-3

ATTENTION, ces produits industriels relevant du marquage CE sont pour la plupart des mortiers (granulométrie ≤ 0,4 mm) et non des bétons.

Il existe cependant des produits industriels de type béton qui font à la fois référence à la norme NF EN 206-1 mais pas aux normes 206/CN et 1504-3.

Les caractéristiques mécaniques minimales exigées, pour obtenir le marquage CE pour les utilisations prévues (par la norme), sont données par les deux tableaux ci-après extraits des tableaux n°1 et n°3 de la norme NF EN 1504-3.

ATTENTION, ces tableaux sont utilisables non seulement pour toutes les réparations (restauration du béton au moyen d'un mortier ou béton), mais aussi pour le renforcement (renforcement par ajout de mortier ou de béton) et également pour la préservation ou la restauration de la passivité des armatures (passivité conservée ou restaurée par augmentation de l'enrobage et par remplacement du béton contaminé).

Il y lieu de rappeler (se reporter à l'article 4.2.4.1) qu'outre les caractéristiques obligatoires pour toutes les utilisations (marquées par « ■ » dans le Tableau n° 35), des caractéristiques de performance complémentaires sont à exiger par le marché pour certaines utilisations prévues (marquées par « □ » dans le Tableau n° 35) et aussi pour les 4 applications spéciales visées par l'annexe B de la norme et listées ci-dessous.

À la suite de chacun des 2 tableaux, si nécessaire, des notes explicitent, par exemple, quelle famille de produits ou systèmes (CC, PCC ou PC) doit respecter certaines caractéristiques du tableau.

De plus, il faut tenir compte que les produits et systèmes conformes à la norme NF EN 1504-3 ont des conditions d'emploi qui peuvent être limitées sur certains points listés ci-après en particulier en matière de formulation et vis-à-vis des classes d'exposition (cf. la norme NF EN 206/CN et le fascicule 65 du CCTG). Dans un tel cas, le marché fixe des exigences complémentaires de performances pour ces utilisations non prévues. Performances à valider lors d'une épreuve d'étude ou de convenance. Ces deux points sont traités ci-après.

Étant donné que les performances de ces produits sont mesurées sur des éprouvettes de faible dimensions réalisées par coulage dans des moules, leurs performances ne sont pas représentatives des performances qu'ils présentent, par exemple en cas de mise en place par projection.

Il est également nécessaire, si la réparation présente un caractère structural et si les caractéristiques du support, le béton de la structure (résistance, module d'élasticité...) sont supérieures aux valeurs minimales des tableaux, d'exiger des caractéristiques pour les produits et systèmes supérieures à ces minimaux²⁴.

Lorsque des exigences de tenue au feu sont nécessaires, il appartient enfin au marché de fixer la classe de performance et le niveau d'EVCP nécessaires.

> Spécificités de l'annexe B (informative) de la norme NF EN 1504-3 :

1. lorsque le produit ou le système de réparation industriel se trouve soumis à une forte concentration d'ions chlorure (par exemple, ouvrage au contact de l'eau de mer). Sachant que les exigences sur l'absorption capillaire du Tableau n° 36 ci-après sont peu élevées, il peut être nécessaire :

- soit de les relever,
- soit d'imposer la mise en œuvre d'un revêtement ad hoc. Par exemple, avec un revêtement performant, le niveau de l'absorption capillaire descend à 0,1, voire à 0,01 kg / (m² x h^{0,5}) ;

Note : l'application d'un revêtement étanche à une structure ou une partie de celle-ci étanche impose, d'une part, que de l'eau ne puisse pénétrer dans le béton (par exemple sous forme de remontées d'humidité par le sol...) et d'autre part, que l'évacuation de la vapeur d'eau ne soit pas nécessaire (cependant, cette évacuation est indispensable dans le cas des habitations).

24 Le niveau d'adhérence maximal visé par la norme européenne ne dépasse pas 2 MPa alors que l'ex norme française P 18-840 (base à l'époque de la Marque NF-Produits spéciaux) allait jusqu'à 3 MPa. De même, le niveau fixé pour le module d'élasticité de 20 GPa est faible. Des produits nettement plus performants que ces minimaux sont proposés par des fabricants.

2. **il faut tenir compte du fluage en compression** dans le cas des réparations avec des produits de type PC, si les contraintes dépassent 60% de la résistance normalisée à 28 jours ;
3. **lorsque le produit ou le système de réparation industriel se trouve soumis à un environnement chimiquement agressif**, en fonction de la nature du produit chimique, de sa concentration et de la fréquence potentielle des attaques, le **marché** se doit d'exiger un produit de réparation adapté ce qui peut imposer une **épreuve d'étude spécifique ou la mise en œuvre d'un revêtement de protection**.
La norme NF EN 1504-2 relative aux **systèmes de protection de surface pour béton** impose pour la résistance chimique une absence de défaut après 30 jours d'exposition. Elle traite aussi de la résistance aux fortes attaques chimiques ;
4. **l'application au plafond** impose le respect d'une contrainte d'adhérence du tableau 3 de la norme (Tableau n° 36 du guide) mais aussi un produit thixotrope²⁵. **Le marché** se doit d'imposer que le produit ou systèmes satisfasse aux dispositions de la **norme NF EN 13395-4** pour une application manuelle.

> Prise en compte des conditions d'emploi limitées :

1. **Composition**, les produits industriels de réparation ne doivent pas contenir de composants susceptibles de provoquer des **attaques chimiques internes ou des réactions de gonflement**. Les exigences de durabilité correspondantes sont détaillées après celles de performances des tableaux 1 et 3 ci-après.
2. **Classes d'exposition**, la **norme NF EN 1504-3** ne traite que partiellement des **classes d'exposition visées** par la **norme NF EN 206/CN**. Les exigences de durabilité vis-à-vis des attaques chimiques externes et physiques sont détaillées après celles de performances des tableaux ci-après.
3. **Essais de validation**, les **produits de réparation industriels** sont testés comme suit :

Les essais de validation des produits de réparation industriels sont, pour la plupart, effectués en laboratoire sur des éprouvettes de faible dimensions coulées dans des moules (40 mm x 40 mm x 40 mm ou 40 mm x 40 mm x 160 mm).

Ils ne peuvent être représentatifs des performances dans le cas où le produit est mis en place par projection (tout particulièrement en voie sèche à cause des importantes retombées, sachant, qu'en voie mouillée, les modifications de la composition du produit une fois projeté sont moindres les retombées étant plus faibles).

Il faut donc imposer dans le **marché** que le produit soit projetable c'est-à-dire satisfasse à certaines des dispositions des trois normes relatives au béton projeté : **NF EN 14487-1**, **NF EN 14487-2** et **NF P95-102-1** (en cours de révision). Des essais complémentaires indispensables sont à effectuer sur le produit, essentiellement après projection.

Rappel, la majeure partie des **produits industriels de réparation** disponibles chez les fabricants, qui relèvent de la **norme NF EN 1504-3**, ne sont pas des **bétons** mais des **mortiers** (diamètre des plus gros granulats ≤ 4 mm). De tels mortiers sont mieux adaptés aux **réparations superficielles non-structurelles ou structurelles de faible importance**. Certains de ces mortiers peuvent être appliqués par projection, au dire du fabricant, mais les normes **NF EN 14487-1** et **2** sont rarement citées.

4. **Prise en compte d'autres exigences non définies dans la norme européenne NF EN 1504-3. Ce peut être :**
 - une résistance à une érosion et/ou des chocs sévères ;
 - une résistance élevée au jeune âge (quelques jours) ou très jeune âge (quelques heures) ;
 - etc.

²⁵ L'orientation du support joue sur les épaisseurs pouvant être mises en œuvre (consulter les notices des fabricants).

a) Cas d'un ouvrage soumis à une érosion forte et/ou des chocs sévères :

La norme NF EN 1504-3 ne vise aucun essai. La méthode d'essai TABER (NF EN ISO 5470-1) et aussi les méthodes d'essai (NF EN 13813), traitent d'essais simulant l'effet d'un trafic de faible intensité. Ils ne sont pas utilisables pour simuler les effets de l'érosion et des chocs causés par des eaux chargées en particules abrasives et charriant des blocs de pierres et des galets.

Pour ce type d'agression, il est possible d'avoir recours à deux essais spécifiques de la CNR (Compagnie Nationale du Rhône²⁶) détaillé dans l'annexe A de la norme NF P95-103 :

■ L'essai d'érosion :

L'essai représentatif des eaux chargées en alluvions consiste à soumettre à un jet d'eau chargé en sable incliné à 45° l'éprouvette du produit à tester laquelle est encadrée par deux plaques de verre (ces plaques servent de référence). C'est le rapport entre les volumes des empreintes dans l'éprouvette et dans le verre qui permet de qualifier le produit sous la forme d'un indice d'érosion I. L'indice I varie de quelques dixièmes à 5 à 10 pour les matériaux les moins résistants.

■ L'essai de choc :

L'essai représentatif des eaux charriant des blocs de pierre et des galets consiste à soumettre l'éprouvette du produit à tester, fixée dans un tambour tournant, au choc créé par la chute d'une boule métallique.

- Le volume de l'empreinte créée est mesuré pour les matériaux rigides. Il varie de quelques cm³ pour les matériaux les plus performants à près de 500 cm³ pour les matériaux les moins performants ;
- La perte de cohésion et d'adhérence sont contrôlées visuellement pour les matériaux souples sur les éprouvettes d'essais ou par un essai d'adhérence suivant la norme NF EN 1542 de juillet 1999 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de l'adhérence par traction directe.

a) Cas d'une réparation où le béton doit présenter une certaine résistance jeune âge ou très jeune âge :

Il appartient au marché de fixer les exigences sur les résistances que le produit doit présenter au jeune âge, voire au très jeune âge (quelques heures).

Les mesures peuvent être effectuées :

- classiquement sur éprouvettes pour les résistances au jeune âge (quelques jours). Ces mesures peuvent être complétées par une auscultation sonique (fiche B1-2) ;
- conformément à la norme NF EN 14488-2 d'octobre 2006 : Essais pour béton projeté Partie 2 : résistance à la compression au jeune âge du béton projeté ; si on cherche à évaluer les résistances au très jeune âge, les essais sont effectués, soit par enfoncement d'une aiguille (méthode A de 0,2 à 1,2 MPa), soit par enfoncement d'un clou fileté (méthode B de 2 à 16 MPa). Cette norme permet d'évaluer un durcissement mais pas une résistance en compression tant que la corrélation avec des mesures réalisées sous presse n'aura pas été établie.

> Tableau 1 de la norme NF EN 1504-3 :

Ce premier tableau ci-dessous donne les caractéristiques de performance non chiffrées que doivent présenter les produits et systèmes de réparation industriels pour toutes les utilisations prévues et pour certaines utilisations prévues. La lecture du tableau et des avertissements, qui précèdent, montre la nécessité de fixer des clauses complémentaires dans le marché. C'est particulièrement le cas pour les ouvrages d'art compte tenu de leur classe d'exposition aux agressions de l'environnement (par exemple, la compatibilité thermique ne fait pas partie des caractéristiques obligatoires pour bénéficier du marquage CE !).

²⁶ Le laboratoire de la CNR se trouve à Lyon.

Caractéristiques de performance	Principe de réparation			
	3 Restauration du béton		4 Renforcement structural	7 Préservation ou restauration de la passivité
	Méthodes de réparation			
	3.1 Mortier mis en place manuellement 3.2 Coulage nouveau béton	3.3 Mortier ou béton projeté (a)	4.4 Ajout de mortier ou béton	7.1 Augmentation de l'enrobage par mortier ou béton 7.2 Remplacement du béton contaminé ou carbonaté
Résistance en compression	■	■	■	■
Teneur en ions chlorure (b)	■	■	■	■
Adhérence	■	■	■	■
Retrait /expansion empêchés (c)	■	■ (voir la remarque*)	■	■
Durabilité : a) Résistance à la carbonatation (b) (d)	■	■	■	■
Module d'élasticité (concerne le renforcement structural)	□	□	■	□
Durabilité : b) Compatibilité thermique, partie 1 ou 2 ou 4 de l'EN 13687(e)	□	□	□	□
Résistance au glissement et au dérapage (f)	□	□	□	□
Coefficient de dilatation (g)	□	□	□	□
Absorption capillaire (perméabilité à l'eau) (e) (h)	□	□	□	□

Tableau n° 35 : extrait de la norme EN 1504-3

Notes :

- a) le mode d'application du mortier ou du béton peut imposer la modification de certaines des méthodes d'essais (cf. les normes NF EN 14487-1 et 2) ;
- b) la réparation du **béton non armé** n'est pas concernée par cette exigence de teneur en ions chlorure du produit ou système de réparation ;
- c) cet essai n'est pas requis si les essais de cycles thermiques sont effectués (attentions aux classes d'exposition) ;
- d) cet essai n'est pas requis lorsque le système de réparation comporte un revêtement assurant une protection contre la carbonatation (cf. NF EN 1504-2) ou s'il s'agit d'un mortier de type PC (pH neutre) ;
- e) les essais à effectuer dépendent des conditions d'exposition de l'ouvrage objet de la réparation ;
- f) ces essais concernent les zones soumises à des circulations ;
- g) ces essais concernent les produits de type PC ;
- h) cet essai, comme celui relatif à la **teneur en ions chlorure** dans les produits et celui relatif à la **carbonatation**, concerne la **résistance à la corrosion des armatures**. En effet, une **faible perméabilité à l'eau** empêche la pénétration des chlorures. Ces trois exigences ont pour but de **préserver la passivité des armatures**, passivité qui est visée dans l'article 4.2.6 ci-après.

(*) *Remarque* : le tableau ci-dessus exige pour les mortiers et les bétons projetés des **essais de mesure de l'expansion et du retrait empêchés**, or, la note b) du tableau suivant indique que cette **méthode d'essai n'est pas requise pour la méthode de réparation 3.3**. Il y a donc un certain flou sur ce point dans la norme qui précise cependant (note a) de se rapprocher de la norme NF EN 14487-1, car certaines méthodes d'essai doivent être modifiées pour tenir compte du mode d'application du mortier ou du béton.

> **Tableau 3 de la norme NF EN 1504-3 :**

Ce troisième tableau ci-dessous donne les caractéristiques de performance minimales chiffrées que doivent présenter les produits et systèmes de réparation industriels pour toutes les utilisations prévues et pour certaines utilisations prévues.

Point n°	Caractéristiques de performance	Support de référence (EN 1766)	Méthode d'essai	Méthodes de réparation			
				Structurale		Non structurale	
				Classe R 4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	Résistance en compression	Se reporter au tableau 3 de la norme NF EN 1504-3	NF EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	Teneur en ions chlorure		NF EN 1015-17	≤ 0,05%		≤ 0,05%	
3	Adhérence		NF EN 1542	≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	
4	Retrait /expansion empêchés (b) (c)		NF EN 12617-4	Contrainte d'adhérence après essais (d) (e)			Aucune exigence
				≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	
5	Résistance à la carbonatation (f)		NF EN 13295	dk ≤ béton témoin (MC 10,45))		Aucune exigence (g)	
6	Module d'élasticité		NF EN 13412	≥ 20 GPa (*)	≥ 15 GPa (*)	Aucune exigence	
7	Compatibilité thermique (f) (h) Partie 1 : gel-dégel		NF EN 13687-1	Contrainte d'adhérence au bout de 50 cycles (d) (e)			Examen visuel au bout de 50 cycles
				≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	
8	Compatibilité thermique (f) (h) Partie 2 : pluie d'orage		NF EN 13687-2	Contrainte d'adhérence au bout de 30 cycles (d) (e)			Examen visuel au bout de 30 cycles
				≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	
9	Compatibilité thermique (f) (h) Partie 4 : cycles thermiques à sec		NF EN 13687-4	Contrainte d'adhérence au bout de 30 cycles (d) (e)			Examen visuel au bout de 30 cycles
			≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)		
10	Résistance au glissement et au dérapage	NF EN 13036-4	Classe I : > 40 unités essayées humides		Classe I : > 40 unités essayées humides		
			Classe II : > 40 unités essayées à sec		Classe II : > 40 unités essayées à sec		
			Classe I : > 55 unités essayées humides		Classe I : > 55 unités essayées humides		
11	Coefficient de dilatation (c)	NF EN 1770	Non requis si les essais 7, 8 et 9 sont effectués. Sinon valeur déclarée			Non requis si les essais 7, 8 et 9 sont effectués. Sinon valeur déclarée	
12	Absorption capillaire	NF EN 13057	w ≤ 0,5 kg/(m ² x h0,5)				Aucune exigence

Tableau n° 36 : performances exigées des différents produits pour bénéficier du marquage CE (Tableau n°3 extrait de la norme EN 1504-3)

Notes :

- a) la valeur de 0,8 MPa n'est pas requise s'il y a rupture de cohésion du matériau de réparation, une résistance minimale en traction de 0,5 MPa est cependant exigée ;
- b) essai non requis pour la **méthode de réparation 3.3** par mortier ou béton projeté (se reporter à la remarque ci-devant) ;
- c) cet essai n'est pas requis si les essais de cycles thermiques sont effectués ;
- d) la valeur moyenne issue des essais \geq valeur minimale exigée, sous réserve que la valeur minimale mesurée $>$ 75% de la valeur minimale exigée ;
- e) l'ouverture moyenne des fissures qui apparaissent \leq 0,05 mm, sous réserve qu'il n'y ait pas de fissure \geq 0,1 mm et de feuilletage ;
- f) ces essais concernent la durabilité de la réparation (attention aux classes d'exposition) ;
- g) de tels produits et systèmes n'assurent pas une protection contre la carbonatation, sauf si un revêtement de protection assurant cette protection et conforme à la NF EN 15404-2, est mis en œuvre ;
- h) le choix de la méthode d'essai dépend des conditions d'exposition de la réparation. Il est admis qu'un produit ou système satisfaisant à la partie 1 est réputé conformes aux deux autres parties ;

Remarque (*) :

$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10^4 \text{ bars} \sim 10^4 \text{ kgf/cm}^2$. Un module de 20 GPa correspond donc à 200 000 bars, valeur nettement inférieure à celui des bétons de génie civil !

> Exigences de durabilité concernant la composition des produits :

Les exigences de durabilité vis-à-vis des **attaques chimiques internes** et des **réactions de gonflement** ci-dessous doivent être vérifiées conformément aux dispositions de la **norme NF EN 206/CN** ou du **fascicule 65 du CCTG** sur la composition du produit, sauf prescription contraire du marché :

- teneur en chlorures libres ;
- teneur en sulfures ;
- alcali-Réaction ;
- réaction sulfatique interne.

La teneur en **ions chlorure** des produits industriels de réparation relevant de la **norme NF EN 1504-3** est limitée à 0,05%.

La **teneur en sulfures** n'est pas fixée par la **norme NF EN 1504-3** mais le **fascicule 65 du CCTG** impose, dans le cas où les produits de réparation sont en contact avec des **armatures de précontrainte**, que le ciment entrant dans la composition du mélange concerné respecte les prescriptions de la **norme NF P15-318 (CP)**. À savoir :

- cas des éléments précontraints par pré-tension : le ciment doit être du CEM I CP2 ou du CEM II CP2 ;
- cas éléments précontraints par post-tension : les ciments doivent être à minima de classe CP1. Cependant, si les armatures de précontrainte ne sont pas durablement isolées du contact avec le béton, ils doivent être de classe CP2.

La **prévention de l'alcali-réaction**, dans le cas où les **granulats du béton support sont potentiellement réactifs**, impose l'utilisation de ciments à faible teneur en alcalins (se reporter à la **norme NF EN 206/CN** ou au **fascicule 65 du CCTG**).

La **prévention de la réaction sulfatique interne** est généralement satisfaite car les épaisseurs mises en œuvre sont réduites (réparations superficielles) et les températures restent normalement inférieures au seuil critique. Si l'on sort des cas courants, le contrat précise la procédure à respecter. Se reporter au **guide de l'Ifsttar d'octobre 2017** : « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne ».

Il appartient au **fabricant** d'attester que ses produits respectent les exigences du **marché** en fournissant des résultats d'essais ou de caractérisation.

Le **fabricant** peut, à cet effet, utiliser les essais figurant dans le tableau de correspondance avec les classes d'exposition de la **norme NF EN 206/CN** proposés dans le Tableau n° 37 ci-après. Il peut aussi s'engager sur la nature et le dosage du ciment utilisé.

Note : les exigences ci-dessus concernant la formulation des mortiers et bétons figurent dans la **norme NF P95-102-1**.

> Exigences de durabilité vis-à-vis des classes d'exposition :

Des exigences complémentaires sont à fixer car seules les situations suivantes sont prises en compte par la **norme NF EN 1504-3** :

- la résistance à la carbonatation par les essais de la **norme NF EN 13295 de septembre 2004** : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de la pénétration d'ions chlorure ;
- les essais de compatibilité thermiques visés par la **norme NF EN 13687 parties 1, 2 et 4 de décembre 2002** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique :
 - partie 1 : Cycles de gel-dégel avec immersion dans des sels de déverglaçage,
 - partie 2 : Cycles d'averses d'orage (choc thermique),
 - partie 4 : Cycles thermiques à sec.

La **norme NF EN 1504-3** ne se réfère pas aux **classes d'exposition** de la **norme NF EN 206/CN** (bétons), de l'**Eurocode 2** et du **fascicule 65 du CCTG**. Il faut se reporter à l'**annexe A** (informative) de la **norme NF P95-101**, qui donne les correspondances entre les performances des **mortiers industriels** et les **classes d'exposition** des bétons, **annexe à rendre contractuelle** par le **marché** si besoin est.

Cette **annexe A** introduit, suivant la **classe d'exposition** et le **facteur physique ou chimique** pouvant aggraver le produit ou le système de réparation, les exigences complémentaires suivantes :

- une résistance minimale à la compression pour les produits de classe R3 ou R4 ;
- une valeur pour l'absorption capillaire ;
- une valeur pour la résistance à l'écaillage ;
- une résistance à l'eau de mer ;
- une résistance à des eaux à haute teneur en sulfates.

Les exigences du Tableau n° 36 ci-devant sont à compléter par celles du tableau ci-dessous en fonction de la **classe d'exposition** (extrait partiel du tableau A1 de la **norme NF P95-101**).

ATTENTION, il est impératif que l'**entrepreneur** obtienne du **fabricant** l'assurance, avec résultats d'essais à la clé, que le produit de réparation est à même de résister aux **agents agressifs** liés à la **classe d'exposition** requise dans le **marché**, voire, dans certains cas, à d'autres exigences.

	Classes d'exposition	Description de l'environnement	Classe « minimale » du produit (NF EN 1504-3) avec éventuelle exigence complémentaire sur la résistance à la compression minimale (NF EN 12190)	Exigences complémentaires autres que celles couvertes par la classe du produit (NF EN 1504-3)
CORROSION INDUITE PAR CARBONATATION	XC1	Sec ou Humide en permanence	R3	/
	XC2	Humide, rarement sec	R3	Absorption capillaire (NF EN 13057) < 0,5 kg.m ⁻² .h ^{0,5}
	XC4	Alternance humidité et séchage	R3 avec Rc > 30 MPa ou R4	Résistance à la carbonatation (NF EN 13295) - Test satisfaisant
CORROSION INDUITE PAR CHLORURES AYANT UNE AUTRE ORIGINE QUE MARINE	XD1	Humidité modérée	R3 avec Rc > 30 MPa ou R4	Absorption capillaire (NF EN 13057) < 0,5 kg.m ⁻² .h ^{0,5}
	XD2	Humide, rarement sec	R3 avec Rc > 37 MPa ou R4	Absorption capillaire (NF EN 13057) < 0,5 kg.m ⁻² .h ^{0,5}
	XD3	Alternance humidité et séchage	R4	Absorption capillaire (NF EN 13057) < 0,5 kg.m ⁻² .h ^{0,5} (a ou b)
CORROSION INDUITE PAR CHLORURES PRESENTS DANS L'EAU DE MER	XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	R3 avec Rc > 37 MPa ou R4	Tenue à l'eau de mer selon NF P18-837 (gonflement < 600 microns/m) (a)
	XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou des embruns marins	R4	Tenue à l'eau de mer selon NF P18-837 (gonflement < 600 microns/m) (a)
	XF1	Saturation modérée en eau, sans agent de déverglaçage	R3 avec Rc > 30 MPa ou R4	Compatibilité Thermique - Partie 4 - Cycles thermiques à sec (NF EN 13687-2) : adhérence (NF EN 1542) > 1,5 MPa
ATTQUES GEL/DEGEL AVEC OU SANS AGENT DE DEVERGLACAGE	XF4	Forte saturation en eau, avec agent de déverglaçage	R3 avec Rc > 37 MPa ou R4	Compatibilité Thermique - Partie 1 - Gel dégel (avec sels de déverglaçage) (NF EN 13687-1) : adhérence (NF EN 1542) > 1,5 MPa et résistance à l'écaillage (XP P18-420) : écaillage < 600g/m ² pour les éléments très exposés aux risques d'écaillage (cf. fascicule 65 du CCTG version 2016) en classes de gel faible ou modéré et de salage très fréquent ou en classes de gel sévère et de salage fréquent ou très fréquent (a ou b)

	Classes d'exposition	Description de l'environnement	Classe « minimale » du produit (NF EN 1504-3) avec éventuelle exigence complémentaire sur la résistance à la compression minimale (NF EN 12190)	Exigences complémentaires autres que celles couvertes par la classe du produit (NF EN 1504-3)
ATTAQUES CHIMIQUES (Uniquement celles du FD P18-011)	XA1	Environnement à faible agressivité chimique au sens de la NF EN 206/CN	R3 avec Rc > 37 MPa ou R4	Tenue à l'eau de mer selon NF P18-837 (gonflement < 600 microns/m) (c)
	XA3	Environnement à forte agressivité chimique au sens de la NF EN 206/CN	R4 avec Rc > 50 MPa	Tenue à l'eau à haute teneur en sulfates selon NF P18-837 (gonflement < 600 microns/m) (c)

a Les mortiers à base de ciment PM sont réputés résistants à l'eau de mer.
 b Les mortiers à base de ciment ES (ou ciment SR + certification NF) sont réputés résistants à l'eau à haute teneur en sulfates.
 c Pour le choix du ciment et des additions éventuelles, se référer à **FD P18-011** ; en cas de dépassement des seuils d'agressivité définis dans le **FD P18-011**, il convient de justifier la durabilité du mortier dans le milieu considéré au moyen d'une étude spécifique. Dans certains cas de **forte agressivité**, la mise en œuvre d'une protection par revêtement qualifié vis-à-vis des fortes attaques chimiques (**NF EN 13529**) est nécessaire.

Tableau n° 37 : extrait du tableau A 1 de l'annexe A de la norme NF P95-101

En résumé, en fonction de toutes les indications données dans cet article et aux conditions de mise en œuvre et à la technique de mise en place retenue, il appartient au marché de fixer la famille de produits ou système ainsi que les caractéristiques et les performances que doivent présenter ces produits et systèmes, ainsi que les essais complémentaires à éventuellement effectuer.

> Exigences de performance des produits de réparation industriels mis en place par projection :

En s'appuyant sur la norme NF P95-102-1 et sur la catégorie d'inspection 2 pour les travaux non structuraux et celle d'inspection 3 pour les travaux structuraux conformément à l'article 7.2 de la norme NF EN 14487-1, le marché fixe pour le projet de réparation ou de renforcement, voire de protection, les caractéristiques de performance obligatoires.

Les performances sont mesurées sur le matériau projeté, c'est-à-dire selon la technique retenue pour le projet, à l'état frais immédiatement après projection ou à l'état durci.

À l'état durci, les échéances de mesure sont classiquement à 28 jours. En plus des exigences de montée en résistance au jeune âge (jusqu'à 24 h), des exigences à 7 jours (ou à un nombre de jours spécifié) peuvent figurer au marché. Les valeurs à atteindre pour ces échéances complémentaires sont définitivement fixées après les résultats des épreuves de convenance.

Note : l'ajout d'une échéance à 7 jours, par exemple, est recommandé pour améliorer la réactivité en cas de résultats non conformes lors des différentes phases du projet (étude, convenance, exécution des travaux). Se reporter à l'annexe informative G de la norme NF P95-102-1.

Dans le cadre d'un projet particulier, le marché peut fixer des exigences supérieures pour la résistance en compression et l'adhérence (dans des limites réalisables) à celles données dans la dernière colonne du tableau.

Note : les classes de résistance des bétons projetés qui s'appuient sur la norme NF EN 206/CN et/ou le fascicule 65 du CCTG sont des valeurs caractéristiques. Les classes de résistance des mortiers et bétons projetés de réparation qui s'appuient sur la norme NF EN 1504-3 sont des valeurs minimales garanties mesurées en laboratoire, avec des modes opératoires d'essais différents.

Il est nécessaire que le produit utilisé (mortier ou béton) présente, sur le support béton ayant subi une préparation, une adhérence minimale. Seule la norme NF EN 1504-3 fixe des valeurs pour les produits de réparation. La norme NF EN 14487-1, qui vise l'utilisation du béton projeté dans le domaine des réparations et impose le contrôle de l'adhérence, ne fixe aucune valeur. Les valeurs à respecter figurent dans le Tableau n° 38 ci-après.

Caractéristiques de performance	Méthode de renforcement	Méthode de réparation		Méthode de protection				Méthodes d'essai	Compléments
	4.4	3.3	7.2	5.3	6.3	7.1	10.1		
	Renforcement structural par ajout de mortier ou de béton	Restauration du béton par projection de mortier ou de béton	Restauration de la passivité par remplacement du béton contaminé ou carbonaté	Augmentation de la résistance physique par ajout de mortier ou béton	Résistance aux produits chimiques par ajout de mortier ou béton	Restauration de la passivité par augmentation de la couche de béton	Enrobage de l'anode pour application d'un potentiel électrique		
Performances à spécifier pour tous les bétons projetés selon la NF EN 14487-1 :									
Résistance en compression	■	■	■	■	■	■	■	EN 12504-1	Les essais étant réalisés sur des carottes d'éclatement 2 mais de diamètre inférieur aux cylindres de béton coulé, il est nécessaire d'effectuer une correction géométrique des résultats obtenus. Cette correction est définie dans les abaques de l'annexe nationale de la norme NF EN 13791/CN (figure N.A. 1). Le contrat précise les échéances des essais (exemples : 2, 7, 28 jours).
Adhérence au béton support	■	■	■	■	■	■	■	EN 14488-4/IN1/+ A1 ou EN 1542	EN 1542 si épaisseur < 50 mm L'adhérence minimale est fixée à 1,5 MPa pour les réparations structurales et 0,8 MPa pour les réparations non structurales
Module sécant d'élasticité en compression	■	□	□	□				EN 12390-13	La norme d'essai est intitulée « Module de déformation ». Les essais doivent être effectués sur des carottes prélevées après projection.
Développement de la résistance au jeune âge	□	□	□	□	□	□	□	EN 14488-2	Les mesures sont effectuées conformément à la norme NF EN 14488-2 sur une couche de béton projeté d'au moins 100 mm d'épaisseur par enfoncement d'une aiguille (méthode A de 0,2 à 1,2 MPa) ou d'un clou fileté (méthode B de 2 à 16 MPa). L'étalonnage par des mesures de résistance en compression sous presse est obligatoire car cette norme ne permet d'évaluer qu'un durcissement. Lorsque les valeurs de résistance en compression ne permettent pas d'effectuer un carottage, les essais sont réalisés sur des cubes obtenus par sciage de préférence à sec (dimension : 100 x 100 x 100 mm).

Caractéristiques de performance	Méthode de renforcement	Méthode de réparation		Méthode de protection				Méthodes d'essai	Compléments
	4.4	3.3	7.2	5.3	6.3	7.1	10.1		
	Renforcement structural par ajout de mortier ou de béton	Restauration du béton par projection de mortier ou de béton	Restauration de la passivité par remplacement du béton contaminé ou carbonaté	Augmentation de la résistance physique par ajout de mortier ou béton	Résistance aux produits chimiques par ajout de mortier ou béton	Restauration de la passivité par augmentation de la couche de béton	Enrobage de l'anode pour application d'un potentiel électrique		
Performances complémentaires à spécifier pour les bétons fibrés selon la NF EN 14487-1 :									
Résistance à la flexion (au 1^{er} pic, ultime et résiduelle)	□	□	□					EN 14488-3 ou NF EN 14651 + A1	Le recours aux essais de résistance à la flexion (au 1 ^{er} pic, ultime et résiduelle) s'impose lorsqu'on dimensionne la structure suivant le modèle code 2010 et s'applique donc au remplacement ou à l'ajout d'éléments entièrement en béton fibré. En cas d'utilisation de la norme NF EN 14651 + A1, les mesures sont à effectuer sur des éprouvettes prismatiques sciées dans des caisses après projection.
Capacité d'absorption d'énergie	□	□	□					EN 14488-5	Le recours aux essais de capacité d'absorption d'énergie s'impose lorsqu'on veut vérifier la ductilité du béton projeté en l'absence de dimensionnement suivant le modèle-code.
Teneur en fibres	■	■	■	■	■	■	■	EN 14488-7	De préférence, l'essai est à réaliser immédiatement après la projection (méthode B de la norme).

Tableau n° 38 : extrait de la norme NF P95-102-1

Légende :

- : exigence de performance imposée pour **toutes les utilisations prévues** par la norme produit (son respect permet l'obtention du marquage CE) ;
- : exigence de performance pour **certaines utilisations prévues** à imposer au **marché** ;

Dans le cas d'**attaques chimiques sévères** par exemple si le degré d'agressivité du milieu environnant dépasse la **classe XA3**, les mortiers et bétons projetés peuvent recevoir un revêtement de protection adapté comme l'indique le **FD P18-011**. Les essais sur ces revêtements relèvent des **normes NF EN 13529** et **NF EN ISO 2812-1**.

4.2.5.2.3.4 Deuxième phase – Cas des produits de type 2 (mortiers ou bétons) fabriqués en centrale ou sur le chantier conformes aux dispositions de la norme NF EN 206/CN ou au fascicule 65 du CCTG et des mortiers et bétons industriels assimilés ne relevant du marquage CE.

> Généralités :

Rappel : les produits assimilés sont des **produits industriels** qui s'appuient sur la **norme NF EN 206/CN** et/ou sur les normes relatives au béton projeté (**NF EN 14487-1 et 2** et **NF P95-102-1**) mais, s'ils ne font pas référence à la **norme NF EN 1504-3**, ils ne peuvent être considérés comme des **produits de réparation**. Ils doivent être considérés comme des **produits de type 2**.

L'utilisation de produits de type 2 pour des réparations superficielles n'est envisageable que si les surfaces à traiter et les volumes à mettre en œuvre sont importants (remplacement du béton carbonaté ou pollué avec reconstitution de l'enrobage des armatures de tout ou partie d'une structure). Pour des réparations localisées, les **produits de type 1** sont mieux adaptés (efficacité – coût – délais).

Il appartient tout d'abord au marché de choisir le texte de référence, à savoir la **norme NF EN 206/CN**, ou le **fascicule 65 du CCTG**. En effet, dans ces deux documents des tableaux donnent des règles de composition d'un béton adaptées aux **classes d'exposition** d'un ouvrage mais pour des **durées d'utilisation de projet différentes** (50 ans pour la norme et 100 ans pour le fascicule).

Ces mortiers ou bétons devant être utilisés dans des **travaux de réparation**, il est indispensable qu'ils satisfassent en outre aux essais pertinents applicables aux produits relevant de la **norme NF EN 1504-3** en particulier **l'adhérence au béton support** (se reporter au Tableau n° 35 et au Tableau n° 36 susvisé et au tableau B1 de l'annexe B de cette norme) et de la **norme NF P95-101** (se reporter au tableau A1 de l'annexe A de cette norme).

Si ces mortiers sont mis en œuvre par projection, ils doivent en outre, satisfaire aux **normes NF EN 14487-1, NF EN 14487-21 et NF P95-102-1** (en révision).

Dans son introduction, la **norme NF EN 206/CN** précise que si le béton est **conforme aux valeurs limites spécifiées**, le béton dans la structure est présumé satisfaire aux exigences de **durabilité** pour l'utilisation prévue dans les **conditions d'environnement spécifiques** dans la mesure où :

- les classes d'exposition ont été correctement sélectionnées ;
- l'épaisseur minimale d'enrobage des armatures requise dans la norme de calcul est respectée (Eurocode 2 partie 1) ;
- le béton est correctement mis œuvre conformément aux normes en vigueur ;
- la maintenance appropriée est réalisée

ATTENTION, pour cette norme, la **durée d'utilisation prévue au projet** est de **50 ans**.

La simple référence à cette **norme NF EN 206/CN** dans le **marché** ne suffit pas pour obtenir un béton capable de satisfaire aux objectifs d'une **réparation efficace et durable** et ce pour les principales raisons suivantes :

- **la norme vise trois types de bétons entre lesquels il faut donc choisir :**
 - **les bétons à composition prescrite (BCP)**, béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur. C'est le cas courant des bétons de génie civil visés par le fascicule 65 du CCTG ;
 - **les bétons à propriétés spécifiées (BPS)**, béton pour lequel les propriétés requises et les éventuelles caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur ;
 - **les bétons à composition prescrite dans une norme (BCPN)**, qui concernent les ouvrages de bâtiment de faible importance R +2 (cf. la norme NF DTU 21) ;

Si la formulation du béton (BCP ou BPS) résulte d'une **étude préliminaire** réalisée sous la responsabilité du **prescripteur**, le béton est désigné sous le vocable : **béton d'ingénierie**. Ce peut être le cas des **bétons dits performantiels** à cause de la durée de l'étude de formulation.

Note : en réparation dans le domaine des ouvrages d'art, seuls les **BPS** et les **BCP** sont à retenir.

■ **cas des bétons BCP** : les spécifications du béton sont à rédiger en s'appuyant sur l'article 6.3 de la norme qui traite :

Note : les listes du présent **GUIDE** ne sont pas aussi développées que dans la norme à laquelle il convient de se reporter. Seules les caractéristiques principales ont été listées.

- des données de base comme :
 - la conformité à la présente norme,
 - la classe d'exposition aux effets de l'environnement,
 - la classe de résistance à la compression minimale à 28 jours...,
 - le type de ciment et sa classe de performance,
 - la teneur cible en ciment,
 - etc.
- des données complémentaires comme :
 - l'origine de certains constituants,
 - la température de béton frais,
 - des exigences techniques particulières (mise en place par projection),
 - etc.

Dans le cas où le marché s'appuie sur le **fascicule 65 du CCTG**, pour lequel la **durée d'utilisation est de 100 ans**, la liste des données est utilisable mais les valeurs numériques à fixer sont différentes.

■ **cas des bétons BPS** : les spécifications du béton sont à rédiger en s'appuyant sur l'article 6.2 de la norme qui traite :

- des données de base comme :
 - la conformité à la présente norme,
 - la classe d'exposition aux effets de l'environnement,
 - la classe de résistance à la compression,
 - la classe de consistance,
 - etc.
- des données complémentaires comme :
 - l'origine de certains constituants (types ou classes de ciment),
 - le teneur minimale en fibres...,
 - les caractéristiques exigées vis-à-vis du gel/dégel (teneur en air ou résistance aux essais),
 - le dégagement de chaleur lors de la prise,
 - la résistance à l'abrasion et aux chocs,
 - etc.

Dans le cas le marché s'appuie sur le **fascicule 65 du CCTG**, pour lequel la **durée d'utilisation est de 100 ans**, la liste des données est utilisable avec les **spécifications** du fascicule.

> **Exigences de durabilité concernant la formulation des produits :**

Comme pour les **produits de réparation industriels**, la **composition des produits de type 2** doit satisfaire aux **exigences** suivantes pour prévenir toute attaque chimique interne et toute réaction de gonflement (se reporter à la **norme NF EN 206/CN** ou au **fascicule 65 du CCTG**) :

- teneur en chlorures libres ;
- teneur en sulfures ;
- alcali-Réaction ;
- réaction sulfatique interne.

Les réactions de gonflement interne est prise en compte dans la norme NF EN 206/CN comme dans le **fascicule 65 du CCTG** mais les références normatives ne sont plus à jour. Le texte ci-dessous tient compte des dernières modifications normatives.

1. Cas de réaction alcali-granulats :

Les dispositions préventives applicables sont présentées dans les **fascicules de documentation FD P18-464 et FD P18-541**. Le fascicule de documentation **FD P18-464** fait référence :

- au fascicule de documentation FD P18-542 de novembre 2017 : Granulats – Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction. Ce dernier s'appuyant sur la norme expérimentale XP P18-594 de juillet 2015 : Granulats – Méthodes d'essai de réactivité,
- à la norme expérimentale **XP P18-543** : de novembre 2017 : Granulats - Étude pétrographique des granulats appliqués à l'alcali-réaction,
- à la norme expérimentale **XP P18-544** : de juin 2015 : Granulats - Déterminer les alcalins solubles dans l'eau de chaux,
- à la norme **NF P18-454** et au fascicule de documentation **FD P18-456** pour l'essai de performance et l'interprétation de ses résultats.

2. Cas de la réaction sulfatique interne :

La norme NF EN 206/CN, comme le **fascicule 65 du CCTG**, fait référence aux **recommandations provisoires du LCPC de 2007**, elle n'est donc plus à jour. Il convient donc dans un **marché** de viser les **Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne de l'IFSTTAR de 2017** et des trois classes d'exposition à l'eau (XH).

> Exigences de durabilité vis-à-vis des classes d'exposition :

Les produits de type 2 peuvent être soumis à diverses agressions physiques ou chimiques :

- le gel/dégel (écaillage et gel à cœur),
- la carbonatation,
- les chlorures et leurs origines,
- les attaques chimiques (eaux à haute-teneur en sulfates, eau de mer),
- etc.

Les dispositions de la norme NF EN 206/CN et/ou du fascicule 65 du CCTG s'appliquent.

Dans le cas où le projet s'appuie sur une **démarche performantielle**, ce sont les dispositions du **fascicule 65 du CCTG** qui s'imposent.

> Exigences de performances mécaniques :

En fonction des particularités du **projet**, le **marché** fixe :

- **la résistance à la compression minimale** que doit avoir le béton de réparation (en adéquation avec celle du béton support). Il s'agit des **résistances classiques** à 7 et 28 jours, voire des **résistances au jeune ou très jeune âge**. Dans le cas d'une **mise en place par projection**, les mesures sont effectuées sur le produit après projection et durci ;
- **le module d'élasticité** que doit avoir le béton de réparation (en adéquation avec celle du béton support) ;
- **l'adhérence minimale** que doit présenter le béton de réparation (il s'agit ici d'une exigence liée directement à la réparation conformément à la **norme NF EN 1504-3**). Elle est limitée à la valeur de la cohésion superficielle de béton support mesurée lors d'un essai d'arrachement) ;
- **la limitation du retrait** afin de limiter les risques de fissuration ;
- la nécessité d'une tenue à **l'érosion et aux chocs** (normes CNR) ;
- **les conditions de mise en œuvre** du produit sur des surfaces, horizontales, verticales, inclinées, au plafond ;

- **les techniques prévues pour la mise en œuvre** (manuelle ou mécanique avec des dispositions particulières en cas de projection puisque les caractéristiques du béton avant et après projection sont différentes) ;
- etc.

Dans le cas où les **produits de type 2** doivent, une fois durcis, participer à la **reprise des sollicitations** (charges d'exploitation seules ou charges permanentes et d'exploitation), le **marché** fixe les **opérations connexes** nécessaires (mise sur cintre, vérinage ...).

Il est possible, dans ce cas, **de compter sur la participation des armatures existantes ou ajoutées pour équilibrer la part des sollicitations** qui transite par la réparation. Il est également important d'avoir une excellente adhérence entre le béton existant et le produit et système de réparation pour éviter des décollements, des feuilletages, des fissurations préjudiciables à la durabilité de la réparation et à la préservation de la passivité des armatures. Une amélioration de l'adhérence peut être obtenue par encollage ou par injection de résines de l'interface entre le béton existant et le produit et système de réparation.

> Exigences de performance des produits de type 2 mis en place par projection :

Les dispositions développées dans l'article 4.2.5.2.3.3 ci-dessus consacré aux **produits de type 1** s'appliquent aux **produits de type 2**. Elles sont rappelées ci-dessous.

Le **marché** fixe pour le **projet** de réparation ou de renforcement, voire de protection, les **caractéristiques de performance mécanique** obligatoires. Il s'appuie sur la **norme NF P95-102-1** et sur la **catégorie d'inspection 2** pour les **travaux non structuraux** et celle d'**inspection 3** pour les **travaux structuraux** conformément à l'article 7.2 de la **norme NF EN 14487-1**,

Les performances sont mesurées sur le matériau projeté, c'est-à-dire selon la technique retenue pour le projet, à l'état frais immédiatement après projection ou à l'état durci.

À l'état durci, les échéances de mesure sont classiquement à 28 jours. En plus des exigences de montée en résistance au jeune âge (jusqu'à 24 h), des exigences à 7 jours (ou à un nombre de jours spécifique) peuvent figurer au **marché**. Les valeurs à atteindre pour ces échéances complémentaires sont définitivement fixées après les résultats des épreuves de convenue.

Note : l'ajout d'une échéance à 7 jours, par exemple, est recommandé pour améliorer la réactivité en cas de résultats non conformes lors des différentes phases du projet (étude, convenue, exécution des travaux). Se reporter à l'annexe informative G de la **norme NF P95-102-1**.

Dans le cadre d'un projet particulier, le **marché** peut fixer des exigences supérieures pour la résistance en compression et l'adhérence (dans des limites réalisables) à celles données dans la dernière colonne du tableau.

Note : les classes de résistance des bétons projetés qui s'appuient sur la **norme NF EN 206/CN** et/ou le **fascicule 65 du CCTG** sont des valeurs caractéristiques. Les classes de résistance des mortiers et bétons projetés de réparation qui s'appuient sur la **norme NF EN 1504-3** sont des valeurs minimales garanties mesurées en laboratoire, avec des modes opératoires d'essais différents.

Il est nécessaire que le produit utilisé (mortier ou béton) présente, sur le support béton ayant subi une préparation, une **adhérence minimale**. Seule la **norme NF EN 1504-3** fixe des valeurs pour les produits de réparation. La **norme NF EN 14487-1**, qui vise l'utilisation du béton projeté dans le domaine des réparations et impose le contrôle de l'adhérence, ne fixe aucune valeur. Les valeurs à respecter figurent dans le Tableau n° 38 ci-devant qui s'applique aux **produits de type 2**.

4.2.5.2.3.5 Réparations et/ou renforcements de bétons non-courants et utilisation lors de réparations et/ou renforcements de mortiers ou bétons non-courants

Une réparation et/ou un renforcement peut concerner des **mortiers** ou **bétons non-courants** ou utiliser, pour la réparation ou le renforcement, des **mortiers** ou **bétons non-courants** à savoir :

- Des bétons autoplaçants (BAP) :



Photo n° 127 : recommandations de L'AFGC pour l'emploi des BAP de janvier 2008 (crédit photo AFGC)

L'AFGC avait fait paraître en janvier 2008 des **recommandations sur l'emploi des bétons autoplaçants** (disponibles sur le site de l'association). Depuis les **BAP** sont traités en détail par la norme NF EN 206/CN, ainsi que par le **fascicule 65 du CCTG**, deux textes auxquels il convient de se reporter.

- **Des bétons à haute-performances (BHP) :**

La norme NF EN 206/CN vise les bétons jusqu'à la classe de résistance à la **compression C100/115**. Les bétons sont considérés comme des **BHP** si leur résistance à la compression atteint ou dépasse les 50 MPa. Il faut aussi se reporter au **chapitre 8 du fascicule 65 du CCTG** qui traite de ces bétons.

Note : la résistance aux effets du gel/dégel peut être obtenue sans l'usage d'un entraîneur d'air si la résistance du BHP dépasse les 60 MPa.

Note : certains **produits de type 1 de classe 4 (≥ 45 MPa)** ont des performances nettement plus élevées, ils pourraient être utilisés à condition que le **fabricant** fournisse les résultats des essais de résistance à la compression.

- **Des bétons légers :**

La norme NF EN 206/CN vise les bétons légers jusqu'à la classe de résistance à la **compression C80/88**. Il faut aussi se reporter au **chapitre 8 du fascicule 65 du CCTG** qui traite des bétons.

- **Des bétons fibrés :**

La norme NF EN 206/CN traite des bétons contenant des fibres métalliques ou en polymères en quantité plus ou moins importante de façon à obtenir des bétons capables de supporter des efforts de compression et de traction. La **norme NF P95-102-1**, relative au béton projeté utilisé en réparation, fixe également les performances de tels bétons. Se reporter aux articles ci-devant relatifs aux produits des types 1 et 2.

■ **Des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) :**

De tels bétons ont essentiellement été utilisés, soit pour **construire de nouveaux ouvrages**, soit pour **renforcer des structures en béton précontraint**. Ils peuvent être utilisés comme un **revêtement de protection**. Quelques exemples sont développés ci-après.

Les premières **recommandations de l'AFGC** sont parues en janvier 2002. Elles ont fait l'objet d'un **complément en mars 2003** et d'une **révision en juin 2013**.



Photo n° 128 : guide de l'AFGC sur les BFUP de janvier 2002 (crédit photo AFGC)

La norme NF EN 206/CN traite des bétons fibrés mais pas des **BFUP**. Le **fascicule 65 du CCTG** vise les **BFUP** mais se contente de renvoyer aux **recommandations de l'AFGC de 2013**.

Le texte qui suit fait le point sur :

- le contexte normatif ;
- les principales caractéristiques de ces bétons ;
- des références de réparations et de renforcements ;

1. **Contexte normatif : les BFUP** utilisés pour du renforcement, de la protection ou de la réparation doivent être conformes aux normes :

- **NF P18-470 de juillet 2016** : Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécification, performance, production et conformité ;
- **NF 18-710 d'avril 2016** : Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) ;
- **NF P18-451 de décembre 2018** : Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUP.

Les BFUP sont des **bétons d'ingénierie** prescrits par une **approche performantielle** détaillée dans la **norme NF P18-470** et dans les documents de bonne prescription des bétons disponibles en libre accès sur le site de l'**AFGC**.

2. **Principales caractéristiques des BFUP :**

- **les BFUP** sont des matériaux dont la matrice cimentaire a été optimisée afin d'atteindre des niveaux de performances supérieurs (classe de résistance en compression entre 130 et 250 MPa) et une durabilité améliorée. Ils ne comportent aucun granulats grossier et disposent ainsi d'une matrice cimentaire fine et très homogène. Les BFUP sont également caractérisés par un ratio eau/ciment réduit (aux alentours de 0.2) et par la présence de fibres en quantité importante ;

- **les BFUP** ont un coût élevé, aussi, ils sont, le plus souvent, mis en œuvre en faibles quantités.
- Leurs performances mécaniques et de durabilité les rendent bien adaptés :
 - au renforcement d'ouvrages (résistance caractéristique à la compression minimale de 130 MPa, limite élastique caractéristique en traction minimale de 6 MPa et Module d'Young aux alentours de 45 GPa),
 - à la protection des ouvrages (porosité à l'eau < 9%, perméabilité aux gaz < 9.10^{-19} m^2 , pénétrations des ions chlorures < $5.10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, insensibilité aux cycles gel/dégel) vis-à-vis des agressions extérieures,
- **les BFUP** disposent :
 - d'une excellente adhérence aux bétons support rugueux ne nécessitant pas de primaire d'accroche. Ils peuvent être appliqués en faibles épaisseurs (de 25 à 100 mm),
 - d'une résistance à l'abrasion et aux chocs importante dont le niveau de réponse peut être spécifié par l'annexe I de la **norme NF P18-470**,
 - d'une résistance à jeune âge dépassant généralement les 80 MPa à 24 h permettant la réouverture anticipée des ouvrages,
 - d'une flexibilité dans la mise en œuvre avec la prescription de consistances génériques ou cibles permettant l'application manuelle, par pompage, ou par injection et sur des surfaces planes comme inclinées.
- **les BFUP** disposent également d'une quantité importante de fibres métalliques (entre 150 kg/m³ jusqu'à 300 kg/m³). Ce matériau une fois en place est relativement armé et permet :
 - la reprise consécutive d'efforts (l'effort tranchant notamment),
 - la réduction des longueurs d'ancrage et de recouvrement (de l'ordre de 8 fois le diamètre de la barre),
 - la réduction de la quantité d'armatures de BA à mettre en place,

Les BFUP peuvent donc être recommandés pour le traitement des défauts et dégradations suivants :

- porosité excessive entraînant une carbonatation ;
- usure superficielle du béton (abrasion, érosion) ;
- dégradation superficielle du béton due à l'environnement ;
- éclatement du béton avec armatures apparentes ou non ;
- protection des ouvrages soumis aux sels de déverglaçage et chlorures marins.

Le tableau ci-après donne les exigences du **fascicule 65 du CCTG** en matière de **porosité**, **perméabilité** et de **diffusion des chlorures**. Ce tableau montre que les **BFUP** peuvent être utilisés quasiment pour toutes les **classes d'exposition**, seules les **classes XD3 et XS3** nécessitent des formulations plus élaborées.

Tableau 8.D – Valeurs maximales des indicateurs de durabilité sans réduction d'enrobage

	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
$P_{\text{eau } 90} (\%)$	15,5	15,5	15	14,5	14	14	13
$K_{\text{gaz } 90} (10^{-18} \text{ m}^2)$	-	-	200	200	-	-	200
$D_{\text{app } 90} (10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	-	-	-	-	7	7	3,5

$P_{\text{eau } 90}$: Porosité accessible à l'eau par absorption sous vide mesurée selon la norme NF P 18-459, exprimée en %.

$K_{\text{gaz } 90}$: Perméabilité apparente au gaz mesurée selon la norme XP P 18-463 après séchage complet, exprimée 10^{-18} m^2 .

$D_{\text{app } 90}$: Coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré selon la norme XP P 18-462, exprimé en $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tableau n° 39 : tableau extrait du fascicule 65 du CCTG

3. Exemple de réparations et renforcements à base de BFUP :

Références marquantes et non exhaustives des applications de BFUP en France et à l'étranger depuis 2008 concernant la réparation des ouvrages d'art :

■ **clavetages d'éléments préfabriqués pour tablier de pont en béton (plus de 200 références aux États-Unis (FHWA-HRT-14-084)),**

- étanchéité de ponts en Suisse (plus de 100 références depuis 2013 (SIA2052)),
- blocs d'ancrage de précontrainte additionnelle (pont sur l'Huisne au Mans),
- renforcement d'un tablier à dalle orthotrope (tablier du pont de l'Ilzsch en 2011, pont levant de l'Usine Marémotrice de la Rance en 2015),
- dalles de couverture de tabliers de faible épaisseur (tablier des Ponts de Thouaré sur Loire en 2017, ouvrage d'Harel de la Noë à Saint-Brieuc) ;

■ **Ouvrages Hydrauliques concernés par des problèmes d'abrasion hydraulique et de chocs, voire de cavitation :**

- barrage de Caderousse (CNR) en 2015,
- canal Saint Bernard en 2016,
- galerie de déchargement du barrage de Génissiat (CNR) en 2018 (cavitation),
- canal de l'Isère à Val d'Isère en 2018 (mise en service de l'ouvrage en 1960) ;

■ **Ouvrages Maritimes :**

- renforcement de la tourelle du Cabon dans le Morbihan par une couche de 6 cm de BFUP coulé pour la Division des Phares et Balises en 2013,
- renforcement de la tourelle de mer à Houteliguët à l'île d'Houat par le même procédé en 2017.

La suite du présent GUIDE ne traite pas du choix des matériaux et de la fabrication du BFUP pas plus que de sa mise en œuvre ni des contrôles pendant et après sa mise en œuvre. Se reporter aux textes visés dans le présent article.

4.2.5.3 Choix des produits et systèmes de collage structural des bétons



Photo n° 129 : encollage avant pose de tissus en composites
(crédit photo Freyssinet)

Les produits et systèmes de collage structural concernent :

- le collage de béton durci sur béton durci ;
- le collage de béton frais sur béton durci ;
- le collage de plaques (en acier, en composites ou pultrudés) à la surface d'un béton.

Note : *la norme européenne semble avoir oublié le **collage de tissus composites** !*

Les produits et systèmes de collage structural peuvent être mis en œuvre :

- manuellement :
- mécaniquement :
 - par projection,
 - par injection...

La mise en œuvre d'un produit ou d'un système de collage n'est pas forcément nécessaire lors des travaux de réparation ou de renforcement d'une structure en béton. En effet :

- les produits et systèmes de réparation visés par la **norme NF EN 1504-3** peuvent présenter des niveaux d'adhérence suffisants à l'interface structure réparation ;
- les produits et systèmes de collage peuvent être nuisibles à l'adhérence, par exemple dans le cas des bétons mis en place par projection ;
- le coulage d'un béton frais au niveau d'un béton durci en réparation ne nécessite pas nécessairement un encollage de la reprise la surface de reprise si celle-ci est traversée par des armatures de couture en quantité suffisante ou précontrainte par des armatures actives additionnelles, sous réserve que la surface de reprise soit traitée suivant les règles de l'art²⁷ ;

La réalisation d'un collage structural s'avère nécessaire, par exemple, juste avant le coulage du béton lors du renforcement d'une dalle par un béton contrecollé ou lorsqu'une fissure de retrait peut se produire le long d'une reprise de bétonnage et doit être traitée par une injection. Dans de tels cas, le produit ou le système utilisé doit satisfaire aux exigences du **marché**, qui vise les exigences applicables de la **norme NF EN 1504-4 de mars 2005** (Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 4 : collage structural) en fonction **des utilisations prévues** par celle-ci.

Suivant le type de collage (renforcement par plaque collée ou mortier ou béton collé), la **position de la réparation** (sur une surface horizontale ou verticale, au plafond), les **conditions thermiques**, l'**humidité du support**, la **tenue au feu...**, le produit ou le système devra satisfaire à des **exigences de performances communes** pour **toutes les utilisations prévues** (marquées par « ■ ») et, en plus, à des **exigences de performances particulières** pour **certaines utilisations prévues** dans la norme (marquées par □ « »). Ces exigences figurent dans le tableau ci-dessous extrait de la norme.

²⁷ Se reporter au document édité par le CEBTP, la FFB et le Sétra intitulé : *recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage (2000)*.

Caractéristiques de performances	Principe de réparation à satisfaire 4 (renforcement structural)	
	Renforcement par plaques collées (méthode de réparation 4.3) (1)	Mortier ou béton collé (méthode de réparation 4.4) (2)
1. Aptitude à l'application : a) sur des surfaces verticales ou des sous-faces b) par-dessus des surfaces horizontales (auto-lissant) c) par injection	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2. Aptitude à l'application et au durcissement dans les conditions ambiantes particulières suivantes : a) températures basses ou élevées (3) b) substrat humide	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
3. Adhérence : a) plaque sur plaque b) plaque sur béton c) acier protégé contre la corrosion sur acier protégé contre la corrosion (4) d) acier protégé contre la corrosion sur béton(4) e) béton durci sur béton durci f) béton frais sur béton durci (5)	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Sans objet Sans objet Sans objet Sans objet <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
4. durabilité d'un système composite : a) cycles thermiques b) cycles d'humidité	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
5. Caractéristiques des matériaux pour le concepteur : a) temps ouvert (5) et (6) b) durée pratique d'utilisation normale (6) c) module d'élasticité en compression d) module d'élasticité en flexion e) résistance à la compression f) résistance au cisaillement g) température de transition vitreuse (*) h) coefficient de dilatation thermique i) retrait	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>

Tableau n° 40 : extrait de la norme EN 1504-4

Notes :

- (1) méthode de réparation conforme à la norme NF EN 1504-9. Il est vraisemblable que l'utilisation de plaques en acier inoxydable ne permet pas d'obtenir une liaison acceptable ;
- (2) méthode de réparation conforme à la norme NF EN 1504-9. Collage de béton durci sur béton durci associé à l'utilisation d'éléments préfabriqués ou collage de béton frais sur béton durci faisant partie intégrante de la structure, les trois éléments constituant une nouvelle structure. ;
- (3) le fabricant peut spécifier des températures pour l'utilisation prévue ;
- (4) dans ce contexte, la protection contre la corrosion implique l'application sur l'acier d'une couche de revêtement primaire anticorrosion ;
- (5) non applicable aux techniques par injection ;
- (6) au minimum températures d'application normale et maximale ;

(*) : Cette température doit être nettement supérieure à la température ambiante maximale de la structure en service. La mise en œuvre d'une protection thermique peut être nécessaire.

Il appartient au marché de fixer les exigences de performances et les niveaux des attestations de conformité nécessaires en fonction de l'usage prévu et de la mise en œuvre.

Pour ce faire, il est indispensable de s'appuyer sur le tableau précédent ainsi que sur les tableaux 3.1 (exigences de performances pour un renforcement par plaque collée) et 3.2 (exigences de performances pour le produit de collage du mortier ou béton collé) de la norme.

Si l'utilisation n'est pas prévue par ces tableaux ou si certains niveaux de performance de la norme ne conviennent pas, il appartient au marché de fixer les essais spécifiques à effectuer lors de l'épreuve d'étude. C'est le cas, par exemple, des deux applications particulières visées par l'annexe informative A :

- *fatigue sous chargement dynamique pendant le durcissement (cf. la norme NF EN 13894-1 de février 2004 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la fatigue sous charge dynamique Partie 1 : pendant le durcissement) ;*
- *fatigue sous chargement dynamique après le durcissement (cf. la norme NF EN 13894-2 d'avril 2003 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai Détermination de la fatigue sous charge dynamique Partie 2 : après durcissement) ;*

Note : ces deux points concernent tout particulièrement le renforcement par plaques collées.

4.2.5.4 Choix des produits et systèmes d'injection de l'interface entre le produit de réparation et le béton support

Se reporter à l'article 4.2.5.6 ci-dessous

4.2.5.5 Choix des produits et systèmes d'injection ou de remplissage des fissures ou des vides du béton

Se reporter à la partie 5 de la norme NF EN 1504-5 (Produits et systèmes d'injection du béton), à la norme NF P 95-103 et au guide FABEM 3.

ATTENTION, la norme NF P95-103 vise la norme NF EN 1504-5 de 2006 et non celle de 2013. Le nombre des modifications est peu important. Par exemple :

- performances des produits de **type F** : ajout de la résistance en compression et suppression de la variation volumique remplacée par la détermination de l'extrait sec ;
- performances des produits de **type D** : suppression du taux et évolution de l'expansion
- modification partielle de l'annexe B informative.

4.2.5.6 Choix des produits et systèmes de scellement des armatures de béton armé

4.2.5.6.1 Généralités

La réalisation du scellement d'armatures en acier rapportées est développée dans les guides FABEM 7 (cas des ouvrages en béton) et FABEM 6 (cas des ouvrages en maçonnerie). Le choix et la mise en œuvre des produits et systèmes de scellement sont traités par le présent GUIDE qui apporte des **compléments très importants** aux deux guides susvisés.

Les produits de scellement d'armatures rapportées « **performants** » peuvent atteindre les **mêmes valeurs de contrainte ultime d'adhérence** et avec le **même coefficient de sécurité** que les barres d'armatures enrobées dans un béton coulé en place dans le cadre d'un calcul selon l'**Eurocode 2 partie 1.1**.

Quatre modes de rupture peuvent être obtenus lors d'un essai d'arrachement d'une barre de BA scellée dans un trou foré dans un béton existant :

1. rupture de la barre ;
2. glissement de la barre dans le scellement ;
3. glissement de la barre et du produit de scellement d'ancrage du scellement dans le béton ;
4. rupture dans le produit de scellement (rupture difficile à identifier).

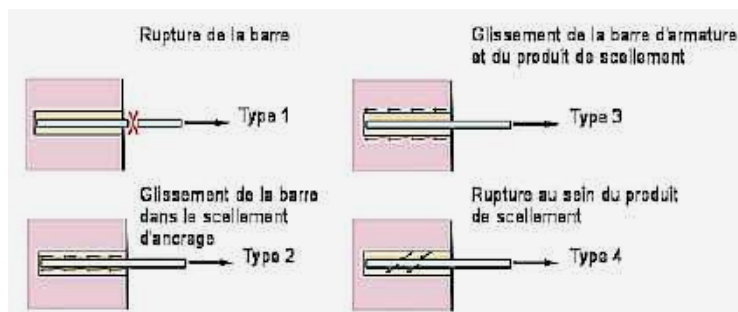


Figure n° 67 : les quatre modes de rupture pouvant être obtenus lors d'un essai d'arrachement

Les essais d'arrachement d'une barre de BA scellée peuvent être **confinés ou non**. Dans le cas du **confinement**, la rupture par arrachement d'un cône de béton n'est pas possible.

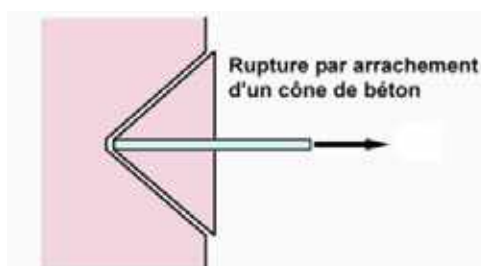


Figure n° 68 : rupture par arrachement d'un cône de béton (essai non confiné)

Pour information, deux théories existent sur le scellement des barres d'armatures :

- la **conception béton armé** conformément à l'**Eurocode 2** et au **rapport technique 23 (TR 23)** dans laquelle l'ancrage des barres est basé sur le transfert des efforts sur les armatures voisines avec un mode de rupture par éclatement imposant la nécessité d'armatures de coutures transversales ;
- la **théorie chevilles**, qui figure dans le **guide d'agrément technique européen (ETAG 001)** et dans le **rapport technique (TR 029)**, est basée sur des essais sur des dalles en béton non-armé avec l'hypothèse d'un transfert de charge sur le béton sous forme de traction obliques. Les règles de distances au bord des éléments en béton et d'entraxe entre les chevilles sont basées sur un mode de rupture de type cône. Cette théorie peut être utilisée pour le scellement des armatures longitudinales d'un poteau soumis à une compression simple ou le scellement des armatures d'un élément supportant uniquement un effort de cisaillement.



Figure n° 69 : les trois textes (ETAG 001 – TR23 – DÉE 330087-00-0601)

4.2.5.6.2 Les textes de référence et leurs incohérences

Le présent article concerne uniquement le scellement de barres d'armatures suivant la conception béton armé. Il s'appuie sur les trois textes suivants :

- la norme harmonisée **NF EN 1504-6** ;
- les Documents d'Évaluation Européen **DÉE n°33087-00-0601** et **331522-00-0601** (le second **DÉE** concerne les scellements soumis à des actions sismiques) ;
- le fascicule de documentation **FD P18-823** : recommandations pour la conception et le dimensionnement des scellements de barres d'armature dans le béton armé et précontraint.

> Norme harmonisée **NF EN 1504-6**

La norme harmonisée **NF EN 1504-6**, pour valider un produit de scellement, se base essentiellement sur un essai d'arrachement confiné (sans risque de rupture par arrachement d'un cône de béton) conformément à la norme d'essai **NF EN 1881**.

L'essai d'arrachement n'est pas réalisé jusqu'à rupture comme le prévoit la **norme NF EN 1881**, en effet, la force de traction est limitée à 75 kN mais le déplacement de la barre ne doit pas dépasser 0,6 mm.

Compte tenu des dispositions de cette norme, s'imposent les principales observations suivantes :

- a) Lors de l'essai, la contrainte subie par l'armature est nettement inférieure à la contrainte limite de calcul aux états limites ultimes relevant des règles de la section 8 de l'Eurocode 2 partie 1 traitant de l'ancrage et du recouvrement des barres et armatures de béton mais également à la contrainte limite de calcul aux états limites de service. Il est donc possible qu'un scellement fortement sollicité présente une sécurité insuffisante ;
- b) Les essais sont effectués sur une éprouvette en béton de classe élevée, qu'en est-il dans un béton de faible résistance, voire fissuré ?
- c) La tenue du produit de scellement aux effets du gel/dégel n'est pas prévue ;
- d) La résistance du produit de scellement à certains agents agressifs comme l'eau de mer et les eaux à haute teneur en sulfates n'est pas prévue ;
- e) Les températures minimales et maximales de mise en œuvre ne sont pas évaluées ;
- f) Les actions sismiques ne sont pas prises en compte ;
- g) Etc.

> **DÉE n°33087-00-0601** et **331522-00-0601** :

En 2006 est paru un guide sur l'agrément technique des chevilles métalliques ancrées dans le béton, lequel traite aussi des **chevilles métalliques scellées** dans des trous forés dans le béton sous forme de barres filetées avec un produit de scellement à base de polymères : le **GATE 001 (ETAG 001)**. Dans sa partie 5-1-2, ce guide traitait aussi du scellement des armatures de béton armé rapportées en se basant sur le **rapport technique O23 (TR O23)** de 2006 également.

Ce guide imposait un programme d'essais beaucoup plus développé que celui de la **norme NF EN 1504-6**.

Parmi les différents critères de validation d'un produit de scellement, il y a lieu de noter l'**essai à rupture** avec la détermination de la **courbe allongements/contraintes** et de la **contrainte d'adhérence** de la barre de béton armé.

Si les essais sur un produit de scellement étaient validés, la longueur de scellement des barres et armatures de béton armé pouvait être calculée avec les **règles de l'Eurocode 2 partie 1 (EN 1992-1-1)** comme si la barre ou l'armature avait été enrobée dans un béton coulé en place. Dans le cas contraire, une minoration de l'effort était nécessaire.

Depuis sa parution en 2013, le **Règlement Produits de Construction (RPC)** autorise dans son article 19 un fabricant d'un produit de construction à demander pour un de ses produits une **évaluation technique européenne** auprès de l'**Organisme Européen d'Agrément Technique (EOTA)** dans le cas où ce produit et ces usages ne sont pas totalement couverts par une norme harmonisée

Une telle demande a été formulée par des **producteurs de produits de scellement à base de polymères**, (résines) qui sont également utilisés pour réaliser des **chevilles scellées (barres filetées)**. L'**Organisme Européen d'Agrément Technique** a donc élaboré les **DÉE n° 330087-00-0601** et **n°331522-00-0601**.

> Conclusions :

La norme harmonisée **NF EN 1504-6** qui relève du **Comité Européen de Normalisation (CEN)** et le **DÉE n° 330087-00-0601** qui relève de l'**EOTA** se trouvent en contradiction. D'où la nécessité de la révision de la **norme 1504-6**, qui est en cours : elle devrait suivre une démarche proche de celle du **DÉE**. Le guide **FD P18-823** faisant référence à cette norme devra donc être révisé.

Ce guide a subi une **première révision** en avril 2020 avec l'introduction d'un avant-propos qui limitait la contrainte dans la barre ou l'armature de béton armé mais sans adapter le corps du texte.

La date de parution de la norme n'étant pas encore connue, une **seconde révision du guide** était donc impérative pour assurer la sécurité des scellements sachant qu'une **troisième révision** sera obligatoire lors de la sortie de la norme.

4.2.5.6.3 Le marquage CE des produits de scellement

Les **produits de scellement** peuvent bénéficier du **marquage CE** s'ils satisfont aux exigences :

1. soit de la **norme NF EN 1504-6**. Cette norme relève du **mandat M/128**.
2. soit du **DÉE (EAD) 330087-00-0601** de mai 2018 qui a remplacé la **partie 5.1.2 de l'ETAG 001** ;
3. soit du **DÉE (EAD) 33152200-0601** (en cours de validation).

En outre, certains de ces produits peuvent bénéficier de la **marque NF 030** qui s'appuie sur les **normes NF EN 1504-6 et NF EN 1881**. Par rapport aux normes susvisées, le **référentiel de certification NF** a été enrichi comme suit :

- **les armatures de BA de type HA doivent être conformes à la norme NF A35-080-1 de mai 2020 : Aciers pour béton armé - Aciers soudables - Partie 1 : barres et couronnes (surface des verrous) ;**
- **le diamètre du trou de forage est fixé à 30 mm ;**
- **les moyens de forage (foreuse à roto-percussion ou diamant) sont proposés par le fabricant ;**
- **trois orientations pour le scellement (vertical, horizontal et au plafond) et trois pour le support (plancher, mur et plafond) sont proposées au choix du fabricant ;**
- **des tests optionnels de durabilité à l'eau de mer et aux sulfates peuvent être effectués à la demande du fabricant.**

Note : l'effort d'arrachement n'est pas modifié, c'est celui « **insuffisant** » de la norme NF EN 1504-6 soit 75 KN.

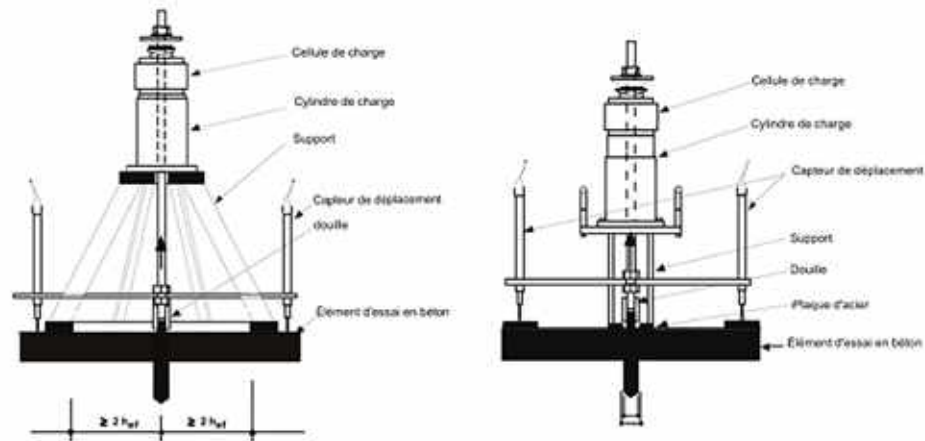


Figure n° 70 : essai non-confiné à gauche et essai confiné à droite

4.2.5.3.3.1 Cas de la norme NF EN 1504-6

Le produit utilisé pour le scellement doit satisfaire aux exigences de la norme **NF EN 1504-6** en fonction des **utilisations prévues** et de la **nature du produit** (produit à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques).

Le tableau ci-après donne les exigences de la norme européenne :

Point n°	Caractéristiques de performance	Méthode d'essai	Utilisations prévues		Exigences
			Produits à base de liants hydrauliques	Produits à base de résines synthétiques	
1	Arrachement	NF EN 1881 (2)	■	■	Déplacement $\leq 0,6$ mm sous une charge de 75 kN (3)
2	Teneur en ions chlorure	NF EN 1015-17	■	■	$\leq 0,05\%$
3	Température de transition vitreuse (1)	NF EN 12614	Sans objet	■	45°C ou 20°C au-dessus de la température ambiante maximale de la structure en service (la plus élevée)
4	Fluage en traction	NF EN 1544	Sans objet	■	Déplacement $\leq 0,6$ mm au bout de 3 mois après application continue d'une charge de 50 kN

Tableau n° 41 : synthèse des tableaux 1 et 3 de la norme EN 1504-6

Note :

- (1) Concerne la perte d'efficacité des résines synthétiques à partir d'une certaine température (entre 50 et 80°C). Il faut s'assurer que le collage ne risque pas d'être soumis pendant la durée de vie de la structure à une température supérieure. Si tel est le cas, une protection doit être mise en place ;
- (2) La norme **NF EN 1881** ne donne pas l'âge que doit avoir le produit de scellement lors de l'essai d'arrachement. Elle indique, que les produits sont mis en place horizontalement, verticalement ou au plafond suivant les instructions du fabricant, que les essais d'arrachement peuvent être effectués sur **support sec ou humide**.
- (3) Le nombre des essais à effectuer et les conditions de leur interprétation ne sont pas précisés !

La norme NF EN 1504-6 s'appuie sur la norme NF EN 1881 relative à un **essai d'arrachement confiné** en laboratoire d'une armature de BA de classe 500 MPa, de 16 mm de diamètre et de 150 mm de longueur scellée au centre d'une éprouvette en béton C(0,40) (béton proche de la classe 45/55) de 400 mm x 400 mm x 250 mm. La norme d'essai prévoit normalement de poursuivre l'essai jusqu'à rupture mais la **norme NF EN 1504-6 limite l'effort de traction à 75kN** et le déplacement mesuré à **0,6 mm**.

Rappel : dans le cadre du DÉE (EAD) 330087-00-0601, les ancrages des barres de BA rapportées et scellées avec des produits de scellement sont testées jusqu'à leur rupture avec tracé de la courbe charges /déplacements !

Dans le cas d'une barre de classe $f_{yd} = 500$ MPa, la contrainte maximale de traction sous la charge de **75 kN** s'élève à **373 MPa valeur nettement inférieure à la contrainte limite ultime de calcul de $500/1,15 = 435$ MPa** sous des charges d'exploitation normales et de 500 MPa sous les charges accidentelles. La contrainte de traction imposée est très faible si on la compare à celle exigée dans les **anciennes normes françaises** (Cf. l'encadré ci-après).

Avant la parution de la norme européenne, la certification des **produits de scellement** des barres de BA rapportées dans un béton existant était régie par la **marque NF produits spéciaux** (produits destinés aux constructions en béton hydraulique) et toujours en vigueur. Cette marque s'appuyait sur des normes françaises de la **série P18-800 suivantes** :

- **NF P18-821** : produits de calage et de scellement à base de liants hydrauliques – Caractères normalisés garantis ;
- **NF P18-822** : produits de calage et de scellement à base de résines synthétiques – Caractères normalisés garantis ;
- **NF P18-831** : produits de calage et de scellement à base liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Essai d'arrachement ;
- **NF P18-836** : produits de calage et de scellement à base de résines synthétiques – essai de fluage en traction à +23°C et +50°C ;

L'essai d'arrachement **non confiné** était réalisé avec une barre en acier à haute adhérence de **classe 400 MPa** et de **12 mm** de diamètre ancrée sur une longueur de 120 mm (10Φ) dans une éprouvette de 400x400x200 en béton de classe de résistance ≥ 45 MPa. Les essais portaient sur trois configurations de scellement (horizontal, vertical ou au plafond et deux états de surface (sec et humide). L'effort de traction était limité à **45 kN** et le déplacement à **0,5 mm**.

Dans l'ancienne norme française, la contrainte maximale de traction s'élevait à **398 MPa** soit sensiblement la **limite d'élasticité des barres de classe 400 MPa** utilisées à cette époque.

Note : les produits de scellement à base de liants hydrauliques étaient soumis également à des essais de durabilité vis-à-vis de l'eau de mer et des eaux à haute teneur en sulfate (essai visé par la **norme NF P18-837** visée ci-après).

Des informations partielles en provenance du **groupe de travail européen** indiquent que la contrainte d'adhérence à prendre en compte dans les calculs de longueur de scellement ou de recouvrement pourrait être, comme dans le **DÉE (EAD)**, la **contrainte d'adhérence issue de l'essai** à laquelle serait appliquée une **cascade de coefficient partiels de sécurité**.

En attendant la parution de la norme européenne révisée pour concevoir les scellements avec des **produits à base de liants hydrauliques** diverses solutions sont envisageables (se reporter à l'article 4.2.5.6.3.4 ci-dessous).

4.2.5.6.3.2 Cas du DÉE (EAD) 330087-00-0601

La **partie 5.1.2 de l'ETAG 001** (cf. le Technical Report **TR 023²⁸**) a été transformée en **DÉE (EAD)**. La batterie des essais de l'ETAG a cependant été complétée (tests 3 à 6 [béton fissuré], 9, 10 et 18) ; elle est nettement plus importante que celle de la norme NF EN 1504-6 comme le montre le Tableau n° 41 et le Tableau n° 43 ci-après.

28 Se reporter à la page 131 du Cahier du CSTB 3617 de mai 2009 en français

Les essais d'adhérence, contrairement à ceux de la norme NF EN 1504-6, sont poursuivis jusqu'à rupture et les courbes charges/déplacements sont analysées.

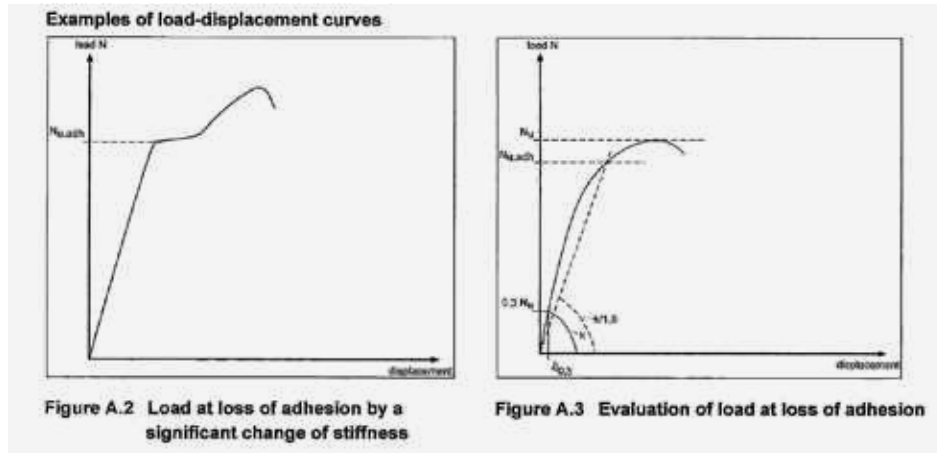


Figure n° 71 : mode d'évaluation des courbes contraintes/déplacements

Table A.1 Test program for post-installed rebar connections

Line	Purpose of test	Concrete strength class ¹⁾	Rebar size ²⁾ ϕ [mm]	Setting depth ³⁾ L, [mm]	Minimum number of tests	Criteria	Test procedure / assessment
Basic tension tests							
1	Reference tension tests in uncracked concrete	C20/25	all ¹⁰⁾	10 ϕ	5 each	$f_{cm} \geq 7,1$ [N/mm ²] ₁₄₎	2.2.1.1
2		C50/60	ϕ_{max}	7 ϕ	5		
3	Reference tension tests in cracked concrete ($\Delta w = 0,3$ mm) ⁴⁾	C20/25	12	10 ϕ	5	-	2.2.2
4			ϕ_{max}	10 ϕ	5		
5		C50/60	12	7 ϕ	5		
6			ϕ_{max}	7 ϕ	5		
7	Robustness in dry concrete ^{5) 10)}	C20/25	s/m/l	10 ϕ	5 each	req. $\alpha \geq 0,8$	2.2.1.2
8	Robustness in wet concrete ^{6) 10)}	C20/25	s/m/l	10 ϕ	5 each	req. $\alpha \geq 0,75$	2.2.1.3
9	Installation at minimum installation temperature ¹⁵⁾	C20/25	ϕ_{max}	max L	3		2.2.1.4
10	Installation at maximum installation temperature	C20/25	ϕ_{max}	max L	3		2.2.1.4
11	Correct injection	-	ϕ_{max}	max L	3		2.2.1.5
12	Vertical upwards installation direction ^{7) 13)}	C20/25	ϕ_{max}	10 ϕ	5	req. $\alpha \geq 0,9$	2.2.1.6
13	Horizontal installation direction ⁸⁾	C20/25	ϕ_{max}	10 ϕ	5	req. $\alpha \geq 0,9$	
14	Sustained loads ^{9) 13)}	C20/25	12	10 ϕ	5	req. $\alpha \geq 0,9$	2.2.1.7
15	Freeze/thaw conditions ¹³⁾	C50/60	12	7 ϕ	5	req. $\alpha \geq 0,9$	2.2.1.8
16	High alkalinity and sulphurous atmosphere ¹³⁾	C20/25	12 ¹¹⁾	-	3 x 10		2.2.1.9
17	Corrosion resistance of rebar ¹²⁾	C20/25	12	70 mm	3		2.2.1.10
Resistance to fire							
18	Bond strength at increased temperature ^{4) 9)}	C20/25	12	10 ϕ	20		2.2.4

Tableau n° 42 : tableau A.1 extrait de l'annexe A du DÉE (EAD) 330087-00-0601 de mai 2018

Notes explicatives relatives au tableau A 1 de l'EAD :

- 1) All tests performed in uncracked concrete except test series line 3-6.
- 2) Diameter of the rebar ϕ ; ϕ_{max} = maximum diameter of the rebar specified by the manufacturer.
- 3) 10ϕ and 7ϕ shall be reduced in case of steel failure mode. The reduction shall be the same in all test series. It is the objective of these tests to determine bond resistance.
- 4) This test series is optional.
- 5) This test series may be omitted if no cleaning is specified in the MPII.
- 6) Test series may be omitted if no cleaning is specified in the MPII for mortars based on cement only.
- 7) This test series may be omitted if this installation direction is excluded in the MPII.
- 8) This test series may be omitted if only downward installation is allowed in the MPII.
- 9) If more than one drilling diameter is given in the MPII for the same rebar diameter, drilling shall be done with the largest drilling diameter.
- 10) The test series may be omitted if the assessment for this aspect is taken from assessment acc. to ETAG 001-5 with TR 023.
- 11) This test series may be performed with threaded rods of size M12. High alkalinity tests are not required for mortars based on cement only.
- 12) No proof of the corrosion resistance of the rebar is needed if post-installed rebar is used in building components in dry surroundings according to exposure class X0 and XC1 of EN 1992-1-1. Also no proof is needed when only corrosion resistant rebar is specified for all application.
- 13) The test series may be omitted if the assessment for this aspect is taken from assessment acc. to EAD 330499.
- 14) The requirement accounts for the lowest concrete strength class C12/15 in accordance with EN 1992-1-1 [1] (see also 2.2.1 of this EAD)
- 15) The test series 9 may be omitted for minimum installation temperature $> 0^{\circ}\text{C}$ and minimum mortar temperature $\geq 5^{\circ}\text{C}$.

Le produit de scellement pour être validé doit satisfaire aux performances imposées. De plus, un calcul spécifique, prenant en compte le **coefficient de projection de la surface des saillies (f_p) des barres HA**, des coefficients partiels correcteurs intégrant la résistance réelle du béton de l'éprouvette, et le coefficient de variation de la charge de rupture..., permet de calculer une **contrainte moyenne d'adhérence**. Cette contrainte est à comparer à la **contrainte d'adhérence dite requise ($f_{bm,req}$)** donnée dans le **tableau ci-après** pour chacune des deux classes de béton (C20/25 et C50/60) en considérant le cas où les **conditions d'adhérence sont bonnes** au sens de l'**EC 2 partie 1.1**. Le rapport entre la contrainte requise et la contrainte d'adhérence de l'Eurocode est de l'ordre de **4,3** (empilement de plusieurs coefficients partiels). Le document précise également comment tenir compte du cas où la **contrainte requise n'est pas obtenue...**

Table A.4 Bond strength of cast-in rebar

Concrete strength class	Bond strength $f_{br,req}$ [N/mm ²]	Design value of the ultimate bond stress according to EN 1992-1-1 ^{*)} f_{bd} [N/mm ²]
C12/15	7,1	1,6
C16/20	8,6	2,0
C20/25	10,0	2,3
C25/30	11,6	2,7
C30/37	13,1	3,0
C35/45	14,5	3,4
C40/50	15,9	3,7
C45/55	17,2	4,0
C50/60	18,4	4,3

*) Design values for the ultimate bond stress, f_{bd} , for ribbed bars (rebars) are determined based on Nationally Determined Parameters given in the National annex; the recommended values given here are calculated using equation (8.2) in clause 8.4.2 of EN 1992-1-1 [1], i.e. $f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$, inserting the recommended basic values for η_1 , η_2 and γ_c given in EN 1992-1-1 as well as $\eta_2 = 1$.

Note 6: The bond strength $f_{br,req}$ is based on large number of tests with cast-in-place rebar following the test regime of Table A.1 lines 1 and 2 and using concrete mixed according Technical Report TR 048.

Note 7: The bond strength $f_{br,req}$ is based on the design value of ultimate bond stress according to EN 1992-1-1 [1]. According to [9] the value includes the following increasing factors taking into account the recommended material safety factor for concrete ($\gamma_{bet} = 1,5$), the ratio of mean value to 5% fractile (1/0,75), the effect of uncracked concrete to bond in cracked concrete (1/0,75), the effect of large edge distance and spacing (1/0,7), and the influence of distribution of bond stress for short embedment as used in tests to long embedment (40 ϕ) according to EN 1992-1-1 [1] (1/0,8). The requirement given in Table A.1 line 1 corresponds to for the lowest concrete strength class C12/15 according to EN 1992-1-1.

Tableau n° 43 : tableau A.4 extrait de l'annexe A du DÉE (EAD)

Si les résultats des essais satisfont à la **contrainte d'adhérence requise**, la longueur de scellement peut alors être calculée avec les **formules de l'Eurocode 2-partie 1.1** (cependant, la longueur peut être réduite si l'effort appliqué à la barre est inférieur à l'effort ultime qu'elle peut supporter comme le prévoit l'Eurocode).

Un **coefficient d'abattement de 0,7** sur la valeur de la contrainte d'adhérence s'applique si les conditions d'adhérence sont médiocres).

Normalement, le béton de l'élément concerné par le scellement ne doit pas être carbonaté ni chloruré afin de ne pas compromettre la durabilité du scellement.

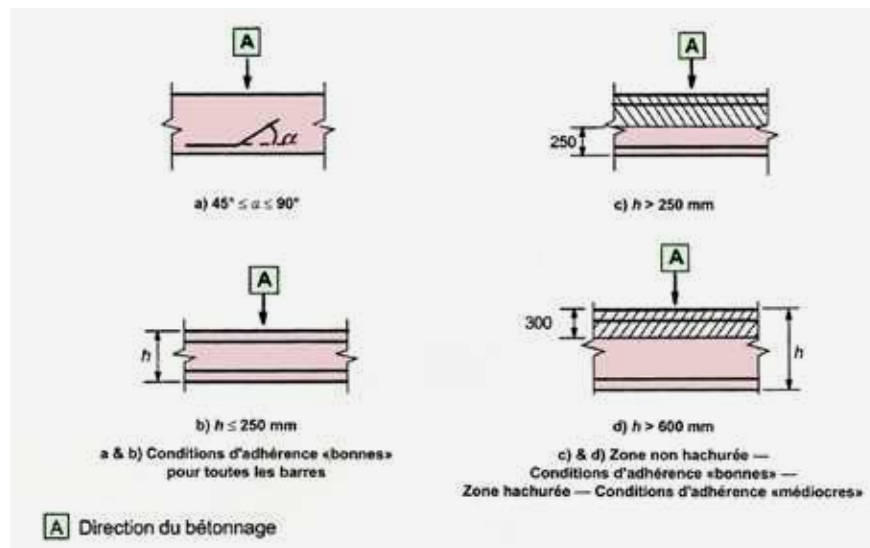


Figure n° 72 : conditions d'adhérence bonnes et médiocres extraites de l'Eurocode 2 partie 1-1

Note : la partie calcul de la **contrainte d'adhérence moyenne**, sans changement notable, est disponible en français dans la **partie 5.1.2 de l'ETAG 001** et se trouve dans le **cahier 3617 du CSTB de mai 2009**.

Un fabricant dont le produit répond aux exigences du **DÉE** se voit attribuer une **Évaluation Technique Européenne (ÉTE)** qui fixe le mode de réalisation des scellements (outils de perçage, de préparation et de mise en œuvre du produit...) et les règles de conception des scellements (diamètre et profondeur des trous, longueur de scellement...). Le produit bénéficie du **marquage CE**.



Figure n° 73 : exemple d'ÉTE le 14/0423 basé sur l'ETAG 001

4.2.5.6.3.3 Informations sur l'état d'avancement de la révision du FD P18-823

Il est rappelé que le **fascicule** relève des décisions de la **Commission Française de Normalisation P18P** (commission traitant des produits de réparation).

Le futur **FD P18-823** doit normalement supprimer toute référence aux produits de scellement à base de polymères (résines).

Des essais d'arrachement sur un certain nombre de produits de scellement à base de liants hydraulique et suivant les dispositions de la **norme NF EN 1881**, ont été menés jusqu'à la rupture. La majeure partie des ruptures ont été de **type 1** (rupture de la barre).

Une nouvelle batterie d'essais est en cours pour tester les **ruptures de type 3** (glissement de la barre et du produit de scellement) ce qui permettra de valider, comme cela existe dans le fascicule actuel, la possibilité de tenir compte pour le calcul de la contrainte d'adhérence du diamètre du trou et pas seulement de celui de la barre.

4.2.5.6.3.4 Solutions envisageables en attendant la parution des nouveaux textes en projet

1. Cas des produits de scellement à base de liants hydrauliques (types CC et PCC) :

Note : il est recommandé d'utiliser des **produits de scellement admis à la marque NF** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Celle-ci prévoit en effet, sous forme optionnelle, la possibilité de contrôler la tenue des produits à l'eau de mer et aux eaux à haute teneur en sulfates.

Il est rappelé que la structure ne doit pas être exposée à des **actions sismiques**.

En attendant la parution des documents susvisés, le **marché** peut fixer les règles de dimensionnement des scellements d'armatures rapportées en s'inspirant des **dispositions développées** ci-après sous réserve que les **études et investigations préalables** permettent de s'assurer que les matériaux de la structure ne présentent pas de désordres et que le béton dans les zones de scellement de barres rapportées est de bonne qualité et présente une résistance homogène.

En cas de doute sur la qualité du béton support, il est indispensable de faire des prélèvements de carottes et des mesures de résistance en compression de ces carottes combinées à des mesures de vitesse du son avant écrasement (**norme NF EN 12504-2**). Ces mesures peuvent être combinés avec une auscultation sonique de la surface du béton qui permet de définir des zones d'iso-vitesse donc où la résistance du béton est homogène.

ATTENTION, les dispositions ci-après devront encore subir quelques modifications, la rédaction du **FD P18-823** n'étant pas terminée.

Notes explicatives dans le cadre actuel où un produit de scellement satisfait uniquement aux exigences de la norme NF EN 1504-6 actuelle :

Le **coefficient de 0,75 du FD P18-823 de 2020** a pour origine le rapport entre l'effort de traction de 75 KN de l'essai de la **norme NF EN 1504-6** et l'effort de traction d'une barre de 16 mm de diamètre à sa limite élastique (500 MPa).

Normalement, l'essai doit se faire à rupture (550 MPa) il faudrait donc appliquer un coefficient de :

$$\frac{75000}{\frac{\pi \cdot 16^2}{4} \cdot 550} = 0,68 \quad (1)$$

Si nous nous plaçons dans la démarche de révision de la norme européenne, il faut se référer au DÉE. Pour cela, il faut calculer la contrainte d'adhérence obtenue lors de l'essai et lui appliquer un coefficient correcteur $(0,08/f_r)^{0,4}$ en fonction de la valeur de f_r (coefficient de projection de la surface des verrous) lequel vaut 0,056 pour une barre de 16 mm de diamètre ancrée sur 150 mm.

La contrainte à comparer à la contrainte requise vaut :

$$\frac{75000}{\pi \cdot 16 \cdot 150} \left(\frac{0,08}{0,056} \right)^{0,4} = \mathbf{11,4 \text{ MPa}}$$

La contrainte requise pour un béton de classe 45/55 qui est celui de l'éprouvette d'essai est de 17,2 MPa.

Le rapport entre les deux contraintes donne le coefficient réducteur à appliquer pour le calcul de la longueur de scellement soit : $11,4/17,2 = \mathbf{0,66}$ (2).

Pour rester raisonnable, nous proposons une valeur de 0,65 soit une majoration de la longueur de scellement de $1/0,65 = 1,538$ arrondi à 1,50.

Note explicative dans le cadre où un produit de scellement satisfait aux exigences du nouveau FD P18-823 (essai de traction à rupture $f_t = 550 \text{ MPa}$) :

Dans ce cas, la contrainte d'adhérence vaut :

$$\frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot f_t = \frac{\varnothing \cdot f_t}{4 \cdot l_v} \quad \text{soit} \quad \frac{16 \cdot 550}{4 \cdot 150} = \mathbf{14,67 \text{ MP}}$$

Le coefficient correcteur de 1,15 ne change pas, d'où la contrainte à comparer à la valeur requise soit :

$$14,67 \cdot 1,15 = 16,87 \text{ MPa}$$

Dans ce cas, la valeur du coefficient réducteur vaut : $16,87/17,2 = 0,98$. Cette valeur nous **permettrait**, soit de ne pas majorer la longueur de scellement, soit de la majorer seulement de 5%. Un tel choix devrait être fixé dans le nouveau fascicule

■ **Solution 1** : si le fabricant n'apporte pas la preuve que le produit de scellement a été testé en respectant les dispositions du nouveau **FD P18-823**, il faut appliquer un coefficient de réduction de 0,65 soit une majoration de 50% de la longueur de scellement ;

Note : cette solution conduit à augmenter les longueurs d'ancrage ou à multiplier le nombre des scellements, ce qui n'est pas toujours souhaitable ni possible.

■ **Solution 2** : si le fabricant apporte la preuve que son produit a été testé et respecte les dispositions du nouveau **FD P18-823** (en projet), la longueur de scellement est à calculer conformément aux **règles de dimensionnement du fascicule** qui s'appuient sur les règles de l'Eurocode 2 partie 1 (EN 1992-1-1) ;

■ **Solution n°3** : le marché peut imposer une **épreuve d'étude** complémentaire dans le cadre d'une **application spéciale pour un projet particulier**. Cette épreuve peut comporter des essais spécifiques, en fonction des besoins et de la classe d'exposition de la structure. **Les résultats de l'épreuve d'étude** sont à confirmer par une **épreuve de convenance**. Pour rédiger la procédure d'essai, il est conseillé de se référer au DÉE (EAD) 330087-00-0601. Dans ce cas, le nombre des essais à effectuer n'est pas très important (5 essais minimum par type de test) s'ils portent uniquement sur les tests d'arrachement (béton humide ou sec) avec, éventuellement, une ou plusieurs orientations des scellements suivant les besoins. Bien entendu, les fabricants peuvent présenter des résultats d'essais antérieurs probants.

■ **Solution 4** : si la réparation nécessite le scellement d'armatures dans un élément de béton dont la géométrie ne permet pas d'envisager une longueur de scellement normale et qu'il faut limiter au maximum le nombre des scellements (cas d'armatures de coutures sous forme de connecteurs dans une pièce mince), il est possible de prévoir au marché une **épreuve de convenance**. Celle-ci consiste à réaliser in situ des essais d'arrachement confinés (pour éviter des cônes d'arrachement). Le nombre des tests à effectuer doit permettre une interprétation statistique des résultats (efforts/déplacements...). Le contrat fixe les règles d'interprétation des résultats.

Note : pour rédiger dans le marché la **procédure d'essai** et les **conditions d'interprétation des résultats des essais sur chantier**, il est possible de s'appuyer sur le **rapport technique TR 053 de l'EOTA** (Recommandations pour les essais d'ancrages en métal scellés par injection dans la maçonnerie y compris le béton) ainsi que sur les **recommandations du CISMA**²⁹ (pour la réalisation in situ d'essais de cheville sur site ou sur chantier). Ce document est disponible dans la rubrique chevilles du site CISMA.

D'après le TR 053, le nombre des essais à prévoir doit être ≥ 15 . Cependant, si le béton peut être considéré comme ayant des caractéristiques homogènes sur toute la zone des scellements, il est envisageable de réduire le nombre des tests d'arrachement. Cette homogénéité se contrôle par une auscultation sonore préalable combinée à des écrasements de carottes avec mesures de la vitesse du son.

Note : dans les bétons d'ouvrages d'art, l'expérience montre qu'un essai d'arrachement conduit à la rupture de la barre avec des barres de BA de classe 400, un produit de scellement performant et avec une profondeur de scellement d'environ 15 diamètres. Avec les barres de BA de classe 500, la profondeur de scellement est à porter à **environ 20 diamètres**. Ces longueurs de scellement satisfont normalement aux **longueurs d'ancrage minimales** de la partie 1-1 de l'EC 2 mais une vérification peut être nécessaire.

2. Dans le cas d'utilisation de **produits et systèmes de scellement à base de polymères** (types PC et P) une des deux solutions suivantes peut être envisagée et fixée au contrat :

- **Solution 1 :** lorsque la structure n'est pas soumise à des actions sismiques, le produit de scellement doit relever d'une **ÉTE** basée sur le **DÉE (EAD) 330087-00-0601**. Si le produit ou système satisfait aux exigences du **DÉE**, les longueurs de scellement et de recouvrement peuvent être calculées avec les **règles de la partie 1.1 de l'EC 2** en considérant la qualité du béton de la zone de scellement (résistance en compression) et la qualité des conditions d'adhérence (bonnes ou non suivant la position des barres et armatures)).
- **Solution 2 :** lorsque la structure à réparer peut être soumise à des **actions sismiques**, le produit de scellement doit bénéficier d'une **ÉTE** relevant du **DÉE (EAD) 331522-00-0601**.

Note : il est rappelé que la **norme NF EN 1504-6** ne vise pas ce type de sollicitation. Ce qui ne veut pas dire qu'un scellement avec un mortier à base de produits hydrauliques ne puisse pas résister à de telles sollicitations après une validation lors d'une **épreuve d'étude**.

Conformément au **DÉE (EAD) susvisé**, l'utilisation de produits et systèmes à base de polymères (P et PC) impose de préserver la **passivité des armatures**. Dans le cas où le béton est carbonaté, voire chloruré il faut éliminer un cylindre de béton pollué autour de la barre à sceller de (60 mm + ds de diamètre et d'une hauteur égale à la profondeur de pénétration des agents agressifs).

4.2.5.6.3.5 Incidence sur les Guides FABEM 6 et 7

Les parties des **GUIDES FABEM 6 et 7** qui traitent du scellement de barres de BA dans une maçonnerie ou un béton existant sont devenues **partiellement obsolètes** et nécessiteront des modifications.

Note : se reporter, en cas de besoin, aux divers documents cités dans **L'ANNEXE 1** concernant les armatures scellées et les chevilles métalliques scellées dans le béton.

4.2.5.7 Choix des produits et systèmes de calage d'éléments

ATTENTION, actuellement il n'existe pas de norme européenne traitant des produits et systèmes de calage.

Le produit ou le système utilisé pour le calage doit satisfaire aux exigences du **marché**, qui vise les exigences applicables des normes françaises :

²⁹ Syndicat professionnel Construction, Infrastructure, Sidérurgie et Manutention. Depuis le 8 juillet 2019, le CISMA est devenu EVOLIS.

- **NF P 18-821 d'août 2013** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de calage à base de liants hydrauliques - Caractères normalisés garantis ;
- **NF P 18-822 de décembre 2009** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de calage à base de résines synthétiques - Caractères normalisés garantis.

Ces diverses exigences sont fonction des **utilisations prévues** et de la **nature des produits** qui peuvent être à base de liants hydrauliques (CC ou PCC) ou de résines synthétiques (P ou PC).



Photo n° 130 : réalisation d'un calage pour une reprise en sous-œuvre (crédit photo Parexlanko)

Les deux tableaux suivants donnent les exigences des deux **normes françaises susvisées** relatives aux produits de **calage** respectivement à base de liants hydrauliques et de liants synthétiques. Elles sont liées à la **marque NFO30 (Produits spéciaux)**.

La tenue à l'eau de mer et celle des eaux à haute teneur en sulfates des produits de calage base de liants hydrauliques sont des **performances optionnelles** dans le **règlement de la marque NF** et relèvent de la **norme XP P18-837**.

> Cas des produits à base de liants hydrauliques

Les catégories sont fonction de l'étendue de la plage d'utilisation normale, du délai d'utilisation (délai entre la fabrication et l'essai d'aptitude à la mise en place) et de la résistance aux eaux agressives.

Les normes d'essai sont les suivantes :

- **NF P18-832 de mai 2012** : produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique — Produits de calage à base de liants hydrauliques — Essai d'aptitude à la mise en place ;
- **XP P18-837 d'avril 1993** : produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique — Produits de calage et/ou de scellement à base de liants hydrauliques — Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates.

PRODUITS DE CALAGE	Teneur en eau nominale						Teneurs en eau adaptées
	CATÉGORIES	Plage d'utilisation normale	Caractères normalisés garantis		Caractères normalisés garantis opérationnels	Caractères normalisés garantis complémentaires pour les plages d'utilisation [5 °C – 1 °C] et ou [T °C – 35 °C]	
Conditions de réalisation des essais							
Aptitude à la mise en place							
		Délai d'utilisation	Température		Tenue à l'eau de mer	Tenue à l'eau à haute teneur en sulfates	
		(°C)	(°C)				
3	t, T	< 1 h 30	T		—	non	possible
4	t, T	< 1 h 30	T		oui	oui ou non	possible
7	t, T	≥ 1 h 30	T	t	—	non	possible
8	t, T	≥ 1 h 30	T	t	oui	oui ou non	possible

Tableau n° 44 : tableau 1 d'après la norme NF P 18-821

> Cas des produits à base de résines synthétiques

Les catégories dépendent de la température de mise en œuvre, de la température d'utilisation et des contraintes applicables au produit.

Les normes d'essai sont les suivantes :

- **NF P18-833 d'août 2014** : produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique — Produits de calage à base de résines synthétiques — Essai d'aptitude à la mise en place ;
- **NF P18-835 d'avril 1993** : produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique — Produits de calage à base de résines synthétiques — Essai de fluage en compression à + 23 °C et + 70 °C (avril 1993).

Produits de calage	Aptitude à la mise en place	Fluage en compression	
		2,5 MPa	5 MPa
	Catégories	T °C d'essai	T °C d'essai
1	23	23	—
2	Mini et Maxi ^{a)}	23	—
3	23	70	—
4	Mini et Maxi ^{a)}	70	—
5	23	—	23
6	Mini et Maxi ^{a)}	—	23
7	23	—	70
8	Mini et Maxi ^{a)}	—	70

a) À préciser par le fabricant.

Tableau n° 45 : tableau 1 d'après la norme NF P 18-822

4.2.5.8 Choix des armatures passives additionnelles internes au béton

Il appartient au **marché** de fixer les types, les classes des armatures passives additionnelles à mettre en œuvre, si besoin est, sur le chantier de réparation ou de renforcement. Il s'agit : des aciers pour béton armé, des armatures de béton armé, des aciers inoxydables, des aciers galvanisés et des armatures non métalliques de type polymère renforcé de fibres (**PRF**).

4.2.5.8.1 Aciers pour béton armé

Les **aciers pour béton armé** se présentent sous forme de treillis ou de barres (ou ronds à béton) qui peuvent ensuite être coupés, façonnés, assemblés et adjoints de dispositifs spéciaux afin d'obtenir des **armatures de béton armé**.

Les différentes catégories d'aciers de béton armé relèvent des normes suivantes :

- Norme européenne :
 - **NF EN 10080 de septembre 2005** : Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – Généralités.
- Normes françaises :
 - **NF A35-014 de février 2018** : Aciers pour béton armé - Aciers inoxydables soudables - Barres et couronnes - Aciers pour béton armé - Barres, fils machine et fils en acier inoxydable ;
 - **NF A35-015 de juillet 2019** : Aciers pour béton armé – Aciers soudables lisses – Barres et couronnes ;
 - **NF A35-024 de juillet 2019** : Aciers pour béton - Treillis soudés de surface constitués de fils de diamètre nominal inférieur à 5 mm ;

Note : ces treillis soudés de faible diamètre sont utilisés pour leur fonction anti-fissuration.

- **NF A35-025 de décembre 2017** : Produits en acier – Barres et couronnes pour béton armé galvanisées à chaud – Fils destinés à la fabrication d'armatures pour béton armé galvanisées à chaud ;
- **NF A35-080-1 de mai 2020** : Aciers pour béton armé – Aciers soudables – Partie 1 : Barres et couronnes ;
- **NF A35-080-2 de décembre 2013** : Aciers pour béton armé – Aciers soudables – Partie 2 : Treillis soudés ;

Les armatures à haute adhérence sont admises à l'usage de la **Marque NF armatures pour béton armé** gérée par l'**Association Française de Certification des Armatures de Béton armé** ou **AFCAB**.

Les **aciers lisses soudables** ne sont pas couverts par la **marque NF/AFCAB** susvisée, ils doivent être conformes à la **norme NF A35-015** et être accompagnés d'un **certificat de type 3.1** selon la **norme NF EN 10204 de janvier 2005** : Produits métalliques - Types de documents de contrôle.

Il appartient au **marché** de fixer la **classe des aciers de béton armé**, normalement **B500B**, voire **B500C** (aciers les plus ductiles) par exemple, si l'ouvrage peut-être soumis à des sollicitations sismiques.

4.2.5.8.2 Armatures de béton armé

Les armatures de béton armé relèvent de la norme suivante :

- **NF A35-027 de décembre 2015** : Produits en acier pour béton armé – Armatures.

Cette norme traite des armatures fabriquées dans une **installation fixe** située sur un **site déterminé** c'est-à-dire des armatures sur catalogue, des armatures sur plans (dressage, coupe, façonnage, assemblage par soudage) y compris les panneaux préassemblés, des armatures spéciales (armatures mettant en œuvre des dispositifs de raboutage ou d'ancrage, des boîtes d'attente, des aciers inoxydables).

Cette norme ne s'applique pas :

- aux treillis soudés (cf. **NF A35-080-2** et **NF A35-024**) qui ne sont pas des panneaux préassemblés ;
- aux treillis raidisseurs (cf. **NF A35-028** d'avril 2020 : Aciers pour béton armé - Treillis raidisseurs) ;
- aux éléments en acier destinés au calage ou à l'écartement des nappes d'armatures (distanciers, écarteurs, chaises) ;
- aux crochets ou boucles et accessoires de levage.

Les armatures de béton armé en acier sont admises à la **marque NF : Armatures**, gérée par l'**Association Française de Certification des Armatures de Béton armé** ou **AFCAB**.

4.2.5.8.3 Dispositifs de raboutage et d'ancrage

Les dispositifs de raboutage et les dispositifs d'ancrage des armatures sont conformes aux normes suivantes :

- **NF A35-020-1 de novembre 2017** : Produits en acier - Dispositifs de raboutage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 1 : prescriptions relatives aux performances mécaniques ;
- **NF A35-020-1/A1 d'avril 2020** : Produits en acier - Dispositifs de raboutage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 1 : prescriptions ;
- **NF A35-020-2-1 de novembre 2017** : Produits en acier - Dispositifs de raboutage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 2-1 : méthode d'essai pour dispositif de raboutage ;
- **NF A35-020-2-2 de novembre 2017** : Produits en acier - Dispositifs de raboutage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 2-2 : méthode d'essai pour les dispositifs d'ancrage et les coupleurs à souder.

Les dispositifs de raboutage et les dispositifs d'ancrage des armatures du béton (**DRAAB**) sont admis à la certification **AFCAB – DRAAB**.



Photo n° 131 : **DRAAB BARTEC** (crédit photo Bartec)

Plusieurs types de DRAAB sont disponibles :

- les uns nécessitent une préparation des extrémités des barres sous forme d'un filetage ;
- les autres ne nécessitent pas cette préparation :
 - le serrage et le maintien des barres sont obtenus par système de vis disposées sur le dispositif de couplage,
 - le serrage est obtenu par « écrasement » du dispositif de couplage sur les barres au moyen d'un vérin.

Il est nécessaire de s'assurer que ces éléments sont compatibles avec la géométrie de l'ouvrage, notamment en ce qui concerne leur encombrement.

Le **marché** peut imposer des prescriptions complémentaires comme les caractéristiques relatives à la **fatigue ou aux sollicitations sismiques**. Les fabricants doivent fournir les données ou effectuer les essais nécessaires à leur validation. Cependant, les niveaux de performance attendus peuvent être ceux des normes à condition que leurs **certificats AFCAB** indiquent que ces caractéristiques optionnelles sont attestées.

4.2.5.8.4 Cales, chaises et dispositifs de fixation

Les cales, les chaises (sous forme d'écarteurs ou d'entretoises...) et les dispositifs de fixation assurent le maintien des barres et lits d'armatures et la rigidité du ferrailage pendant les opérations de bétonnage (coulage en place ou projection). **L'épreuve de convenance** permet de valider leur efficacité.

Conformément à l'article 6.2.1.4 du **fascicule 65 du CCTG** :

- les dispositions figurant en (2) du D.6.2 de l'**annexe informative D de la norme NF EN 13670/CN sont rendues contractuelles**.
- la disposition, la forme et la nature des dispositifs de calage sont soumises à l'acceptation du **maître d'œuvre**. Les cales métalliques au contact des coffrages sont interdites. Les cales et les chaises doivent être mécaniquement stables, chimiquement inertes et indéformables. Leurs fixations doivent garantir le maintien de leur position. Les cales ne doivent pas s'opposer au bon cheminement du béton lors de sa mise en œuvre, ni altérer la qualité esthétique du parement décrite dans les spécifications d'exécution. Elles ne doivent pas entraîner de diminution de la résistance mécanique de l'ouvrage.

4.2.5.8.5 Boîtes d'attente

Le recours à des boîtes d'attente est exceptionnel sur les chantiers de réparation ou de renforcement.

Le **marché** indique si les boîtes d'attente, qui bénéficient de la **certification AFCAB – Boîtes d'attente pour le béton armé**, sont autorisées. Ce choix est validé après vérification des dispositions constructives des armatures. **L'épreuve de convenance** permet de vérifier leur efficacité.

Normalement, les boîtes d'attente ne sont pas autorisées sur les **chantiers de béton projeté** parce qu'elles gênent la projection du béton et entraînent une diminution de résistance mécanique de l'ouvrage.

4.2.5.8.6 Aciers et armatures de béton armé inoxydables

Dans le domaine de la réparation, comme dans celui des ouvrages neufs, il est possible d'utiliser des aciers et des armatures en acier inoxydable (**consulter les normes NF EN 10088-1, 3 et 5 et NF A35-014 de février 2018**) au voisinage d'armatures de béton armé classiques, sous réserve de prendre certaines précautions. Il faut en effet éviter la formation de **piles galvaniques** entre les deux nuances d'acier pouvant entraîner la corrosion des armatures ordinaires³⁰. Se reporter à l'**annexe n°3** qui détaille les propriétés des aciers et armatures en acier inoxydable.

³⁰ Consulter le document **T.81 de CIMbéton d'avril 2004** intitulé : **béton armé d'inox ainsi qu'un document de septembre 2001 de l'Office fédéral des routes suisse** (intitulé : **utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton**) et prendre contact avec un laboratoire spécialisé.



Photo n° 132 : aciers et armatures de béton armé inoxydables (crédit photo CIMbéton)

4.2.5.8.7 Aciers et armatures de béton galvanisés

Les aciers et les armatures en acier galvanisé (NF A35-025) peuvent être utilisées si le risque de corrosion est lié à :

- la carbonatation du béton ;
- la pénétration des chlorures, sous la réserve expresse que la teneur finale du béton en chlorures soit faible ;

S'il y a à la fois **carbonatation et pénétration de chlorures**, le revêtement de zinc va être soumis à la corrosion par piqûres. Dans ce cas, il est donc préférable de **proscrire ce type d'aciers ou d'armatures**.

Extrait de la NF EN 13670 (texte et note) : lorsque des aciers et armatures galvanisés sont utilisés, la couche de zinc doit être suffisamment passive pour éviter des réactions chimiques avec le ciment ou bien, le béton doit être formulé avec un ciment n'ayant pas d'effet nocif sur l'adhérence avec les armatures galvanisées.

Note : pour éviter une attaque du zinc par le ciment du béton frais avec dégagement d'hydrogène, la **passivation naturelle de la couche de zinc** peut être obtenue par stockage des produits à l'extérieur. Normalement un délai de quatre semaines est suffisant. Une passivation instantanée peut être obtenue par immersion des produits revêtus dans une solution passivante.



Photo n° 133 : aciers de béton armé galvanisés au Grand Rocher du Zoo de Vincennes (crédit photo D. Poineau)

4.2.5.8.8 Armatures non métalliques de type polymère renforcé de fibres (PRF)

Le présent article complète, en tant que de besoin, l'article 4.2 du guide FABEM 7.

Il appartient au **marché** de fixer les caractéristiques que doivent présenter les **armatures PRF** à mettre en œuvre, les règles de dimensionnement à utiliser, les conditions de mise en œuvre et les contrôles à effectuer. Ces armatures peuvent être des « joncs » de faible section collées dans des encoches ou de **véritables armatures de béton armé** enrobées dans le béton comme celles en acier.

Note : le projet de norme **NF P95-105** traite, outre des tissus et plaques collées : **externally bonded reinforcement (EBR)**, du choix et de la mise en œuvre des armatures sous forme de joncs collés : **near surface bonded reinforcement (NSM)**.



Photo n° 134 : barre PRF avec revêtement sablé (crédit photo Freyssinet)



Photo n° 135 : barres PRF type ComBAR (crédit photo Schöck)

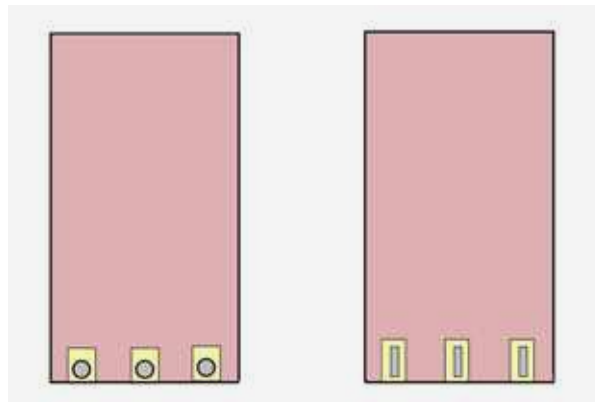


Figure n° 74 : joncs de diverses sections collés dans des encoches

> Généralités

Ces armatures sont obtenues par **pultrusion** et sont constituées de fibres (verre, carbone, aramide, basalte) de très faible diamètre (une dizaine de microns) enrobées dans une matrice à base de polymères (résines thermodurcissables : vinylesters ou époxydes).

Les armatures PRF sont disponibles sous la forme :

- de barres droites ;
- de barres courbes ;
- de barres avec une tête d'ancrage (remplacement des parties courbes aux extrémités d'une barre droite, étriers, armatures de barrières de sécurité...).

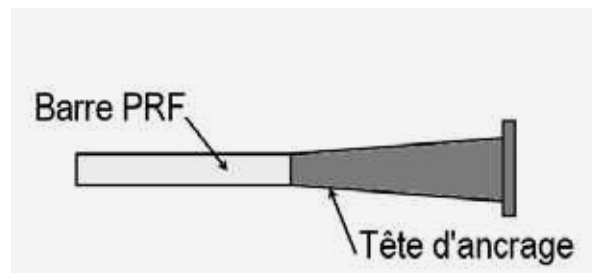


Figure n° 75 : schéma d'une barre PRF avec une tête d'ancrage

Pour assurer l'adhérence avec le béton, ces produits se présentent :

- soit comme les barres de BA en acier de type HA avec des verrous ;
- soit comme des barres lisses mais sablées pour augmenter l'adhérence ;
- soit enfin avec des verrous et sablées.

Pour obtenir des armatures courbes (étriers, cadres...) leur **façonnage est obligatoirement exécuté par le fabricant avant la polymérisation de la résine.**

Type de fibre	Type de fibre	Fournisseur
Verre E (PRFV)	V-Rod [®]	Pultrall [®] (Canada)
	Aslan™ 100	Hugues Brothers Inc. (USA)
	ComBar [®]	Schöck [®] (Allemagne)
Basalte (PRFB)	RockBar [®]	MagmaTech [®] (UK)
	Technobasalt [®]	Technobasalt [®] (Ukraine)
Carbone (PRFC)	Carbopree [®]	Sireg [®] (Italie)
	Aslan™ 200 [®]	Hugues Brothers Inc. (USA)
	V-Rod Carbon [®]	Pultrall [®] (Canada)
Aramide (PRFA)	Arapree [®]	Sireg [®] (Italie)
	Fibra [®]	Fibex [®] (Japon=

Tableau n° 46 : liste de fabricants de barres et armatures PRF

> Propriétés des fibres et des matrices :

Les deux tableaux suivants indiquent les principales propriétés des fibres et des matrices, propriétés développées dans la suite du présent article.

Fibres	Propriétés
Verre	Parmi les fibres de verre, celles de la classe E (coût modéré) sont les plus utilisées. Elles présentent une bonne résistance aux sollicitations mécaniques et thermiques. Elles doivent avoir une résistance adaptée aux milieux alcalins (béton).
Carbone	Ce sont les fibres les plus performantes dans tous les domaines mais leur coût est élevé
Aramide	Ces fibres présentent un haut module ; leurs performances les situent entre les fibres de verre et de carbone. Elles sont sensibles à l'humidité et leur résistance à la chaleur n'est pas très élevée.
Basalte	Ces fibres à base de basalte sont plus performantes que les fibres de verre et, comme elles, sont sensibles aux milieux alcalins . L'expérience actuelle est plus limitée sur ces fibres issues d'une technologie récente.

Tableau n° 47 : principales propriétés des fibres

Matrices	Propriétés
Polyesters	Retrait important, sensibilité aux UV et aux alcalins. Les polyesters ne sont pas utilisés dans les armatures PRF.
Vinylesters	Leurs bonnes propriétés et leur résistance aux agressions chimiques font qu'elles sont utilisées pour enrober les fibres de verre.
Époxydiques	Ces résines présentent de bonnes performances mécaniques, une faible absorption de l'eau, une température de transition vitreuse (Tg) élevée ainsi qu'une bonne adhérence aux fibres. Par contre, leur coût est élevé.

Tableau n° 48 : principales propriétés des résines utilisées comme matrices

> Propriétés détaillées des armatures PRF :

■ Propriétés mécaniques :

Contrairement aux aciers de béton armé, ces armatures ont une **rupture fragile** puisqu'ils ne présentent pas de palier plastique (leur limite d'élasticité est confondue avec leur contrainte de rupture).

ATTENTION, les caractéristiques mécaniques des composites sont moins élevées que celles des fibres à cause de la présence (indispensable) de la matrice de liaison. Cependant, elles sont plus élevées que celles des barres en acier. De plus, les **barres PRF** sont plus légères.

Les **armatures PRF**, si elles présentent dans le **sens longitudinal** une **résistance à la traction** plus élevée que les **barres en acier**, ont un **module d'élasticité** beaucoup plus faible sauf celles à base de fibres de carbone. En conséquence, les poutres armées **d'armatures PRF** peuvent présenter des **déformations élevées**. De plus, leur **résistance à la traction dans le sens transversal** est beaucoup plus faible car seule intervient la résistance du polymère de la matrice.

Autre particularité, dans les **parties courbes** réalisées avant polymérisation, les fibres côté extérieur sont tendues mais celles du côté intérieur ont un tracé ondulé. **La résistance à la traction des parties courbes des barres PRF est donc moins élevée que celle des parties rectilignes.**

Leur **adhérence au béton** varie suivant le traitement appliqué à leur surface et les dimensions de leurs verrous, elle peut être **nettement inférieure** à celle des aciers de béton armé.

Le comportement fragile des **armatures PRF** empêche le **signal d'alerte classique** que l'on constate avec les armatures en acier, à savoir l'apparition de fissures. Lors du dimensionnement, il faut donc surdimensionner la section des **armatures PRF** pour avoir une rupture par **écrasement du béton**.

■ Effets de la température :

Pour béton et un acier de BA, le **coefficient longitudinal de dilatation** est identique au coefficient **transversal de dilatation**. De plus, les coefficients de ces deux matériaux sont très proches. Ce n'est pas le cas pour les **armatures PRF**, le coefficient transversal pouvant être beaucoup plus important. Cela peut avoir une incidence sur l'adhérence des armatures et provoquer la fissuration du béton.

■ Température de transition vitreuse (Tg) :

Cette température est impactée par la composition de la matrice et aussi par le **cycle de polymérisation** c'est-à-dire un cycle de cuisson optimal ou pas.

En cas de risque d'incendie, comme pour les **armatures composites collées**, il faut s'assurer que la tenue au feu de la structure soit assurée par les armatures métalliques existantes en cas de défaillance des **armatures PRF**.

■ Durabilité :

• Incidence de l'humidité :

Une matrice constamment en contact avec l'eau peut subir une diminution de ses propriétés. Les fibres de verre peuvent subir des dégradations. Les fibres d'aramide sont très sensibles aux effets de l'humidité.

• Incidence des milieux alcalins :

Les fibres de verre, si elles ne sont pas correctement protégées, sont attaquées par les milieux alcalins (ciment du béton).

• Fluage et fatigue :

Le fluage des armatures PRF doit être pris en compte. **La fatigue** joue peu sur les matrices vinylesters et époxydes. Les fibres de carbone ont un très bon comportement vis-à-vis de la fatigue.

> **Textes de référence (choix des produits, méthodes d'essai et méthodes de dimensionnement) :**

Pays	Organismes	Titres
USA	ACI	Guide de dimensionnement, guide des méthodes d'essai et guide de certification
Canada	CSA	Guide de dimensionnement, et guide de certification et rapport technique
Italie	CNR	Guide de dimensionnement et de mise en œuvre
/	FIB	Guide de dimensionnement dans le modèle Code 2010

Tableau n° 49 49 : principaux textes de référence.

Note : une annexe JA « Embedded FRP Reinforcement » est prévue dans le **futur Eurocode 2** (parution en 2023 ou 2024).

Note : consulter également sur le site **Concrete Society** le **Technical report 055** : design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. 2nd edition).

4.2.5.9 Choix des armatures passives extérieures au béton et collées

Il s'agit des plats métalliques, des plaques et tissus composites. Se reporter au **guide FABEM 7** qui traite des armatures passives additionnelles extérieures au béton et collées.

Depuis 2003, outre les **avis techniques du CSTB**, sont parues de **nouvelles recommandations provisoires** élaborées par un **groupe de travail de l'AFGC** :

- Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique – Recommandations provisoires - Guide AFGC de décembre 2003 – Texte basé sur les **règles BAEL** ;
- Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique – Recommandations provisoires - Guide AFGC de juin 2007. Texte de 2003 actualisé ;
- Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique – Recommandations provisoires - Guide AFGC de février 2011. Texte basé sur l'**Eurocode 2** ;
- Renforcements parasismiques de structures en béton armé par matériaux composites de juin 2015. Texte basé sur l'**Eurocode 8** et la réglementation nationale (nouvelles zones sismiques).

Des règles de calcul et de dimensionnement devraient être intégrées au **futur Eurocode 2**.

Une **norme NF P95-105** sur la mise en œuvre des armatures composites collées dans le domaine de la réparation est en cours de rédaction (parution probable en 2021). **ATTENTION**, cette norme ne traite pas des méthodes de dimensionnement mais du choix des produits, de leur mise en œuvre et de leurs contrôles.

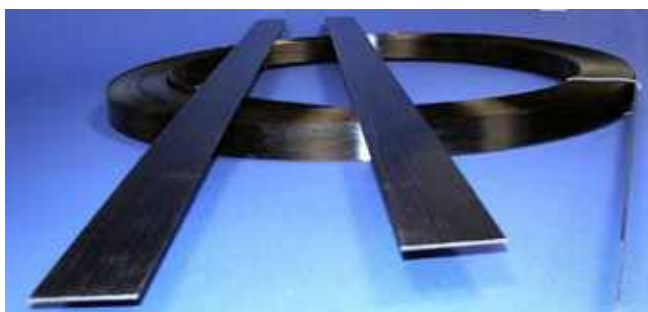


Photo n° 136 : diverses armatures composites sous forme de plaques
(crédit photo Freyssinet)

4.2.5.10 Choix des procédés et des armatures de précontrainte pour l'ajout de forces³¹ et des produits d'injection des conduits

4.2.5.10.1 Généralités

Se reporter à la nouvelle norme **NF P95-104**. Cette norme, qui intègre les mises à jour nécessaires, s'appuie, sur la norme **NF EN 13670/CN** et le fascicule **65 du CCTG**. Elle complète, en tant que de besoin, le **guide FABEM 8**.

Note : les références normatives de la norme **NF P95-104** sont à jour, ce qui n'est pas le cas des trois autres documents susvisés.

En réparation ou renforcement, les armatures de précontrainte additionnelles peuvent être disposées à :

- l'extérieur du béton de la structure à réparer ou renforcer ;
- l'intérieur du béton de la structure et, dans ce cas, le plus souvent, dans des conduits réalisés par forage.

Rappel des dispositions du fascicule 65 du CCTG concernant la précontrainte extérieure :

- sauf indication contraire du **marché**, les faisceaux d'armatures constituant un câble sont logés et protégés sur toute leur longueur à l'intérieur d'un **conduit collectif** (injecté ou non) même si les armatures bénéficient individuellement d'une protection anticorrosion définitive, par exemple par gainage.

Note : en cas d'utilisation de barres de précontrainte en acier inoxydable, il est possible de s'affranchir du recours à un conduit de protection.

- sauf exception dûment justifiée, la **précontrainte extérieure** doit être **démontable et remplaçable**. Le câble peut ainsi être détendu et ôté de la structure sans l'endommager (conservation des entretoises, déviateurs, massifs d'ancrage, etc.). Un nouveau câble peut ensuite être installé et tendu en lieu et place du câble existant. **Ainsi, l'utilisation de torons clairs injectés au coulis de ciment est proscrite**. Le tracé du conduit, des zones d'ancrage et des déviateurs doivent permettre la dépose et le remplacement du câble.
- si le **marché** impose la possibilité d'une **retension de la précontrainte**, l'attention est attirée sur le fait que les exigences cumulées sur la **possibilité de démonter et de retendre** imposent de laisser des sur-longueurs suffisantes d'armatures pour permettre la remise en place d'un vérin. Ces sur-longueurs doivent être protégées par des **capots spécifiques** fixés sur l'ancrage et/ou sur le béton environnant.

³¹ Consulter le guide de l'AFGC sur la durabilité de la précontrainte et sur les solutions de protection à mettre en œuvre (document paru en 2014).

4.2.5.10.2 Kits ou procédés de précontrainte

Le procédé de précontrainte utilisé lors d'une réparation ou d'un renforcement doit être **marqué CE** par un organisme notifié tel que l'**ASQPE** et faire l'objet d'une **Évaluation Technique Européenne (ÉTE)** (en anglais : European Technical Approval [ETA]).

Les nouveaux procédés de précontrainte doivent faire l'objet d'une **ÉTE** élaborée sur la base du **Document d'Évaluation Européen (DÉE) n°160004-00-0301** de septembre 2016 (en anglais : European Assessment Document [EAD] intitulé « Post-tensioning kits for prestressing of structures »)

À ce **DÉE** sur les procédés s'ajoute le **DÉE n°160027-00-0301 de 2017** qui traite des **produits d'injection** (Special Filling Products for Post Tensioning Kits).

Les anciens procédés de précontrainte relevaient d'un **Agrément Technique Européen (ATE)** basé sur le **Guide d'Agrément Technique Européen n°13 (GATE 13)** (en anglais : European Technical Approval Guide [ETAG 13]). Ils font désormais l'objet d'une **ÉTE** avec les deux situations suivantes :

- l'**ATE** est remplacé par une **ÉTE** mais il est toujours basé sur le **GATE n°13** ;
- l'**ATE** est remplacé par une **ÉTE** basée sur le **DÉE n°160004-00-0301**.

ATTENTION : il est rappelé que le simple marquage CE ne permet pas de garantir le **respect de toutes les performances exigées** par le **fascicule 65 du CCTG** et le **DÉE**. Le marquage CE peut ne concerner qu'une partie des exigences. Il est indispensable de vérifier que la **Déclaration des Performances (DdP)** couvre bien tous les aspects souhaités.

Dans le domaine de la réparation, des **adaptations des procédés sont parfois nécessaires**. Ces adaptations doivent respecter les principes du procédé et sont définies par le détenteur de l'**ÉTE**. Le **marché** doit être rédigé en conséquence. Par exemple :

- l'ajout d'armatures de précontrainte sur des bossages d'ancrage existants et prévus lors de la construction ;
- le remplacement d'armatures de précontrainte ancrées sur des têtes d'ancrage d'un procédé obsolète ;
- la mise en œuvre de corsets pour la précontrainte transversale...

Le recours à des **armatures en matériaux composites**, voire en d'autres matériaux, ne relève pas actuellement de documents à caractère normatif. Les exigences concernant les caractéristiques de ces systèmes (armatures, ancrages...) relèvent exclusivement du **marché**.

4.2.5.10.3 Armatures de précontrainte

- **Normes européennes** : actuellement, il n'y a pas de norme européenne opérationnelle sur les armatures de précontrainte. Il y a seulement des prénormes :
 - **PR NF EN 10138-1 de janvier 2001** : Armatures de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales,
 - **PR NF EN 10138-2 de janvier 2001** : Armatures de précontrainte – Partie 2 : fils,
 - **PR NF EN 10138-3 de janvier 2001** : Armatures de précontrainte – Partie 3 : torons,
 - **PR NF EN 10138-4 de janvier 2001** : Armatures de précontrainte – Partie 4 : barres,
 - **PR NF EN 10369-1 de juillet 2019** : Armatures de précontrainte – Torons de précontrainte protégés et gainés - Partie 1 : prescriptions générales,
 - **PR NF EN 10369-2 de juillet 2019** : Armatures de précontrainte – Torons de précontrainte protégés et gainés - Partie 2 : torons coulissants,
 - **PR NF EN 10369-3 de juillet 2019** : Armatures de précontrainte – Torons de précontrainte protégés et gainés - Partie 3 : torons adhérents,
- **Normes françaises** : les normes françaises expérimentales et homologuées sur les armatures de précontrainte actuellement en vigueur sont les suivantes :

- **NF A35-035 de juillet 2019** : Produits en acier – Fils lisses et torons de précontrainte à 7 fils revêtus par immersion à chaud de zinc ou d'alliage de zinc,
- **XP A35-037-1 de mai 2003** : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 1 : prescriptions générales,
- **XP A35-037-2 de mai 2003** : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 2 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés coulissants (type P),
- **XP A35-037-3 de mai 2003** : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 3 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés adhérents (type SC) ;
- **NF A35-045-1 de novembre 2018** : Aciers de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales,
- **NF A35-045-2 de novembre 2018** : Aciers de précontrainte – Partie 2 : fils,
- **NF A35-045-3 de novembre 2018** : Aciers de précontrainte – Partie 3 : torons,
- **NF A35-045-4 de novembre 2018** : Aciers de précontrainte – Partie 4 : barres,

Les armatures à haute résistance pour construction en béton précontraint par post-tension bénéficient d'une attestation de conformité au règlement ASQPE – Armatures de précontrainte ou équivalent.

Le référentiel technique de l'ASQPE concerne tous les types d'armatures : « claires », « revêtues », « protégées gainées ». Les armatures peuvent être des câbles constitués de fils lisses ou toronnés. Les armatures peuvent également être des barres filetées, les barres nervurées étant exclues conformément à la **norme NF P95-104**.

Les torons gainés-protégés sont du type P « coulissant », c'est-à-dire que le produit de protection permet un mouvement relatif entre le conduit et le toron par application d'une faible force (cela évite la rupture de la gaine à la mise en tension).

Note : se reporter au guide sur la durabilité de la précontrainte de l'AFGC de 2014 qui donne des conseils sur les différents niveaux de protection des armatures de précontrainte.



Photo n° 137 : précontrainte provisoire pour le remplacement de la précontrainte extérieure de l'ouvrage de Val Durance (crédit photo D. Poineau)

4.2.5.10.4 Conduits de précontrainte

L'ÉTE relatif au procédé de précontrainte à mettre en œuvre définit les types de conduits et leurs caractéristiques dans le respect du DÉE n°160027-00-0301.

■ Normes européennes :

- **NF EN 523 de janvier 2004** : Gains en feuillard d'acier pour câbles de précontrainte – terminologie, prescriptions, contrôle de qualité,
- **PR NF EN 10255 de juin 2015** : Tubes en acier non-allié filetables, soudables et aptes à d'autres méthodes d'assemblage - Exigences et méthodes d'essai - Tubes en acier non allié soudables et filetables,

- **NF EN 10255/IN1 de juillet 2007** : Tubes en acier non-allié soudables et filetables — Conditions techniques de livraison,
- **NF EN 10255+A1 de juillet 2007** : Tubes en acier non-allié soudables et filetables — Conditions techniques de livraison,
- **NF EN10210-1 de juillet 2006** : Profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins Partie 1 : conditions techniques de livraison,
- **NF EN10210-2 de mai 2019** : Profils creux de construction finis à chaud en aciers - Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de section,
- **NF EN 10216-1 d'avril 2014** : Tubes sans soudure en acier pour service sous pression — Conditions techniques de livraison — Partie 1 : tubes en acier non allié avec caractéristiques spécifiées à température ambiante,
- **NF EN 10217-1 d'avril 2019** : Tubes soudés en acier pour service sous pression - Conditions techniques de livraison - Partie 1 : tubes en acier non allié, soudés électriquement et soudés à l'arc immergé, avec caractéristiques spécifiées à température ambiante,
- **NF EN 12219-1 d'août 2006** : Profils creux de construction soudés formés à froid en aciers non alliés et à grains fins Partie 1 : conditions techniques de livraison,
- **NF EN 12219-2 de mai 2019** : Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers - Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de section,
- **NF EN 10305-3 de juin 2016** : Tubes de précision en acier - Conditions techniques de livraison - Partie 3 : tubes soudés calibrés à froid,
- **NF EN 12201-1 de novembre 2011** : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) - Partie 1 : généralités,
- **NF EN 12201-2/IN1 de novembre 2013** : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) - Partie 2 : tubes,
- **NF EN 12201-2+A1 de novembre 2013** : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) - Partie 2 : tubes,

■ **Normes françaises : (P.M.)**

■ **Marques NF :**

- **Marque NF 114** : Tubes en polyéthylène pour réseaux de distribution de gaz combustibles, réseaux de distribution d'eau potable, irrigation industrie, eau non potable et assainissement sous pression, confinement de transport d'électricité.

■ **Conduits de précontrainte extérieure :**

Se reporter à la norme NF P95-104 qui explicite le choix et les caractéristiques des conduits (tubes lisses en polyéthylène haute-densité (voire, d'un autre matériau que le PEHD) et tubes en acier obligatoirement protégés contre la corrosion par galvanisation à chaud ou métallisation). En particulier, la norme précise :

- le diamètre intérieur minimal, d'une part, pour les armatures claires ou revêtues et d'autre part, pour les armatures gainées et protégées ;
- le mode de livraison des tubes en PEHD ;
- longueur droite sauf pour les conduits de faible diamètre (pas plus de trois torons clairs) afin d'éviter des déformations préjudiciable à leur durabilité ;
- le mode de livraison des monotorons gainés protégés en couronne d'un diamètre ≥ 18 fois le diamètre extérieur minimal.

L'annexe C de la norme NF P95-104 donne les dimensions des tubes en PEHD pour les différents câbles constitués de torons clairs ou gainés et protégés, les torons étant de type standard et super.

■ **Conduits de précontrainte intérieure :**

Dans le cas où le projet de réparation ou renforcement prévoit la mise en œuvre d'armatures de précontrainte intérieures au béton deux solutions sont possibles :

- les armatures sont mise en œuvre dans le carottage sans conduit : se reporter à l'article 5.3.2 de la **norme NF P95-104** qui impose une injection au coulis de ciment,
- les armatures sont placées sous conduit : il convient de se reporter au **fascicule 65 du CCTG**.

4.2.5.10.5 Pipes d'injection, événements purges

Ces éléments font partie du procédé de précontrainte. La **norme NF P95-104** donne dans son tableau 4 les dimensions minimales de ces différents éléments : dispositifs d'ancrage, pièces et accessoires de précontrainte

Les dispositifs d'ancrage, les pièces et accessoires sont livrés sous un emballage et avec une protection provisoire assurant l'absence de corrosion jusqu'à la mise en œuvre de la protection définitive (voir les dispositions de l'ÉTE relatives aux procédés concernés). Les dispositifs d'ancrage, pièces et accessoires doivent être exempts de corrosion lors de la mise en tension.

4.2.5.10.6 Tubes coffrants des déviateurs et des zones d'ancrage, les selles d'appui des déviateurs et pièces mécano-soudées

- **les tubes coffrants et assimilés** sont des tubes de constructions conformes aux normes européennes susvisées (se reporter à l'article 4.2.5.11.4 ci-dessus). Ce sont des tubes ronds soudés formés à froid ;
- à partir de produits laminés à chaud ou des profils creux circulaires. Les aciers utilisés sont au moins de nuance S235 JR d'une épaisseur minimale de 3 millimètres ;
- **les selles d'appui et autres pièces mécano-soudées** sont élaborées avec des aciers de construction conformes aux normes :
 - **NF EN 10025-1 de mars 2005** : Produits laminés à chaud en aciers de construction Partie 1 : Conditions techniques générales de livraison,
 - **NF EN 10025-2 d'août 2019** : Produits laminés à chaud en aciers de construction — Partie 2 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés,
 - **NF EN 10025-3 d'août 2019** : Produits laminés à chaud en aciers de construction — Partie 3 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à l'état normalisé/laminage normalisant ;
- **tous ces éléments métalliques** doivent recevoir une protection par **galvanisation à chaud ou par métallisation** ce qui impose que la composition de ces aciers respecte la **norme NF A35-503 de juin 2008** : Produits sidérurgiques - Exigences pour la galvanisation à chaud d'éléments en acier.

Le marché fixe les exigences d'épaisseur en fonction de la **classe d'environnement et de la classe d'ouvrage** conformément aux dispositions du **fascicule 56 du CCTG de 2004** : **protection des ouvrages métalliques contre la corrosion**.

4.2.5.10.7 Produits d'injection des conduits de précontrainte

Le cas de la réinjection des conduits de précontrainte dans le but d'une protection, voire d'une restauration de la passivité des armatures de précontrainte, est traité dans la suite du présent document à l'article 4.2.6.6 ci-dessous.

■ **Cas de la précontrainte extérieure :**

Sauf disposition contraire du **marché**, la précontrainte extérieure doit être **démontable et remplaçable**. Le **marché** peut aussi la prévoir **retenable**. Deux solutions sont envisageables :

- l'injection avec un produit souple de type cire pétrolière (les graisses ne sont admises que pour la réalisation de torons gainés et protégés) et bénéficiant d'un marquage CE par un organisme notifié tel que l'ASQPE sauf cas exceptionnel,
- l'utilisation de torons gainés protégés dans une gaine injectée avec un coulis de ciment (la mise en tension ayant lieu après durcissement du coulis).

Les deux tableaux de L'article 7.2.6.2 du **fascicule 65** fixent les spécifications que doivent respecter les produits souples.

■ **Cas de la précontrainte intérieure :**

Le **marché** peut prévoir, soit une injection par un **produit rigide**, soit par un **produit souple**.

- injection par produit rigide : le coulis doit être conforme à la **norme NF EN 447 de décembre 2007** : Coulis pour câbles de précontrainte – Prescriptions pour coulis courants et doit bénéficier d'un marquage CE par un organisme notifié tel que **l'ASQPE** (produit élément du kit de précontrainte ou produit relevant d'un **ÉTE**) sauf cas exceptionnel. L'article 7.2.6.1 du **fascicule 65** du CCTG fixe les spécifications que doivent respecter les produits rigides ;
- injection par produit souple : de type cire pétrolière (les graisses ne sont admises que pour la réalisation de torons gainés et protégés) et bénéficiant d'un marquage CE par un organisme notifié tel que **l'ASQPE** sauf cas exceptionnel. Les produits souple doivent répondre aux dispositions de L'article 7.2.6.2 du fascicule 65 du CCTG.

4.2.5.11 Choix des produits et systèmes d'ajout de forces par déformations imposées

Article pour mémoire. Les techniques, produits et systèmes utilisés pour de telles opérations sont traités dans le **guide FABEM 8**.

4.2.6

CRITÈRES DE CHOIX SPÉCIFIQUES DES PRODUITS ET SYSTÈMES DE RESTAURATION OU DE PRÉSERVATION DE LA PASSIVITÉ DES ARMATURES

4.2.6.1 Généralités

Les fonctions auxquelles un produit ou un système de préservation ou de restauration de la passivité des armatures doit répondre sont fixées par le **marché** et contrôlées, si nécessaire, par une **épreuve d'étude**³².

Le présent article porte sur les produits et systèmes suivants :

- produits et systèmes destinés à remplacer le béton carbonaté et/ou pollué ou à augmenter le recouvrement des armatures avec apport d'alcalins ;
- produits et systèmes destinés aux traitements électrochimiques :
 - les produits et systèmes utilisés lors de la réalcalinisation et de l'extraction des chlorures ;
 - les produits et systèmes utilisés lors de la prévention et la protection cathodique ;
- les produits et systèmes utilisés pour appliquer un revêtement actif ou non sur les armatures de béton armé ;
- les produits et systèmes inhibiteurs de corrosion applicables sur les bétons ;
- les produits et systèmes utilisés pour augmenter la résistivité du bétons ;
- les produits et systèmes utilisés pour la réinjection des conduits de précontrainte.

Rappel : avant, mais, le plus souvent après, une **restauration de la passivité des armatures** (combinée ou non à une **réparation structurale ou non structurale**), il peut être nécessaire de réaliser. :

³² Les caractéristiques d'un produit normalisé même bénéficiant d'une marque de certification ou du marquage CE, ne permettent pas toujours d'assurer les fonctions recherchées pour la réparation d'une structure donnée. Des essais complémentaires sont parfois nécessaires.

- un **colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes** dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, pour le choix des produits et systèmes, au **guide FABEM 2** ;
- une **protection supplémentaire**, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour augmenter la résistivité du béton et/ou assurer le contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... Se reporter, pour le **choix des produits et systèmes**, au **guide FABEM 4**.

4.2.6.2 Choix des produits et systèmes de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures avec apport d'alcalins

Il s'agit des différents types de mortiers et bétons, se reporter aux articles 4.2.5.2 et 4.2.5.3 ci-dessus.

4.2.6.3 Choix des produits et systèmes nécessaires aux traitements électrochimiques

4.2.6.3.1 Généralités

ATTENTION, dans le cas où des **réparations locales avec remplacement du béton dégradé sont nécessaires**, les produits ou systèmes de réparation doivent présenter une résistivité électrique voisine de celle du béton de la structure pour permettre une densité de courant homogène (cf. l'article 5.10.4 de la **norme NF EN ISO 12696** relative à la protection cathodique). Les méthodes de traitements électrochimiques du béton sont effectuées par des **procédés d'entreprises donc brevetés**.

Les produits à mettre en œuvre sont proposés par l'**entrepreneur** à l'**acceptation du maître d'œuvre**, qui a lieu après les résultats de l'**épreuve de convenue**.



*Photo n° 138 : opération de déchloruration
(crédit photo Direction des Routes)*

4.2.6.3.2 Cas de la réalcalinisation par courant imposé

Les produits utilisés dans le traitement sont les suivants :

- une anode sous forme d'une grille en acier ou titane,
- des baguettes permettant d'isoler l'anode du parement,
- des fibres cellulosique imprégnées d'une solution de carbonate de soude ($[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ environ 100gr/litres d'eau). Des solutions potassique ou à base de lithium peuvent aussi être utilisées,
- de l'eau pour l'imprégnation de la cellulose et pour le lavage à la fin du traitement ;

Se reporter à la **norme NF EN 14038-1** et à l'article **3.5.6.3.3 ci-dessus**.

4.2.6.3.3 Cas de l'extraction des chlorures par courant imposé

Les produits utilisés dans le traitement sont les suivants :

- une anode sous forme d'une grille en acier ou titane,
- des baguettes permettant d'isoler l'anode du parement,
- des fibres cellulosiques imprégnées d'une solution de chaux (eau de chaux),
- de l'eau pour l'imprégnation de la cellulose et pour le lavage à la fin du traitement.

Se reporter à la **norme NF EN 14038-2** et à l'article **3.5.6.3.3 ci-dessus**.

4.2.6.3.4 Cas de la réalcalinisation ou de l'extraction des chlorures par anode sacrificielle

Les produits utilisés dans le traitement sont les suivants :

- une anode sous forme d'une grille métallique dont le potentiel normal est plus faible à celui des armatures (aluminium ou alliage d'aluminium),
- des baguettes permettant d'isoler l'anode du parement,
- des fibres cellulosiques imprégnées d'une solution permettant à la fois la déchloruration et la réalcalinisation, si nécessaire,
- de l'eau pour l'imprégnation de la cellulose et pour le lavage à la fin du traitement ;

Se reporter à la **norme NF EN 14038-1** et à l'article **3.5.6.3.3 ci-dessus**.

4.2.6.3.5 Cas de la prévention et de la protection cathodique

Rappel : la protection cathodique peut être appliquée sur des **ouvrages neufs ou des ouvrages existants** qui ne présentent aucune corrosion. Dans ce cas, la protection cathodique a pour rôle la **préservation de la passivité des armatures**. Dans le cas contraire, si la corrosion est développée, la protection cathodique a pour rôle la **restauration de la passivité des armatures**.

Rappel, les procédés de protection cathodiques sont de deux types :

- la protection cathodique par courant imposé ;
- la protection cathodique par anode sacrificielle où les armatures à protéger sont reliées directement à l'anode.

Rappel : au sens de la **norme NF EN ISO 12696**, les anodes ou ensembles anodiques, peuvent être constituées par :

1. des grilles, bandes, fils, tubes... en titane activé disposés :

- soit à la surface du béton et enrobées dans un mortier à base de liants hydrauliques,
- soit dans des rainures, des encoches pratiquées dans le béton et rebouchées par un mortier à base de liants hydrauliques,
- soit sous forme :
 - d'anodes intégrées dans la structure, dans des trous forés dans le béton puis rebouchés par un mortier à base de liants hydrauliques,
 - d'anodes avec un enrobage conducteur à base de graphite (carbone),
 - d'anodes noyées dans le béton de réparation.

Les mortiers d'enrobage à base de liants hydrauliques de certains des ensembles anodiques susvisés, doivent satisfaire aux dispositions de la norme **NF EN 1504-3**, en particulier en matière d'adhérence. De plus, leur **résistivité** doit rester comprise entre 50% et 200% de celle du béton de la structure, sans dépasser 100Ω. Enfin, leurs caractéristiques mécaniques doivent être voisines de celles du béton de la structure. Bien entendu, le mortier ne doit pas contenir de poudres ou fibres métalliques, afin d'éviter les courts-circuits (dans le cas où, au cours des travaux, les armatures de la structure sont mises à jour, il faut disposer des fixations non métalliques pour les isoler des anodes).

2. un revêtement conducteur :

- à base de résines synthétiques enrobant les anodes dites primaires (épaisseur du film entre 250 et 500 μm),
- métallique à base de zinc mis en place par métallisation, voire en alliage de zinc ou en titane activé (épaisseur du film entre 150 et 200 μm),
- à base de graphite conducteur enrobant des anodes ou des tiges de titane platiné.

Note : d'autres ensembles anodiques peuvent être utilisés, mais ne sont pas d'un usage courant. Se reporter à l'**annexe C informative** de la norme.

Les produits à mettre en œuvre sont proposés par l'**entrepreneur** à l'**acceptation du maître d'œuvre**, qui a lieu après les résultats de l'**épreuve de convenance**.

4.2.6.4 Choix des produits et systèmes utilisés pour appliquer un revêtement actif ou non sur les armatures de béton armé

Rappels, il s'agit d'un **contrôle des zones anodiques**, pour les empêcher de participer à la réaction, à l'aide :

- **d'un revêtement actif** qui contient des pigments électro-chimiquement actifs, c'est-à-dire susceptibles d'agir comme inhibiteurs ou pouvant assurer une protection cathodique localisée. Par exemple :
 - des produits à base de liants hydrauliques avec des polymères et des inhibiteurs de corrosion,
 - des produits à base de polymères (résines époxy et zinc)...

ATTENTION : certains des produits s'appliquent uniquement sur les armatures, d'autres peuvent aussi être appliqués sur le béton pour améliorer l'adhérence du produit de réparation.

- **d'un revêtement étanche** qui isole l'armature de l'eau interstitielle du béton (résines époxy).

Suivant le **type de revêtement** (actif ou étanche), la **nature des produits** (à base des résines de synthèse ou de liants hydrauliques...), la **participation des armatures au fonctionnement de la structure**, le produit ou le système devra satisfaire à des **exigences de performances communes pour toutes les utilisations prévues** (marquées par « ■ ») et, en plus, à des **exigences de performances particulières pour certaines utilisations prévues** dans la norme (marquées par □). Ces exigences et leur niveau figurent dans le tableau ci-dessous extrait de la **norme NF EN 1504-7** de novembre 2006.

Note : pour les revêtements actifs, le tableau ci-après montre qu'un produit pourrait être **marqué CE** sans avoir fait l'objet d'un quelconque essai ! Il est donc indispensable que le **marché** fixe des exigences à satisfaire parmi celles du tableau.

Méthodes d'essai	Caractéristiques de performance	Utilisations prévues		Exigences
		Revêtements actifs	Revêtements étanches	
NF EN 15183	Protection contre la corrosion	Sans objet	■	L'essai est jugé satisfaisant si les zones revêtues sont exemptes de corrosion et si la corrosion sous-jacente au niveau des bords meulés est < 1 mm

Méthodes d'essai	Caractéristiques de performance	Utilisations prévues		Exigences
		Revêtements actifs	Revêtements étanches	
NF EN 12614	Température de transition vitreuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Au moins 10°C ³³ au-dessus de la température de service (concerne les produits à base de résines de synthèse)
NF EN 15184	Adhérence par cisaillement (de l'acier revêtu sur le béton)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	La contrainte d'adhérence sur barres revêtues est au moins égale à 80% de la contrainte d'adhérence sur barres non revêtues. La valeur mesurée est la contrainte d'adhérence pour un déplacement de 0,1 mm

Tableau n° 50 : exigences de la norme EN 1504-7

Note : la norme susvisée a fait l'objet d'une révision mais le nouveau texte reste à l'état de projet, il s'agit de la **PR NF EN 1504-7** de novembre 2015.

À titre indicatif, le tableau suivant, extrait d'un document de septembre 2001 de l'Office fédéral des routes suisse sur l'utilisation des armatures en acier inoxydable dans les ouvrages en béton, donne des critères de choix sur différentes solutions de conservation de la passivité des armatures dans le cas d'un ouvrage neuf ou lors du remplacement des armatures corrodées d'un ouvrage existant. Il ne donne pas de solution sur la restauration de la passivité par l'application, après décapage, sur les barres corrodées de produits actifs ou non.

Types d'armatures	WS	BK	Béton carbonaté						
			Non	Oui	Non	Oui	Oui (1)	Oui (1)	
			Teneur en chlorures (2)						
			Null	Null	Faible	Faible	Moyenne	Élevée	
Armatures en acier normal	0	0	+	-	+/-	(-)	-	-	
Armatures revêtues de résine époxydique	0	?	Barrière uniquement physique sensible aux blessures et possible perte d'adhérence aux aciers dans le temps						
Armatures en acier galvanisé	0	0 / 1	+	+	(+)	-	-	-	
Armatures en acier inoxydable :	Au Cr (3)	10-16	1	+	+	+	(+ / -)	(+ / -)	-
	Au Cr+Ni ou Cr+Ni+Mo	17-22	2	+	+	+	+	+	(+)
	Au Cr+Ni+Mo	23-30	3	+	+	+	+	+	+
	Au Cr+Ni+Mo	> 31	4	Cas particuliers pour teneur en chlorures très élevée ou teneur en chlorures élevée et conditions défavorables (partie inaccessibles, fissuration avec écoulements d'eau...)					

Tableau n° 51 : tableau extrait d'un document de L'OFRS

Notes :

WS est l'indice de résistance aux piqûres (cf. l'annexe n°3) ;

BK est la classe de résistance à la corrosion (cf. l'annexe n°3) ;

(1) enrobages importants, les effets de la carbonatation est secondaire par rapport à celle des chlorures ;

(2) les teneurs en chlorures sont données dans l'annexe n°3 ;

(3) la sensibilité aux piqûres augmente lorsque le pH diminue. La carbonatation joue donc un rôle plus ou moins important.

³³ Erreur dans le tableau 3 de la norme qui indique 10 K au-dessus de la température de service maximale.

Il appartient au marché de fixer les exigences de performances et les niveaux des attestations de conformité nécessaires en fonction de l'usage prévu et de la mise en œuvre. Pour ce faire, il est indispensable d'analyser les deux tableaux ci-devant.

4.2.6.5 Choix des produits et systèmes inhibiteurs de corrosion applicables sur les bétons

Définition : un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, appliqué dans des quantités adaptées, si possible faibles, sur le béton à proximité d'aciers corrodés, stoppe ou retarde leur corrosion et ne montre aucun effet secondaire sur les propriétés du béton au niveau microscopique comme macroscopique.

Rappel, les inhibiteurs peuvent être mis en œuvre dans le béton frais lors de la construction d'un ouvrage neuf très exposé, ils peuvent être appliqués à la surface des armatures (voir l'article 4.2.6.4 ci-devant) et également à la surface du béton lors d'une réparation.

Les inhibiteurs peuvent être à base de molécules :

- **soit organiques** (aminoalcools, sels aminés d'acides carboxyliques, glycérophosphates de lithium, glucoheptonates). Ils se classent dans le groupe des inhibiteurs anodiques ;
- **soit minérales** (monofluorophosphates désignés par le sigle « MFP », nitrites de sodium ou de calcium, etc.). Ils se classent dans le groupe des inhibiteurs cathodiques non oxydants.

Les produits du commerce contiennent souvent des mélanges de composants qui peuvent avoir à la fois un effet anodique et un effet cathodique.

L'article 3.5.6.3.3.2 ci-dessus précise les limites d'emploi de cette technique et de certains des produits et systèmes utilisés.

En l'absence de norme de performance et de guide de choix, il appartient au marché de fixer, en fonction des résultats des études effectuées de mise au point du projet de réparation, les catégories de produits et systèmes pouvant être utilisés. Les produits et systèmes à mettre en œuvre sont proposés par l'entrepreneur à l'acceptation du maître d'œuvre, qui a lieu après la validation des résultats de l'épreuve de convenance.

4.2.6.6 Choix des produits et systèmes pour la réinjection de conduits de précontrainte

Se reporter au guide FABEM 8 relatif aux armatures de précontrainte additionnelles, à l'article 4.2.5.11.7 ci-dessus qui traite des produits d'injection des conduits de précontrainte et au fascicule 65 du CCTG.

4.2.7 EXIGENCES CONCERNANT LES CONSTITUANTS DES PRODUITS ET SYSTÈMES DE RÉPARATION ET LES PRODUITS CONNEXES

4.2.7.1 Généralités

Cet article concerne les principaux composants utilisés pour la fabrication ou la mise en œuvre des produits et systèmes de réparation. Ces composants doivent être conformes aux normes en vigueur complétées, si nécessaire, par les exigences du marché.

Rappel important : dans un **marché**, la référence à une norme ne suffit pas, puisque plusieurs niveaux de performance peuvent être exigés d'un même produit. Il convient d'analyser la norme concernant le produit et de se reporter aux **NF DTU, DTU et fascicules du CCTG**, qui donnent souvent les niveaux de performance à exiger et des conseils sur les documents et guides à consulter.

Les composants suivants font l'objet du présent article :

- les granulats pour béton ;
- les liants hydrauliques ;
- les additions ;
- les fibres ;
- les adjuvants ;
- les ajouts ;
- l'eau de gâchage ;
- les résines synthétiques.

Cet article rappelle également la nécessité de s'assurer :

- de la compatibilité des constituants des bétons
- et de l'absence de risque d'altération des armatures et autres pièces métalliques.

Les normes citées ci-après couvrent les différents domaines de la construction (le bâtiment et le génie civil) ainsi que les différents usages des différents produits (par exemple, adjuvants pour mortiers et adjuvants pour bétons). **Le marché doit uniquement faire références aux normes en rapport direct avec l'objet des travaux et aux documents complémentaires qui s'imposent.**

Les autres produits nécessaires aux travaux comme ceux pour le nettoyage, le décapage, la préparation de surface, le nettoyage des matériels et des outils ne font pas l'objet d'un article spécifique dans le **présent GUIDE**.

Il appartient au **marché** de fixer les caractéristiques et les performances des produits qui peuvent avoir une incidence sur la qualité des travaux. Les autres produits sont soumis par l'**entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre** en tant que de besoin.

4.2.7.2 Granulats pour bétons et mortiers

Les granulats pour bétons et mortiers doivent être conformes aux spécifications des normes suivantes : **NF EN 12620/ IN1 de juin 2008** : Granulats pour béton, **NF EN12620+A1 de juin 2008** : Granulats pour béton, **NF EN 13055 de mai 2016** : Granulats légers, **NF P 18-545 septembre 2011** : Granulats – Éléments de définition, conformité et codification.

Note : une révision de la norme granulats a débouché en septembre 2019 sur un projet de norme intitulé : **PR NF P18-545**.

Plusieurs niveaux de performances sont fixés par les **normes granulats**. Des choix s'imposent en fonction des caractéristiques du béton de la structure existante, de l'utilisation du produit ou système de réparation dans lequel sont incorporés des granulats (par exemple, en matière de résistance au gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage, à l'alcali-réaction, à l'abrasion...).

Le marché peut imposer que les granulats bénéficient de la **marque NF granulats** ou d'une marque équivalente.

Se reporter au **fascicule 65 du CCTG** qui précise :

- les conditions d'utilisation des granulats récupérés au niveau de la centrale et des granulats recyclés ;
- le choix des codes A ou B que les granulats doivent avoir suivant la classe de performance exigée du béton à mettre en œuvre ;

- les spécificités que doivent présenter les granulats pour la composition des **BHP** et **BAP** ;
- l'absence de pyrites et autres sulfures sous forme de grains pour les bétons apparents ou devant être mis en peinture ;
- les spécificités à respecter dans le cas de béton pour des éléments précontraints par pré-tension (armatures de précontrainte en contact direct avec le béton).

4.2.7.3 Liants hydrauliques

Les liants hydrauliques courants et non courants doivent être conformes aux spécifications des normes suivantes :

- **Normes européennes :**
 - **NF EN 197-1 d'avril 2012** : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ;
 - **NF EN 14216 de février 2016** : Ciments — Composition, spécifications et critères de conformité de ciments spéciaux à très faible chaleur d'hydratation (complète la norme NF EN 197-1) ;
 - **NF EN 413-1 de septembre 2012** : Ciment à maçonner - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité (utilisés pour la confection de mortiers destinés à réaliser des enduits).
- **Normes françaises :**
 - **FD P15-010 d'octobre 1997** : Liants hydrauliques - Guide d'utilisation des ciments ;
 - **NF P15-302 de septembre 2006** : Liants hydrauliques - Ciments à usage tropical - Composition, spécifications et critères de conformité ;
 - **NF P15-314 de février 1993** : Liants hydrauliques — Ciment prompt naturel ;
 - **NF P15-317 de septembre 2006** : Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer ;
 - **NF P15-318 de septembre 2006** : Liants hydrauliques - Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint ;
 - **NF P15-319 de janvier 2014** : Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

Pour les éléments en béton précontraint par pré-tension (armatures au contact direct du béton), le ciment conforme à la norme **NF P15-318** doit être du **CEM I CP2** ou du **CEM II CP2**. Pour les éléments en béton précontraint par post-tension, les ciments doivent être de classe **CP1**.

Le marché peut imposer que les ciments bénéficient de la marque **NF liants hydrauliques** ou d'une marque équivalente.

4.2.7.4 Additions

Les additions doivent être conformes aux spécifications des normes suivantes :

- **Normes européennes :**
 - **NF EN 450-1 d'octobre 2012** : Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité ;
 - **NF EN 450-2 d'octobre 2005** : Cendres volantes pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité ;
 - **NF EN 13263-1/IN1 de mai 2009** : Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité ;
 - **NF EN 13263-1+A1 de mai 2009** : Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité ;
 - **NF EN 13263-2/IN1 de mai 2009** : Fumée de silice pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité ;
 - **NF EN 13263-2+A1 de mai 2009** : Fumée de silice pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité.

■ **Normes françaises :**

- **NF P18-508 de janvier 2012** : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité ;
- **NF P18-509 de septembre 2012** : Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité.

Les ajouts ou additions doivent être compatibles avec le support ou la couche d'accrochage, le liant et les granulats (par exemple, les cendres volantes ne sont pas compatibles avec la résistance aux effets du gel/dégel). L'incorporation in situ d'ajouts ou d'additions est une opération délicate qui peut modifier formule et performances finales. Elle doit être réalisée suivant les spécifications du **fabricant** par un personnel utilisant un matériel adéquat.

Il est rappelé que le **fascicule 65 du CCTG** précise que :

- **les additions admises en substitution partielle du ciment** sont celles autorisées par la **norme NF EN 206/CN**. Les mêmes additions peuvent aussi être utilisées comme correcteur granulométrique ;
- pour les éléments en béton précontraint, la composition de l'addition vis-à-vis de la teneur en sulfure doit être telle que le liant respecte les exigences de la **norme NF P15-318** ;
- **pour la formulation du BHP** et dans le cas où une résistance caractéristique à 28 jours dépassant les 80 MPa est exigée, l'incorporation d'ultrafines s'avère nécessaire (fumées de silice...). L'incorporation d'ultrafines autres que la fumée de silice et en l'absence de norme de référence, est traitée comme un ajout.

4.2.7.5 Fibres

Les **fibres** utilisées dans la formulation des bétons fibrés à caractère structural ou non doivent être conformes aux spécifications des deux normes suivantes :

- **NF EN 14889-1 de novembre 2006** : Fibres pour béton - Partie 1 : fibres d'acier - Définitions, spécifications et conformité ;
- **NF EN 14889-2 de novembre 2006** : Fibres pour béton - Partie 2 : fibres de polymère - Définition, spécifications et conformité.

Note : un projet de norme concernant les fibres polymères : PR NF EN 14889-2 est paru en novembre 2018. D'autres fibres peuvent être utilisées dans la fabrication des armatures PRF et de plaques et tissus composites. Il s'agit des fibres de verre, de carbone, d'aramide et de basalte. Des fibres de cellulose sont utilisées dans les traitements électrochimiques.



Photo n° 139 : exemple de fibres métalliques en fonte
(crédit photo D. Poineau)

4.2.7.6 Adjuvants

Les adjuvants relèvent des normes suivantes :

- **NF EN 934-1 d'avril 2008** : Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 1 : exigences communes ;
- **NF EN 934-2+A1 d'août 2012** : Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage ;
- **NF EN 934-3+A1 d'octobre 2012** : Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 3 : adjuvants pour mortier de montage - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage ;
- **NF EN 934-4 d'août 2009** : Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 4 : adjuvants pour coulis de câble de précontrainte - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage ;
- **NF EN 934-5 de décembre 2007** : Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage ;
- **NF EN 934-6 de mars 2009** : Adjuvant pour béton, mortier et coulis — Partie 6 : Échantillonnage, évaluation et vérification de la constance des performances.

Il est rappelé que le fascicule 65 du CCTG impose que la compatibilité des différents adjuvants entre eux, ainsi qu'avec les ciments et additions, telles que les fumées de silice (en cas d'emploi de fumée de silice, la défloculation de ce matériau est assurée par la présence de superplastifiants), doit être vérifiée.

Le marché peut imposer que les adjuvants pour béton bénéficient de la **marque NF adjuvants** ou d'une marque équivalente.

4.2.7.7 Ajouts

Il est rappelé que le fascicule 65 du CCTG précise que des ajouts peuvent être incorporés au béton, conformément aux normes en vigueur. La norme NF EN 206/CN donne la définition de ces ajouts (NA.3.1.2.18) et en précise les règles d'emploi (NA.5.1.8). Ces ajouts ont pour rôle d'améliorer certaines des propriétés du béton ou de lui conférer des propriétés particulières.

4.2.7.8 Eau de gâchage

Il est rappelé que le fascicule 65 du CCTG précise que l'eau de gâchage satisfait aux prescriptions de la norme **NF EN 1008 de juillet 2003** (2^{ème} tirage juin 2006) : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

L'eau provenant d'un réseau public d'eau potable est réputée conforme à la norme. L'emploi d'eau de mer est interdit. L'utilisation d'eau décantée (masse volumique inférieure ou égale à 1,01) issue de la production de béton est autorisée sous réserve de prise en compte de son influence éventuelle sur des spécifications particulières telles que la teinte et la teneur en air entraîné. L'utilisation des eaux chargées (masse volumique strictement supérieure à 1,01) issues de la production de béton est interdite dans le cas de bétons apparents et de bétons à air entraîné.

4.2.7.9 Résines synthétiques

Les résines synthétiques utilisées dans les produits de réparation ne font pas l'objet d'une norme de spécifications, mais elles doivent satisfaire lorsqu'elles sont utilisées seules ou en mélanges, aux diverses normes d'essai visées dans les normes de la série **NF EN 1504-****.

Il est rappelé que des résines sont également utilisées pour la fabrication d'armatures (**PRF**) et de plaques ou tissus en matériaux composites comme indiqué dans deux articles ci-devant 4.2.5.9.8 et 4.2.5.10.



Photo n° 140 : boîtes de résines : base et durcisseur (crédit photo Freyssinet)

4.2.7.10 Compatibilité des constituants

Il est rappelé que le fascicule 65 du CCTG précise que les constituants du béton doivent être choisis de façon à être **compatibles entre eux** et ne pas **altérer les armatures** :

- la quantité maximale **d'ions chlore (Cl⁻)**, rapportée à la masse de ciment, doit être conforme aux dispositions suivantes :
 - Cl 0,15 pour les bétons précontraints par pré-tension ;
 - Cl 0,20 pour les bétons contenant des armatures de précontrainte en acier (post-tension) ;
 - Cl 0,40 pour les bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées ;
 - Cl 0,65 pour les bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec des ciments de type CEM III
 - Cl 1,0 pour les bétons ne contenant ni armature en acier, ni pièces métalliques noyées.
- pour les éléments en béton précontraint par pré-tension, la teneur totale du béton en **soufre des sulfures** doit être inférieure à 0,50 % de la masse du ciment ;
- les teneurs en **alcalins actifs** (cas des granulats PR, PRP et NQ), en **sulfates et en chlorures** de l'ensemble des constituants des bétons (y compris l'eau de gâchage) doivent être communiquées au **maître d'œuvre**.

Note : la classe de teneur en chlorures correspond au pourcentage de chlorures par rapport au poids de ciment.

Il est également rappelé que des **recommandations** concernant la **résistance des bétons aux effets du gel/dégel** fait l'objet d'un **guide technique édité par le LCPC** en décembre 2003 intitulé «recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel». Ces recommandations font actuellement l'objet d'une révision. **Un nouveau texte devrait paraître fin 2021, ou en 2022.**

4.2.8 ÉPREUVE D'ÉTUDE

Les produits prêts à l'emploi et conformes aux normes en vigueur, relevant d'un **marquage CE** (par l'intermédiaire d'une **norme harmonisée** ou d'un **ÉTE**), admis à une **marque de certification**, **telle que la Marque NF produits spéciaux** destinés à la construction en béton hydraulique ou une marque équivalente (**ATTENTION** : dans le mesure où le champ d'application de celles-ci couvre les besoins du chantier) ou encore faisant l'objet d'un **Avis Technique**, ne font normalement pas l'objet d'une **épreuve d'étude**.

Cette épreuve est cependant requise si :

- les caractéristiques de performance requises pour certaines utilisations (□) ne sont pas connues ;
- des caractéristiques de performance spécifiques sont requises pour des utilisations spéciales (au sens des annexes B des normes de la série **EN 1504-****) ;
- les conditions de contrôle ne sont pas adaptées ;
- les conditions de mise en œuvre du produit, en particulier la géométrie et l'orientation du support, les sollicitations imposées aux fissures, les conditions climatiques et hygrométriques, ne correspondent pas à celles fixées par les normes (**applications particulières ou non prévues**) ;
- les produits, une fois mis en œuvre, seront soumis à des sollicitations mécaniques spécifiques (vibrations sous trafic, séisme...) ou en contact avec un milieu agressif particulier...

Les produits non normalisés ou fabriqués sur le chantier doivent faire l'objet d'une **épreuve d'étude en laboratoire** pour s'assurer qu'ils satisfont bien aux **exigences du marché** avec les **techniques de mise en œuvre** prévues et dans les **conditions thermiques et hygrométriques** attendues sur le chantier.

Les résultats d'une **épreuve d'étude récente** (quelques mois) effectuée sur un **chantier identique** peuvent servir de référence si le **marché** l'autorise.

Dans le cas où une **épreuve d'étude** doit avoir lieu, elle est fixée par le **marché**. Sa consistance, son importance et les conditions d'interprétation des essais s'inspirent des essais visés par les normes en vigueur et des conditions de mise en œuvre des produits.

L'acceptation de l'**épreuve d'étude** par le **maître d'œuvre** fait l'objet d'un **POINT D'ARRÊT**.

4.3.1 LES DIFFÉRENTS PRODUITS

Différents types de matériaux, produits et systèmes de produits sont nécessaires pour la réalisation d'une réparation, d'un renforcement ou d'une protection d'une structure en béton, béton armé ou béton précontraint. Tous ces matériaux et produits ont été listés dans l'article 4.2.5 ci-devant relatif au choix des produits et systèmes. Il s'agit :

- des produits et systèmes utilisés pour la réparation et le renforcement du béton (mortiers et bétons, produits de collage...);
- des produits et systèmes utilisés pour préserver ou restaurer la passivité des armatures ;
- des matériaux et produits de base utilisés pour la fabrication de la plupart des produits et systèmes des deux catégories précédentes et, en particulier, les mortiers et les bétons.

À ceci s'ajoutent les produits et systèmes nécessaires au nettoyage et à la préparation des surfaces à traiter (produits de nettoyage, biocides, solvants abrasifs...), ceux nécessaires pour nettoyer les matériels utilisés, ceux pour assurer la protection et la cure des mortiers et bétons mis en œuvre...

4.3.2 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS PRÊTS À L'EMPLOI

4.3.2.1 Généralités

Les produits de nettoyage liquides ou sous forme de gels sont livrés en jerricans, bidons ou fûts.

Les produits de préparation des supports, suivant leur forme (poudre, liquide...), sont livrés en sacs, bidons, jerricans...

Les solvants sont livrés en jerricans, bidons, fûts... En général, ils sont facilement inflammables, nocifs par inhalation... Des précautions particulières s'imposent donc. Se reporter aux **fiches de sécurité (FDS)**.

Les mortiers à base de liants hydrauliques modifiés (type PCC) sont livrés en sacs, en seaux ou en big-bags et les produits servant au gâchage en seaux ou en bidons.

Pour les produits à plusieurs composants (deux ou trois), tels que les mortiers à base de liants organiques, les produits de collage..., devant être mélangés dans leur totalité avant leur emploi, les boîtes des composants doivent être réunies sous un **emballage unique** et avoir des capacités telles que le mélange puisse être effectué sans avoir à verser leur contenu dans un récipient additionnel.

Les produits doivent être livrés en récipients d'origine, parfaitement hermétiques, prédosés. Si les produits sont en pots, ils doivent disposer de tambours à ouverture totale.

Les armatures de béton armé et de précontrainte, les armatures industrielles pour béton, le béton prêt à l'emploi, les granulats... sont livrés conformément aux **normes en vigueur** complétées par les exigences des textes de mise en œuvre, tels que le **fascicule 65 du CCTG**, les **NF DTU** et les **DTU**, voire de celles du **marché**.

Le marché, si besoin est, impose des **conditionnements particuliers** lorsque les matériaux, les produits et les systèmes risquent d'être soumis pendant leur transport et leur stockage à des environnements nocifs à la conservation de leur propriétés (par exemple, conditionnement des armatures de précontrainte dans le cas d'un transport maritime, protection pendant le transport contre le froid des produits gélifs qui peuvent perdre leurs propriétés lors du dégel ...).

4.3.2.2 Marquage – Étiquetage

Dans le cas de produits normalisés ou admis à une marque, le marquage peut être défini dans la norme et/ou dans le règlement de la marque. Elles ne sont pas toujours explicites et complètes.

4.3.2.2.1 Marquage et étiquetage liés aux normes européennes

- **Sous le régime de la DPC** : les diverses normes européennes harmonisées relatives aux produits de construction comme les **normes NF EN 1504-2 à 7** de la série **1504** traitent du **marquage CE** et imposent les informations à apposer sur les **étiquettes des produits**. Il en est de même dans les guides relatifs aux agréments techniques européens (**GATE** ou **ETAG**). Les normes susvisées, lors de leur révision, relèveront du **RPC**.
- **Sous le régime du RPC** : pour les normes nouvelles ou révisées validées après juin 2015 avec la nouvelle **annexe ZA** (consulter le **TF N 687 rev1 de juin 2015**), il faut se reporter à l'**article 9 du RPC** qui fixent les conditions du **marquage CE** et de l'**étiquetage**, qui est également applicable aux produits relevant d'une **ÉTE** (conditions détaillées ci-après).

Se reporter au **guide de la Commission Européenne : marquage CE** des produits de construction étape par étape du 12 novembre 2015 destiné aux **fabricants** pour faciliter leurs démarches. Ce guide permet également aux **clients** (entreprise et maître d'œuvre) de s'informer sur le contenu d'une déclaration de performance (**DdP** ou **DoP**), de connaître les différents systèmes d'**EVCP**, les différentes approches du **marquage CE**...

L'article 9 du RPC impose les règles suivantes :

- 1) Le **marquage CE** est apposé de façon visible, lisible et indélébile sur le produit de construction ou sur une étiquette qui y est attachée. Lorsque la nature du produit ne le permet pas ou ne le justifie pas, il est apposé sur son emballage ou sur les documents d'accompagnement.
- 2) Le **marquage CE** est suivi :
 - des deux derniers chiffres de l'année de sa première apposition ;
 - du nom et de l'adresse du siège du fabricant ou de la marque distinctive permettant d'identifier facilement et avec certitude le nom et l'adresse du fabricant ;
 - du code d'identification unique du produit type ;
 - du numéro de référence de la déclaration des performances ;
 - du niveau ou de la classe des performances déclarées ;
 - de la référence à la spécification technique harmonisée appliquée ;
 - du numéro d'identification de l'organisme notifié le cas échéant (fonction du niveau de l'EVCP : systèmes 1+, 1, 2+ et 3°) ;
 - de l'usage prévu tel que défini dans la spécification technique harmonisée appliquée.

« L'option « **Performance Non Déterminée** » ne peut pas être utilisée lorsqu'un **seuil s'applique à la caractéristique**. Au contraire, elle peut être utilisée lorsque, pour un **certain usage prévu**, la caractéristique ne relève pas d'une réglementation dans l'État membre de destination ».

Note : dans un **système d'EVCP de niveau 3**, l'**organisme notifié** n'intervient que pour l'évaluation des performances mais pas au niveau du **Contrôle de la Production en Usine (CPU)**. Pour le **niveau 4**, aucun organisme notifié n'intervient.

Conformément au guide susvisé, Le fabricant est tenu de fournir à son client (ici l'entrepreneur) les informations suivantes :

- la **déclaration des performances (DdP ou DoP)** du produit (Cf. le **règlement UE n°574 du 21 février 2014**) ;
- le **marquage CE** et les informations accompagnant le marquage susvisées ;
- les instructions et informations de sécurité (**FDS**) si nécessaire ;
- les informations **REACH** si nécessaire.

Le marché impose que ces informations soient remises au maître d'œuvre par l'entrepreneur.

*Note : les indications, rédigées au moins en langue française, apparaissent normalement sur l'étiquette apposée sur chaque récipient d'un produit ou d'un système, sinon sur la **déclaration des performances** complétée par la **fiche technique** devant accompagner dans ce cas chaque livraison. A minima, le numéro de la **DdP** et le lien vers celle-ci figurent sous le cartouche **CE**.*

Il y a lieu de rappeler que les **normes harmonisées** disposent d'une **annexe ZA en trois parties ZA1 à ZA3**. Le contenu de ces trois parties a été légèrement modifié par le **RPC** :

- la **partie ZA1** comporte autant de tableaux que **d'usages prévus** et chaque tableau liste les **caractéristiques essentielles** (non chiffrées) auxquelles doit satisfaire le produit et s'il s'agit d'une classe de performance, d'une valeur déclarée, d'une valeur seuil... ;
- la **partie ZA2** traite des classes **d'EVCP** pour chaque **usage prévu** mais aussi des classes **d'EVCP** pour les **usages** soumis à une **réglementation relative à la réaction au feu** ;
- la **partie ZA3** traite du **marquage CE** et de l'**étiquetage** (texte conforme à celui de l'**article 9** du **RPC** susvisé).

4.3.2.2 Marquage et étiquetage liés aux normes françaises

Certaines normes françaises précisent le contenu des **fiches techniques** des fabricants ou des producteurs. Il en est ainsi de la **norme NF P18-545** qui assure une liaison entre les diverses normes européennes relatives aux granulats (pour béton, mortier, ballast...).

*Note : la norme NF P18-800 relative aux définitions, conditionnement marquage et conditions de réception des produits spéciaux destinés aux réparations, détaillait les conditions minimales d'étiquetage des produits. **Elle a été abrogée fin 2008** à cause de la parution des normes de la série 1504.*

Les **DTU** ou **NF DTU** demandent un **étiquetage d'identification** donnant les précautions d'emploi.

Pour synthétiser, le **marquage** et/ou l'**étiquetage** doivent être conformes aux **spécifications** de la **norme en vigueur** complétée, si besoin est, par les exigences du **règlement de certification du produit** dans le cas où une certification a été mise en place (par exemple, la **Marque NF** ou une **marque équivalente**).

4.3.2.2.3 Marquage et étiquetage - Synthèse des besoins

Les indications rédigées au moins en langue française, que devrait comporter une « **étiquette idéale** » (y compris le **marquage CE**) y compris les **documents d'accompagnement** pour un produit ou d'un système, sont les suivantes :

- les deux derniers chiffres de l'année de la première apposition du marquage **CE** ;
- le **nom de l'adresse du siège du fabricant ou de la marque distinctive** permettant d'identifier facilement et avec certitude le nom et l'adresse du fabricant, voire l'adresse de son représentant agréé établi dans l'EEE, ainsi que le lieu de production ;
- l'identification du produit, c'est-à-dire la **marque de fabrique**, le **numéro du lot** et le **code d'identification unique** du produit type ;
- le **numéro de référence de la déclaration de performances (DdP ou DoP)** ;
- le **type du produit ou du système** et la **référence datée** de la **spécification technique harmonisée** appliquée (par exemple la norme de la série **EN 1504-.****) ;
- le **niveau ou la classe des performances déclarées** ;
- le **numéro d'identification de l'organisme notifié** (seulement pour les produits relevant des systèmes 1+, 1, 2+ et 3) ;
- l'**usage prévu** tel que défini dans la **spécification technique harmonisée** appliquée ;
- les **instructions et informations de sécurité (FDS)** si nécessaire ;

- les informations **REACH** si nécessaire ;
- un résumé des exigences relatives au stockage, avec les exigences concernant la durée du stockage, clairement marquées, par exemple : « Ce produit ne doit plus être considéré comme conforme à l'**EN 1504**-** après le ... » ;
- des recommandations relatives à l'emploi, y compris toutes précautions particulières concernant l'utilisation et les mesures de sécurité imposées par les réglementations locales.

La présence du **numéro d'identification de l'organisme notifié** est importante. Elle permet de connaître le **système d'EVCP** du produit et donc le niveau de confiance qu'on peut lui accorder.

Dans le cas où certaines des indications susvisées ne figurent pas sur l'étiquette, voire dans la fiche technique, il appartient à l'**entrepreneur** de les demander au **fabricant** afin de les remettre au **maître d'œuvre**.

Il est recommandé de prévoir dans le **marché** que les **indications suivantes**, qui complètent l'étiquetage, ainsi que les **fiches techniques**, doivent être remises par l'**entrepreneur au maître d'œuvre** sur sa demande :

- la **date de fabrication** complétant le numéro du lot (sur chaque composant pour les produits à plusieurs composants et sur le suremballage) ;
- la référence à la **notice d'emploi** (fiche technique) ;
- le cas échéant, le sigle de la **Marque NF** de conformité aux normes apposé dans les conditions prévues au règlement particulier de cette marque³⁴ ;
- pour les produits à **plusieurs composants**, l'indication de l'obligation de les mélanger dans leur totalité, sauf indication contraire du fabricant ;
- la masse ou le volume net des produits de type monocomposant ou, pour les produits à plusieurs composants, la masse ou le volume net total ;
- pour les produits à base de liants hydrauliques, la **quantité d'eau de gâchage** prévue selon le ou les usages du produit correspondant à l'unité de conditionnement ;
- pour les produits à base de résines synthétiques la **durée pratique d'utilisation (DPU)** suivant les conditions thermiques des essais normalisés effectués en laboratoire.

Note : sur le chantier l'**épreuve de convenue** permet de mesurer la **DPU réelle** du produit en fonction du volume des composants mélangés et des conditions hygrothermiques qui y règnent. Les mesures doivent être renouvelées si les conditions changent.

³⁴ Pour les Marchés Publics, il faut aussi admettre les marques de certification équivalentes (la preuve est du ressort du producteur).



Photo n° 141 : extrait d'une fiche technique (document Sika Top 122)

4.3.3 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS FABRIQUÉS SUR LE CHANTIER

Les différents composants et constituants qui servent à la fabrication foraine des produits doivent être livrés dans des récipients ou containers adaptés aux quantités à mettre en œuvre, parfaitement nettoyés pour éviter toute pollution et suffisamment solides pour éviter tout mélange accidentel. Chaque composant doit être facilement identifiable (étiquette, marquage indélébile, etc.) de façon à éviter toute confusion. Si besoin est, le **marché** impose des exigences particulières.

L'entrepreneur propose le **conditionnement** à l'acceptation du **maître d'œuvre**.

4.4.1 GÉNÉRALITÉS

Les produits doivent être livrés sur le chantier suffisamment à l'avance pour permettre d'effectuer les **essais** et **contrôles** prévus par le **marché** et la **procédure** correspondant aux travaux à effectuer.

Les exigences relatives à la **réception des produits et systèmes** sont développées dans la partie « **ESSAIS ET CONTRÔLES** » du **présent GUIDE** sachant que la **réception** des produits, systèmes, matériaux... fait l'objet d'un **POINT D'ARRÊT**.

1^{ER} TYPE DE PRODUITS : la majeure partie des produits et systèmes de réparation structurale et non structurale et de restauration ou conservation de la passivité des armatures ainsi que des produits connexes tels que ceux nécessaires à la préparation des surfaces, au nettoyage des outils... sont des **produits « prêts à l'emploi »**.

Les produits doivent être transportés puis stockés en suivant les prescriptions fixées par la **fiche technique** du produit, la **fiche de données de sécurité** et l'**étiquette de sécurité**, en particulier vis-à-vis du point éclair. Le **marché** complète, en tant que de besoin, ces prescriptions.

Certains produits, s'ils sont transportés en ne respectant pas les conditions prescrites vis-à-vis de la température (par exemple en cas de gel), peuvent **ne pas être récupérables** alors que d'autres produits retrouvent leurs caractéristiques initiales. L'**entrepreneur** impose au **transporteur** de respecter les consignes et d'équiper le véhicule des moyens de mesure permettant de démontrer que les consignes ont été respectées.

En principe, les produits sont stockés à l'abri du soleil et du froid et en respectant les températures exigées (en général, entre 10 et 25°C). Le **local de stockage** doit être fermé mais aéré. De plus, une signalétique appropriée (par exemple, matières inflammables) doit être apposée sur le local.

2^{ÈME} TYPE DE PRODUITS : les autres produits utilisables sur un chantier de réparation, tels que les granulats, bétons, armatures... relèvent également de normes, voire de règlements de certification et sont visés par les documents normatifs ou à caractère normatif que sont les **NF DTU, DTU** et **fascicules du CCTG**.

Les matériaux et les produits doivent être transportés puis stockés en suivant les prescriptions des textes en vigueur complétées par les prescriptions du **marché**.

4.4.2 CONDITIONS DE TRANSPORT ET DE STOCKAGE - EXAMEN DES TEXTES CONCERNANT LES PRODUITS SPÉCIAUX POUR BÉTON (PRODUITS DE RÉPARATION)

L'examen des normes européennes de la série **NF EN 1504-**** et de leurs **annexes ZA** montre que celles-ci traitent surtout du **contrôle en usine** (annexe informative avec la fréquence des essais) mais pas de la **réception sur le chantier**. Cependant dans ces normes se trouvent des tableaux donnant les **exigences d'identification** et les **normes d'essai** associées mais ne sont pas précisés le nombre des essais et les conditions de leur interprétation.

Compte tenu de la **relative faiblesse des exigences** de ces normes, il est donc nécessaire que le **marché** impose parmi les **essais d'identification** ceux qui peuvent être réalisés sur le chantier, voire, si nécessaire, ceux qui doivent être réalisés en laboratoire. De plus, le **marché** doit prévoir les **prélèvements conservatoires** et leurs conditions de stockage.

Note : les deux textes suivants **annulés** : la norme française **NF P 18-800** et le fascicule de documentation **FD P 18-802** imposaient des **essais de réception** sur chantier qu'il est possible d'intégrer dans un **marché** avec sous réserve de les adapter aux normes actuelles.

4.4.3

**CONDITIONS DE TRANSPORT ET DE STOCKAGE -
EXAMEN DES TEXTES CONCERNANT LES BÉTONS
ARMATURES ET PRODUITS CONNEXES LIVRÉS SUR
LE CHANTIER**

Cas des bétons :

- la norme NF DTU 21 de juin 2017 s'appuie sur les normes NF EN 206/CN et NF EN 13670/CN ;
- la norme NF EN 206/CN montre qu'elle traite essentiellement des conditions de livraison mais non des conditions de transports ;
- la norme NF EN 13670/CN traite des conditions de transport du béton mais reste très générale ;
- le fascicule 65 du CCTG traite dans leur ensemble des conditions de transport, stockage et manutention des bétons.

Compte tenu de ce constat, il est donc nécessaire que le marché fixe des règles en faisant appel aux clauses du fascicule 65 du CCTG. **ATTENTION**, pour les bétons autoplaçants, projetés... des clauses complémentaires sont à ajouter.

Cas des granulats et des armatures :

La même constatation peut être faite pour les granulats et les armatures. Comme pour les bétons, le marché s'appuie donc sur les clauses du fascicule 65 du CCTG.

4.5.1 GÉNÉRALITÉS

Dans le cadre de la **procédure correspondant aux travaux à réaliser**, l'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** le matériel qu'il compte utiliser dans le respect des dispositions du **marché** et conformément aux stipulations des documents rendus contractuels (normes, NF DTU, DTU, fascicules du CCTG, guides techniques...) et des fiches techniques des fabricants³⁵.

L'état et le bon fonctionnement du matériel doivent être contrôlés par l'**entrepreneur** qui s'assure également de la présence des **fiches techniques** et des **cahiers d'entretien**, voire des **procès-verbaux de tarage** (manomètres, dispositifs de pesage...). Il présente ces documents au **maître d'œuvre** sur sa demande ou dans les conditions prévues par le **marché** ou les documents rendus contractuels.

Les différents matériels à utiliser concernent :

- la préparation du support ;
- la préparation des produits et systèmes ;
- la mise en œuvre des produits et systèmes.

Avant tout commencement d'une réparation ou d'un renforcement, si nécessaire, des protections contre le **vent**, le **soleil** ou la **pluie** sont à mettre en place. Ces exigences figurent normalement dans la **fiche technique du produit** ou du **système**. Dans le cas des produits fabriqués sur chantier, il faut appliquer les mêmes précautions que pour les produits prêts à l'emploi du même type (produits à base de liants hydrauliques ou organiques).

Note : un dispositif de protection peut être également nécessaire pour des raisons **d'hygiène ou de sécurité** vis-à-vis du personnel du chantier, du milieu environnant et des tiers (émission de poussières, projections de produits et matériaux, nuisances sonores...).

4.5.2 MATÉRIELS DE PRÉPARATION DU SUPPORT

Le **présent GUIDE** traite dans le chapitre 3.4 ci-dessus des diverses causes des dégradations des bétons, des armatures passives et actives et des structures et dans le chapitre 3.5 ci-dessus des diverses méthodes de réparation et/ou renforcement en fonction des désordres et dégradations constatées et de leurs causes.

Chaque méthode de réparation ou renforcement peut nécessiter une **préparation du support** concernant le béton seul ou le béton et les armatures. La liste qui suit traite des **principales méthodes de réparation ou de renforcement, voire de certaines techniques de mise en œuvre** avec un renvoi aux **GUIDES du STRRES, NF DTU, DTU et normes** dans lesquels les techniques et les matériels de préparation du support sont détaillés (**nettoyage** du béton et des armatures, **repiquage** du béton [profondeur limitée à 1,5 cm], enlèvement du béton [au-delà de 1,5 cm] et **décapage** des armatures...) :

- **exécution des ouvrages en béton** (les textes concernent les ouvrages neufs mais nombre des opérations comme les reprises de bétonnage... sont mises en œuvre lors des réparations et renforcements) : **Fascicule 65 du CCTG** (exécution des ouvrages de génie civil en béton) et NF DTU 21 (exécution des ouvrages en béton) deux textes basés sur la **norme NF EN 13670/CN** (exécution des structures en béton) ;
- **exécution des réparations non structurales et structurales et renforcements, norme NF P95-101** (partie de la norme consacrée à la préparation du support et des armatures). Ces méthodes figurent également dans la **norme NF P95-103**. Se reporter à l'article 5.2 ci-dessous ;
- **traitement des fissures** : **guide FABEM 2** (calfeutrement, pontage, protection localisée et création d'un joint), **guide FABEM 3** (traitement des fissures par injection) et **norme NF P95-103** (partie de la norme consacrée au traitement des fissures) ;

³⁵ Le marché vise en tant que de besoin les fiches techniques de fabricants, les normes, les fascicules du CCTG, les guides techniques en totalité ou en partie...

- **protection du béton : guide FABEM 4** (protection du béton), **norme NF P95-103** (partie de la norme consacrée à la protection du béton) et **norme NF DTU 42-1** (réfection de façades en service par revêtement d'imperméabilisation à base de polymères) ;

Note : la mise en peinture des bétons est traitée par le fascicule 65 du CCTG et la norme NF DTU 59 1 (revêtements de peinture en feuil mince, semi-épais et épais). Le DTU 59.3 (peinture de sols) a été abrogé.

- **béton projeté : guide FABEM 5** (guides ASQUAPRO) et **norme NF P 95-102-1** (mortier et béton projeté norme en cours de révision, qui s'appuie sur les normes NF EN 14487-1 (définitions, spécifications et conformité) et 14487-2 (exécution) ;
- **armatures passives additionnelles : guide FABEM 7 et norme NF P 95-105** (renforcements par matériaux composites collés ou scellés – norme en cours de rédaction) ;
- **précontrainte additionnelle : guide FABEM 8 et norme NF P95-104** (spécifications relatives à la technique de la précontrainte additionnelle).

Note : d'autres techniques comme la régénération des bétons par des méthodes électrochimiques nécessitent aussi divers matériels pour la préparation du support, ces matériels sont évoqués dans les parties du présent document consacrées à la mise en œuvre de ces techniques.

La suite de cet article traite cependant des **matériels de préparation du support béton et des armatures** dans le cadre des opérations d'enlèvement du béton carbonaté et pollué et de la préservation ou de la restauration de la passivité, techniques et méthodes traitées par le **présent GUIDE** (réfection du béton dégradé).

Rappel, l'opération d'enlèvement du béton pollué ou carbonaté peut concerner, soit tout ou partie de l'épaisseur de la couche de béton d'enrobage du premier lit d'armatures dans le cadre d'une réparation de surface, soit une épaisseur plus importante dans le cadre d'une réparation à considérer comme structurelle. Dans les deux cas les **armatures de BA doivent être détournées et découpées** pour que l'on puisse, lors de la réparation, créer tout autour des armatures une enveloppe de mortier ou béton au pH élevé gage de la restauration de leur passivité.

Avant de procéder à l'opération susvisée, il peut être nécessaire de **nettoyer la surface du béton** pour enlever des salissures, de la végétation (mousses, lichens...) un revêtement dégradé... ce qui permet, si nécessaire, de compléter le **relevé contradictoire** des désordres apparents effectué précédemment.

Après l'opération susvisée lorsqu'elle provoque, des salissures et/ou de la poussière sur le béton et les armatures dégagées, il est de nouveau nécessaire de **nettoyer la surface du béton et des armatures** avant de procéder à la **restauration du béton (principe 3)** par application manuelle ou mécanique d'un mortier ou d'un béton.

Le marché fixe les **méthodes autorisées** en fonction des exigences de protection de la zone concernée par les travaux, de l'importance des travaux à effectuer (surface, profondeur...), de la nécessité de dégager, sans les endommager, les armatures de leur gangue de béton, du type de produits de réparation à mettre en place (PC, PCC, CC...).

Les différentes techniques et le matériel nécessaire sont listés ci-dessous mais sans plus de détail ; il convient de se reporter aux **deux tableaux, de l'article 5.2 ci-dessous**, qui listent les **différents moyens** utilisables pour repiquer ou enlever le béton, dégager et découper les armatures et procéder aux nettoyages nécessaires avec leurs **avantages, inconvénients et limites d'emploi**.

- **techniques de repiquage du béton** (limité à 15 mm de profondeur) :
 - sablage (jet d'abrasif à sec),
 - hydro-sablage,
 - grenailage,
 - jet d'eau à moyenne pression (pression < environ 60 MPa),
 - rabotage mécanique,
 - ponçage,

- décapage thermique,
 - décapage chimique,
 - cryo-décapage.
- **techniques d'enlèvement du béton** (au-delà de 15 mm de profondeur) :
- burinage avec des outils manuel légers,
 - burinage avec un marteau à aiguilles multiples,
 - bouchardage avec des outils manuels légers,
 - décapage à moyenne pression (jusqu'à 60 MPa) avec une pompe HP,
 - décapage à haute pression (110 MPa et plus) avec une pompe HP.
- **techniques de nettoyage** :
- grattage et brossage,
 - ponçage,
 - marteau léger à aiguilles multiples,
 - jet d'abrasif à sec,
 - grenailage,
 - jet d'eau à basse pression (pression < 18 MPa),
 - jet d'eau à moyenne pression (pression < 60 MPa),
 - air comprimé sans huile,
 - vapeur,
 - lessivage avec détergents et/ou biocides,
 - lavage à l'acide.

4.5.3 MATÉRIELS DE PRÉPARATION DES PRODUITS

***Note** : faute d'un intérêt technique fort pour le lecteur, le présent article ne détaille pas pour chaque produit et chaque système les matériels nécessaires à leur préparation. Il ne traite que du matériel nécessaire à la préparation des trois grandes familles de produits et systèmes.*

Rappel : une réparation structurale ou non structurale, un renforcement et/ou une restauration de la passivité des armatures doit souvent être complété par :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, pour le **choix du matériel de préparation des produits et systèmes au guide FABEM 2 et à la norme NF P 95-103** ;
- **et/ou une protection supplémentaire**, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... Se reporter, pour le **choix du matériel de préparation des produits et systèmes au guide FABEM 4 et à la norme NF P 95-103**.

4.5.3.1 Généralités

Les produits et systèmes (pour réparation structurale ou non et pour restauration ou préservation de la passivité des armatures) **imposent, pour leur préparation**, selon qu'ils sont à base de liants hydrauliques modifiés ou non, à base de liants organiques, fabriqués en usine ou sur le chantier en petite ou grande quantité et mis en œuvre manuellement ou mécaniquement, un **certain type de matériel**.

Pour les produits prêts à l'emploi, la **fiche technique** indique quels sont les outils et matériels à utiliser.

Pour les produits fabriqués sur le chantier, l'**entrepreneur** propose, en **temps utile**, à l'acceptation du **maître d'œuvre** le matériel de fabrication et ce, dans le respect des exigences du **marché**.

Les **produits** utilisés lors de la mise en œuvre des **méthodes particulières de réparation** que sont les traitements électrochimiques, l'application d'inhibiteurs de corrosion..., doivent être préparés avec le matériel prévu dans la **fiche technique du procédé**, le plus souvent breveté. L'**entrepreneur** remet, en temps utile, à l'acceptation du **maître d'œuvre** la **procédure d'exécution** relative à la **préparation des produits**.

Les **produits et matériaux traditionnels**, comme les bétons (courants, BHP et BAP) les armatures industrielles pour béton, les cages d'armatures réalisées sur chantier..., sont fabriqués conformément aux normes et textes en vigueur complétés par les exigences particulières du **marché** (se reporter, en particulier, au **fascicule 65 du CCTG et au NF DTU 21**).

La préparation et la mise en œuvre des produits non traditionnels tels que les **BFUP**, les **bétons projetés**... imposent que le **marché** fixe les règles à respecter en s'appuyant sur les normes documents et guides disponibles :

- **Recommandations de l'AFGC de 2013** relatives au **BFUP** ;
- **Normes NF P18-470, NF 18-710 et NF P18-451** susvisées et relatives au **BFUP** ;
- **Normes NF EN 14487-1 et 2 et NF P95-102-1** relatives au **béton projeté**.

4.5.3.2 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi de type monocomposant à base de liants organiques

L'homogénéisation de ces produits est généralement obtenue en les remuant manuellement ou avec un **agitateur à faible vitesse de rotation**³⁶ (quelques centaines de tours par minutes pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme.

4.5.3.3 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi multicomposants à base de liants organiques ou de liants hydrauliques et organiques

Les **produits à base de résines** sont livrés dans des emballages regroupant une boîte contenant la résine et une boîte contenant le durcisseur.

Le plus souvent, le durcisseur est à verser dans la **boîte de résine dont la capacité est adaptée à cet effet**. L'homogénéisation du mélange est obtenue par un **agitateur à faible vitesse de rotation**, pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange, en respectant la **durée de malaxage** de la **fiche technique** (quelques minutes) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme. Ensuite il faut, en général, aussi respecter la **durée de mûrissement** (quelques minutes) de la **fiche technique** avant d'utiliser le produit.

Les **mortiers et bétons de type PCC** sont livrés dans des emballages contenant un bidon de résine et un sac contenant un mélange granulaire (ciment et granulats).

La **préparation d'un produit PCC** se déroule généralement comme suit : la résine est versée dans un récipient propre, puis on y ajoute le mélange granulaire en remuant le tout avec un **agitateur à faible vitesse de rotation**, pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange. Il convient de respecter la durée de malaxage de la **fiche technique** (quelques minutes) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme. Ensuite il faut, en général, aussi respecter la **durée de mûrissement** (quelques minutes) de la **fiche technique** avant d'utiliser le produit.

³⁶ Suivant le type de produit et les risques feu qu'il présente, l'agitateur peut être électrique ou pneumatique.

Pour les produits, tels que les mortiers à base de liants organiques (PC), il faut commencer par préparer le mélange résine durcisseur selon les indications de la **fiche technique**, puis y ajouter les charges. Le mélange final est généralement obtenu par un **malaxeur à axe vertical** plus puissant qu'un simple agitateur.

4.5.3.4 Matériels de préparation des produits prêts à l'emploi ou non à base de liants hydrauliques

Pour la fabrication des mortiers et bétons à base de liants hydrauliques, si les quantités à mettre en œuvre sont importantes, le mélange se fait sur le chantier, soit dans une **bétonnière**, soit dans le **malaxeur** associé à certaines machines de projection à moteur thermique ou électrique... Le mélange des mortiers peut se faire manuellement dans une **auge de maçon** lorsque les quantités à mettre en œuvre sont faibles.



Photo n° 142 : préparation d'un mortier de réparation à base de liants hydrauliques (crédit photo Parexlanko)

Les mortiers et bétons peuvent aussi être fabriqués en centrale et livrés sur le chantier au moyen de bétonnières portées. Les normes et textes en vigueur précisent les caractéristiques que doivent présenter les matériels de fabrication et de transport (se référer, par exemple, à la norme NF EN 206/CN et au **fascicule 65 du CCTG**).

Les mortiers traditionnels non prêts à l'emploi sont fabriqués dans une bétonnière, voire dans une auge de maçon.

4.5.4 MATÉRIELS DE MISE EN ŒUVRE DES PRODUITS

Note : les matériels de mise en œuvre des différents produits et systèmes de réparation et de renforcement du béton, ainsi que ceux de préservation et de restauration de la passivité, sont détaillés dans la suite de cet article compte tenu de leurs spécificités. En tant que de besoin, sont effectués les renvois aux **normes de référence** et aux autres **GUIDES du STRRES**.

4.5.4.1 Généralités

Les **produits et systèmes** (pour réparation structurale ou non et pour restauration ou préservation de la passivité des armatures) **imposent pour leur mise en œuvre**, selon qu'ils sont à base de liants hydrauliques modifiés ou non (**CC et PCC**), à base de liants organiques (**PC et P**) et selon la quantité à mettre en place, un **certain type de matériel pour une application manuelle ou mécanisée**.

Il est rappelé que la **fiche technique d'un produit ou système prêt à l'emploi** indique quels sont les **différents outils et matériels** nécessaires à sa mise en œuvre ainsi que les réglages nécessaires de ces matériels (par exemple, **préparation** : humidification ou gobetis d'accrochage..., **application** : truelle et taloche ou machine à projeter..., **finition** : taloche, pulvérisateur de produit de cure...).

La fiche peut indiquer également certaines **astuces d'exécution** et quelles sont les **précautions à prendre** afin d'éviter les accidents, les intoxications, les pollutions... **La norme NF P95-101** traite des matériels de mise en œuvre des **produits de réparation** des types CC, PCC et PC.

Les matériaux de construction classiques, tels que les armatures de béton armé, les bétons, sont mis en place traditionnellement en respectant les règles de mise en œuvre, soit de la **norme NF EN 13670**, du **NF DTU 21**, soit du **fascicule 65 du CCTG**. Les matériels nécessaires à la mise en œuvre de tels matériaux ne font pas l'objet de développements spécifiques dans le présent document.

Pour certains produits plus innovants, tels que les bétons fibrés à ultra-hautes performances (**BFUP**), les produits composites collés, il convient de se référer aux **normes et guides existants** et aux **fiches techniques**.

Rappel : une réparation structurale ou non structurale, un renforcement et/ou une restauration de la passivité des armatures doit souvent être complété par :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des **fissures existantes** dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour le choix du matériel de mise en œuvre, au guide FABEM 2 et à la norme NF P 95-103** ;
- **et/ou une protection supplémentaire**, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... Se reporter, **pour le choix du matériel de mise en œuvre, au guide FABEM 4 et à la norme NF P 95-103**.

4.5.4.2 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes (mortiers et bétons) de réparation et renforcement des bétons

Le matériel à mettre en œuvre sert, suivant le cas, sur des parties ou des éléments d'une structure à :

- remplacer le béton pollué ou carbonaté ;
- remplacer du béton endommagé (chocs, gel/dégel...) ;
- ajouter du mortier ou du béton.

Il peut s'agir suivant le cas :

- d'une **réparation de surface** du béton relevant de la **norme NF P95-101** ;
- d'une **réparation** d'un élément en béton à **caractère structurel ou non** ;
- d'un **renforcement** d'un élément ou d'une structure en béton.

Lorsque les réparations sont de **faible importance en surface et volume**, les produits et systèmes sont **mis en œuvre manuellement**. Dans le cas contraire la **mise en œuvre est mécanisée**.

Rappel, avant toute réalisation de la réparation, une protection contre le **vent**, le **soleil** ou la **pluie** est à mettre en place. Cela concerne les opérations de mise en place d'un mortier ou d'un béton mais aussi les produits et systèmes prêts à l'emploi (se reporter à leur fiche technique) :

- abris ;
- bâches ;
- panneaux ;
- tissus non tissés humidifié en permanence (protection en cas de forte chaleur)...

Si, avant la mise en place d'un mortier ou d'un béton, il est nécessaire d'humidifier la surface du béton, peuvent être utilisés suivant l'importance de la surface à traiter :

- un pinceau ;
- une brosse ;
- une éponge ;
- un pulvérisateur ;
- un jet d'eau...



Photo n° 143 : humidification du substratum (crédit photo Parexlanko)

Si la mise en œuvre d'un gobetis d'accrochage est nécessaire, peuvent être utilisés :

- une truelle (projection),
- un pinceau ;
- une brosse ;
- un rouleau ;
- un pistolet à pot de projection ;
- une pompe à mortier...

Si, avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants organiques, la surface doit être enduite d'un primaire d'accrochage (par exemple un adhésif), peuvent être utilisés :

- un pinceau ;
- une brosse ;
- un rouleau ;
- un gant ;
- un peigne cranté ;
- un rouleau ;
- une pompe pour produits bicomposants...

4.5.4.2.1 Cas des applications manuelles

La mise en place d'un mortier, voire d'un béton est réalisée classiquement à la **truelle**. Pour le dressage des arêtes, une **règle** peut être utilisée. L'utilisation de coffrages peut être nécessaire pour maintenir le mortier ou le béton pendant sa prise et son durcissement.



Photo n° 144 : exécution d'une réparation de surface manuellement (crédit photo Fosroc)

Pour la finition produits à base de liants hydrauliques (CC ou PCC) suivant l'aspect souhaité, peuvent être utilisés (cf. le guide FABEM 4) :

- une taloche en plastique rigide ;
- une taloche éponge ;
- une taloche métallique ;
- un bloc de polystyrène ;
- une lisseuse en acier inoxydable...

Pour la finition des produits à base de liants de liants organiques (PC), il est préférable d'utiliser une lisseuse en acier inoxydable.

Pour la réparation ou le renforcement de surfaces horizontales, suivant les caractéristiques du mortier ou du béton, sont utilisés :

- cas des mortiers et bétons auto-lissants :
 - des plots pour matérialiser l'épaisseur à réaliser,
 - une raclette d'égalisation ou une truelle (dans les angles),
 - un rouleau débulleur et égalisateur.
- Cas des mortiers et bétons à consistance normale :
 - une règle pour tirer le produit,
 - une taloche pour la finition.

Après la mise en place de produits (mortier ou béton) à base de liants hydrauliques, la réalisation d'une cure est nécessaire (se reporter à la norme NF EN 13670 et au fascicule 65 du CCTG qui fixent la durée de la cure suivant des conditions hydro-thermiques) :

- avec un produit de cure à mettre en œuvre au pulvérisateur ;
- des paillassons de feutre non tissé...maintenus humides ;
- des feuilles de polyane ou de PVC ;
- des bâches...

4.5.4.2.2 Cas des applications mécanisées

La mise en place d'un mortier ou d'un béton peut être réalisée au moyen de plusieurs techniques :

- par coulage classique dans des coffrages (se reporter à la norme NF DTU 21 et au Fascicule 65 du CCTG), ce qui impose :
 - des vibrateurs sauf pour des bétons de type BAP ;
 - des règles pour dresser les surfaces...
- par injection (coulis, mortiers ou bétons à faible granularité) dans des coffrages étanches :

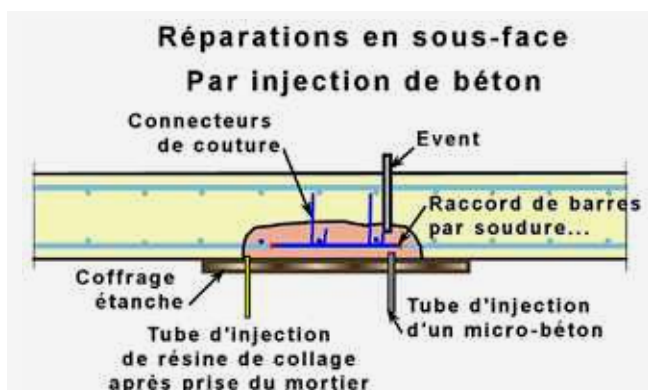


Figure n° 76 : principe d'une injection sous pression d'un mortier ou d'un micro-béton

- par projection (se reporter au guide FABEM 5 et à la norme NF P95-102-1 en révision) :
 - par voie mouillée au moyen :
 - d'un pistolet à pot de projection ;
 - d'une pompe à mortier ou béton ;
 - d'une lance de projection...
 - par voie sèche au moyen :
 - d'une machine à projeter ;
 - d'une lance de projection...

Note : la projection par voie sèche est incompatible avec la mise en place d'un revêtement sur les armatures ou d'un gobetis d'accrochage sur le béton.



Photo n° 145 : machine à projeter le béton en voie sèche (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 146 : projection en cours (crédit photo Parexlanko)

Les guides **ASQUAPRO** et la norme **NF P95-102-1** détaillent les caractéristiques des matériels de projection :

- les machines à projeter avec leurs caractéristiques ;
- les compresseurs ;
- les conduites de transfert des compositions ;
- les lances de projection ;
- les cuves et les doseurs d'activateurs ou raidisseurs ;
- les dispositifs d'aide à la projection (bras télescopiques ou robots).

Le réglage de l'épaisseur de la couche mise en place par projection peut être obtenu au moyen :

- de planches de coffrage matérialisant le coffrage de la pièce à restaurer ;
- d'une règle s'appuyant sur des guides...



Photo n° 147 : planches matérialisant le coffrage d'une poutre (crédit photo D. Poineau)

Après la mise en place des produits (mortier ou béton) à base de liants hydrauliques, la réalisation d'une cure est nécessaire (se reporter à la norme **NF EN 13670** et au fascicule **65** du **CCTG** qui fixent la durée de la cure suivant des conditions hygro-thermiques) :

- avec un produit de cure à mettre en œuvre au pulvérisateur ;
- des paillasons de feutre non tissé...maintenus humides ;
- des feuilles de polyane ou de PVC ;
- des bâches...

Une **injection de l'interface** entre le mortier ou le béton ajouté et le béton de la structure peut être nécessaire pour limiter la fissuration de l'interface sous les effets des retraits (se reporter à l'article 4.5.4.4 ci-dessous).

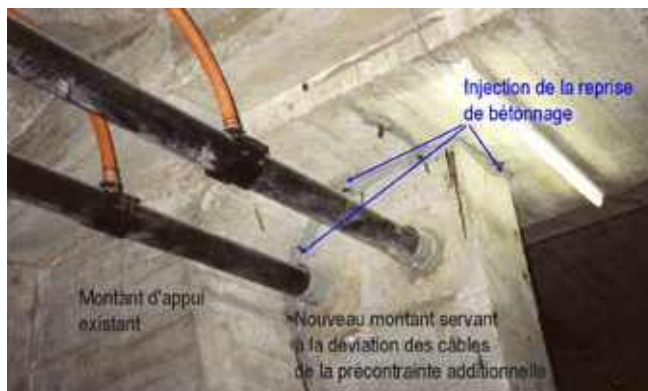


Photo n° 148 : évènements pour l'injection de la surface de reprise
(crédit photo D. Poineau)

4.5.4.3 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de collage structural des bétons

Le **choix de l'outillage** est fonction de l'importance des surfaces à encoller, il faut terminer l'encollage avant que la colle ne fasse prise (DPU) d'autant que le double encollage est souvent nécessaire.

Rappel : la **durée pratique d'utilisation** ou **DPU** d'un produit ou d'un système (synonymes : *délai maximal d'utilisation, durée de vie en pot, délai d'utilisation, temps d'utilisation et temps ouvert*) est mesurée en **laboratoire**, sur des quantités de composants du mélange réduites et dans des conditions thermiques d'intensités limitées. Elle n'est donc pas représentative de la DPU observée sur le chantier laquelle doit être mesurée lors d'une **épreuve de convenance** à renouveler en cas de modification des conditions climatiques.

4.5.4.3.1 Cas du collage d'un béton durci sur un béton durci

La mise en place de la colle se fait :

- dans cas d'un produit d'encollage à viscosité élevée, avec :
 - une taloche métallique,
 - un peigne cranté (ce qui assure une répartition uniforme du produit),
 - un gant (ce qui permet de frotter pour bien appliquer la colle sur toute la surface) ;
- dans le cas d'un produit d'encollage moins visqueux, avec :
 - un rouleau,
 - une brosse (petites surfaces).

La **mise en pression du film de colle**, souvent indispensable, est obtenue au moyen de **charges, vessies gonflables, vérins...**

4.5.4.3.2 Cas du collage d'un béton frais sur un béton durci

Ce type de collage concerne la technique du **béton contrecollé** utilisé pour le renforcement ou l'élargissement des dalles de couverture, l'amélioration de l'adhérence entre le béton durci et le béton frais d'un ragréage, le remplissage d'une encoche destinée à la mise en place d'une armature de renfort...

Le produit de collage peut être mis en place avec :

- un pistolet relié à une pompe pour produits bicomposants (Cf. le **guide FABEM 3**),
- un rouleau,
- une brosse
- un pinceau...

Le choix du matériel de mise en place est souvent conditionné par un **essai de convenue**, car la présence des armatures de béton armé de couture entre les deux bétons rend difficile la mise en place du produit de collage.

Dans les deux cas, il faut également prévoir des **bâches en polyane** pour empêcher la colle de baver sur les surfaces non concernées et des **produits** (dichlorométhane [produit nocif]) pour le nettoyage des outils avant la polymérisation de la colle.

4.5.4.3.3 Cas du collage d'armatures passives extérieures au béton

Les tôles métalliques ainsi que les tissus et les plaques en composites à coller à la surface du béton sont façonnées, assemblés et mis en place avec les matériels visés dans le **guide FABEM 7** et la **norme NF P95-105**.

4.5.4.4 Matériels pour l'injection de produits et systèmes dans l'interface entre le produit de réparation et le béton support

Lors de la réalisation d'une réparation ou d'un renforcement avec mise en œuvre d'un mortier ou d'un béton lié au béton existant d'une structure, il est souhaitable d'améliorer la liaison entre les matériaux au droit de la reprise de bétonnage, en particulier à cause des effets des retraits. Deux solutions sont envisageables :

1. Dans le cas d'une reprise de bétonnage en sous-face d'une structure où d'une reprise pour laquelle une étanchéité est nécessaire, pour que la totalité de l'interface soit traitée, il faut disposer avant le bétonnage :
 - des joints hydro-gonflants (dispositifs brevetés) si la reprise est longiligne et soumise à une pression d'eau ;
 - des événements reliés par des flexibles qui permettront une injection ultérieure ;
2. Dans le cas où ces dispositifs n'ont pas été mis en place, il est possible d'injecter la fissure de retrait qui se forme à l'interface des deux matériaux. Pour réaliser cette opération, qui concerne le périmètre de la reprise de bétonnage, il faut mettre en place après le décoffrage du massif des injecteurs tout le long de la reprise.

Les matériels nécessaires pour effectuer de telles injections sont décrits dans le **guide FABEM 3** et dans la **norme NF P95-103**.

4.5.4.5 Matériels pour l'injection ou le remplissage de produits et systèmes dans des fissures ou des vides du béton

L'injection des fissures, des vides du béton, des nids de cailloux... d'une structure est parfois nécessaire pour renforcer la structure ou pour réduire les risques de pénétration des agents agressifs.

Les matériels nécessaires pour effectuer de telles injections sont décrits dans le **guide FABEM 3** et dans la **norme NF P95-103**.

4.5.4.6 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de scellement, de manchonnage et de soudage des armatures de béton armé

Les produits et systèmes de scellement des armatures sont, soit à base de **liants organiques**, soit à base de **liants hydrauliques** (dits à retrait compensé). Souvent certains de ces produits sont aussi utilisés pour la réalisation de calages.

Les trous dans le béton sont effectués généralement :

■ cas des trous de diamètre < 25 mm :

- avec un perforateur à percussion électrique ou pneumatique équipé d'une mèche de forage pour béton ;

■ cas des trous > 25mm :

- avec une perceuse équipée d'une couronne de forage au diamant (attention, la **fiche technique du produit** peut imposer que la surface du trou ne soit pas trop lisse ce qui peut imposer d'utiliser une sorte « d'alésoir » disponible chez certains fabricants).

Note : les dimensions des trous sont fixées dans la fiche technique du produit en conformité avec les textes en vigueur (**ÉTE et FD P18-823**).

Le nettoyage soigné des trous est effectué avec :

- un écouvillon ;
- un jet d'air comprimé d'un compresseur en bon état car l'air doit être propre et ne pas polluer le trou avec de l'huile ;
- un jet d'eau sous réserve que l'orientation du trou permette l'évacuation de l'eau chargée par les débris de béton et que le produit de scellement soit compatible avec un béton humide.

Le produit de scellement doit remplir complètement le trou :

- cas d'un scellement vertical sur une paroi horizontale ou faiblement inclinée, le produit sous forme d'un coulis est mis en place par simple gravité :
 - avec un seau et un entonnoir...
- cas d'un scellement sur une paroi verticale ou une sous-face, le produit sous forme d'un **mortier à consistance ferme** est mis en place manuellement avec une truelle et serré dans le trou :
 - avec un matoir (tige en métal ou en bois de diamètre adapté),
 - avec un pistolet manuel ou pneumatique prévu pour cet usage...



Photo n° 149 : remplissage des trous avant scellement de barres (crédit photo Parexlanko)



Scellement de barres et dispositif de maintien pendant le durcissement du produit de scellement

Photo n° 150 : scellement d'armatures de béton armé (crédit photo D. Poineau)

Certains industriels proposent des **coffrets de scellement pour armatures de béton armé** comprenant des outils de nettoyage des trous (écouvillons, buses de nettoyage), des pistolets d'injections manuels ou pneumatiques équipés de flexibles, buses d'injection, ainsi que des cartouches contenant le produit de scellement.

À ceci, il faut ajouter les **dispositifs qui maintiennent l'armature en place** pendant le durcissement du produit de scellement comme celui figurant sur la photo précédente.

Il est parfois nécessaire de disposer :

- **du matériel de mise en place de manchons de jonction** pour allonger des barres de béton armé trop courtes. Se reporter à la **Marque NF/AFCAB-Dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armature** et aux **normes NF A35-020-1, NF A35-020-1+A1, NF A35-020-2 et NF A35-020-2** susvisées.

Note : certains dispositifs nécessitent le filetage de l'extrémité des barres à allonger.

- **du matériel de soudage** pour allonger des barres de béton armé, sachant que les soudures à exécuter sont de type bout à bout ou sur éclisses. Se reporter aux **normes NF EN ISO 17660-1 de décembre 2008** : Soudage - Soudage des aciers d'armatures - Partie 1 : assemblages transmettant des efforts et **NF EN ISO 17660-2 de décembre 2008** : Soudage - Soudage des aciers d'armatures - Partie 2 : assemblages non transmettants.

ATTENTION, Ne pas oublier de s'assurer de la tenue en fatigue. En outre, la norme NF EN ISO 17660-1 indique que la transmission des efforts est assurée uniquement pour des charges statiques et non pour des charges dynamiques comme celles provoquées par un séisme.



Photo n° 151 : manchon de jonction (crédit photo D. Poineau)

4.5.4.7 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de calage d'éléments

Les produits et systèmes de calage sont, soit à base de liants organiques, soit à base de liants hydrauliques à retrait compensé. Ils peuvent se présenter sous la forme d'un coulis, d'un mortier.

Pour les produits de calage à base de liants organiques (résines époxydiques), la mise en place d'un **primaire d'accrochage étant nécessaire**, peuvent être utilisés :

- un pinceau ;
- une brosse ;
- un rouleau...

Les mortiers et les micro-bétons de consistance ferme sont classiquement mis en œuvre par coulage dans des coffrages. Leur mise en place peut nécessiter

- des vibrateurs lorsque le volume à couler est important).

Ils sont arasés et lissés avec :

- une règle ;
- une truelle ; une taloche...

Les coulis et les mortiers de consistance fluide peuvent être coulés dans des coffrages ; ils peuvent aussi être injectés au moyen :

- d'une pompe adaptée à la granulométrie du produit ;
- d'une pompe ou d'un pot à pression dans un coffrage adapté muni d'évents et rempli de granulats pour constituer un béton à faible granulométrie.

Il est aussi possible de mettre en œuvre un mortier sec au moyen d'un matoir. Cette technique n'est plus guère utilisée. Elle nécessite un exécutant ayant une grande expérience.

4.5.4.8 Matériels de mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton

Ces armatures de béton armé peuvent être disposées traditionnellement sous forme de barres isolées, de treillis ou de cages d'armatures. Parfois, en sus, elles doivent être scellées dans le béton de la structure (se reporter à l'article 4.5.4.6 ci-dessus).

Les aciers de béton armé en acier normal ou galvanisé sont coupés, façonnées, assemblées (manchons, soudage) et mises en place avec les techniques et matériels traditionnels (se reporter aux **normes NF EN 13670/CN et NF DTU 21 et au fascicule 65 du CCTG**).

Les aciers inoxydables sont coupés, façonnées, assemblées et mises en place avec des matériels spécifiques. De plus, il faut éviter les couples bimétalliques avec les autres armatures en acier normal (se reporter à l'**annexe n°3 du présent GUIDE**).

Les armatures en composites sont obligatoirement façonnées en l'atelier du fabricant, elles sont assemblées et mises en place en utilisant le matériel prescrit par le fabricant.

4.5.4.9 Matériels d'ajout de forces par précontrainte additionnelle

La mise en place d'une précontrainte additionnelle complète parfois les autres techniques lors de la réparation ou le renforcement d'une structure en béton armé ou précontraint. La conception, la réalisation d'une telle opération, ainsi que les **matériels spécifiques d'exécution** sont l'objet du **guide FABEM 8**, de la **norme NF P95-104 et du fascicule 65 du CCTG** auquel les deux textes renvoient si besoin est.

Note : la norme NF P95-104 a mis à jour les références normatives du chapitre 7 (précontrainte) du fascicule 65 du CCTG.

4.5.4.10 Matériels d'ajout de forces par déformations imposées

La conception, la réalisation d'une telle opération, ainsi que les **matériels spécifiques d'exécution**, en particulier les **vérins**, sont l'objet du **guide FABEM 8**.

4.5.4.11 Matériels de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

Le matériel nécessaire à ces opérations, qui concernent, soit une réparation de surface du béton relevant de la **norme NF P95-101**, soit une **réparation** d'un élément en béton à **caractère structural ou non**, soit un **renforcement** d'un élément ou d'une structure en béton, relèvent de l'article 4.5.4.2 ci-dessus.

4.5.4.12 Matériels de mise en œuvre des traitements électrochimiques

Le **lancement d'une consultation** pour la mise en œuvre de tels procédés doit être précédé d'une **étude par un spécialiste** afin de juger de la faisabilité d'une telle opération. Cette étude permet d'avoir une idée du matériel nécessaire et des quantités à mettre en œuvre. **Le marché** fixe la liste et les caractéristiques des matériels et des instruments de mesure... indispensables pour une telle opération.

4.5.4.12.1 Cas de l'extraction électrochimique des chlorures et de la réalcalinisation électrochimique

Les procédés d'extraction des chlorures et de réalcalinisation sont brevetés. Les matériels à mettre en œuvre en conformité avec la liste ci-dessus sont proposés par l'entrepreneur à l'acceptation du maître d'œuvre.

La norme **NF EN 14038-1** (sur la réalcalinisation) détaille la liste des matériels nécessaires et leur rôle. Le résumé ci-après permet d'avoir une idée des matériels qui doivent être disponibles sur le chantier, aussi bien pour une **extraction des chlorures que pour une réalcalinisation à courant imposé**. Les méthodes utilisant une anode sacrificielle ne nécessitent pas le recours à une alimentation électrique.

***Rappel**, ces procédés ne sont pas applicables aux structures précontraintes, ni aux armatures de béton armé galvanisées ou revêtues d'un revêtement étanche. Si la corrosion est due à la présence de chlorures, avant d'effectuer une réalcalinisation, il est nécessaire d'effectuer une déchloruration.*

Sont à prévoir :

- **les appareils de mesure** permettant de connaître : la position et l'enrobage des armatures ainsi que leur continuité électrique, la profondeur de carbonatation, le courbe pénétration/dosage des chlorures ;
- **les dispositifs nécessaires à l'étude des risques éventuels d'alcali-réaction** (à cause de l'ajout d'alcalins par le traitement) ;
- **l'anode**, souvent en titane activé, qui permet le passage et la répartition du courant sur toute la surface à traiter ;
- **la solution électrolytique alcaline et son support** (cellulose sous forme de pâte à papier), qui permet le passage du courant et apporte les alcalins au béton (réalcalinisation). Le revêtement de cellulose doit avoir une humidité sensiblement constante, ce qui impose une protection contre les intempéries (vent, pluie et soleil) ;
- **des câbles isolés de couleur rouge** lorsqu'ils sont reliés à l'anode et **de couleur noire** lorsqu'ils sont reliés aux armatures formant cathode ;
- **une alimentation électrique** fournissant un courant continu stable en voltage (50 V) et ampérage et une puissance suffisante. Le système doit être muni des disjoncteurs et fusibles nécessaires en cas de court-circuit (avec alarme) ;
- **des appareils pour mesurer** la continuité électrique des armatures et des circuits, le voltage et l'ampérage développés et la durée du traitement.



Photo n° 152 : opération d'extraction des chlorures-réalcalinisation sur une poutre d'un immeuble (crédit photo Freyssinet)

4.5.4.12.2 Cas de la prévention et de la protection cathodique

La norme NF EN ISO 12696 détaille la liste des matériels nécessaires et leurs rôles. Le résumé ci-après permet d'avoir une idée des matériels qui doivent être disponibles sur le chantier dans le cas d'une **protection cathodique à courant imposé**. Ce matériel est destiné à fonctionner **pendant de très nombreuses années** contrairement aux dispositifs utilisés dans les traitements d'extraction des chlorures et de réalcalinisation.

Sont à prévoir :

- **les appareils de mesure** permettant de connaître : la présence de désordres (délaminations...), la position et l'enrobage des armatures ainsi que leur continuité électrique, la profondeur de carbonatation, le courbe pénétration/dosage des chlorures mais aussi la résistivité du béton et le potentiel d'électrode acier/béton ;
- **les dispositifs** nécessaires à l'étude des risques éventuels d'alcali-réaction (normalement il est précisé que la protection cathodique ne déclenche pas un tel phénomène, mais il peut exister) ;
- **l'anode**, normalement en titane activé, qui permet le passage et la répartition du courant sur toute la surface à traiter et son **enrobage de protection** (mortier ou micro-béton à base de liants hydraulique adhérant au support avec une résistivité proche de celle du béton de la structure) ;
- **des capteurs de surveillance** nécessaires pendant toute la durée du traitement : électrodes de référence portatives (mesure du potentiel d'électrode acier/béton), sondes dépolarisantes, éprouvettes et sondes macro-piles... et une **centrale de recueil des données** ;
- **des câbles isolés de couleur rouge** lorsqu'ils sont reliés à l'anode et de **couleur noire** lorsqu'ils sont reliés aux armatures formant cathode, des **câbles gris** pour les câbles d'essais de surveillance, des **câbles bleu** pour les électrodes de référence, des **câbles jaunes** pour les autres capteurs de référence et enfin des **boîtiers de jonction** ;
- **une alimentation électrique** fournissant un courant continu stable en voltage (42 V) et ampérage et une puissance suffisante. Le système doit être muni des disjoncteurs et fusibles nécessaires en cas de court-circuit (avec alarme).

4.5.4.13 Matériels de mise en œuvre d'un revêtement actif ou non sur des armatures de béton armé

Afin de restaurer la passivité des armatures ou de les protéger contre la corrosion, des produits et systèmes peuvent être utilisés sous forme de revêtements actifs ou non³⁷. Il est rappelé que :

- **certains produits actifs** doivent être appliqués uniquement sur les armatures ;
- **les produits non-actifs** ne peuvent être utilisés sur des armatures non totalement dégagées du béton de la structure et que la moindre solution de continuité du revêtement conduit à une corrosion cavernueuse.

La première opération consiste, après avoir dégagé les armatures du béton, à les débarrasser de la **rouille** mais aussi de **toute trace de gras, de poussières et débris de béton adhérents**. Pour enlever la rouille et les débris de béton adhérents, sur tout le périmètre des barres de béton armé, sont utilisés les techniques et matériels suivants :

- brosses métalliques ;
- pistolet à aiguilles ;
- grenailage ;
- sablage à sec ou hydro-sablage ;
- hydro-nettoyage à haute-pression...

³⁷ Les produits à base de liants hydrauliques, tels que les mortiers et bétons, peuvent aussi assurer la passivité des armatures sans nécessiter la mise en place de produits spécifiques contenant des inhibiteurs de corrosion comme indiqué dans la norme NF P95-101 qui ne recommande l'application d'un produit de protection contre la corrosion que dans des cas spécifiques.

Les normes applicables pour l'évaluation du degré d'enrouillement et de l'évaluation après traitement sont les suivantes :

- **NF EN ISO 8501-1 de septembre 2007** : Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - Évaluation visuelle de la propreté d'un subjectile - Partie 1 : degrés de rouille et degrés de préparation des subjectiles d'acier non recouverts et des subjectiles d'acier après décapage sur toute la surface des revêtements précédents ;
- **NF EN ISO 12944-4 de décembre 2017** : Peintures et vernis — Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture — Partie 4 : Types de surface et de préparation de surface.

Suivant le type de produit l'enlèvement de la rouille peut être plus ou moins poussé. Il convient de se reporter aux **fiches techniques des produits**. Le marché peut fixer le niveau du **degré de soins** par décapage.

- **Cas des produits dits actifs : le décapage des armatures relève du degré de soin DS 2 ou St 3** : Décapage soigné permettant d'éliminer presque entièrement les particules de rouille.

Note : le niveau DS 2 correspond au degré Sa 2 de la norme suédoise.

- **Cas des produits non actifs : le décapage des armatures relève du degré de soin DS 2,5** : Décapage très soigné conduisant à l'élimination totale de la calamine et de la rouille.

Sur les armatures existantes dégagées du béton et débarrassées de la rouille, les produits sont mis en place avec :

- **Cas des produits actifs** :
 - une brosse ;
 - un pinceau...
- **Cas des produits non actifs** : sur des barres additionnelles ou des cages d'armatures ajoutées, les produits sont appliqués par des processus industriels :
 - galvanisation à chaud des armatures ;
 - trempage dans des bains pour les revêtements à base de résines époxydiques...

4.5.4.14 Matériels de mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur bétons

Les **inhibiteurs de corrosion** sont mis en œuvre conformément aux fiches techniques des fabricants au moyen :

- d'une brosse ;
- d'un rouleau ;
- d'un pulvérisateur basse pression.

Il convient également de se reporter au **guide FABEM 4**.

4.5.4.15 Matériels de réinjection de conduits de précontrainte

La conception, la réalisation d'une telle opération, ainsi que les matériels spécifiques d'exécution font l'objet du **guide FABEM 8**.

5

Modes opératoire

Rappel : les 45 méthodes de réparations, renforcement et protection visées dans l'introduction et qui se réduisent à 16 sont regroupées dans les deux ensembles A (restauration du béton et renforcement) et B (préservation et restauration de la passivité des armatures).

5.1 Généralités

5.2 Préparation du support et des armatures

5.3 Préparation et réalisation de l'opération

La réparation, le renforcement et la protection d'une structure dont le béton est dégradé impose le respect des **exigences générales** listées ci-dessous. La majeure partie de ces exigences est extraite des **normes NF EN 1504-10** et **NF P 95-101** et figure **dans l'article 3 ci-dessus consacré au projet de réparation** :

- l'état de la structure sur les plans chimique, électrochimique et physique doit être connu, les **causes des désordres** doivent être identifiées et leur importance mesurée. **Les méthodes de réparation ou de renforcement et de protection** doivent être fixées. De plus, les contraintes d'accès aux ouvrages, leurs étaitements provisoires éventuels et les contraintes de mise en œuvre des matériaux doivent être définies par **l'étude préalable**. En sus, **l'entrepreneur** doit mettre en place les **moyens nécessaires** pour assurer de façon efficace l'exécution des travaux ;
- **l'entrepreneur** doit prendre en compte les **contraintes** que lui impose le **marché** concernant les emprises de chantier et la protection contre toute nuisance, pollution ou contamination, tant des parties de l'ouvrage laissées en l'état, que des tiers et d'autres ouvrages. **Le marché** peut aussi, si cela est compatible avec les travaux prévus, imposer le maintien de l'ouvrage en exploitation pendant tout ou partie des travaux avec les conséquences qui en résultent, d'une part sur le plan de la sécurité des tiers et du personnel et, d'autre part sur l'exécution des travaux (vibrations, déformations...) ;
- avant la mise en œuvre des produits et systèmes, **l'entrepreneur** doit s'assurer de **l'état du support requis** (propreté, résistance, adhérence...) ;
- **l'importance et le phasage des travaux de démolition** ainsi que leurs incidences sur la **stabilité de la structure** doivent être prises en compte et donc faire l'objet d'une étude et, si besoin est, de calculs. **Une procédure d'exécution**, à porter à la connaissance de tous les intervenants, doit être tirée de cette étude. Tous doivent avoir reçu la consigne impérative de saisir le **chargé d'études** si les travaux ne peuvent être exécutés suivant la procédure prévue (modification de l'ordre des démolitions, volume de démolition à augmenter, ferrailage en place différent de celui des plans dits d'exécution...), voire dans le cas où il serait impossible de respecter la procédure.
En effet, la reprise du béton dégradé nécessite, le plus souvent, l'élimination du béton pollué et le dégagement des armatures corrodées. **Ces opérations, si elles concernent des surfaces et volumes importants, peuvent mettre en péril la stabilité de la structure** (matériel de démolition inadapté, réduction drastique des sections résistantes, suppression de contreventements, absence d'étalement provisoire...) ;
- **en cas de renforcement, le béton et les armatures ajoutés doivent participer à la reprise des efforts appliqués à la structure**. Cette participation, suivant les exigences du **marché** et des **études** effectuées, concerne, soit uniquement la reprise des charges d'exploitation, soit à la fois la reprise des charges permanentes et des charges d'exploitation. Il peut en résulter la nécessité d'une mise en charge de la structure par un décintrement, un vérinage... ;
- **les contraintes environnementales**, qui règnent au moment des travaux, doivent être prises en compte par **l'entrepreneur** afin d'obtenir les conditions requises (température, hygrométrie, vitesse du vent...) pour l'application des produits et systèmes. Si besoin est, des **protections temporaires** sont à mettre en place.

Il est rappelé que, le plus souvent, les travaux doivent satisfaire à la fois à **plusieurs fonctions ou « principes »** (terme utilisé dans les normes de la série **NF EN 1504-****), ce qui oblige à mettre en œuvre **plusieurs méthodes en même temps**. Par exemple, le remplacement du béton pollué peut être combiné à la mise en place d'un revêtement inhibiteur sur les armatures, à l'ajout d'armatures, au traitement des fissures, à l'application d'un revêtement de protection...

Il est possible de considérer que la majeure partie des différentes méthodes de réparation et de renforcement, ainsi que celles de préservation ou de restauration de la passivité des armatures du présent GUIDE comportent normalement³⁸ les trois phases principales suivantes :

- la préparation du support en béton et, si nécessaire, des armatures ;
- la préparation de l'opération (préparation de la réalisation de la méthode retenue) ;
- la conduite de l'opération (mise en œuvre de la méthode retenue).

Ces différentes phases sont déjà évoquées ci-devant dans le présent GUIDE mais aussi dans les articles 6.2 et 6.3 de la norme NF P95-101 relative à la réparation de surface des bétons. On retrouve quasiment les mêmes phases dans la norme NF EN 1504-10, voire dans les normes NF DTU et le fascicule 65 du CCTG. Chaque phase peut comporter plusieurs opérations unitaires.

L'ensemble des opérations liées aux trois phases est effectué conformément aux dispositions de la procédure d'exécution correspondant aux travaux à exécuter, qui reprend les exigences du marché, des normes associées, de la notice d'emploi (fiche technique) du produit et des règles de l'art (fascicules du CCTG, DTU...). Le document de suivi d'exécution correspondant aux travaux exécutés est complété au fur et à mesure du déroulement des travaux.

38 Par exemple, l'ajout de forces par une précontrainte additionnelle ou des déformations imposées comprend plusieurs séries d'opérations successives. De telles opérations comportent donc davantage de phases qu'un simple ajout de béton.

5.2.1 GÉNÉRALITÉS

5.2.1.1 Relevé des défauts du support en béton et des armatures

L'article 3.2 du **guide FABEM 4** consacré à la protection des bétons donne une **liste exhaustive des différents défauts** que peut présenter un support en béton (voir également les **guides FABEM 2 et 3**).

L'article 3.4 ci-dessus du **présent GUIDE** donne les différentes causes et explique les mécanismes de dégradation du béton et des armatures. **Il est donc inutile de répéter toutes ces informations dans le présent article.**

Quelle que soit la méthode de réparation et/ou de renforcement ou de préservation et/ou de restauration de la passivité des armatures visée dans le **présent GUIDE**, le **marché** impose sur le chantier un **relevé contradictoire de l'état du support et sa consistance**, même si un **relevé des défauts** doit normalement déjà figurer dans les **pièces du marché**. **Ce relevé contradictoire de l'état du support** permet, en marquant et en métrant les défauts du béton, les fissures, l'état des armatures... de **contrôler le relevé joint au marché** et de fixer définitivement, après **l'épreuve de convenue**, les techniques de préparation du support à mettre en œuvre.

Il est rappelé que les études préliminaires permettent d'évaluer l'épaisseur de béton endommagé ou pollué ainsi que sa cohésion, la position des armatures et les autres défauts apparents (nids de cailloux, fissures...). **Le relevé contradictoire** permet de valider les relevés antérieurs et si nécessaire de programmer des essais complémentaires.

RAPPEL de l'article 3.3 ci-dessus : si le **diagnostic et l'expertise préalable** n'ont pu avoir lieu, le **marché** doit **fixer la consistance des investigations et études** à entreprendre avant tout travaux. Dans un tel cas, il est conseillé de mettre le **diagnostic en tranche ferme** et les **travaux en tranche conditionnelle**, compte tenu des incertitudes sur les méthodes à appliquer, les quantités à mettre en œuvre et le coût final des travaux.

Les travaux de réparation ou de renforcement d'un ouvrage précontraint nécessitent encore plus de précautions que dans le cas d'un ouvrage en béton armé, pour ne pas mettre en jeu la sécurité de la structure, tout particulièrement lors du repiquage et de l'enlèvement du béton (réduction de la section résistante mais conservation de la force de précontrainte).

5.2.1.2 Préparation du support béton et des armatures et qualité du support à obtenir

5.2.1.2.1 Généralités

Le **marché** doit définir la **qualité** que doit présenter le **support béton** :

- avant la mise en œuvre**, soit de la méthode de réparation du béton et/ou de renforcement structural, soit de la méthode de préservation et/ou de restauration de la passivité des armatures :

Les exigences correspondantes sont détaillées pour chaque méthode dans la suite de cet article avec, si nécessaire, un renvoi vers un des **GUIDES du STRRES de la famille FABEM**. Cependant, si la préparation du support concerne **une reprise de bétonnage** (par exemple, cas de la mise en place d'un produit ou systèmes en forte épaisseur par bétonnage), il suffit d'appliquer les **textes de références** :

- la norme **NF EN 13670/CN** : article 8.2 (très succinct) ;
- la norme **NF DTU 21** : article 7.4.3 (peu détaillé) ;
- le fascicule **65 du CCTG** : article 8.4.1.2 qui fait référence aux recommandations professionnelles ci-dessous ;

- **les recommandations professionnelles de 2000** pour l'exécution des reprises de bétonnage mises au point par le **CEBTP, la FFB et le SETRA**.
- 2. **mais aussi, après la réalisation**, soit de la méthode de réparation du béton et/ou de renforcement structural, soit de la méthode de préservation et/ou de restauration de la passivité, par exemple, pour :
 - satisfaire à des tolérances géométriques et/ou à des exigences d'aspect ;
 - permettre l'exécution d'autres opérations :
 - une injection de fissures ou de vides du béton,
 - un remplissage ou un pontage des fissures existantes,
 - un traitement de surface (imprégnation, revêtement de protection),
 - etc.

Les tolérances géométriques et les exigences d'aspect du gros œuvre sont données par la norme NF EN 13670/CN. La norme NF DTU 21 et le fascicule 65 du CCTG s'appuient sur cette norme européenne de référence.

La norme NF EN 13670/CN, relative à l'exécution des structures en béton, traite de **deux classes de tolérances structurales** ; sauf disposition spéciale du **marché**, c'est la **classe 1** qui s'applique. La classe 2 est destinée à être utilisée avec des **coefficients réduits des matériaux** (coefficients partiels de sécurité) visés dans **l'annexe A de la norme de calcul NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2 partie 1-1)**. Ces coefficients sont applicables lorsque les tolérances géométriques seront (contrôle d'exécution renforcé) ou sont (mesures in-situ) inférieures aux tolérances réduites fixées dans l'annexe A.

- **la norme NF EN 13670/CN** traite des tolérances géométriques dans son chapitre 10, elles concernent les :
 - fondations,
 - poteaux et des murs,
 - poutres et dalles,
 - sections (dimensions transversales et enrobages des armatures),
 - la planéité des surfaces et la rectitude des arêtes,
 - réservations et les inserts.
- **dans le domaine du bâtiment, la norme NF DTU 21** fixe dans son chapitre 8 les caractéristiques dimensionnelles des ouvrages. Elles concernent les :
 - tolérances dimensionnelles de construction,
 - états de surface,
 - parements des parois latérales et sous-face,
 - états de surface des dalles et des planchers,
 - incorporations dans les dalles et murs.

Pour la texture et la teinte, les **documents particuliers du marché (DPM)** doivent faire référence au **fascicule de documentation FD P 18-503 de novembre 1989** : Surfaces et parements de béton – Éléments d'identification, visé dans le chapitre 2 relatif aux références normatives.

- **dans le domaine du génie civil, le fascicule 65 du CCTG** fixe dans l'article et le chapitre suivants :
 - article 8.8 : tolérances sur les parements et autres surfaces coffrées (parements simples, soignés, ouvragés, parois et surfaces non coffrées) ainsi que les exigences sur la texture et la teinte, en s'appuyant sur le FD P 18-503,

Les tolérances des surfaces devant recevoir un **revêtement** (lasure, peinture ...) relèvent du **chapitre 11** (peintures) du fascicule. **ATTENTION**, les exigences sont plus sévères que pour des surfaces non revêtues (cas des exigences en cas de bullage).

Les tolérances des surfaces devant recevoir un **revêtement d'étanchéité** relèvent des **fascicules du CCTG suivants** : **Fascicule 67 titre 1** : étanchéité des ponts-routes et **fascicule 67 titre III** : étanchéité des ouvrages souterrains.

- chapitre 10 : tolérances géométriques sur :
 - la géométrie (fondations, piles, poteaux et murs, poutres et dalles),
 - les sections,
 - la position des armatures de béton armé,
 - la position des armatures de précontrainte internes (pré et post-tension) et extérieures,
 - la planéité des surfaces (renvoi à l'article 8.8) et la rectitude des arêtes.

Lorsqu'il est nécessaire de réaliser d'autres travaux après une réparation et/ou un renforcement ou une préservation et/ou une restauration de la passivité, pour la **préparation du support**, il peut être fait appel :

- au guide **FABEM 2** et au guide **FABEM 3** pour une injection des fissures ou des vides du béton, un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes, soit dans le cadre d'un renforcement structural, soit dans celui d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs ;
- au guide **FABEM 4** pour la réalisation par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... d'un **protection supplémentaire**, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique ;
- à d'autres **NF DTU, DTU** ou d'autres fascicules du **CCTG** pour certains travaux.

Le marché demande à l'entrepreneur de proposer à l'acceptation du maître d'œuvre la **procédure d'exécution** et le **cadre du document de suivi d'exécution** relatifs à la **préparation du support en béton et des armatures**. Les techniques, le personnel ainsi que les moyens, matériels et produits à mettre en œuvre seront ensuite validés par l'épreuve de convenance correspondante.

Cette procédure est intégrée dans la **procédure relative à l'ensemble des travaux à effectuer** (préparation du support, préparation des produits, mise en œuvre des produits, contrôles...) et ce cadre de document de suivi est intégré dans le **cadre du document de suivi de l'ensemble des travaux**.

Avant de mettre en œuvre une méthode de réparation du groupe 1 (ces méthodes sont listées dans l'introduction [par exemple, la mise en œuvre d'un revêtement]), il est le plus souvent nécessaire, dans une **première phase, de réparer, au moins localement, le béton dégradé** (très souvent à cause de la corrosion). Il faut donc mettre en œuvre les **techniques de préparation du support béton et des armatures** utilisées pour les **réparations du groupe 2**, à savoir : repiquage, sablage, bouchardage, décapage, nettoyage, lavage...

Afin de ne pas surcharger le présent guide, seules sont développées les techniques de préparation du support béton et des armatures relatives aux **méthodes de réparation du groupe 2**. Pour celles du groupe 1, les techniques sont simplement rappelées car elles sont détaillées dans les autres guides du **STRRES**.

La **préparation du support béton et des armatures** comprend :

- la **préparation du support béton**, comprenant deux ou trois des opérations suivantes :
 - le nettoyage (élimination de la poussière des matériaux décollés, des agents contaminants...),
 - le repiquage du béton (cas des réparations de surface avec un enlèvement du béton sur une profondeur ≤ 15 mm),
 - l'enlèvement du béton (cas des réparations à caractère structural avec un enlèvement du béton sur une profondeur > 15 mm) ;
- la **préparation des armatures en place qui ont été dégagées** ;
- le **nettoyage des surfaces après préparation du support et des armatures** ;
- les **exigences particulières liées à la nature des produits de réparation**.

Seule parmi les normes de l'ensemble de la série, la **norme NF EN 1504-10** traite dans sa partie normative et dans son **annexe A informative** des **techniques de préparation** du support béton et des armatures et des exigences à satisfaire rappelées ci-après :

- **partie normative** :

- le tableau 2 indique, sans les développer, les techniques de préparation,
- le tableau 4 indique, sans les développer, les contrôles de la qualité,
- l'article 7 détaille essentiellement les facteurs à prendre en compte lors de l'opération pour obtenir un résultat satisfaisant ;

■ **annexe A informative :**

- l'article A7 traite dans le détail des différentes techniques,
- l'article A9 et le tableau A2 détaillent les contrôles de la qualité à effectuer avec certains niveaux de performance à obtenir.

La norme homologuée **NF P 95-101** donne avec force détails :

- d'une part, dans son article 6.2 et dans le tableau 5 les différentes méthodes permettant d'éliminer le béton dégradé en épaisseur et/ou en surface (les méthodes utilisables sont décrites avec leurs avantages, inconvénients et limites d'emploi) ;
- d'autre part, les différentes méthodes de préparation des armatures et, en particulier, elle insiste sur la nécessité de l'enlèvement total de la rouille sur tout leur périmètre, opération appelée : **détourage des armatures** ;
- et enfin, les méthodes de nettoyage dans son tableau 6.

L'efficacité de la préparation du support béton se mesure lors de l'épreuve de convenance de deux façons :

- **la première** par un **contrôle visuel** après le repiquage ou l'enlèvement du béton complété par des **essais** (mesure de la cohésion du support, vérification de l'absence de carbonatation et/ou pollution...) ;

- **la seconde** par des **essais de contrôle** sur le produit ou le système, une fois appliqué et durci sur les **surfaces de référence** (essai de traction directe, carottage... in situ).

En effet, si les résultats de l'**épreuve de convenance** avant et après application du produit ou du système sont satisfaisants, comme on connaît l'**état des surfaces de référence**, tant sur le plan visuel que sur le plan des performances physiques et chimiques avant toute application des produits et systèmes, on dispose des informations qui permettent de contrôler la qualité de la préparation du support du béton dans son ensemble.

5.2.1.2.2 Préparation du support béton – Élimination du béton dégradé – Exigences de résultats

En tenant compte des informations fournies par les **études préalables et le relevé contradictoire** et en respectant les exigences du **marché** sur le panel des techniques à privilégier, l'**entrepreneur** doit, proposer à l'acceptation du **maître d'œuvre** les **techniques** qu'il compte utiliser pour éliminer le béton dégradé. Il doit détailler le matériel nécessaire, les dispositifs de protection et les moyens de contrôle prévus, ainsi que les conditions de recyclage des produits utilisés (par exemple, en cas de sablage ou lorsqu'un décapage chimique est prévu). Les lieux de stockage ou d'évacuation des gravais doivent être précisés.

Les différentes méthodes d'élimination des bétons dégradés, de préparation des surfaces et de nettoyage sont indiquées dans les deux tableaux suivants inspirés de la **norme NF P95-101**. Un troisième tableau inspiré du **guide technique du LCPC de décembre 2002 sur la protection des bétons** permet d'orienter le choix de la technique de préparation en fonction du **défait constaté sur la surface du béton**.

Suivant l'épaisseur de la matière à enlever (revêtement existant, béton endommagé, pollué ou carbonaté...), les **normes NF EN 1504-10, NF P95-101** et NF P95-102-1 utilisent les mêmes termes à savoir :

- décapage $\leq \sim 2$ mm ;
- repiquage $\leq \sim 15$ mm ;
- enlèvement > 15 mm.

ATTENTION, la préparation d'un support avec enlèvement du béton nécessite, en général, le recours à au moins **deux techniques de préparation** :

- une première de dégrossissage relativement agressive ;
- une autre de finition ;
- plus un nettoyage complémentaire qui est normalement nécessaire.

Méthodes — Matériel	Efficacité, domaine d'emploi	Contraintes
Méthodes exclusivement adaptées au repiquage du béton : enlèvement du béton jusqu'à une profondeur de 15 mm et production d'un support rugueux offrant une bonne adhérence.		
Décapage à l'abrasif et au sable		
Jet d'abrasif (ou sablage) à sec : machine pneumatique et compresseur (pression 6 à 7 bars (06 à 0,7 MPa)).	Avec abrasifs conformes à la réglementation en vigueur, bonne préparation des bétons et armatures. Décapage des armatures corrodées.	Nuages de poussières, générateur de résidus à récupérer et évacuer. Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée (ÉPI). Interdit en tunnel. Aspiration ou lavage nécessaires pour assurer l'adhérence du produit de réparation. En l'absence de lavage compatible avec les produits à base de liant polymère (PC). En cas de lavage un séchage est nécessaire.
Jet d'abrasif humide (ou hydro-sablage) : machine pneumatique et compresseur.	Avec des abrasifs conformes à la réglementation en vigueur, bonne préparation des bétons et armatures. Décapage des armatures corrodées.	Générateur de résidus à récupérer et évacuer. Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Risques importants de pollution des parties voisines , prévoir une protection efficace. Lavage indispensable. Un séchage est nécessaire avec les produits à base de liant polymère (PC).
Grenaillage.	Bonne préparation des bétons et armatures. Décapage des armatures corrodées. Récupération facilitée des résidus à évacuer.	Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Aspiration ou lavage nécessaires pour assurer l'adhérence du produit de réparation. En l'absence de lavage compatible avec les produits à base de liant polymère (PC). En cas de lavage un séchage est nécessaire.
Décapage à l'eau à moyenne haute pression (< 60 MPa environ)		
Pompe haute pression.	Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés. Décapage des armatures corrodées.	Ne convient pas dans les environnements où la présence d'eau et d'humidité est néfaste ou dangereuse (par exemple à proximité d'installations électriques). Générateur de bruit et de brouillard. Risques pour le personnel. Nécessite un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée et une épreuve de convenance pour définir les paramètres adaptés. Lavage en fin d'opération. Compatible avec les produits à base de liants polymères (PC) après séchage.

Méthodes — Matériel	Efficacité, domaine d'emploi	Contraintes
Décapage mécanique abrasif et à percussion		
Rabotage mécanique : rabot électrique à molettes ou outils multiples.	Préparation des surfaces planes horizontales ou faiblement inclinées avec un recouvrement suffisant des armatures. Rendement important et maîtrise de la profondeur repiquée, cela évite l'endommagement des armatures.	A tendance à créer des amorces de fissuration . Nécessité d'éliminer les poussières générées.
Ponçage : ponceuse légère rotative à disques abrasifs.	Préparation de surfaces planes de faible importance sans fissure ni armature apparente.	Aspiration ou lavage nécessaires. Ne crée pas de surface rugueuse. Ne convient pas pour les produits à base de liant hydraulique.
Autres méthodes de décapage		
Décapage thermique : lance à becs multiples oxyacétyléniques.	Préparation des surfaces planes de béton non armé . Peut convenir en cas de pollution chimique. Efficace pour l'enlèvement de revêtements polymères en combinaison avec un raclage.	Ne convient pas à tous les bétons (nécessite une épreuve de convenance). Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Création d'amorces de fissures dans les granulats du béton. Prévoir un nettoyage final énergique. Assèche le support.
Décapage chimique : par acide dilué ou par solvant.	À réserver à des cas particuliers par exemple : élimination de laitance de béton non armé par acide dilué ou élimination de graisse par solvant.	Risque important de pollution des parties voisines, de corrosion d'équipements métalliques voisins, prévoir une protection efficace. Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Nettoyage obligatoire. Risques pour l'environnement.
Cryo-décapage.	Ne génère pas de déchet supplémentaire aux résidus à évacuer. Bien adapté à l'élimination des anciennes peintures.	Risques de brûlure pour le personnel , nécessité d'équipements de protection individuelle adaptés. Dispositions particulières à prévoir dans les endroits clos (ventilation pour évacuer la production de gaz carbonique, etc.).

Méthodes — Matériel	Efficacité, domaine d'emploi	Contraintes
Enlèvement de béton ou purge : enlèvement des parties polluées ou carbonatées, détériorées et/ou de parties saines du support au-delà de 15 mm de profondeur. <i>Note</i> : Ces méthodes sont également applicables au repiquage du béton.		
Mécanique et à percussion		
Outils manuels pneumatiques ou électriques légers (Burinage).	Bon dégagement des bétons fissurés, brûlés, pollués ou carbonatés dans l'encombrement des armatures.	Création de microfissurations locales dans le cas d'abattage sans précaution avec déformation possible des armatures de faible diamètre. Transmission de vibrations par le béton et génération de bruit. Nécessité d'éliminer les débris et les poussières générées.
Marteau léger pneumatique à aiguilles multiples.	Préparation efficace des bétons et surtout des armatures corrodées provoquant le décollement de la rouille.	Création de microfissurations dans les granulats du béton avec déformation possible des armatures de faible diamètre. Transmission de vibrations par le béton et génération de bruit. Nécessité d'éliminer les débris et les poussières générées.
Outils manuels, pneumatiques légers ou électriques légers à pointes de diamant (Bouardage).	Bonne préparation des surfaces de faible importance.	Microfissuration importante et déformation possible des armatures. Transmission de vibrations par le béton et génération de bruit. Nécessité d'éliminer les débris et les poussières générées.
Décapage à l'eau à haute pression (jusqu'à 60 MPa) et à très haute pression (jusqu'à 110 MPa)		
Pompe électrique à haute pression (pression supérieure à 2 fois la résistance du béton en compression).	Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés. Décapage des armatures corrodées.	Ne convient pas dans les environnements où la présence d'eau et d'humidité est néfaste ou dangereuse (par exemple à proximité d'installations électriques). Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Récupération des eaux polluées nécessaire. Pas de possibilité d'appliquer rapidement des produits de réparation nécessitant une surface sèche (produits de type PC par exemple). Lavage nécessaire en fin d'opération.

Tableau n° 52 : méthodes de repiquage et d'enlèvement du béton - Tableau inspiré de la norme NF P95-101

Méthodes — Matériel	Efficacité, domaine d'emploi	Contraintes
Nettoyage du support : au moyen de procédés mécaniques de dispositifs abrasifs ou à percussion		
Grattage, brossage	Adapté au nettoyage des armatures apparentes oxydées.	
Ponçage	Nettoyage des salissures peu adhérentes.	Aspiration ou lavage nécessaires.
Marteau léger pneumatique à aiguilles multiples	Enlèvement des clous, fils de ligature, morceaux de bois incrustés dans le béton...	Possible création de microfissurations dans les granulats du béton. Transmission de vibrations par le béton et génération de bruit.

Méthodes — Matériel	Efficacité, domaine d'emploi	Contraintes
Nettoyage par décapage à l'abrasif et au sable		
Jet d'abrasif à sec	Avec abrasifs conformes à la réglementation en vigueur, bonne préparation des bétons et armatures apparentes.	Nuages de poussières, générateur de résidus à récupérer et évacuer. Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Interdit en tunnel. Aspiration ou lavage nécessaires pour assurer l'adhérence du produit de réparation.
Jet d'abrasif humide	Avec des abrasifs conformes à la réglementation en vigueur, bonne préparation des bétons et armatures apparentes.	Ne convient pas dans les environnements où la présence d'eau et d'humidité est néfaste ou dangereuse (par exemple à proximité d'installations électriques). Générateur de résidus à récupérer et évacuer. Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Risques importants de pollution des parties voisines , prévoir une protection efficace. Lavage indispensable. Compatible avec les produits à base de liant polymère après séchage.
Grenailage	Bonne préparation des bétons et armatures apparentes. Récupération facilitée des résidus à évacuer.	Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée.
Nettoyage par décapage à l'eau basse pression (< 18 MPa) et, lorsque des volumes d'eau restreints sont nécessaires, jusqu'à 60 MPa :		
Eau à basse pression (< 18 MPa)	Bon enlèvement de la poussière, de la laitance. Nettoyage des fissures, des joints. Enlèvement superficiel de béton et des parties de béton mal adhérentes ou présentant des caractéristiques mécaniques très faibles.	Ne convient pas dans les environnements où la présence d'eau et d'humidité est néfaste ou dangereuse (par exemple à proximité d'installations électriques). Difficulté de récupération d'éventuels résidus polluants. Pas de possibilité d'appliquer rapidement des produits de réparation nécessitant une surface sèche (produits de type PC par exemple).
Eau à moyenne pression (> 18 MPa et < 60 MPa)	Enlèvement superficiel de béton et des parties de béton mal adhérentes ou présentant des caractéristiques mécaniques faibles.	Ne convient pas dans les environnements où la présence d'eau et d'humidité est néfaste ou dangereuse (par exemple à proximité d'installations électriques). Risques pour le personnel. Nécessité d'un personnel qualifié équipé de protection individuelle agréée. Pas de possibilité d'appliquer rapidement des produits de réparation nécessitant une surface sèche (produits de type PC par exemple).

Méthodes — Matériel	Efficacité, domaine d'emploi	Contraintes
Autres méthodes de nettoyage		
Air comprimé	Nettoyage de poussière non adhérente, des fissures, des joints.	S'assurer que le compresseur ne dégage pas d'huile .
Vapeur	Élimination de certains contaminants (végétaux, etc.) en surface, voire ayant pénétré dans le béton.	Risques de brûlure pour le personnel.
Lessivage avec détergents et biocides	Élimination des taches grasses avec utilisation d'eau chaude. Élimination de micro-organismes par utilisation de biocides.	Récupération des produits de lessivage après mise en œuvre.
Lavage acide	Béton non armé.	INTERDIT pour les bétons armés et précontraints. Récupération des produits.

Tableau n° 53 : méthodes de nettoyage – Tableau inspiré de la norme NF P95-101



Photo n° 153 : résultat d'un décapage par sablage à sec
(crédit photo D. Poineau)



Photo n° 154 : sacs d'abrasif sans silice pour sablage
(crédit photo D. Poineau)



Photo n° 155 : résultats d'une hydrodémolition : enlèvement complet du béton et ferrailage intact
(crédit photo J.M. Lacombe)

Technique de préparation	Traitement des défauts de planéité	Nettoyage des salissures peu adhérentes	Nettoyage des taches de gras	Amélioration de la rugosité superficielle	Élimination des micro-organismes
Égrenage, brossage et dépoussiérage		Oui			
Ponçage	Oui	Oui plus ou moins			
Lessivage avec détergents (pas de solvants)		Oui plus ou moins	Oui avec détergents et eau chaude		Oui avec biocides
Projection d'abrasifs à sec		Oui	Non	Oui	oui
Projection d'abrasifs par voie humide		Oui	Non	Oui	Oui
Projection d'eau sous pression (Cf. NF EN 1504-10) :					
Basse pression $P \leq 18 \text{ MPa}$		Oui	Oui avec détergent et eau chaude	Après essai de convenance pour déterminer la pression optimale	Oui avec biocides
Moyenne pression $18 \text{ MPa} < P \leq 60 \text{ MPa}$					
Haute pression $P > 60 \text{ MPa}$					

Tableau n° 54 : choix des techniques de préparation du support (inspiré du guide technique du LCPC de décembre 2002 sur la protection des bétons)

Note :

- l'annexe n°4 au présent **GUIDE** donne des informations complémentaires sur le matériel d'hydrodémolition à utiliser en fonction du type de travail à effectuer ;
- l'article 4.2 du **guide FABEM 4** donne les exigences sur la qualité des supports devant recevoir un enduit, une imprégnation, un revêtement...

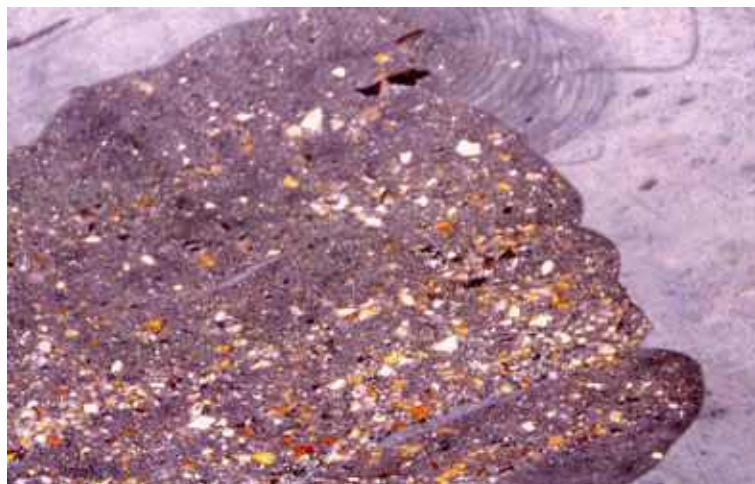


Photo n° 156 : résultat d'un décapage léger à l'eau sous pression (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 157 : incidences néfastes du marteau-piqueur sur le ferrailage (crédit photo Poineau)

Le marché peut imposer mais aussi interdire certaines de ces méthodes en fonction des avantages ou des risques qu'elles présentent :

- **pour le personnel** : la projection d'abrasifs à sec, le décapage à l'eau à haute pression nécessitent de prévoir des équipements de protection individuelle agréés (ÉPI) ;
- **pour l'environnement** : la projection d'abrasifs à sec, le décapage chimique avec des acides dilués... imposent de prévoir le recueil des **déchets polluants** ;
- **pour le béton** : le rabotage mécanique, le décapage thermique (intense) risquent de provoquer des amorces de fissures, les marteaux-piqueurs provoquent des déformations du ferrailage...

La ou les techniques de préparation du support en béton doivent satisfaire aux exigences de l'article 7.2 de la norme **NF EN 1504-10**, dont les principales sont détaillées ci-après avec, entre parenthèses, quelques explications :

- l'étendue et la profondeur de la préparation doivent être conformes au principe et à la **méthode de réparation ou de renforcement du béton et/ou à celle de préservation et de restauration de la passivité** ;
- l'intégrité structurale doit être assurée, si nécessaire par un **éaiement provisoire** ;
- l'importance de la préparation doit tenir compte de la **profondeur de carbonatation** et des **profils de concentration des chlorures** et autres contaminants (après réparation et diffusion des contaminants restants, ces produits doivent rester nettement en dessous des taux critiques sauf dans le cas où un traitement électrochimique est mis en œuvre) ;
- le béton ou le mortier de réparation ou de renforcement doit pouvoir être correctement compacté, en particulier, autour des armatures, ce qui impose un dégagement minimal de celles-ci ;
- les bords de la zone où du béton a été enlevé doivent être taillés suivant un angle compris entre 90° et 135° à $\pm 5^\circ$ pour assurer une bonne liaison mécanique entre le matériau d'origine et celui d'apport ;
- les armatures, dans le cas d'un environnement très agressif avec risque de développement rapide d'une corrosion sur les armatures décapées, doivent être traitées contre la corrosion (sauf si le mortier ou le béton est mis en place par projection en voie sèche ou s'il y a un traitement électrochimique).



Photo n° 158 : étaie provisoire (crédit photo Parexlanko)

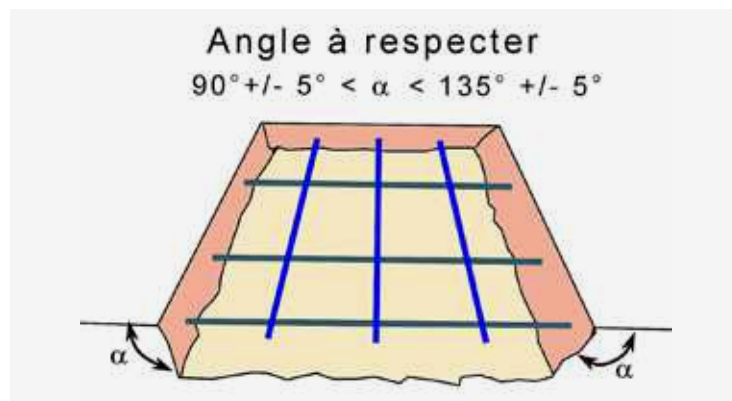


Figure n° 77 : dispositions à respecter pour le dégagement des armatures

5.2.1.2.3 Préparation des armatures – Exigences de résultats

Note : avant de lire le présent article, le lecteur est invité à se reporter à l'article 3.4.6.2 ci-dessus qui traite des phénomènes provoquant la corrosion des armatures et à l'article 3.5.6 ci-dessus qui traite des méthodes de préservation des armatures de la corrosion et méthodes de traitement des armatures corrodées.

Il existe dans le domaine de la peinture deux normes qui traitent du degré d'enrouillement des subjectiles en acier et des degrés de soins à obtenir après traitement. Il s'agit des normes : **NF EN ISO 85101** et **NF EN ISO 12944-4** susvisées.

Le tableau ci-après résume une partie des degrés de soins extraits de la seconde norme.

Mode de préparation	Degré de soins	Caractéristiques essentielles des surfaces ainsi préparées	Références de l'extrait
Projection d'abrasifs	DS 3 ou Sa 3	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminées. La surface doit avoir une couleur uniforme métallique (acier à blanc)	Annexe A page 14 NF EN ISO 12944-4
	DS 2,5 ou Sa 2,5	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminées. Les traces de contamination qui subsistent doivent apparaître simplement comme de légères taches sous forme de points ou trainées	
	DS 2 ou Sa 2	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminées. Toute contamination résiduelle doit être très adhérente	
	DS 1 ou Sa 1	Seuls la calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminées.	
Nettoyage à la main ou à la machine	St 3	La calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères sont éliminées. Toutefois, la surface doit être traitée beaucoup plus soigneusement que St 2 pour donner un reflet dû à la partie métallique du sujet	
	St 2	Seuls la calamine, la rouille, les revêtements et les matières étrangères peu adhérentes sont éliminées.	

Tableau n° 55 : tableau d'un extrait partiel de la norme NF EN ISO 12944-4

En fonction des indications ci-après du **présent GUIDE** sur les **degrés de soins** à obtenir pour les armatures de BA, voire des pièces métalliques scellées dans le béton, il appartient au **marché** de fixer les exigences que doit respecter l'**entrepreneur**.

Dans le cas où les armatures de béton armé sont corrodées, il faut les dégager sur tout leur tracé et tout leur périmètre : c'est le **détourage. Le dégarnissage doit être fait jusqu'à ce qu'apparaissent la partie non corrodée sur une longueur d'au moins 50 mm.**



Photo n° 159 : toutes les armatures corrodées doivent être dégagées (crédit photo Parexlanko)

Pour permettre une bonne mise en place et un bon compactage du matériau de réparation, le croquis suivant donne la **distance minimale « d »** à respecter entre la barre et le support repiqué (Cg représente la dimension maximale du granulat). Cette distance « d » est au minimum égale à la plus grande des deux valeurs suivantes : 15 mm ou Cg + 5 mm.

Note : l'Eurocode 2 utilise le sigle « dg » : dimension nominale supérieure du plus gros granulat.

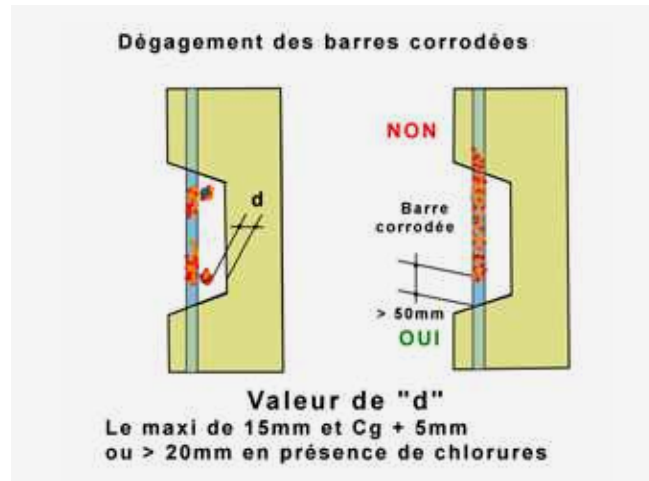


Figure n° 78 : distance minimale à respecter entre la barre et le béton lors de la préparation du support

Si le béton est contaminé par les chlorures, la distance minimale est à porter à **20 mm**. De plus, un **lavage soigné** du béton et des armatures est à effectuer à l'eau sous pression (< 18 MPa)

En l'absence de toute trace de corrosion, le béton carbonaté et/ou pollué par des chlorures peut rester en place si le **traitement fait appel aux méthodes électrochimiques** (sous réserve que sa résistivité soit compatible avec la méthode) ou lorsque la teneur en eau du béton est très faible (forte résistivité) et peut le rester (environnement sec).



Photo n° 160 : entassement de barres dans une structure ancienne (crédit photo Parexlanko)

Parfois, dans certaines parties d'une structure, la concentration des barres, le faible espacement entre les barres ou les paquets de barres rendent **l'enlèvement du béton carbonaté et/ou pollué et le nettoyage très difficile** (les mesures du potentiel d'armature peuvent renseigner sur l'existence d'une corrosion).

Dans un tel cas, il est conseillé, soit de mettre en œuvre une **méthode électrochimique**, soit de renforcer l'efficacité de la méthode de réparation au moyen de produits à base de liants hydrauliques (apport d'alcalins) et de prévoir après réparation, par exemple, la mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité aux gaz et aux liquides...

Une fois réalisée l'élimination des parties oxydées... par brossage métallique, repiquage, sablage, grenailage ou à l'eau sous très haute pression, deux cas se présentent :

1. la réparation avec remplacement du béton pollué ou carbonaté et ajout de mortier ou de béton est mise en œuvre ;

2. un revêtement de protection contre la corrosion des armatures est mise en œuvre et est suivi, après un délai d'attente adapté au produit de protection, par la mise en place du mortier ou du béton de réparation.

Quand faut-il mettre en place un revêtement de protection contre la corrosion sur les armatures ? Les exigences sont différentes dans le domaine du bâtiment et celui du génie civil. Se reporter à l'article 3.5.6.3 ci-dessus.

1. Domaine du bâtiment :

Consulter l'annexe normative B (réparations locales des bétons éclatés par oxydation des armatures) de la norme NF DTU 42. 1 qui impose la mise en œuvre d'un revêtement sur les armatures. L'article B3.1 dans l'extrait ci-après prescrit : devant, immédiatement après décapage des armatures, être recouvert selon la spécification du fabricant du mortier :

- soit avec un inhibiteur de corrosion appliqué sous forme liquide directement sur l'acier,
- soit avec un inhibiteur de corrosion appliqué sur la totalité de la surface,
- soit avec une barbotine, spécifique au système, en badigeon sur l'acier et le béton.

Après séchage de cette couche protectrice (au moins quelques heures), bien nettoyer le support et l'humidifier avant application du mortier. »

2. Domaine du génie civil :

Rappel des exigences de la norme NF P95-101 :

« La mise en œuvre d'un revêtement sur les armatures n'est pas nécessaire, sauf dans des cas particuliers tels que :

- réparation très localisée et épaisseur d'enrobage insuffisante du produit de réparation et en l'absence d'une protection extérieure qui relève de la norme NF P95-103 ;
- réparation en milieu agressif qui nécessite une protection rapide contre la corrosion des armatures dégagées en attente de la mise en œuvre du produit de réparation (par exemple : cas de travaux en milieu marin).

Sauf si le mortier de réparation est mis en place par projection par voie sèche, qui détruit la protection. Dans un tel cas un produit ou système de protection doit être appliqué sur la surface du béton.

Note : lorsqu'il n'est pas possible de mettre en œuvre rapidement le mortier de réparation, il est nécessaire de procéder avant la réparation à une nouvelle évaluation du besoin de **préparation complémentaire** des armatures et de la surface du béton. »

Lorsque le mortier ou le béton de réparation est de type PC et utilisé en couche mince :

- si ce produit relève de la norme NF EN 1504-3 et du marquage CE, comme tous les autres produits (CC et PCC), sa résistance à la carbonatation a obligatoirement été testée (NF EN 13295) ;
- sa résistance à la pénétration des chlorures, comme tous les autres produits (CC et PCC), relève des applications spéciales visées par l'annexe B de la norme NF EN 1504-3 (Se reporter à la norme NF EN 13396 de septembre 2004 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de la pénétration d'ions chlorure).

Les deux solutions suivantes peuvent être utilisées :

- en l'absence de chlorures, au minimum la mise en œuvre d'un revêtement anticorrosion sur les armatures, voire celle d'un revêtement de protection sur le béton ;
- en présence de chlorures et si le produit de réparation n'a pas été testé, la mise en œuvre d'un revêtement anticorrosion sur les armatures et d'un revêtement de protection sur le béton.

Il est rappelé, que le recours à des armatures de béton galvanisées, inoxydables ou en matériaux composite peut être une solution dans le cadre de certains projets de réparation.

ATTENTION : certains revêtements anticorrosion doivent être appliqués sur les armatures **sans déborder sur le béton**. D'autres revêtements peuvent jouer deux rôles : **protéger** les armatures et **améliorer l'adhérence** entre le béton support et le produit de réparation.



Photo n° 161 : mauvaise application d'un revêtement anticorrosion : les aciers n'ont pas été détourés et le produit a été aussi appliqué sur le béton (crédit photo D. Poineau)

Important, en cas de recours à un **revêtement anticorrosion non actif** sous forme d'un **film de résine...**, la totalité de la surface de l'armature doit être recouvert par le produit et en épaisseur suffisante. De plus, toute blessure du film est à proscrire pour éviter le développement d'une corrosion pernicieuse sous le film. L'utilisation de ces types de produits est donc fortement déconseillée en réparation.

RAPPEL : en cas de présence de rouille sur les parties des barres qui sont recouvertes de béton apparemment sain et compact juste à côté d'une zone réparée par remplacement du béton pollué, un nouveau couple galvanique va se former entre la zone réparée, qui va jouer le rôle de cathode, et les deux zones non réparées, qui vont va jouer le rôle d'anode (**phénomène appelé inversion de polarité**), avec développement de **deux nouvelles zones de corrosion**.

Ce phénomène d'**inversion de polarité** va aussi survenir si les zones voisines d'une zone réparée sont proches d'être **entièrement carbonatées** ou d'atteindre le **taux limite en chlorures** ou d'autres **polluants**. Dans un tel cas, la corrosion se développera, mais plus tardivement que dans le cas précédent.

Ces phénomènes d'**inversion de polarité** ou de **corrosion généralisée** peuvent être retardés ou empêchés avec la mise en œuvre d'une ou de plusieurs des **méthodes de réparation suivantes** :

- un remplacement complet du béton carbonaté et/ou pollué et ce, sur toute la surface de la structure ;
- l'augmentation du recouvrement des armatures ;
- une réalcalinisation par diffusion avec la mise en place d'une couche de recouvrement en mortier ou béton sur toute la surface de béton carbonaté ;
- une application d'inhibiteurs de corrosion sur la surface du béton ;
- une déchloruration, si nécessaire, suivie d'une réalcalinisation ;
- une protection cathodique ;
- un revêtement totalement étanche aux gaz ou aux liquides (à exclure par exemple, dans le **domaine du bâtiment** car les murs doivent pouvoir laisser passer la **vapeur d'eau** mais aussi par exemple, dans le **domaine du génie civil** pour un mur de soutènement, une solution de continuité du revêtement existe sur la face arrière, sous la semelle... l'eau contenue dans le sol peut donc pénétrer dans le béton).



Photo n° 162 : exemple de réparation présentant le risque d'une inversion de polarité

Les armatures les plus attaquées par la corrosion, après mesure de leur diamètre résiduel, doivent être remplacées si la **réduction de la section résistante** (vis-à-vis de la flexion, du cisaillement...) est suffisamment marquée. L'enlèvement et le remplacement des armatures doivent être effectués sans provoquer de désordres, ni dans le béton (fissures, éclatements...), ni dans les armatures restantes (déformations, dépliages, ruptures, coupes sauvages...).

Le recours à la **soudure bout à bout et par recouvrement** est parfois nécessaire si les dispositions du ferrailage rendent difficile la mise en place d'armatures supplémentaires en recouvrement classique, sous réserve que les barres soient soudables. Les techniques de soudage à utiliser et la qualification des soudeurs sont précisées dans les normes relatives au soudage des armatures de béton armé. Des coupleurs ou manchons peuvent également être utilisés (se reporter à l'article 4.5.4.6 ci-dessus).



Photo n° 163 : exemple de soudures de barres de béton armé
(crédit photo SIKA)

L'ajout de barres peut nécessiter leur **scellement** dans le béton support. Se reporter :

- d'une part, à l'article 4.2.5.7 ci-dessus qui explicite comment choisir les produits les plus performants compte tenu des insuffisances de la **norme NF EN 1504-6** et des difficultés, qui en résultent, d'application du fascicule de documentation **FD P 18-823** relatif au dimensionnement des scellements ;

- d'autre part, au **guide FABEM 7** qui explicite la préparation du support et des trous et/ou forages nécessaires au scellement. Il est à noter que la préparation du support fait appel aux techniques visées ci-dessus, seul le traitement des trous et/ou forages fait l'objet de prescriptions supplémentaires.

5.2.1.2.4 Nettoyage des surfaces – Exigences de résultats

Après la préparation du support béton et des armatures, il faut éliminer tous les résidus (poussières, souillures, morceaux de béton, parcelles d'anciens revêtements...). **Cette opération de nettoyage des surfaces** est réalisée immédiatement avant la mise en œuvre des mortiers et bétons ou de la couche d'accrochage. **L'entrepreneur** doit s'assurer de la compatibilité entre la méthode de nettoyage prévue et les produits de réparation à mettre en œuvre en cas de restauration ou d'ajout de béton (support sec ou humide et texture).

Les méthodes de nettoyage sont développées dans le Tableau n° 53 et le Tableau n° 54 ci-devant.

Dans le cas du lavage à l'eau, les excédents d'eau doivent être éliminés, soit par soufflage à l'air provenant d'un compresseur en bon état pour éviter des venues d'huile, soit par aspiration. De plus, avant l'application des produits, le support doit présenter un état de dessiccation ou d'humidification compatible avec les produits utilisés.

5.2.1.2.5 Dispositions particulières liées à la nature des produits de réparation

> Produits à base de liants hydrauliques (type CC) :

Dans le cas de surfaces très poreuses ou à faible pourcentage de liant, il est nécessaire d'appliquer au préalable une **couche de barbotine** à base de liant hydraulique. L'eau de gâchage peut aussi être additionnée de lastex, ce qui améliore l'adhérence.

Dans le cas général, le support béton doit être saturé d'eau mais non ruisselant et l'application se fait sur un support à une température supérieure à 5 °C.

> Produits à base de liants hydrauliques et polymères (type PCC) :

La notice du fabricant définit l'état de surface à exiger et, dans le cas de surfaces très poreuses ou à faible pourcentage de liant, il est nécessaire d'appliquer au préalable une couche de barbotine à base du produit PCC.

Rappel, les armatures dégagées peuvent ne pas être traitées par un passivant après leur préparation, sauf lorsque l'ouvrage est situé en milieu agressif ou lorsqu'une couche d'accrochage initiale à base de polymère est nécessaire.

> Produits à base de résines synthétiques (type PC) :

En règle générale le support béton doit être sec, sauf si la résine est compatible avec une surface humide.

Le fabricant doit préciser si une couche primaire d'accrochage est nécessaire.

Ces produits étant, le plus souvent, appliqués en couche mince, les armatures doivent obligatoirement recevoir un revêtement à pigments actifs anticorrosion compatible avec la résine synthétique utilisée. De plus, un revêtement de protection du béton peut être nécessaire comme indiqué ci-devant.

5.2.1.2.6 Rappels sur les particularités des préparations du support avant mise en œuvre des méthodes de réparation du groupe 2

5.2.1.2.6.1 Cas des techniques traitées par les autres guides (FABEM) du STRRES

Méthode de réparation	Guides (FABEM) de référence	Observations
Traitement des fissures par calfeutrement, pontage...	N°2 article 4.2	Voir les articles : 6.2 de la norme NF P95-103.
Traitement des fissures et des cavités internes par injection	N°3 article 5.2	Voir les articles : 6.1.2 de la norme NF P95-103.
Mise en œuvre d'imprégnations, d'imprégnations hydrophobes, et de revêtements	N°4 article 4.2	Voir les articles : 6.3.2 et 6.4.2.1 de la norme NF P95-103.
Mise en place de mortier et béton par projection	N°5	Se reporter aux guides ASQUAPRO, à l'article 5.2.2 (très succinct) de la norme NF EN 14487-2 et à l'article 6.2 de la norme NF P 95-102-1 ainsi qu'au présent GUIDE
Collage d'armatures passives additionnelles extérieures au béton (tôle, plaques et tissus collés)	N°7 article 5.9.4	Voir la préparation du support de la norme NF P95-105 Se reporter au guide de juin 2007 de l'AFCG
Ajout de forces par précontrainte additionnelle ou déformations imposées	N°8 articles 5.2.6 et 10.8	Voir le tableau 5 et l'annexe a de la norme NF P 95-104 –
Réinjection des conduits des armatures de précontrainte	N°8 article 13.2	Opération évoquée mais non détaillée dans la norme NF P 95-104 Se reporter au chapitre 8 du livre : Maintenance et réparation des ponts Presses de l'ENPC en 1997.

Tableau n° 56 : documents de référence sur les techniques de préparation du support dans le cadre des méthodes de réparation de type 2

5.2.1.2.6.2 Cas des techniques traitées par une norme ou un document de niveau identique

> ajout d'armatures internes au béton avec ou sans soudure :

Cette opération correspond à la pose des armatures de béton armé qui relève de la norme NF EN 13670/CN qui est complétée par les exigences de la norme NF DTU 21 ou du fascicule 65 du CCTG.

> nouveau mortier ou béton coulé :

Il s'agit d'une reprise de bétonnage dont le calcul et la conception relèvent des règles de calcul retenues dans le projet de réparation ou de renforcement. Sont applicables pour le dimensionnement et le positionnement des armatures de couture, suivant le cas, les règles de l'Eurocode 2 partie 1, voire du BAEL 99 ou du BPEL 99.

Note : les règles à appliquer sont celles qui ont été retenues lors de la mise au point du projet.

La réalisation de la reprise relève de la norme NF EN 13670/CN qui est complétée par les exigences de la norme NF DTU 21 ou du fascicule 65 du CCTG (voir aussi les recommandations professionnelles pour l'exécution des reprises de bétonnage CEBTP, FFB et Sétra parues en 2000).

Il est recommandé d'orienter la reprise de bétonnage de telle sorte qu'elle soit soumise à une compression. Si elle est soumise à des cisaillements et/ou tendue, il faut ménager des redans convenablement disposés. Dans les deux cas, la surface doit présenter des indentations d'environ 5 à 6 mm de hauteur qui assurent une rugosité suffisante.

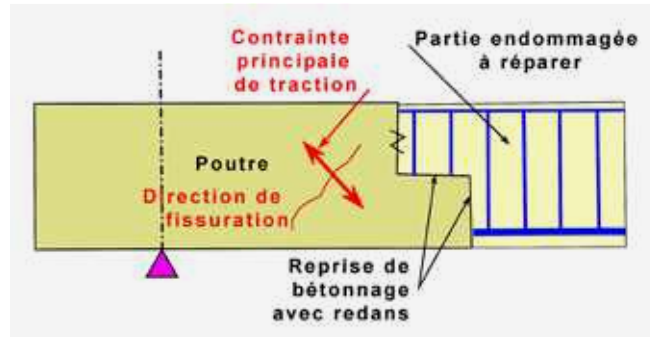


Figure n° 79 : Principe d'une reprise de bétonnage avec redans

Si un produit (barbotine, colle) doit être mis en œuvre pour améliorer l'adhérence entre le béton frais et le béton durci, les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> réalcalinisation électrochimique du béton carbonaté :

Cette méthode fait l'objet de la **norme NF EN 14038-1**, se reporter à l'**article 3.5.6.3.3 ci-dessus**. Les réparations (béton délaminé, nids de cailloux, armatures corrodées ...) doivent être effectuées avant l'opération. Ces réparations comprennent l'enlèvement des produits de réparations anciennes dont la résistivité dépasse de plus de 200 % celle du béton de la structure. Le produit ou le système utilisé pour la réparation doit également respecter le seuil de résistivité de 200%.

La préparation de la surface du béton de la pièce consiste en un nettoyage, voire un décapage destiné à enlever la poussière, les salissures, les revêtements existants ... c'est-à-dire tous les produits présents à la surface du béton et qui pourraient gêner le passage du courant. Il faut aussi couper ou isoler ou enlever les clous, morceaux de ligatures..., qui, en contact avec les armatures, pourraient provoquer des courts-circuits.

Si la méthode fait l'objet d'un brevet, il faut appliquer en sus les dispositions particulières de la **fiche technique** concernant la préparation du **béton support**.

> prévention ou protection cathodique :

La protection cathodique des structures non-immersées et non au contact du sol fait l'objet de la **norme NF EN ISO 12696**, se reporter à l'**article 3.5.6.3.3.1 ci-dessus**. Comme dans les autres traitements électrochimiques susvisés :

- les réparations doivent être effectuées avant le traitement en respectant les mêmes impératifs ;
- seul le seuil de résistivité est fixé dans une fourchette de 50 à 200 % ;
- la préparation des surfaces doit également respecter les mêmes exigences.

Les ensembles anodiques peuvent être à base de revêtements conducteurs placés à la surface du béton ou à base d'anodes en titane activées, qui peuvent être placées, soit à la surface du béton puis enrobées dans un mortier, soit encastrées dans des rainures, soit, enfin, intégrées à la structure dans des forages. Il est donc nécessaire, suivant le cas, de procéder à des préparations de surface complémentaires pour réaliser les rainures, les trous. **Les GUIDES FABEM 2, 3, 4 et 7 du STRRES** donnent des indications sur les outils pouvant être utilisés.

Si la méthode fait l'objet d'un brevet, il faut appliquer en sus les dispositions de la **fiche technique** concernant la préparation du **béton support**.

5.2.1.2.6.3 Cas des autres techniques

> Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage structural des bétons (béton durci sur béton durci et béton frais sur béton durci) :

La colle doit pouvoir pénétrer la surface du béton. La préparation de surface est analogue à celle préconisée pour les produits et systèmes d'imprégnation du béton. L'article 4.2.2 du **guide FABEM 4** décrit, dans le domaine du bâtiment comme celui du génie civil, les techniques de préparation de surface. Les anciens revêtements et la laitance doivent être éliminés, ainsi que toute trace de graisse... (si la surface du béton a fait l'objet d'une d'imprégnation, il faut éliminer la couche de béton imprégnée, soit au maximum de l'ordre de 5 millimètres).

Les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> Mise en œuvre de produits ou systèmes de scellement des armatures de béton armé :

Les trous de scellement doivent être propres (absence de débris et de poussière) et leur surface adhérente (en cas de carottage avec une couronne diamantée, il faut « déglacer » la surface). Le reste de la surface doit pouvoir permettre de réaliser une reprise de bétonnage de qualité (se reporter à l'article 5.2.1.2.6.2 ci-dessus).

Les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> Mise en œuvre de produits et systèmes pour le calage d'éléments :

L'état de surface doit permettre de réaliser une reprise de bétonnage de qualité (se reporter à l'article 5.2.1.2.6.2 ci-dessus).

Les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> Extraction électrochimique des chlorures :

Cette méthode ne fait l'objet d'aucune norme. Les dispositions applicables ci-dessus en cas de réalcalinisation sont, bien entendu, applicables à une opération d'extraction des chlorures.

Si la méthode fait l'objet d'un **brevet**, il faut appliquer en sus les dispositions particulières de la fiche technique concernant la préparation du **béton support**.

> Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs doivent pouvoir pénétrer dans le béton. La préparation de surface est analogue à celle préconisée pour les produits et systèmes d'imprégnation du béton. **L'article 4.2.2 du guide FABEM 4** décrit, dans le domaine du bâtiment comme celui du génie civil, les techniques de préparation de surface. Il faut éliminer les poussières, les salissures, les peintures, les revêtements existants (si la surface du béton a fait l'objet d'une d'imprégnation, il faut éliminer la couche de béton imprégnée, soit au maximum de l'ordre de 5 millimètres). De plus, il faut obtenir une surface absorbante, ce qui peut imposer un « déglacage » de la surface... **La fiche technique du produit ou système** fixe également les exigences liées à la préparation du **support béton**. Voir l'article 5.3.3.4.8 ci-dessous qui détaille la procédure d'exécution.

5.3.1 GÉNÉRALITÉS

Le marché demande à l'entrepreneur de proposer à l'acceptation du maître d'œuvre les deux procédures et les deux cadres de documents de suivi relatifs, d'une part, à la préparation de l'opération et, d'autre part, à la réalisation de l'opération. Les techniques, le personnel ainsi que les moyens et produits à mettre en œuvre seront ensuite validés par l'épreuve de convenance correspondante.

Ces deux procédures sont intégrées dans la procédure relative aux travaux et ces deux cadres de documents de suivi sont intégrés dans le cadre du document de suivi des travaux. Ces deux documents généraux sont visés dans l'article 5.1 ci-devant.

Doivent être disponibles sur le chantier :

- les procédures de préparation et de mise en œuvre de l'opération et les documents de suivi ;
- la fiche des données de performances (DdP ou DoP) pour les produits relevant du marquage CE ;
- les fiches techniques qui définissent les conditions de préparation et de mise en œuvre des produits et les matériels à utiliser ;
- les fiches de sécurité (FDS) qui définissent les précautions à prendre ;
- le personnel et le matériel nécessaires à la préparation des produits et à leur mise en œuvre...

Il faut impérativement respecter :

- les conditions de transport et de stockage, par exemple des produits sensibles au gel qui peuvent être altérés définitivement... ;
- les dates de péremption des produits ;
- les limites d'emploi des produits liées à la température et à l'hygrométrie ambiante et à la température et à l'humidité du support ;
- le temps et les conditions de mélange (vitesse et durée de malaxage) ;
- les précautions à prendre en fonction des risques que présentent les produits (toxicité, inflammation, explosion...) ;
- le temps de mûrissement et la durée pratique d'utilisation des produits de type multicomposants (par exemple, base + durcisseur + charges). Il s'agit de la DPU réelle fonction du volume du produit après mélange et des conditions hygrothermiques du chantier et non celle mesurée en laboratoire...

L'opération de mise en œuvre d'un produit ou d'un système de réparation du béton ne peut avoir lieu que si les conditions thermiques et hygrométriques d'emploi des produits sont respectées (se reporter à la fiche technique du produit et à la procédure d'exécution). Il est donc nécessaire de mesurer la température du support et celle de l'atmosphère ambiante ainsi que l'hygrométrie de l'air, avant tout début de l'opération. Ces mesures doivent être renouvelées si les conditions climatiques évoluent pendant l'opération. La mise en place d'un abri de protection peut permettre d'éviter des variations trop rapides de la température du support.

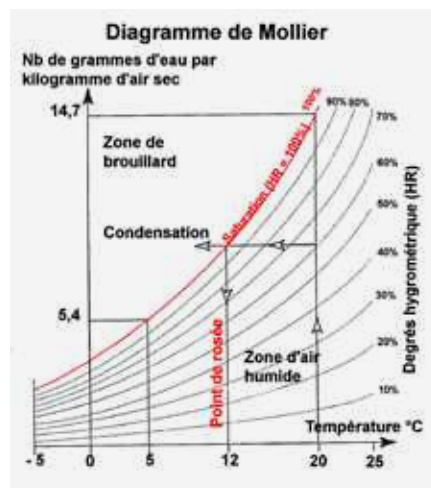


Figure n° 80 : diagramme de Mollier pour la détermination du point de rosée

L'essai n° 25 relatif au « point de rosée » de la norme **NF EN 1504-10** donne un extrait du tableau des normes **ISO 4677-1** et **ISO 4677-2** (actuellement annulées) qui précisent les températures du point de rosée en fonction de la température sèche ambiante et de l'humidité atmosphérique relative ambiante. Il est aussi possible d'utiliser l'abaque de la Figure n° 76 ci-devant.

Par exemple, sur le graphique, pour une température extérieure de 20°C et une humidité relative de 60%, la condensation se produit sur le support si sa température est inférieure ou égale à 12°C.

Se reporter aux normes françaises : **NF X15-110**, **NF X15-113** et **NF X15-118** relatives à la mesure de l'humidité de l'air.

5.3.2 PRÉPARATION DES PRODUITS

5.3.2.1 Généralités

Rappel : 16 méthodes de réparation du béton, de renforcement structural et de préservation ou de restauration de la passivité des armatures sont traitées dans le présent GUIDE.

Les normes européennes de la série **NF EN 1504-**** ne donnent que peu d'indications sur la **préparation des produits et des systèmes utilisés dans chaque méthode**. Heureusement, les normes françaises de la série **NF P 95-1**** sont plus détaillées.

L'article 4.5.3 ci-dessus qui traite des **matériels de préparation des produits** détaille, en fonction des types de produits (produits dit monocomposant, produits dits multicomposants, mortiers à base de liants hydrauliques...), les précautions générales à respecter (vitesse et durée de malaxage, durée de mûrissement...). **Il convient donc de se reporter à cet article ainsi qu'aux fiches techniques des fabricants.**

Il est également possible de se référer aux différents **GUIDES** du **STRRES** auxquels il est fait renvoi (par exemple, pour l'injection et le remplissage des fissures et des vides du béton...) ainsi qu'aux normes de la **série NF P95-10*** (101, 102, 103, 104...).

Enfin, la préparation de certains produits comme le béton relève de normes comme la **norme NF EN 206/CN**, celle d'autres produits comme les armatures de béton armé relève des **normes NF EN 13670/CN**, **NF DTU 21** ou du fascicule 65 du **CCTG**...

Il est rappelé que la préparation des produits et systèmes fait l'objet d'une **procédure d'exécution** et d'un **document de suivi d'exécution**.

Le présent **GUIDE** donne simplement, ci-après, quelques règles génériques sur la **préparation des produits**. Il n'a pas été jugé utile de développer davantage ce point.

Rappel : une réparation structurale ou non structurale, un renforcement et/ou une restauration de la passivité des armatures doit souvent être complété par :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, pour le **choix du matériel de préparation des produits au guide FABEM 2 et à la norme NF P 95-103** ;
- **et/ou une protection supplémentaire**, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... Se reporter, pour le **choix du matériel de préparation des produits au guide FABEM 4 et à la norme NF P 95-103**.

5.3.2.2 Préparation des produits prêts à l'emploi

Les récipients et les outils utilisés doivent être propres et secs.

Les produits sont le plus souvent en **conditionnements prédosés (ou « kits »)**. Ces conditionnements **ne doivent jamais être fractionnés**. En effet, tout manquement à cette règle peut entraîner, par exemple pour un mortier à base de liants organiques, la perte de ses caractéristiques mécaniques par défaut de polymérisation de la résine.

Les produits doivent être préparés et mélangés en suivant scrupuleusement les **indications de la fiche technique du fabricant** et de la **procédure d'exécution**. En particulier, il faut respecter l'ordre d'introduction des différents constituants.

Il est rappelé que pour les produits et systèmes à base de liants organiques, la vitesse de rotation du malaxeur (quelques centaines de tours par minute) et la forme de l'hélice doivent être adaptées pour permettre un mélange homogène en consistance et couleur des composants, qui sont plus ou moins visqueux et pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange.

5.3.2.3 Préparation des produits fabriqués sur le chantier

Les récipients et les outils utilisés doivent être propres et secs.

Les produits doivent être préparés mélangés en suivant scrupuleusement les **indications de la procédure d'exécution**. En particulier, il faut respecter l'ordre d'introduction des différents constituants et leur dosage.

Le chantier doit donc disposer de **moyens de pesage étalonnés** permettant de satisfaire aux mêmes tolérances de fabrication que les produits prêts à l'emploi normalisés du même type. Des tolérances, pour chaque type de produit ou de système, sont fixées dans les normes relatives aux produits (se reporter aux exigences d'identification des **normes 1504-2 à 1504-7**). L'organisation du contrôle de la qualité peut être calquée sur le **contrôle de la production en usine (CPU)** développé dans la **norme NF EN 1504-8**.

Avant toute mise en œuvre, ces produits sont soumis à une **épreuve de convenance de fabrication** pour s'assurer qu'ils peuvent être fabriqués sur le chantier en respectant les tolérances prévues au **marché** et dans la **procédure d'exécution**.

5.3.2.4 Préparation des autres produits (mortiers, bétons, armatures...)

Les **mortiers** et les **bétons** utilisés par exemple pour une mise en œuvre par coulage en place ou par projection (**VS** ou **VM**) peuvent être fabriqués en centrale de type BPE. Ces produits sont

ensuite livrés sur le chantier, soit prêts à être malaxés avec un ajout d'eau et d'adjuvants, soit déjà malaxés.

Ces produits doivent être préparés conformément aux dispositions des textes de référence (NF EN 206/CN, NF DTU 21, fascicule 65 du CCTG...) auxquels le marché fait référence. S'ils sont mis en place par projection s'y ajoutent les dispositions des normes NF EN 14487-1 et 2 et NF P95-102-1.

5.3.3 RÉALISATION DE L'OPÉRATION

5.3.3.1 Généralités

La mise en œuvre d'une opération, soit de **restauration du béton** ou de **renforcement structural**, soit de **restauration** ou de **préservation de la passivité**, sauf disposition contraire du marché, ne peut avoir lieu sans un **accord formel du maître d'œuvre (POINT D'ARRÊT)**.

La levée du **POINT D'ARRÊT** est conditionnée à la validation par le **maître d'œuvre** des **épreuves de convenue** et des **contrôles** sur la préparation du support, de l'opération, des produits.

L'opération est préparée et réalisée conformément aux dispositions de la **procédure d'exécution correspondante**, qui reprend les dispositions du **marché**, celles des fiches techniques des produits, les prescriptions des normes et autres textes en vigueur. Suivant le type de travail à réaliser, les articles correspondants de la **norme NF EN 1504-10** et/ou des **normes** de la série **NF P 95-1****, les **normes NF DTU21 et NF DTU 42.1** [réfection des façades par revêtements à base de polymères] et le **fascicule 65 du CCTG**, voire les **règles de l'art**. Le **document de suivi d'exécution** correspondant est rempli au fur et à mesure de l'avancement des opérations.

Le **nom exact de la procédure de réalisation de l'opération** dépend de la **méthode de réparation et/ou renforcement mise en œuvre**.

Dans le cas de la mise en œuvre des produits industriels prêts à l'emploi, la **fiche technique** indique les exigences à respecter. La **procédure de réalisation de l'opération** doit les reprendre sous forme de prescriptions :

- le ou les matériels à utiliser ;
- la qualité que doit présenter le support ;
- la plage des températures d'utilisation (Tmin et Tmax) ;
- les précautions à prendre par temps froid (par exemple, gâchage à l'eau tiède si la température est proche du Tmin) ou par temps chaud ;
- l'interdiction d'appliquer le produit sur un support gelé ou en cours de dégel ou s'il va geler dans moins de 24 heures ;
- le temps de repos à respecter après le malaxage (mûrissement) ;
- la durée de vie du mélange en fonction de la température ambiante ;
- les épaisseurs minimales et maximales des couches successives en fonction de la position du support (surface horizontale, verticale ou en sous-face) ;
- l'enrobage minimal à réaliser au-dessus des armatures ;
- le délai d'attente avant le talochage ;
- le délai minimum à observer avant le décoffrage ;
- le délai de recouvrement entre les couches (minimal et maximal) ;
- de délai à observer avant la remise en circulation piétonne du chantier (cas des surfaces horizontales) ;
- la consommation prévisible en produit (épaisseur et poids) ;
- le traitement des points particuliers...

Dans le cas des produits préparés sur chantier, la **procédure de réalisation de l'opération** doit fixer les exigences en s'inspirant de la liste ci-dessus.

Dans la suite du présent article sont passées en revue les différentes les méthodes qui, combinées ou non, permettent de satisfaire aux trois fonctions principales :

- la restauration du béton ;
- le renforcement structural ;
- la préservation et la restauration de la passivité des armatures.

Bien entendu, un simple renvoi aux normes de la série NF P95-10* et aux GUIDES du STRRES est effectué si la procédure de mise en œuvre de la méthode de réparation y est décrite en détail (par exemple, les injections). Si, au contraire, la procédure est décrite dans une norme à laquelle fait référence la norme NF EN 1504-10, les points clefs de cette norme sont décryptés.

Rappel : une réparation structurale ou non structurale, un renforcement et/ou une restauration de la passivité des armatures doit souvent être complété par :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, pour la réalisation de l'opération au guide FABEM 2 et à la norme NF P 95-103 ;
- et/ou une protection supplémentaire, soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement... Se reporter, pour la réalisation de l'opération au guide FABEM 4 et à la norme NF P 95-103.

Peut-on s'appuyer uniquement sur les deux principales normes de références, qui traitent des méthodes satisfaisant au trois fonctions ? La réponse est non comme le montre l'analyse de ces deux textes :

> La norme NF P 95-101 :

Cette norme relative aux réparations de surface des bétons, ne traite donc pas des réparations à caractère structural et des renforcements. Des exigences supplémentaires sont à imposer.

Cette norme détaille le choix, les techniques de mise en œuvre et de contrôle des trois familles de produits (CC, PCC et PC). Cependant, la norme n'attire pas suffisamment l'attention sur le fait que les produits relevant de la norme NF EN 1504-3 sont des mortiers dont les caractéristiques sont étudiées sur des éprouvettes coulées dans des moules de faibles dimensions et ne peuvent être représentatives de celles du produit mis en place par projection.

Elle n'attire pas non plus suffisamment l'attention qu'il existe aussi des produits industriels qui sont des bétons (granulométrie > 0,4 mm) qui s'appuient sur la norme NF EN 206/CN et certains aussi sur la norme NF EN 1504-3. Il s'agit de produits, sauf ceux bénéficiant du marquage CE lié à la norme NF EN 1504-3, à considérer comme fabriqués en centrale ou sur site mais pour lesquels, il faut fixer des conditions d'essais représentatives lors des épreuves d'étude et de convenue.

> La norme NF EN 1504-10 :

Cette norme décrit les exigences auxquelles doivent satisfaire les principales techniques de mise en œuvre manuelles et mécanisées. Elle reste quasiment muette sur les méthodes connexes (scellement d'armatures, les injections des vides)... Elle ne traite pas des notions d'épreuves d'étude et de convenue, de l'importance des essais à effectuer...

5.3.3.2 Réalisation des opérations de restauration du béton

5.3.3.2.1 Généralités

Il s'agit de la mise en œuvre de produits ou systèmes en faible épaisseur (réparation de surface) ou en forte épaisseur (réparation à caractère structural ou renforcement) appliqués manuellement, par coulage ou mécaniquement. Les exigences générales développées ci-après pour les trois

familles de produits ou systèmes sont reprises en ajoutant, si nécessaire, des compléments des deux normes de référence susvisées.

Lorsque les réparations sont de faible importance en surface et volume, les produits et systèmes sont mis en œuvre manuellement. Dans le cas contraire la mise en œuvre se fait par coulage ou est mécanisée.

La mise en œuvre est effectuée manuellement, par coulage ou mécaniquement avec le matériel adapté au type de produit, à l'importance des travaux et à la finition recherchée.

Les matériels de mise en œuvre sont ceux fixés par la **fiche technique** et la **procédure de mise en œuvre de l'opération**. Ces matériels d'application des différents types de produits et systèmes sont décrits en détail dans l'article 4.5.4 ci-dessus auquel il convient de se référer.

Rappel, avant toute réalisation de la réparation, une protection contre le **vent**, le **soleil** (ensoleillement direct) ou la **pluie** est à mettre en place en fonction des règles de l'art et des recommandations de la fiche technique du produit ou du système. Toutes ces exigences sont reprises dans la **procédure d'exécution**.

Lorsque la structure à réparer a tendance à vibrer (par exemple, sous les effets des engins utilisés lors des travaux ou sous les effets du trafic car l'ouvrage doit être maintenu en service pendant tout ou partie de l'opération), il y a lieu de s'assurer que les **vibrations éventuelles** ne risquent pas de provoquer la décohé sion du produit ou du système mis en œuvre. Ces vibrations sont particulièrement à redouter pour les mortiers et les bétons projetés. Dans un tel cas, le **marché** peut imposer lors de l'**épreuve de convenue nce** :

- la réalisation de plaquettes étalon, dont une partie est à fixer à la structure et l'autre à conserver sur le chantier dans les mêmes conditions thermiques et hygrométriques ;
- la mesure de l'intensité des vibrations, en particulier au droit des zones les plus sollicitées ;
- la mise en œuvre du produit ou du système sur les deux catégories de plaquettes étalon ;
- la mesure de l'adhérence du produit ou du système une fois durci par un essai de traction directe (rappel : produit de classe R4 \geq 2 MPa et produit de classe R3 \geq 1,5 MPa sous réserve que la cohésion du support soit suffisante).

Note : la structure elle-même peut servir de plaquette étalon s'il est possible de réaliser l'épreuve de convenue nce avec ou sans vibrations.

La simple restauration du béton d'une structure peut, dans certains cas, fait appel aux **techniques complémentaires** visées dans l'article 5.3.3.3 ci-dessous relatif à la réalisation d'un renforcement structural (collage de béton frais sur béton durci, injection de l'interface entre le produit de réparation et le support en béton...).

Rappel : si un revêtement (ou une barbotine) est appliqué sur les armatures, le mortier (ou le béton) de restauration doit être mis en œuvre en respectant le délai d'utilisation prévu par la **notice d'emploi** du produit de revêtement (pour une barbotine, avant la fin de prise de celle-ci).

5.3.3.2.1.1 Mise en œuvre des produits à base de liants hydrauliques (CC)

Quel que soit leur mode de conditionnement et de préparation, les produits et systèmes sont mis en œuvre dans les délais les plus brefs après l'arrêt du malaxage. Le délai de mûrissement dépend de la nature du liant, de la température ambiante et de l'adjonction éventuelle d'un adjuvant.

Tout mortier ou béton n'ayant pu être utilisé dans les délais ou présentant un commencement de prise doit être rejeté. Il ne doit jamais être mélangé à du mortier ou du béton frais. Le re-malaxage est strictement interdit.

Dans le cas de mise en place dans un coffrage, son dimensionnement, sa raideur et sa fixation doivent être tels qu'aucun mouvement ne puisse se produire en provoquant une fissuration interne ou une décohé sion avec ou sans décollage de la reprise.

En l'absence de mise en œuvre d'un primaire, le support doit être humidifié, mais sans excès (le support doit présenter un aspect sombre et mat et non brillant).

Afin d'améliorer la liaison entre mortiers et supports, il peut être nécessaire, sauf s'il s'agit de béton projeté, d'appliquer un produit d'adhérence, soit à base de polymères P (résine pure) ou PC, soit de liants hydrauliques modifiés (PCC). L'application de ces produits est cependant délicate, en particulier dans les zones fortement armées. Les délais prescrits entre l'application du produit (ou « primaire ») d'adhérence et celle des mortiers ou bétons de reprise doivent être scrupuleusement respectés. Ces délais dépendent généralement de la température ambiante et de celle du support. Tout dépassement entraîne une insuffisance d'adhérence.

Dans tous les cas, il faut procéder à une **cure soignée** pour limiter au maximum la dessiccation et la fissuration du plan de reprise.

5.3.3.2.1.2 Mise en œuvre des produits à base de liants hydrauliques modifiés (PCC)

Afin d'améliorer la liaison entre le mortier de réparation et le support, il est conseillé de prévoir l'application d'un produit d'adhérence à base de liant hydraulique modifié (PCC) sauf s'il s'agit de mortiers ou béton mis en place par projection. En l'absence de mise en œuvre d'un primaire, le support doit être humidifié mais sans excès (le support doit présenter un aspect sombre et mat et non brillant).

La fiche technique du fabricant fixe les délais de mise en œuvre des produits après malaxage. Tout mortier ou béton qui n'a pas été mis en place dans les délais doit être rejeté.

Les coffrages éventuellement mis en place doivent être dimensionnés et fixés de telle façon qu'ils ne puissent être à l'origine de fissuration ou de décohésion préjudiciable.

Dans tous les cas, il faut procéder à une **cure soignée** pour limiter au maximum la dessiccation et la fissuration du plan de reprise.

5.3.3.2.1.3 Mise en œuvre des produits à base de résines synthétiques (PC)

Il est rappelé que les produits de type « PC », qui ont des caractéristiques différentes de celles du béton support et n'apportent aucun alcalin passivant, sont utilisés lorsque les deux autres types de produits ne peuvent être mis en œuvre. Par exemple, en cas de :

- réparations de surface de faible épaisseur ;
- réparations locales sous l'eau ;
- nécessité d'une forte résistance aux agressions chimiques ;
- nécessité d'une très forte résistance à l'abrasion ;
- nécessité d'une très forte adhérence ;
- nécessité d'une montée en résistance très rapide ;
- mise en œuvre d'une cure impossible...

Lorsque le subjectile est très poreux ou pauvre en liant ou lorsqu'il y a incompatibilité entre le produit rapporté et le subjectile, une couche d'accrochage doit être appliquée. Sa nature doit apporter la compatibilité avec le support et avec le produit rapporté. Le plus souvent, les **notices techniques** conseillent la mise en œuvre d'une couche d'accrochage sur le support (généralement le liant constitutif du mortier). L'application de certains produits sur un support ruisselant est déconseillée.

La mise en œuvre des mortiers et bétons à base de résines synthétiques fait appel à un **personnel d'exécution spécialement formé et qualifié** pour l'emploi des résines.

La fiche technique du fabricant doit donner les valeurs de la durée pratique d'utilisation (DPU) des produits en fonction de la température initiale des composants et de la température du support. Il faut savoir que les réactions de polymérisation sont exothermiques (elles dégagent de la chaleur) et sont d'autant plus rapides que la température est plus grande (la chaleur est, en général, facteur d'accélération et le froid facteur de ralentissement). Il faut corriger la durée d'utilisation de tels produits en fonction des conditions hygrothermiques mesurées sur le chantier par des essais de convenance à répéter en fonction de la météorologie.

Si le produit doit être mis en place dans un coffrage, il faut s'assurer que la résine (composant du mélange) ne risque pas d'adhérer au coffrage et prendre, si nécessaire, les mesures adéquates, par exemple en plaquant sur le coffrage un film isolant (film en polyéthylène, par exemple).

Il faut aussi s'assurer que ce coffrage est suffisamment raide et bien fixé pour qu'aucun mouvement ne puisse provoquer de fissuration interne ou de décohésion du mortier ou béton de reprise.

Lorsque le produit est mis en place en plusieurs couches successives, il faut attendre le durcissement de la couche précédente et procéder à un nouveau traitement de surface pour obtenir l'adhérence nécessaire entre les couches.

5.3.3.2.2 Application manuelle ou mécanisée des produits et systèmes de réparation des bétons – Réparation non structurales et structurales

Il est rappelé qu'il convient de distinguer :

- **les réparations non-structurales** concernant la **surface** des bétons donc de **faible épaisseur**, qui correspond normalement à la réalisation manuellement d'une seule couche, sauf si la mise en place se fait par projection avec une finition talochée. Réparations relevant de la **norme NF P95-101** ;
- **les réparations non structurales ou structurales** qui concernent la mise en place de mortier ou de béton en fortes épaisseurs parfois **manuellement** mais le plus souvent par coulage dans des coffrages, par **injection** dans des coffrages ou par **projection**.

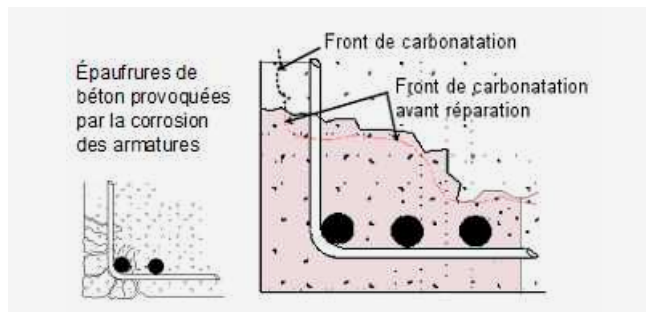


Figure n° 81 : exemple classique de réparation de surface du béton

Suivant l'importance des surfaces et volumes à traiter, la mise en œuvre des produits et systèmes peut se faire **manuellement ou mécaniquement**. En l'absence d'exigences dans le **marché**, l'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** la technique de mise en œuvre.

5.3.3.2.2.1 Réparations de surface, structurales ou non-structurales par applications manuelles

Un traitement des armatures ayant subi une corrosion peut être nécessaire avant la mise en œuvre des produits et systèmes (se reporter à l'article 5.3.3.4 ci-dessous).

5.3.3.2.2.2 Cas des réparations de surface par application manuelle

La mise en place des produits et systèmes, le plus souvent sous forme de mortiers, est réalisée classiquement à la **truelle** en serrant fortement pour éviter les bulles d'air et obtenir ainsi une bonne adhérence. Pour le dressage des arêtes, une **règle** peut être utilisée.

Le traitement des **surfaces horizontales importantes**, développé ci-après, fait appel à des techniques spécifiques, en particulier, l'utilisation de produits auto-nivelants.



Photo n° 164 : mise en place de mortier de réparation à la truelle
(crédit photo Parexlanko)

La mise en place d'un coffrage peut faciliter la mise en place et le serrage du produit comme le montre la figure qui suit sur la réfection de l'about d'une dalle.

La finition des produits et systèmes à base de liants hydrauliques des types CC et PCC est effectuée suivant l'aspect recherché à l'aide d'une taloche en plastique rigide, d'une taloche éponge, d'une taloche métallique, d'un bloc de polystyrène ou d'une lisseuse en acier inoxydable... (cf. le guide FABEM 4).

La finition des produits et systèmes à base de liants organiques de type PC, est effectuée avec une lisseuse en acier inoxydable.

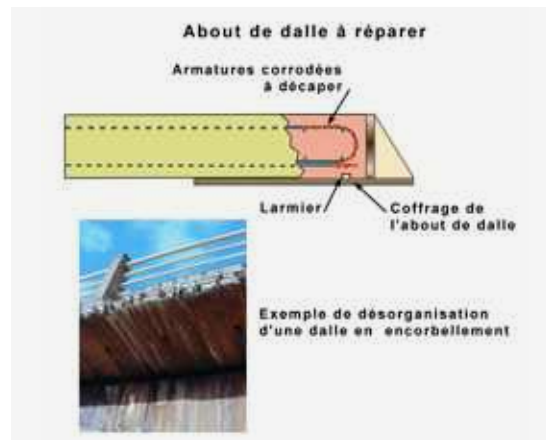


Figure n° 82 : principe de coffrage pour la réparation de l'about d'une dalle en encorbellement (crédit photo Parexlanko)



Photo n° 165 : mise en œuvre d'un mortier auto-nivelant
(crédit photo SIKA)

Sur les surfaces horizontales, lorsqu'un **produit auto-nivelant** est utilisé, le **réglage de l'épaisseur** est obtenu par des **plots** matérialisant l'épaisseur de la couche à réaliser (les plots doivent être enlevés avant la prise du mortier) et le passage d'une **raclette d'égalisation** ou une **truelle** (dans les angles). Pour l'évacuation des bulles on utilise un **rouleau débulleur et égalisateur**.

Dans le cas d'utilisation d'un mortier de consistance normale, celui-ci est tiré à la **règle** et la finition se fait à la **taloche**.

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une **cure** est indispensable.

5.3.3.2.2.3 Cas des réparations non structurales ou structurales par application manuelle

La mise en place des produits et systèmes, sous forme de mortiers ou de bétons à faible granularité, est réalisée, comme dans le cas précédent traité ci-devant et classiquement à la **truelle** en serrant fortement pour éviter les bulles d'air et obtenir ainsi une bonne adhérence. La mise en place s'effectue ici en **plusieurs passes** et en respectant l'épaisseur des couches en fonction de la position du support, ainsi que le délai entre les couches. Pour le dressage des arêtes, une **règle** peut être utilisée.

Rappel, en cas d'utilisation de produits et systèmes à base de résines synthétiques, une préparation de surface est à effectuer entre les couches successives avec mise en œuvre d'une couche d'accrochage.

Comme dans le cas précédent, des **coffrages** peuvent être utilisés, la **finition** est réalisée avec les mêmes outils

Sur les surfaces horizontales, il est également possible d'utiliser des **produits auto-lissants**.

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une cure est indispensable.

Après durcissement du produit ou système, l'**injection de l'interface** entre le support ou le produit ou système de réparation peut être nécessaire. Se reporter à l'article 5.3.3.3 ci-dessous

5.3.3.2.2.4 Réparations de surface, structurales ou non-structurales par applications mécanisées

Les produits et systèmes à mettre en place sur des **surfaces importantes ou des volumes importants** sont, en général, à base de liants hydrauliques modifiés ou non (produits industriels ou fabriqués en centrale ou sur chantier). Ils sont mis en œuvre par :

- coulage en place dans des coffrages ;
- injection dans des coffrages ;
- projection (voie sèche ou mouillée).

Rappel, compte tenu du coefficient de dilatation thermique élevé des produits et systèmes à base de résines synthétiques (produits de type PC) et de leur coût, il est préférable d'utiliser des produits à base de liants hydrauliques.

Les techniques d'injection et de projection sont bien adaptées pour la mise en œuvre d'un béton en **sous-face** d'une structure.

Un traitement des armatures ayant subi une corrosion peut être nécessaire avant la mise en œuvre des produits et systèmes (se reporter à l'article 5.3.3.4 ci-dessous), sauf dans le cas de la mise en place d'un mortier ou béton par projection par voie sèche.

5.3.3.2.2.5 Cas des réparations non structurales ou structurales par coulage en place dans des coffrages

Le bétonnage classique dans des coffrages est envisageable si le coulage gravitaire est possible (la création de cheminées de bétonnage au travers de la structure est parfois nécessaire). Le bétonnage se fait en respectant les règles de l'art de la **norme NF EN 13670/CN** dont les exigences sont complétées, soit par celles la **norme NF DTU 21**, soit celles du **fascicule 65 du CCTG** pour éviter la ségrégation, le ressuage et les fuites de laitance. Les mortiers et les bétons doivent être vibrés et leur surface supérieure est dressée à la règle et talochée.

L'utilisation d'un **béton autoplaçant** est envisageable si la géométrie de la structure à réparer le permet (incidence des pentes transversales et/ou longitudinales). Il est rappelé que les **BAP ne doivent ni vibrés ni talochés**.

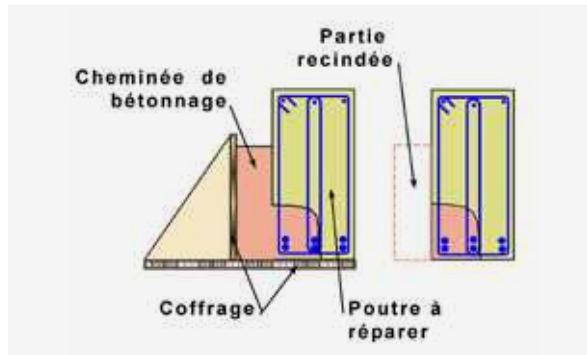


Figure n° 83 : principe de la cheminée de bétonnage pour la réparation d'une poutre

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une **cure** est indispensable.

Après durcissement du produit ou système, l'**injection de l'interface** entre le support ou le produit ou système de réparation est très souvent nécessaire, une fissure se formant à cet endroit sous les effets des retraites. Se reporter à l'article 5.3.3.3 ci-dessous.

5.3.3.2.6 Cas des réparations non structurales ou structurales par injection dans des coffrages

Par **injection** (coulis, mortiers ou micro-bétons) dans des **coffrages étanches** mais munis d'évents pour l'évacuation de l'air. Les coffrages peuvent être remplis de granulats pour obtenir un véritable béton. L'injection peut se faire :

- soit par simple gravité au moyen d'une pompe à mortier ou béton ;
- soit sous pression au moyen d'une presse d'injection adaptée à la granulométrie du produit.

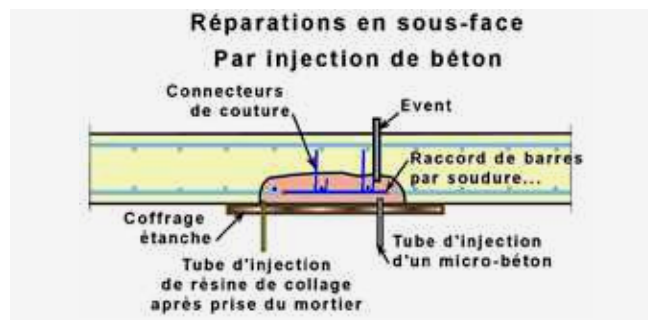


Figure n° 84 : principe de réparation par injection d'un mortier ou d'un micro-béton

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une cure est indispensable.

Après durcissement du produit ou système, l'**injection de l'interface** entre le support ou le produit ou système de réparation est très souvent nécessaire, une fissure se formant à cet endroit sous les effets des retraites. Se reporter à l'article 5.3.3.3 ci-dessous.

5.3.3.2.2.7 Cas des réparations non structurales ou structurales par projection de mortier ou de béton

Ces réparations ou renforcements correspondent aux **méthodes de réparation** suivantes de la norme NF EN 1504-9 et visées par la norme NF EN P95-102-1 :

Principe	Méthodes associées	Commentaires
Principes et méthodes relatifs aux défauts dans le béton		
Principe 3 – Restauration du béton	3.3 Projection de béton ou de mortier	Le terme « pulvérisation » utilisé dans la norme NF EN1504-9 est inapproprié
Principe 4 – Renforcement structural	4.4 Ajout de mortier ou de béton	Dans le cas d'une mise en œuvre par projection
Principe 5 – Augmentation de la résistance physique	5.3 Ajout de mortier ou de béton	Dans le cas d'une mise en œuvre par projection
Principe 6 – Résistance aux produits chimiques	6.3 Ajout de mortier ou de béton	Dans le cas d'une mise en œuvre par projection
Principes et méthodes relatifs à la corrosion de l'armature		
Principe 7 – Préservation ou restauration de la passivité	7.1 Augmentation de la couche avec du mortier ou béton supplémentaire 7.2 Remplacement du béton pollué ou carbonaté	Dans le cas d'une mise en œuvre par projection Méthode 7.1 : le terme « couche » utilisé dans la norme NF EN 1504-9 est inapproprié
Principe 10 - Protection cathodique	10.1 : Application d'un potentiel électrique	Dans le cas d'une mise en œuvre par projection pour l'enrobage de l'anode surfacique et adhérence au béton support.

Tableau n° 57 : principes et méthodes de réparation visés par la norme NF P95-102-1

Le mortier ou le béton, souvent de type industriel avec ou sans fibres, est mis en œuvre par **projection**. Se reporter :

- aux **GUIDES FABEM 4** et **FABEM 5** ce dernier s'appuyant sur les guides de l'**ASQUAPRO** ;
- à la norme **NF P95-102-1** laquelle s'appuie :
 - pour la composition des mortiers ou bétons sur les **normes NF EN 14487-1** et **NF EN 206/CN** et sur le **fascicule 65 du CCTG** ainsi que sur la **norme NF EN 1504-3**,
 - pour la mise en œuvre de la projection sur la **norme NF EN 14487-2**.

Note : se reporter à la **norme NF P95-102-1** plus détaillée que le présent document sur la mise en œuvre du béton projeté.

Deux méthodes de projection peuvent être utilisées :

- la voie mouillée (**VM**) ;
- la voie sèche (**VS**).

Les deux figures qui suivent explicitent les deux méthodes de projection. Cependant, dans le cas de la voie mouillée, si les **quantités de mortier à mettre en œuvre sont faibles**, il est possible d'utiliser un **pistolet à pot de projection** ou d'une **pompe à mortier** (se reporter au **guide FABEM 4**).

ATTENTION, la projection par **voie sèche** est incompatible avec la mise en place d'un revêtement sur les armatures ou d'un gobetis d'accrochage sur le béton.

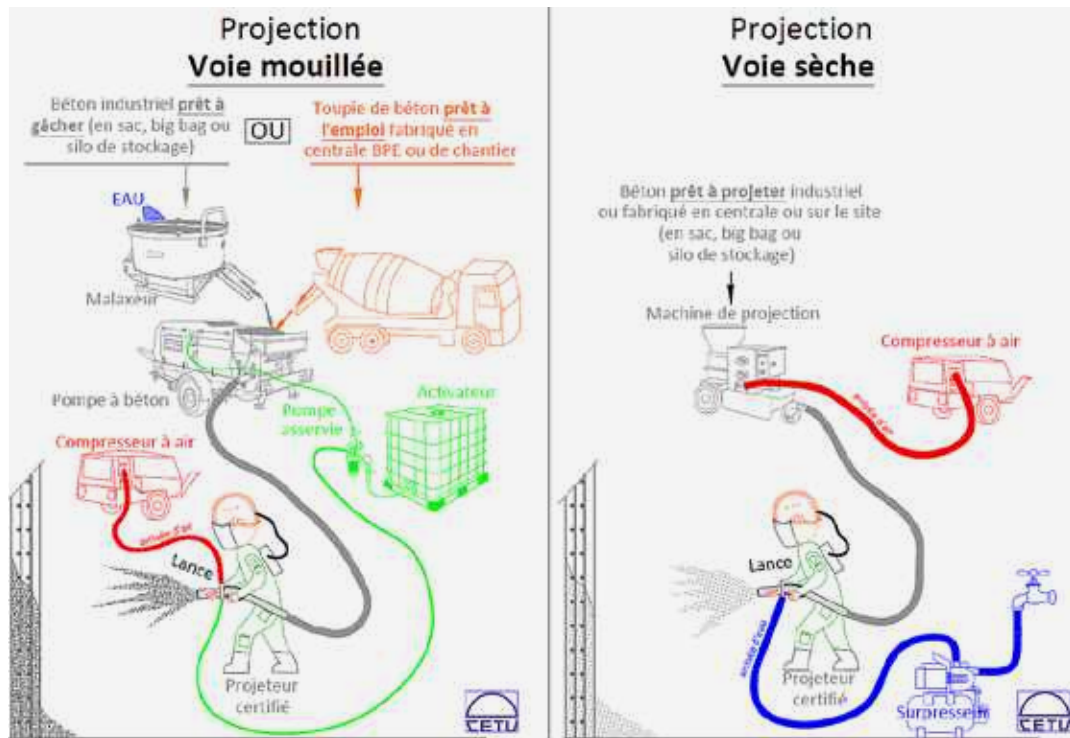


Figure n° 85 : les deux méthodes de projection (crédit photo CETU)

Les points importants d'une opération de projection sont décrits ci-après mais sans rentrer dans tous les détails pour lesquels il convient de se reporter à la norme NF EN 14487-2³⁹ relative à l'exécution du béton projeté, au guide FABEM 5 et à la norme NF P95-102-1, documents qui explicitent les règles de l'art à mettre en œuvre lors d'une projection pour obtenir une réparation ou un renforcement durable.

1. l'utilisation des adjuvants :

En voie mouillée, un activateur liquide est quasiment nécessaire pour permettre au mortier ou béton frais d'adhérer au support en attendant son durcissement. L'adjuvant est aussi appelé raidisseur ou accélérateur de prise du béton projeté.

En voie sèche, l'activateur ne devient nécessaire que si l'épaisseur de la couche de mortier ou de béton projeté en une passe est importante.

Type de projection	Dans le mélange avant projection	Pendant la projection
Voie sèche	Adjuvants en poudre uniquement pour les mélanges accélérés	Activateurs liquides éventuellement (sauf emploi d'un activateur en poudre dans le mélange à projeter)
Voie mouillée	Plastifiants, superplastifiants, réducteur d'eau, stabilisateur, etc.	Activateurs liquides quasi-systématiquement

Tableau n° 58 : adjuvants utilisables en VS et VM

³⁹ Les différents fascicules ASQUAPRO, disponibles sur le site : www.asquapro.asso.fr, complètent la norme européenne sur la mise en œuvre, le contrôle, l'hygiène et la sécurité.

2. Échafaudage et étaielements :

Les **pertes inévitables** (retombées et rebonds) ont pour effet de **surcharger les ouvrages provisoires**. En plus des hypothèses habituelles, le dimensionnement de l'échafaudage doit prendre en compte cette surcharge en fonction de leur procédure d'évacuation sans oublier les autres charges.

La classe minimale de charge pour les échafaudages est la **classe 3** selon la **norme NF EN 12811-1 d'août 2004** : Équipements temporaires de chantiers Partie 1 : Échafaudages - Exigences de performance et étude. Cette classe est normalement acceptable sous réserve d'évacuer les pertes en conséquence pour ne pas dépasser la **charge prévue de 200 kg/m²**. Dans le cas contraire un échafaudage de classe supérieure est à prévoir (la classe n°6 la plus élevée maximale supporte 600 kg/m²).

La **géométrie de l'échafaudage** doit également permettre la projection dans de bonnes conditions, avec un recul adapté pour le porte-lance. Pour cela, il est nécessaire d'avoir un plancher (y compris élément en console permettant d'éloigner les montants de la paroi) d'au moins **1,50 m de largeur**.

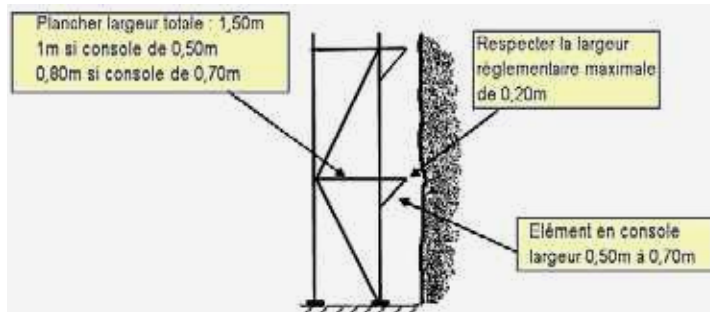


Figure n° 86 : géométrie des échafaudages

Lorsque le projet le prévoit, des **étaielements actifs** (par exemple, un étaielement réglable au moyen de vérins pour modifier la répartition des charges et réactions d'appui) peuvent être employés pour soulager la structure pendant la phase de projection du béton et de son durcissement. Cette opération a pour but de faire participer le béton projeté à la reprise des charges permanentes de la structure existante. Le **marché** définit les exigences liées à une telle opération.

3. Techniques de mise en œuvre :

Deux techniques peuvent être utilisées suivant la configuration et les contraintes du projet :

- la **technique de « projection préalable »** qui minimise le risque de vide à l'arrière du ferrailage. Elle consiste à placer les **armatures nappe par nappe** après projection d'une couche de béton. Ce qui impose de respecter certaines dispositions (cf. la **norme NF P95-102-1**) ;
- la **technique de « ferrailage préalable »** est particulièrement adaptée au ferrailage tridimensionnel ne pouvant être mis en place par nappes successives. Elle consiste à placer la **totalité du ferrailage** avant la projection du béton quel que soit le nombre de couches nécessaires à l'obtention de l'épaisseur finale. Pour assurer l'adhérence au support, l'homogénéité du béton projeté et le bon enrobage des armatures, des règles spécifiques suivantes doivent être respectées.

4. Dispositions constructives spécifiques au béton projeté renforcé de fibres :

Dans le cas des **bétons projetés fibrés**, des précautions particulières doivent être prises au droit d'une **reprise de bétonnage** (de plus de 24 heures) en raison de l'absence de continuité des fibres. Des **armatures de reprise** (couture) doivent être positionnées au droit de ces zones pour pouvoir reprendre les efforts de traction qui s'y développent.

La mise en place d'armatures de liaison entre la structure et le béton fibré est également nécessaire si l'adhérence du béton fibré sur le support est insuffisante au jeune âge ou risque de le devenir à long terme.

5. Règles de pose des armatures :

La conception et le positionnement des barres d'armatures doivent être adaptés au procédé de projection afin de minimiser l'effet d'ombre et d'améliorer le compactage. Ces exigences spécifiques s'appliquent à :

- l'enrobage des armatures pour respecter l'enrobage minimal et les tolérances géométriques ;
- la fixation des armatures : les barres, fils ou treillis soudés sont ancrés de manière à assurer une bonne transmission des forces par adhérence au béton, en évitant toute fissuration ou éclatement du béton. Il faut disposer des points de fixation pour éviter toute vibration sous l'impact de la projection (par exemple au minimum 4 fixations par m² pour les treillis soudés) ;

Note : la norme *NF P95-102-1* donne les dispositions et le nombre de fixation à mettre en œuvre.

- l'espacement entre support et armatures : les armatures sont, soit plaquées au support, soit décollées d'une valeur minimale de 20 mm ou égale à leur diamètre s'il est supérieur à 20 mm ;
- l'espacement entre armatures pour assurer la bonne mise en œuvre du béton : il convient de respecter certaines règles de dispositions des armatures. Ces règles sont différentes suivant la technique de mise en œuvre des armatures :
 - espacement entre armatures avec la technique de projection préalable : pour chaque phase de projection, il n'y a qu'une seule nappe d'armatures (treillis ou barres isolées). L'espacement entre deux barres doit être $\geq 1,5 d_{\max}$ (diamètre du plus gros granulat),
 - espacement entre armatures avec la technique de ferrailage préalable : dans ce cas, plusieurs nappes successives risquent de s'opposer à la projection. Ces nappes doivent être décalées pour que le jet de projection ne rencontre qu'une seule barre à la fois jusqu'au support.

6. Mise en place ponctuelle de coffrages :

Lorsque des arêtes sont à délimiter avec précision, il est souhaitable de mettre en place des coffrages. Ceux-ci doivent être disposés de façon à ne pas gêner la projection. Le béton est projeté directement sur la surface à réparer avec un angle d'incidence convenable et non directement sur le coffrage. Les coffrages doivent être disposés de façon à ne pas risquer d'être remplis par des retombées de béton lors de la projection.

Le réglage de l'épaisseur de la couche mise en place est obtenu au moyen :

- de coffrages matérialisant le coffrage de la pièce à restaurer ;
- d'une règle s'appuyant sur des guides.

Le mortier ou le béton ainsi mis en œuvre peut être laissé **brut de projection** ou **dressé à la règle** avec précautions pour ne pas rompre la cohésion du matériau.

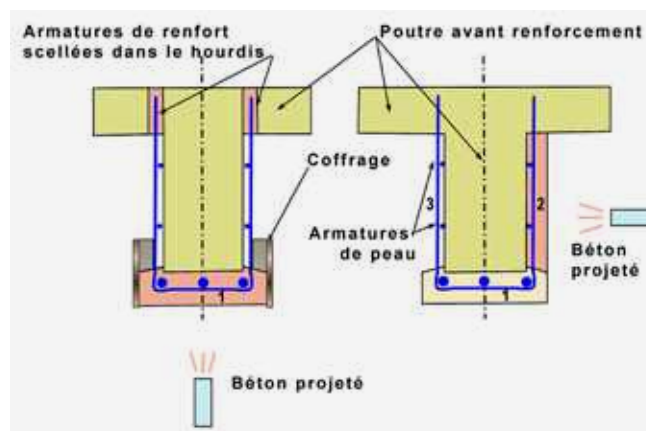


Figure n° 87 : principes à appliquer pour la réparation et le renforcement d'une poutre par béton ou mortier projeté

7. Qualification des opérateurs chargés de la projection :

Tous les opérateurs de projection (porte-lance [manutention manuelle de la lance de projection], projeteur mécanisé [manutention mécanisée de la lance de projection]...) doivent être titulaires d'une **qualification professionnelle** attestant de leur niveau de technicité et être sous le contrôle d'un **encadrant qualifié** pour ce type de travaux.

8. Précautions particulières de mise en œuvre par temps chaud ou froid

La procédure de projection des produits doit tenir compte de la température ambiante, de la température initiale des composants et de la température du support. L'entrepreneur soumet à l'acceptation du maître d'œuvre les procédures d'exécution correspondantes (se reporter aussi au **fascicule 65 du CCTG**)

Spécificité par temps froid :

En voie mouillée, le béton frais doit avoir une température suffisante lors de sa mise en œuvre, afin d'éviter une surconsommation d'activateur.

Lorsque la température du support est inférieure à **+2 °C**, la **projection de béton est formellement interdite**.

En cas de projection du béton sur support froid (température superficielle du support comprise entre **+2 °C et +5°C**), un **système de protection** de la zone traitée maintenant la température de l'air dans cette zone au-dessus de **+5°C** pendant au moins 10 heures après projection doit être spécifié.

Spécificité par temps chaud :

En voie mouillée, le béton frais doit avoir une température maximale de **32°C** lors de sa mise en œuvre, mesurée en sortie de lance.

Lorsque la température du support est supérieure à **35°C**, la **projection de béton est formellement interdite**.

Pour abaisser la température du support, des dispositions doivent être mise en place pour abaisser la température à moins de 35°C comme par exemple l'aspersion d'eau maintenues pendant au moins 72 heures....

9. Exécution de la projection :

Après sa préparation (se reporter à l'article 5.2 ci-dessus), le **support** doit être systématiquement humidifié avant projection.

La projection des **bétons fibrés** nécessite des précautions particulières.

Il est recommandé de tenir la lance de projection perpendiculairement à la surface à traiter afin de limiter les **pertes par rebonds**. Néanmoins, ils sont inévitables et utiles pour la qualité du béton (tout particulièrement en voie sèche).

Lors de la projection des armatures, le projeteur s'assure de limiter les **effets d'ombre** (maîtrise de la distance entre la lance et les armatures et du flux d'air) afin de garantir un bon enrobage requis.

La projection verticale vers le bas est délicate, en particulier, par voie sèche car les granulats non enrobés et les rebonds sont alors mélangés au béton. Il peut en résulter une chute de la résistance de ce dernier.

La distance entre la lance et le support se règle en fonction la vitesse de sortie du produit projeté. En général, elle doit rester dans les limites de **0,60 m à 1,20 m**.

L'opérateur de projection manipule la lance avec un **mouvement lent et elliptique** en commençant par le bas de façon à former des **boucles de projection** (notion de passes de projection).

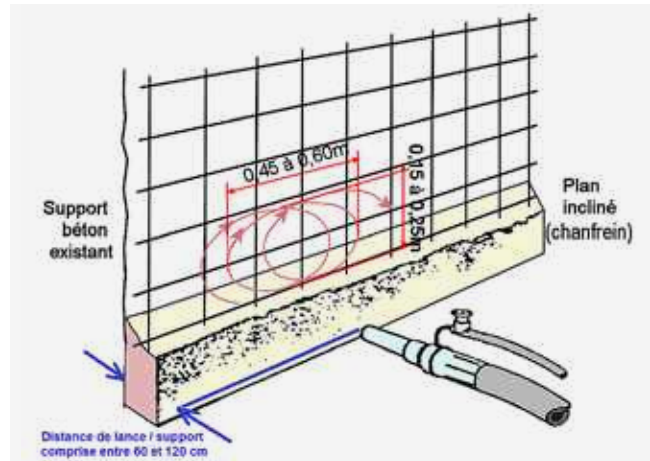


Figure n° 88 : conduite de la lance de projection par le projeteur du bas vers le haut avec des mouvements elliptiques

10. Arrêt et reprise entre couches :

L'épaisseur pouvant être mise en œuvre est naturellement limitée par le poids du béton fraîchement projeté et son adhérence au support. L'application de plusieurs couches peut être nécessaire pour éviter les affaissements et les glissements, en particulier, si la projection doit se faire en sous-face de dalles ou de poutres.

L'épreuve de convenance valide le phasage de mise en œuvre établi par l'entrepreneur et, en particulier, l'épaisseur à donner aux couches successives (incidences des conditions thermiques...).

- Lorsque la projection s'effectue en **plusieurs couches** une préparation de la **surface de reprise** peut être nécessaire pour éliminer la laitance superficielle et éviter le phénomène de feuilletage entre couches. Cette préparation est faite en s'assurant que le **béton a commencé à faire prise sans avoir achevé son durcissement** (environ 3 à 4 h à 20°C).
- **pour une projection voie sèche**, la préparation s'effectue par brossage de la surface avec un balai à poil dur en l'absence d'armatures en attente ou par lavage énergétique en utilisant la lance de projection ;
- **pour une projection voie mouillée**, à cause de l'activateur, la préparation s'effectue par lavage énergétique en utilisant la lance de projection.

11. Arrêt de projection et reprise de bétonnage :

Il faut éviter par un phasage de projection adapté les reprises de bétonnage. Si cela n'est pas possible (panne, fin de poste...), il faut :

- à l'arrêt de projection, réaliser un **chanfrein suivant un angle d'environ 30°** ;
- à la reprise de projection, faire une **préparation de la surface**.

12. Cure après projection :

Sauf dispositions contraires du **marché**, la **classe de cure est la classe 2** au sens de la **norme NF EN 13670/CN** (jusqu'à l'obtention de 35 % de la valeur spécifiée pour la résistance à la compression caractéristique à 28 jours). Dans ce cas, le tableau 8.L de l'article 8.5.3 du **fascicule 65 du CCTG** relatif à la durée minimale de cure se substitue au tableau F.1 de l'Annexe F de la **norme NF EN 13670/CN**.

Tableau 8.L – Délai minimal de cure

Température à la surface du béton, t , en °C (1)	Délai minimal de cure, en jours (j) ou en heures (h)			
	Développement de la résistance, r , du béton (2)			
	Rapide $r \geq 0,50$	Moyen $0,50 > r \geq 0,30$	Lent $0,30 > r \geq 0,15$	Très lent $r < 0,15$
$t \geq 25$	14 h	1,5 j	2 j	2 j
$25 > t \geq 15$	1 j	2,5 j	4 j	5 j
$15 > t \geq 10$	1,5 j	4 j	7 j	9 j
$10 > t \geq 5$ (3)	2 j	5 j	10 j	15 j

- (1) Il s'agit de la température mesurée à la surface du béton et non pas à l'extérieur du coffrage. En pratique, en l'absence de mesure directe de température à la surface du béton, on peut retenir la température ambiante moyenne sur la durée de la cure. Cette température moyenne peut être estimée à partir de la moyenne des températures journalières mesurées à midi sous abri.
- (2) Le développement de la résistance, r , du béton est le rapport de la résistance moyenne à 2 jours à la résistance moyenne à 28 jours, déterminée par des essais préalables ou basé sur l'expérience d'un béton de composition comparable.
- (3) Le décompte de la durée de cure est suspendu lorsque la température de la surface du béton est inférieure à 5 °C.

Tableau n° 59 : délais de cure (extrait de l'annexe F de la norme NF EN 13670/CN)

13. Finition de surface :

La surface projetée est généralement laissée **brute de projection** « sans être talochée » afin d'éviter de détruire sa structure et d'altérer ainsi sa qualité.

Si le contrat prévoit que cette surface ait un autre **aspect esthétique** et une **texture particulière** (finition talochée, lissée, colorée...), il est nécessaire de procéder à une **passé supplémentaire**. Pour cela, après dressement à la règle de la dernière couche de béton de structure, une couche finale de faible épaisseur (1 à 2 cm) doit être appliquée par projection ou un autre mode de mise en œuvre.

Les fibres métalliques utilisées dans un béton projeté sont susceptibles de subir une **oxydation nuisible à l'esthétique**. Le contrat fixe les dispositions à prévoir.

Note : la composition de la couche de finition peut être différente de celle des couches précédentes.

14. Tolérances géométriques :

La classe de tolérances géométriques au sens de la **norme NF EN 13670/CN**, sauf disposition contraire du **marché** contrat est la **classe 1** (dite normale). Elle correspond aux hypothèses de calculs de l'Eurocode 2.

Note : la classe 2 est principalement destinée à un usage avec des coefficients partiels de sécurité sur les matériaux réduits.

Sur certains chantiers de réparation, ces tolérances géométriques de classe 1 peuvent être trop sévères.

Le **marché** fixe les diverses tolérances à respecter sur les dimensions de l'élément, l'enrobage des armatures, la position des armatures, la planéité de la surface après les opérations de finition de surface.

5.3.3.3 Réalisation des opérations de renforcement structural

5.3.3.3.1 Généralités

La réalisation d'un **renforcement structural** fait en premier lieu appel, outre à l'ajout d'armatures, à l'ajout de mortier ou béton, en général, en forte épaisseur. Il s'agit des **techniques de mise en œuvre** décrites dans l'article 5.3.3.2 ci-dessus. **Il n'est donc pas nécessaire de les décrire de nouveau.**

Rappel, comme dans le cas de la restauration, il faut prendre des mesures pour limiter les effets **des vibrations éventuelles**, d'autant que les épaisseurs mises en œuvre sont importantes.

La **grande différence avec une réparation simple** est qu'il est impératif de **faire participer le béton ainsi ajouté à la reprise des efforts appliqués à la structure**. Cette exigence peut imposer la mise en œuvre d'opérations complémentaires, soit pendant les travaux, soit dès que le béton ajouté a atteint une résistance suffisante.

La **technique** à mettre en œuvre pour assurer cette **participation** fait partie du **projet du renforcement**. Le **détail de son exécution** est proposé par **l'entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre**.

Pour permettre au **béton ajouté de bien jouer son rôle**, des **opérations connexes sont souvent indispensables**. Il s'agit de la réalisation des **opérations listées** ci-après et détaillées dans la suite du **présent article** ou dans les **documents** auxquels il est fait référence :

- une mise sur cintre de la structure, sachant que l'étaie peut être actif ;
- le collage entre le béton ou le mortier frais et le béton support ;
- l'injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support ;
- l'injection des fissures ou des vides du béton de la structure ;
- le calage de certains éléments d'une structure ;
- la mise en place d'armatures passives additionnelles ;
- le scellement d'armatures passives additionnelles dans le béton de la structure ;
- le collage d'armatures additionnelles sur le béton de la structure (plaques métalliques, plaques ou tissus de matériaux composites) ;
- l'ajout de forces par une précontrainte additionnelle ;
- l'ajout de forces par vérinage ou par l'intermédiaire d'un étaie actif (étaie permettant de faire participer le mortier ou le béton mis en œuvre à la reprise des charges permanentes outre les charges d'exploitation)...

Note : le recours à des **plaques métalliques collées** n'est actuellement envisageable que dans le cadre d'une **réparation d'une structure renforcée antérieurement** par des **plaques métalliques collées** et si certaines des **plaques ont été endommagées** par la **corrosion** ou des **chocs**.

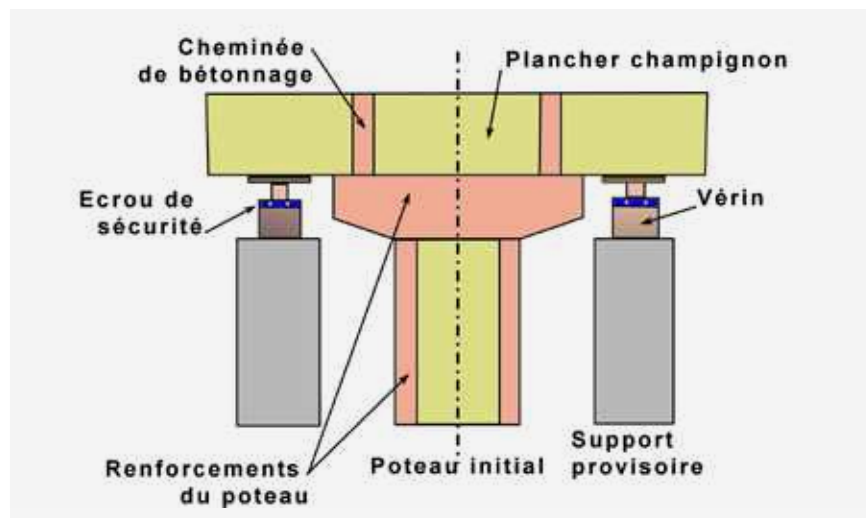


Figure n° 89 : principe de mise en charge d'un renforcement vis-à-vis des charges permanentes et d'exploitation d'un poteau support d'un plancher-champignon

5.3.3.3.2 Réalisation d'un collage structural de bétons

5.3.3.3.2.1 Réalisation d'un collage béton durci sur béton durci

Ce type de collage peut être utilisé pour assembler un élément de béton préfabriqué sur une structure (par exemple, un dé d'appui sous le talon d'une poutre) ou un gros éclat de béton tombé d'une structure sous l'action d'un choc, à condition que le morceau de béton récupéré soit entier...

Les produits et systèmes à utiliser sont à base de résines synthétiques à deux composants. Les résines peuvent être pures ou thixotropes suivant le type de collage à effectuer.

Les produits et systèmes de collage prêts à l'emploi et conformes à la **norme NF EN 1504-4** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**.

Les surfaces des deux éléments à assembler sont encollées par la technique du double encollage, soit en couche mince (produits non thixotropes) à la brosse, au rouleau, voire au pistolet pulvérisateur, soit en couche plus épaisse (produits thixotropes) à la spatule, à la truelle, au peigne cranté, voire au gant en cas de surfaces non planes. La notice technique doit préciser si le support peut être sec ou légèrement humide.

Ensuite, il faut maintenir les éléments en place, par exemple à l'aide de serre-joints en comprimant le plan de collage pour faire baver la colle (pression de 0,05 à 0,1 MPa). L'épaisseur du film de colle doit être la plus mince possible pour limiter le fluage de la colle durcie par temps chaud une fois l'ouvrage en service. Les coulures de colle doivent être nettoyées.

Lorsque la longueur de l'assemblage est importante, il y a lieu de tenir compte des phénomènes de dilatation différentielle entre les éléments assemblés (collage par points). Si les écarts thermiques sont importants, il faut tenir compte du fait que la colle a un coefficient de dilatation supérieur à celui du béton de la pièce à assembler

5.3.3.3.2.2 Réalisation d'un collage béton frais sur béton durci

Les produits et systèmes de collage prêts à l'emploi et conformes à la **norme NF EN 1504-4** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**.

Les colles utilisées sont, soit pures, soit thixotropes (collage sur une paroi fortement inclinée et au plafond). Le support peut être sec ou légèrement humide. Il est encollé avec les mêmes outils que lors d'un collage béton durci sur béton durci.

Lorsque la couche de béton ajoutée est armée, cela impose, le plus souvent, une liaison entre les deux bétons sous forme d'armatures de coutures (reprise de bétonnage classique avec collage) ou de simples connecteurs (cas du béton contrecollé). **Un ferrailage important** rend délicate la mise en place de la colle, car seul le béton doit être encollé.

Dans un tel cas, lorsque la surface à renforcer est importante, compte tenu de la faible durée d'utilisation des produits de collage, il faut travailler par plots successifs.

L'épaisseur de colle à mettre en place est normalement de l'ordre de 2 mm soit de l'ordre de 2 à 3 kg/m² de colle.

5.3.3.3.3 Réalisation d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support

Une telle injection est nécessaire, par exemple, dans les cas suivants :

- mise en place de mortier ou béton en sous face d'une structure ;
- pièce bétonnée de volume important (par exemple, création d'un massif d'ancrage dans une opération de mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle) ;
- reprise de bétonnage à de l'eau avec ou sans pression ;
- bétonnage d'un élément lié à une structure soumise à des vibrations...

Les produits et systèmes d'injection du béton conformes à la **norme NF EN 1504-5** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**.



Figure n° 90 : joint hydro-expansif assurant l'étanchéité d'une reprise de bétonnage (crédit-photo SNAAM)

Il existe des systèmes permettant de rendre étanche une reprise de bétonnage (par exemple, entre le radier et le voile d'un réservoir). Ces dispositifs, bien adaptés aux reprises de bétonnage longilignes, sont à mettre en place dans le plan de la reprise avant bétonnage de l'élément de renfort.

L'injection de l'interface entre la réparation et le béton de la structure peut se faire par l'intermédiaire d'évents mis en place avant le bétonnage (par exemple, lors d'un bétonnage en sous face).

L'injection peut aussi se faire classiquement après durcissement du béton ajouté à la structure en équipant le **périmètre de la reprise de bétonnage** d'injecteurs.

La réalisation d'une telle injection est détaillée dans le **guide FABEM 3** et dans la **norme NF P95-103**, documents auxquels le lecteur est invité à se reporter.

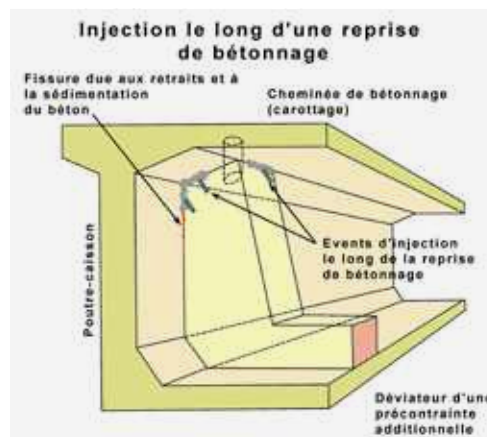


Figure n° 91 : principe de réalisation de l'injection de la périphérie d'une reprise de bétonnage

5.3.3.3.4 Réalisation d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton

Les produits et systèmes d'injection du béton prêts à l'emploi et conformes à la **norme NF EN 1504-5** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**.

La réalisation d'une telle injection est détaillée dans le **guide FABEM 3** et dans la **norme NF P95-103**, documents auxquels le lecteur est invité à se reporter.

5.3.3.3.5 Réalisation de scellements d'armatures de béton armé

Les produits et systèmes d'ancrage et de scellement relèvent, soit d'un **ÉTE**, soit de la **norme NF EN 1504-6**. Ils doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**.

RAPPEL : les précautions très spécifiques pour la détermination des **longueurs de scellement ou d'ancrage** en fonction que les produits relèvent d'un **ÉTE** ou de la **norme NF EN 1504-6** ont été traitées dans l'article 4.2.5.7 ci-dessus.

Les produits de scellement prêts à l'emploi sont disponibles dans des cartouches ou des ampoules, ce qui facilite leur mise en œuvre.

Dans le cas de scellement verticaux sur une **paroi horizontale ou faiblement inclinée**, le produit sous forme d'un coulis fluide peut être mis en place par simple gravité.

Si le scellement concerne une **paroi verticale ou la sous-face d'une poutre ou d'une dalle**, le produit sous forme d'un **mortier à consistance ferme** est mis en place manuellement avec une **truelle** et serré dans le trou avec un **matoir** (tige en métal ou en bois de diamètre adapté), ou mieux, avec un **pistolet manuel ou pneumatique** prévu pour cet usage.

Les barres doivent être impérativement maintenues pendant le durcissement du produit de scellement.



Photo n° 166 : barres scellées au pont de Châlons-en-Champagne
(crédit photo D. Poineau)

La réalisation de tels scellements est détaillée dans le **guide FABEM 7**.

5.3.3.3.6 Réalisation de calages d'éléments

Les produits et systèmes de calage prêts à l'emploi et conformes aux **normes NF P 18-821 et NF P 18-822** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**. Les produits et systèmes utilisés à base de liants hydrauliques doivent être « à retrait compensé ».

Les trois techniques principales décrites ci-après peuvent être utilisées pour réaliser un calage.

Il est rappelé que la mise en place d'un primaire d'accrochage est nécessaire pour les produits et systèmes à base de résines de synthèse. Si cette mise en œuvre est trop difficile, il est préférable de choisir un produit à base de liants hydrauliques.

- **Première technique** : couler un **mortier ou un coulis fluide** gravitairement en veillant bien à ne pas emprisonner de bulles d'air à l'interface entre les éléments à caler et le produit ou le système de calage. Lorsque l'épaisseur du calage est importante, pour réduire les effets du fluage du matériau (surtout s'il est à base de résines synthétiques), il faut incorporer des gravillons de granulométrie adaptée pour réaliser un véritable béton.
- **Deuxième technique** : injecter un **mortier ou un coulis fluide** dans un coffrage étanche dans lequel il est possible de disposer des gravillons pour obtenir au final un béton. Il faut mettre en place des événements pour permettre à l'air de s'échapper du coffrage.
- **Troisième technique** : remplir l'espace entre les deux éléments à caler avec un **mortier sec**. Ce mortier doit être serré avec un matoir. Une telle opération ne peut être effectuée que par un **personnel spécialisé**.

5.3.3.3.7 Réalisation de la mise en place d'armatures passives additionnelles internes au béton

Les armatures sous forme de treillis, cages d'armatures ou barres isolées sont mise en place d'une façon traditionnelle en respectant les exigences, soit des **normes NF EN 13670/CN et NF DTU 21**, soit du **fascicule 65 du CCTG** et, en particulier, le **respect des longueurs de recouvrement et des enrobages**.

Les armatures transversales (épingles, étriers et cadres) doivent être reconstituées pour entourer les nouvelles barres principales.

Dans certains cas, il peut être fait appel, pour rallonger les barres trop courtes, à l'utilisation :

- **de manchons de jonction** (Cf. les normes **NF A 35-020-1** et **NF A 35 020-2**, ainsi que la **Marque NF/AFCAB-Dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armature**) ;
- **du soudage**, les soudures à exécuter étant de type bout à bout ou sur éclisses (cf. l'article 4.5.4.6, la **norme NF EN 13670/CN** et le **fascicule 65 du CCTG**). Les soudeurs doivent être qualifiés conformément aux dispositions de la **norme NF EN ISO 9606-1 d'août 2017** : Épreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion – Partie 1 : Aciers.

Les barres mises en place, si besoin est, peuvent être **scellées dans le béton** de la structure à réparer ou renforcer. Se reporter à l'article 5.3.3.3.5 ci-dessus.

Les barres en acier inoxydable doivent être mises en œuvre en respectant scrupuleusement les précautions de l'**annexe n°3 du présent GUIDE** qui sont à reprendre dans la **procédure d'exécution de l'opération**.

Les barres en composites sont assemblées et mises en place en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**, exigences qui doivent être reprises dans la **procédure d'exécution de l'opération**.

Rappel, en cas d'utilisation de **barres protégées par un revêtement étanche** (normalement fortement déconseillées), toutes les précautions doivent être prises lors des manutentions pour éviter d'endommager le revêtement. Il doit être reconstitué en cas où une blessure est constatée. La méthode de traitement des endommagements du revêtement doit figurer dans la **procédure d'exécution de l'opération**.

5.3.3.3.8 Réalisation du collage d'armatures passives extérieures au béton

Le collage de plaques métalliques ou de plaques et tissus composites est réalisé en fin de travaux après réparation des zones où le béton est dégradé.

Les produits et systèmes de collage prêts à l'emploi et conformes à la **norme NF EN 1504-4** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de la **fiche technique du fabricant**.

La réalisation du collage de plaque métalliques ou de plaques et de tissus composites est détaillée dans le **guide FABEM 7** et la **norme NF P95-105**.

5.3.3.3.9 Réalisation d'un ajout de forces par précontrainte additionnelle

Le plus souvent cette précontrainte est réalisée au moyen d'armatures de précontrainte disposées à l'**extérieur du béton de la structure** à réparer ou renforcer. Parfois, les armatures peuvent être mises en place à l'**intérieur du béton de la structure**, par exemple dans des conduits réalisés par forages, dans des rainures...

La réalisation d'une telle opération est très complexe. Elle est détaillée dans le **guide FABEM 8** et dans la **norme NF P95-104**.



Photo n° 167 : massif d'ancrage de la précontrainte additionnelle longitudinale au pont de Châlons-en-Champagne (crédit photo Sétra)

5.3.3.3.10 Réalisation d'un ajout de forces par déformations imposées

L'**ajout de forces par déformations imposées**, le plus souvent par vérinage, est une opération délicate dont les effets sont très fortement réduits par les **déformations différées du béton** (le fluage) qui se développent quel que soit l'âge du béton. Il est, bien entendu, plus important sur les bétons récents que sur les bétons âgés.

Pour un béton âgé de 28 jours, la force finale après fluage vaut sensiblement le tiers de la force initialement développée.

La force nécessaire au moment de l'application de la déformation peut être excessive pour le béton de la structure (développement de contraintes supérieures aux limites imposées par les règles de calcul). Dans un tel cas, la déformation doit être introduite en **plusieurs phases séparées par un intervalle de temps suffisant** (plusieurs mois) pour que les contraintes au cours de la **phase « n »** et des phases précédentes diminuent suffisamment pour que la **phase n+1** puisse être lancée.

La réalisation d'une telle opération est très complexe. Elle est détaillée dans le **guide FABEM 8**.

5.3.3.4 Réalisation des opérations de restauration ou de préservation de la passivité des armatures

Diverses opérations peuvent être effectuées pour **restaurer ou sauvegarder la passivité des armatures passives et actives**. Certaines de ces opérations ont déjà fait l'objet de développement dans le **présent GUIDE**, elles seront simplement évoquées avec un renvoi à l'article concerné. Il s'agit :

- du remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou l'augmentation du recouvrement des armatures (apport d'alcalins) et/ou l'augmentation de la résistivité du béton ;
- de la réalisation d'un traitement électrochimique de réalcalinisation du béton ;
- de la réalisation d'un traitement électrochimique d'extraction des chlorures du béton ;
- de la réalisation d'un traitement électrochimique de prévention ou de protection cathodique ;
- de la mise en place d'un revêtement actif ou passif sur les armatures de béton armé ;

- de l'application d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton ;
- de la réalisation d'une réinjection de conduits de précontrainte.

Le traitement des zones où les investigations préalables à l'élaboration du projet de réparation ont révélé la présence d'une corrosion des **armatures de béton armé**, qui peut être locale ou généralisée, est traité dans l'article qui suit avec des **rappels de divers articles** ci-devant.

5.3.3.4.1 Réalisation du remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou l'augmentation du recouvrement des armatures et/ou l'augmentation de la résistivité du béton

ATTENTION, la corrosion des armatures peut être accompagnée de désordres ayant une autre cause comme le gel/dégel, les effets d'un incendie, d'un choc...Ce sont les investigations effectuées pendant les études préliminaires qui permettent de mettre au point un projet de réparation ou de renforcement adapté

La réalisation de ces deux opérations fait, en premier lieu, appel à l'**ajout de mortier ou béton**, c'est-à-dire aux **techniques de préparation du support béton et des armatures puis de mise en œuvre du produit ou système de réparation** décrites dans les articles 5.2.1.2 et 5.3.3.2 ci-dessus qui sont très détaillées et auxquelles il convient de se reporter.

En présence d'une **corrosion des armatures** après un **relevé contradictoire** (entrepreneur et maître d'œuvre) s'appuyant sur le relevé impérativement effectué lors des **études préliminaires** à la mise au point du projet, et pour que le **traitement soit pleinement efficace**, il faut éviter le risque **d'inversion de polarité** (se reporter à l'article 5.2.1.2.3 ci-dessus), ce qui impose les différentes opérations suivantes :

1. La préparation du support béton et des armatures :

- Les techniques de préparation sont développées dans l'article 5.2 ci-dessus. Il est indispensable :
 - d'éliminer tout le béton endommagé et pollué (carbonatation, chlorures...) ;
 - de vérifier que l'élimination est complète ce qui impose de faire des **tests de carbonatation et de taux des chlorures**, voire d'autres produits. Se reporter à l'article 3.4.6.4 ci-dessus ;
 - de **détourer** correctement les armatures et **d'éliminer la rouille** comme le montre la figure suivante ;

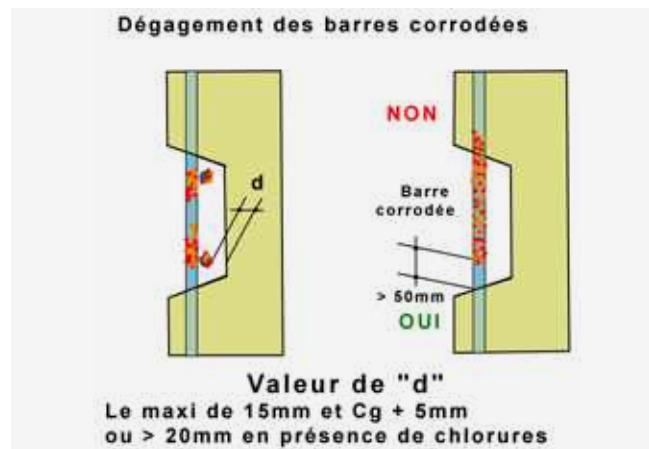


Figure n° 92 : rappel du principe de détourage des armatures et de l'enlèvement de la rouille

- les bords de la zone où du béton a été enlevé doivent être taillés suivant un angle compris entre 90° et 135° à $\pm 5^\circ$ pour assurer une bonne liaison mécanique entre le matériau d'origine et celui d'apport.

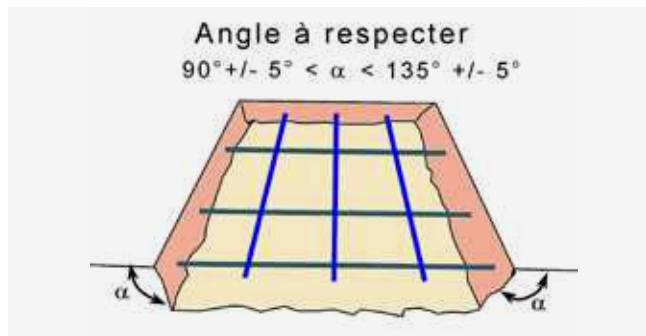


Figure n° 93 : rappel du traitement des bords de la zone concernée

- Dans le cas d'un **environnement très agressif** avec un risque de développement rapide d'une corrosion sur les armatures découpées, celles-ci doivent être **traitées contre la corrosion** par un produit de protection conforme à la **norme NF EN1504-7** (sauf si le mortier ou le béton est mis en place par projection en voie sèche ou s'il y a un traitement électrochimique).
- Dans le cas où **l'environnement est peu agressif** deux cas se présentent :
 - si le produit ou système de réparation (mortier ou béton) est à base de liants hydrauliques (produits CC et PCC), un revêtement de protection est inutile (se reporter à la norme NF P95-101),
 - si le produit ou système de réparation est à base de polymères (produits P ou PC), un revêtement de protection est nécessaire car ces produits ne passivent pas les armatures (pH~7) d'autant que ces produits sont appliqués pour des réparations de faible épaisseur.

Note : dans le domaine du bâtiment il faut se reporter à l'annexe B au **NF DTU 42.1** qui impose un revêtement de protection (il s'agit de réparations de corrosions localisées).

2. La mise en place du produit ou système de réparation (béton ou mortier) ce qui impose les opérations suivantes :

- L'humidification du support ;
- La mise en place du **produit ou système manuellement** (réparations localisées) ou **mécaniquement** ;
- Le traitement, si nécessaire, peut concerner de la totalité de la surface de la structure pour avoir une teneur en alcalins homogène avec, si besoin est, une augmentation de l'épaisseur du recouvrement des armatures. Cela crée une **augmentation du pH pas diffusion** ;
- La mise en œuvre d'un **procédé de cure** (se reporter aux articles 8.5 de la **norme NF EN 13670/CN** et du **fascicule 65 du CCTG**).

3. La mise en place localisée ou généralisée d'un produit ou système de protection de la surface du béton si cette technique a été jugée nécessaire :

- l'application d'un **revêtement de protection** permet :
 - de ralentir fortement la pénétration des agents agressifs dans les zones n'ayant pas nécessité de réparation,
 - d'éviter que les agents ne pénètrent dans le béton par les fissures qui se développent tout autour des zones réparées entre le produit de réparation et le béton support ;
- l'application d'un **revêtement de protection de la surface du béton** respecte les dispositions de la **norme NFP95-103** (se reporter également au **guide FABEM 4**). Elle impose :
 - une préparation de surface,
 - une mise en œuvre du produit manuelle ou mécanique.

5.3.3.4.2 Réalisation d'un traitement électrochimique de réalcalinisation du béton par courant imposé

Le présent article expose dans le détail la **réalcalinisation d'un béton carbonaté par courant imposé**. Il est applicable, à quelques détails près, à une **extraction des chlorures par courant imposé**. Il existe aussi des procédés faisant appel à des **anodes sacrificielles**. Se reporter à l'article 3.5.6.3.3 ci-dessus.

Le **dispositif anodique** doit être constitué d'une **anode** noyée dans une **solution électrolytique alcaline** ou entourée d'un matériau de rétention de liquide approprié saturé en **électrolyte alcalin** placé sur la surface du béton.

Rappel, la réalcalinisation par **courant imposé** n'est pas applicable aux **structures précontraintes, aux armatures de béton armé revêtues d'un revêtement étanche ou galvanisées**. En sus, en cas de pollution par les chlorures, il faut les extraire avant d'envisager la réalcalinisation.

Ces divers procédés par **courant imposé** étant, à ce jour, propriété d'entreprises spécialisées, l'opération doit se dérouler conformément à la **fiche technique de l'applicateur**. Il convient de s'assurer que cette fiche respecte les exigences de la **norme NF EN 14038-1** et des **normes associées**.

L'**entrepreneur**, dans le cadre du **management de la qualité**, doit proposer à l'acceptation du **maître d'œuvre** une **procédure** de réalisation de l'opération adaptée au procédé de réalcalinisation basée sur l'architecture des phases développées ci-dessous ainsi que des **documents de suivi**.

Conformément à l'article 4.2 de la norme, par analogie à ce qui est exigé pour la **protection cathodique**, il convient que la **compétence du personnel** pour le niveau approprié de tâches à accomplir (conception, supervision de l'installation, mise en service, supervision du fonctionnement, mesurages, contrôle et supervision de la maintenance des systèmes) par soit démontrée par :

- une **certification** conformément à la **norme NF EN ISO 15257 de juillet 2017** : Protection cathodique — Niveaux de compétence des personnes en protection cathodique — Base pour un dispositif particulier de certification et par une **expérience adéquate** en matière de réalcalinisation électrochimique ;
- ou par toute autre procédure de pré-qualification équivalente.

Une réalcalinisation comprend cinq phases pendant lesquelles doivent être exécutées un certain nombre d'opérations :

1. conception :

L'**étude de conception** inclut au minimum les informations suivantes :

- les calculs détaillés ;
- les plans d'installation détaillés ;
- les spécificités détaillées relatives aux matériaux et matériels nécessaires à l'installation ;
- les déclarations ou spécifications détaillées relatives à la méthode d'installation, aux essais, à la mise sous tension à la mise en service et à l'exploitation pendant la durée de l'opération.

Cette **étude de conception** nécessite que soient effectuées par l'**entrepreneur** diverses **opérations préalables**, lesquelles complètent les informations effectuées lors de la mise au point du **projet de réparation** et jointes au **dossier de consultation des entreprises**. Ces opérations portent sur :

- la vérification que la structure ne contient pas d'armatures de précontrainte internes au béton (armatures de post-tension ou pré-tension) et ne présente pas de réactions de gonflement interne... ;
- l'étude du projet de réalcalinisation de la structure (justification de l'installation, plans, procédures, personnel, matériel, calendrier...) qui est ensuite remis, pour acceptation, au maître d'œuvre ;
- la vérification qu'une alcali-réaction ne risque pas d'affecter le béton compte tenu de l'ajout d'alcalins dans la solution électrolytique (en cas de risque il faut supprimer le carbonate de sodium) ;

- la mesure de la profondeur de carbonatation ;
- la mesure des profils de chlorures (profondeur et dosage) bien au-delà des premières nappes d'armatures ;

Note : en cas de présence de chlorures, une déchloruration doit être effectuée mais, si le béton est entièrement pollué (par exemple, pollution par des chlorures lors de la fabrication du béton...), seul le béton chloruré entre la surface du béton et les armatures peut être traité. Se reporter au rappel de l'article 5.3.3.4.3.

- la mesure de l'enrobage et la localisation des armatures ;
- la détection des zones de délamination et celles de corrosion des armatures ;
- la préparation de la surface du substrat (nettoyage, décapage, voire repiquage du béton et enlèvement de béton en présence d'une corrosion des armatures) ;
- l'enlèvement de la rouille des armatures (un décapage total n'est pas nécessaire) ;
- la réparation des zones dégradées par un produit de réparation dont la résistivité ne dépasse pas de plus de 200% celle du béton support ;
- la continuité des armatures sur le site est à vérifier en mesurant la résistance électrique entre les barres d'armature en différents emplacements de la structure suffisamment distants les uns des autres et entre toutes les barres d'armature dégagées durant les réparations du béton ou d'autres travaux exécutés selon la méthode et les critères d'acceptation indiqués dans la norme **NF EN ISO 12696**. Le nombre de connexions avec les armatures est fixé par le projet en fonction de la surface des armatures exprimée en m² ;

Attention, la norme NF EN 14038-1 se réfère à la norme NF EN ISO 12696 de 2012 alors que celle-ci a été révisée en 2017.

Ces mesures de continuité détaillées ci-après doivent porter sur :

- la continuité entre les éléments de la structure dans chaque zone de réalcalinisation ;
- la continuité entre les éléments métalliques autres que les armatures, et les armatures elles-mêmes.

Le processus de vérification de la continuité des armatures se fait par mesure de la résistance électrique entre les barres au moins tous les 10 m². La résistance mesurée ne doit pas dépasser 1Ω. Si la continuité n'est pas assurée dans certaines zones, il faut dégager les armatures et assurer leur connexion. Les armatures dégagées doivent ensuite être réenrobées pour éviter les courts-circuits. Cette mesure peut, **en variante**, être effectuée avec une électrode de référence fixe reliée à une barre d'armature, puis ensuite à une autre... Se reporter à la norme **NF EN ISO 12696**.

2. mise en place du matériel :

- câbles électriques : tous les câbles électriques doivent être identifiés par leur couleur (noir ou rouge) et par un numéro. Leur dimension doit permettre d'assurer 1,25 fois le passage du courant évalué lors de la mise au point du projet ;
- dispositif cathodique : connexion des câbles d'alimentation reliés au générateur (couleur noire) aux armatures formant la cathode (la partie située entre deux connexions est appelée « zone » cathodique) et isoler le point de contact ;

Note : au niveau de la conception, prévoir des points de connexions multiples reliés à l'acier de l'armature, soit une connexion reliée tous les 25 m² de surface d'acier ou tous les 50 m² de surface de béton.

- dispositif anodique (la norme utilise le terme de « zone de réalcalinisation ») : mise en place de l'anode (par exemple, treillis en titane) sur des plots non conducteurs pour l'isoler à environ 2 cm de la surface du béton et connexion de cette anode au générateur par des câbles (couleur rouge) tous les 6 à 10 m². La dimension de la zone anodique ne doit pas dépasser 50 m² ou un courant débité de 100 A soit $\geq 2 \text{ A/m}^2$;

Note : au niveau de la conception, prévoir des points de connexions multiples, soit 5 connexions tous les 25 m² d'anodes (Ti-MMO) et, au maximum, 5 A pour un câble de 2 mm² de section.

Note : une anode Ti-MMO est constituée de titane recouvert d'une couche électro-catalytique à base d'oxydes métalliques mixtes ou MMO. Ces anodes ne sont pas corrodables.

- solution électrolytique alcaline : l'anode doit être enrobée par projection dans une couche de cellulose imbibée de carbonate de sodium, de carbonate de potassium et d'hydroxyde de lithium qui doit être en contact avec la surface du béton avec mesure du pH initial de l'électrolyte lequel va augmenter au fur et à mesure du traitement ;

Note : il s'agit d'une **solution 1M** c'est-à-dire contenant une molécule de soluté par litre de solution.

- dispositifs de protection : des dispositifs destinés à protéger la couche de cellulose de l'ensoleillement direct et du vent sont nécessaires de façon à maintenir constante son humidité. Si besoin est, la couche de cellulose doit être réhumidifiée au cours de l'opération. La mesure de l'humidité peut être faite au moyen de sondes hydriques ;
- générateur de courant : le générateur de courant continu (un transformateur-redresseur) doit fournir une tension de 42 V avec un taux d'ondulation efficace inférieur à 100 mV RMS sous une fréquence minimale de 100 Hz) ;

Note : le taux d'ondulation est le rapport entre l'intensité de l'onde sur l'intensité moyenne.

- enregistreur : l'enregistreur doit être installé pour pouvoir mesurer en continu la puissance absorbée par l'installation (intensité et voltage) ;
- essais préliminaires : (épreuve de convenance)
 - contrôle de la polarité de tous les circuits, c'est-à-dire le sens du courant du pôle + vers le pôle -,
 - contrôle de la continuité électrique des circuits par la mesure des résistances sur toutes les connexions (anodes et cathodes),
 - contrôle de l'isolation de tous les circuits, c'est-à-dire que les circuits positifs sont bien isolés des circuits négatifs et des pièces métalliques présentes sur la surface du béton ou à proximité (échafaudage...),
 - mesure de la résistance de l'anode et de la cathode ainsi que le potentiel après l'application de la solution électrolytique,
 - contrôle de la conformité de l'installation aux exigences de sécurité et du fonctionnement des fusibles et disjoncteurs,
 - inspection visuelle de l'installation (installation correcte des composants, numérotation des câbles...) ;
- protection de la zone de traitement : cette protection a pour but d'empêcher la venue d'animaux ou de personnes non autorisées, à cause des risques électriques.

La mesure section par section (entre deux connections) de la résistance entre les armatures et l'anode permet de vérifier l'absence de courts-circuits (la résistance mesurée doit être supérieure à 0,1 MΩ). Le courant mesuré dans chaque section doit être au maximum de 2 A/m² et la tension maximale de 42 V ;

3. réalisation de la réalcalinisation :

- la température sur le chantier doit être supérieure à 0°C. Il est préférable de dégager une marge de sécurité en cas de prévisions météorologiques défavorables ;
- mise sous tension du système progressive avec vérification de tous les circuits électriques ;
- ensuite, réalisation de la réalcalinisation : la surface des armatures doit avoir reçu au minimum 200 A/m². La durée minimale de traitement est de l'ordre de 200 heures (normalement le traitement dure environ deux à trois semaines) ;
- contrôle journalier du fonctionnement de l'installation à savoir :
 - fonctionnement de toutes les zones de réalcalinisation,
 - vérification du système de contrôle du courant et de sa durée (A.h)

- examen visuel de l'isolation des câbles et des connexions,
- mesurage de la tension délivrée dans chacune des zones réalcalinisées,
- contrôle de la solution d'électrolytique et de l'appareillage d'alimentation,
- enregistrement, pour chaque zone de réalcalinisation du courant fourni et du temps écoulé (A.h).

Note : avec un système automatisé, l'intervalle entre les contrôles ne doit pas dépasser 2 h ou mieux l'enregistrement peut être continu.

4. fin de l'opération :

- mesures de l'efficacité de l'opération par la mesure du pH : après avoir soumis la surface d'armatures à une charge minimale de 200 Ah/m², il faut obligatoirement, avant de démonter toute l'installation, s'assurer de l'efficacité du traitement. Ce contrôle s'effectue en procédant à des mesures de pH (se reporter à la **norme NF EN 14630** (Mesure de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphtaléine) ;
- démontage de l'installation et lavage de la surface du béton,
- mise en place d'un revêtement de protection du béton contre de nouvelles pénétrations d'agents agressifs.

Rappel, pour obtenir cette quantité de courant, il est possible de jouer sur **deux variables** : l'intensité « i » et le temps du traitement « t ». **Augmenter exagérément l'intensité** peut conduire au dégagement **d'hydrogène naissant** autour des armatures et **d'acide chlorhydrique** au voisinage de l'anode avec les **conséquences néfastes** que cela provoque.

Le marché peut donc imposer de limiter l'intensité du courant quitte à allonger la durée du traitement. L'épreuve de convenance constituée par les essais préliminaires susvisés permet d'optimiser les paramètres du traitement.

Le nombre des carottes et la fréquence de prélèvement sont fixés par le **marché**. Dans le cas d'un **contrôle extérieur**, le **laboratoire** chargé de ces mesures est également imposé. Dans le cas d'un **contrôle interne**, l'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** le laboratoire avec ses références.

Note : l'étendue de la réalcalinisation est mesurée lors des contrôles. **La zone rose autour des barres doit atteindre la plus petite des deux valeurs : 10 mm ou le diamètre « d » de la barre.**

Si la profondeur de la carbonatation dépasse les lits d'armatures les plus proches de la surface du béton, la surface de ces armatures doit être intégrée au calcul des **200 A.h/m²**. Habituellement, le dimensionnement prend en compte la surface de toutes les armatures situées à moins de 200 cm de la surface du béton.

Attention, si les armatures sont corrodées, il faut allonger le traitement, dans un premier temps pour infiltrer et dissoudre les produits de corrosion, puis, dans un deuxième temps, pour réalcaliniser. Dans un tel cas, la charge est de l'ordre de 300 A.h/m².

- après interprétation des résultats des différents contrôles et des mesures de pH, l'entrepreneur remet au maître d'œuvre un rapport final dont le contenu est détaillé dans l'article 10 de la norme ;
- si le maître d'œuvre lève le POINT D'ARRÊT, il est procédé au démontage du matériel, à l'enlèvement de la couche de cellulose qui est suivie d'un rinçage soigneux du béton.

5. Contrôle post-traitement et revêtement de protection du béton :

- après séchage du substrat, si le marché le prévoit, une préparation de surface est à réaliser et un revêtement de protection est à mettre en œuvre pour empêcher ou limiter la pénétration du gaz carbonique. Il faut attendre environ un mois avant d'appliquer le revêtement, pour que la couche superficielle du béton soit légèrement carbonatée afin d'éviter l'attaque du revêtement par les alcalins ;

- si le marché le prévoit, la mise en place de dispositifs de contrôle de l'efficacité du traitement. Par exemple, des sondes noyées dans le béton permettent de suivre l'évolution du potentiel et la vitesse de corrosion...

5.3.3.4.3 Réalisation d'un traitement électrochimique d'extraction de chlorures du béton par courant imposé

Le document à caractère normatif sur l'extraction des chlorures est la **prénorme PR NF EN 14038-2 de décembre 2019** : Traitements électrochimiques de réalcalinisation et d'extraction de chlorures applicables au BA – Partie 2 : Extraction des chlorures.

Ce traitement étant très semblable à celui d'une réalcalinisation, le **marché** relatif à une extraction des chlorures peut donc être calqué sur celui d'une réalcalinisation.

Rappel : si le béton est entièrement pollué (par exemple, pollution par des chlorures lors de la fabrication du béton...) seul le **béton chloruré entre la surface du béton et environ 3 cm derrière la première nappe d'armatures peut être traité.**

Si, au-delà de la première nappe d'armatures, il y a une forte concentration de chlorures (ordre de grandeur $> 0,4\%$, voire plus du dosage en ciment), par diffusion, ils vont migrer vers le parement sous l'effet du gradient de concentration (lois de Fick), d'où une nouvelle attaque des armatures est certaine.

Lors du projet, doit être étudié le **rééquilibrage des chlorures** : dans le cas où, après traitement, le dosage en chlorures risque de dépasser $0,4\%$, voire $0,5\%$ la **technique n'est pas à préconiser**. Dans ce cas, il faut envisager une **protection cathodique par anodes solubles ou par courant imposé**.

Les limites d'emploi de l'extraction des chlorures sont les mêmes que celles de la réalcalinisation. Les dispositions et le matériel nécessaire pour assurer une **extraction des chlorures** sont quasiment identiques. **L'extraction des chlorures** diffère toutefois de la réalcalinisation sur les points suivants :

- la couche de cellulose est imbibée **d'eau de chaux** ;
 - la durée de l'opération est de l'ordre de 4 à 5 semaines ;
 - les mesures des profils de chlorures remplacent celles de la profondeur de carbonatation (pH) ;
 - sachant que la totalité des chlorures ne peut être extraite, il faut s'assurer que le dosage résiduel en chlorures au droit des armatures est nettement inférieur aux valeurs limites (tenir compte du fait que le profil des chlorures relevé en fin de traitement va se modifier avec le temps par diffusion) ;
- l'extraction des chlorures doit être suivie d'une **réalcalinisation** et, si nécessaire, par la mise en place d'un **revêtement de protection**.

Rappel, la teneur en chlorures se mesure en laboratoire sur des échantillons prélevés sur site sous forme de poudre ou de carottes. Cette mesure relève de la **norme NF EN 14629** (essai n°12 de la **norme NF EN 1504-10**) (fiche B2-3).

5.3.3.4.4 Réalisation d'un traitement électrochimique de réalcalinisation ou d'extraction des chlorures du béton par anodes actives

Le présent article traite des traitements électrochimiques de **déchloruration et de réalcalinisation** du béton par **anodes actives** afin de restaurer la passivité. Ces procédés assurent simultanément le traitement des bétons pollués (chlorures), carbonatés ou soumis à des attaques acides (fumées industrielles chargées en dioxyde de soufre SO₂).

Rappel, le principe du traitement consiste à créer un courant électrique entre une **anode sacrificielle** extérieure et les armatures de béton armé auxquelles elle est reliée. L'anode est enrobée dans une couche d'un matériau constamment maintenu humide par un électrolyte spécialement formulé. Les chlorures se trouvent piégés dans la pâte et simultanément des ions hydroxydes (OH⁻) se forment autour des armatures pour augmenter le pH du béton. La durée de l'opération varie entre 4 et 8 semaines.

Ce traitement développe un courant d'intensité beaucoup plus faible que lorsqu'une source de courant est utilisée (de l'ordre de 0,4A). C'est donc favorable vis-à-vis des risques d'alcali-réaction, voire de fragilisation par l'hydrogène. Cependant, pour éviter ces deux risques, **il n'est pas recommandé d'utiliser ce procédé lorsque le béton contient des granulats potentiellement réactifs (PR et PRP) et si le béton est précontraint (pré ou post-tension interne)**. Une certaine quantité de courant, soit au moins 200 Ah/m², doit être apportée comme dans les traitements susvisés. La durée de l'opération varie entre 4 et 8 semaines.

L'entrepreneur, dans le cadre du **management de la qualité**, doit proposer à l'acceptation du **maître d'œuvre** une **procédure** de réalisation de l'opération adaptée au procédé de prévention ou de protection cathodique basée sur l'architecture des phases développées ci-dessous ainsi que des **documents de suivi**.

Il convient de s'assurer, d'une part, par l'examen des références, de la **compétence de l'entreprise** et, d'autre part, de la **compétence du personnel** pour le niveau approprié de tâches à accomplir (conception, supervision de l'installation, mise en service, supervision du fonctionnement, mesurages, contrôle et supervision de la maintenance des systèmes).

Un tel traitement, comme dans le cas d'une déchloruration ou d'une réalcalinisation, comprend quatre phases pendant lesquelles doivent être exécutées un certain nombre d'opérations :

1. conception :

Cette étude de conception nécessite que soient effectuées par l'**entrepreneur** diverses **opérations préalables**, lesquelles complètent les informations effectuées lors de la mise au point du **projet de réparation** et jointes au **dossier de consultation des entreprises**. Ces opérations portent sur :

- l'étude du projet de réalcalinisation de la structure (justification de l'installation, plans, procédures, personnel, matériel, calendrier...) qui est ensuite remis, pour acceptation, au maître d'œuvre ;
- la mesure de la profondeur de carbonatation ;
- la mesure des profils de chlorures (profondeur et dosage) bien au-delà des premières nappes d'armatures

RAPPEL : si le béton est entièrement pollué (par exemple, pollution par des chlorures lors de la fabrication du béton...) seul le béton chloruré entre la surface du **béton et environ 3 cm derrière la première nappe d'armatures peut être traité**.

Si, au-delà de la première nappe d'armatures, il y a une forte concentration de chlorures (ordre de grandeur > 0,4%, voire plus du dosage en ciment), par diffusion ils vont migrer vers le parement sous l'effet du gradient de concentration (lois de Fick), d'où une nouvelle attaque des armatures est certaine.

Lors du **projet**, doit être étudié le **rééquilibrage des chlorures** : dans le cas où, après traitement, le dosage en chlorures risque de dépasser 0,4%, voire 0,5% la **technique n'est pas à préconiser**. Dans ce cas, il faut envisager une **protection cathodique par anodes solubles ou par courant imposé**.

- la mesure de l'enrobage et la localisation des armatures ;
- la préparation de la surface du substrat ;
- la détection des zones de délamination et celles de corrosion des armatures ;
- la préparation de la surface du substrat (nettoyage, décapage, voire repiquage et enlèvement de béton en présence d'une corrosion des armatures) ;

- l'enlèvement de la rouille des armatures (un décapage total n'est pas nécessaire) ;
- la réparation des zones dégradées par un produit de réparation dont la résistivité ne dépasse pas de plus de 200% celle du béton support ;
- la continuité des armatures sur le site est à vérifier en mesurant la résistance électrique entre les barres d'armature en différents emplacements de la structure suffisamment distants les uns des autres et entre toutes les barres d'armature dégagées durant les réparations du béton ou d'autres travaux exécutés selon la méthode et les critères d'acceptation indiqués dans la **norme NF EN ISO 12696**.

2. mise en place du matériel :

- la position des aciers ayant été repérée, par exemple au moyen d'un pachomètre, des perçages sont effectués de façon à pouvoir relier les armatures par des câbles électriques normalement de couleur noire. Le nombre de connexions est fixé par le projet en fonction de la surface des armatures exprimée en m^2 ;
- la continuité électrique des armatures est à vérifier en mesurant la résistance électrique entre les barres d'armature en différents emplacements de la structure (se reporter à la **norme NF EN ISO 12696**). **Normalement la résistance doit être $\leq 1 \Omega$** ;
- la pâte électrolytique est ensuite appliquée sur la surface de la zone à traiter préalablement humidifiée. Cette application peut être manuelle ou mécanique (projection ou extrusion). Un dispositif de goutte à goutte est disposé pour compenser les pertes d'électrolyte par évaporation ;
- l'anode sous forme de plaques est mise en place sur des plots destinés à la maintenir en position et les connexions électriques sous forme de câbles normalement de couleur rouge avec l'anode sont réalisées. Si nécessaire les plaques sont reliées entre elles pour assurer une continuité électrique,
- ensuite, le tout est enveloppé dans une membrane en polyéthylène de façon à limiter l'évaporation de l'électrolyte ;
- enfin, tous les câbles sont raccordés à un tableau de contrôle ;
- essais préliminaires : (épreuve de convenance) :
 - le circuit est fermé pour assurer la circulation du courant. La fermeture est obtenue par un shunt de résistance 1Ω entre chaque borne noire et la borne rouge associée,
 - contrôle des potentiels entre les câbles rouges et noirs et de l'intensité entre les deux bornes des shunts,
 - contrôle de la conformité de l'installation aux exigences définies dans la procédure,
 - inspection visuelle de l'installation (installation correcte des composants, repérage des câbles...

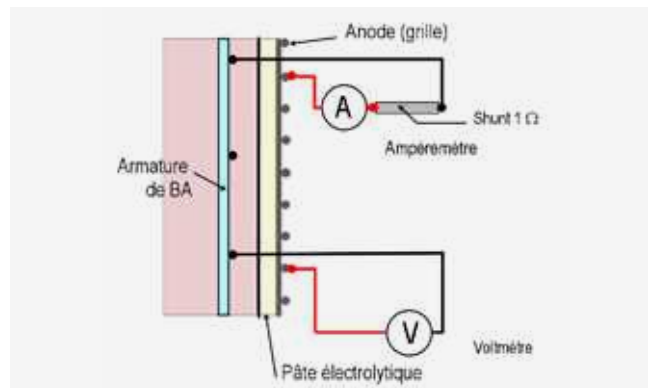


Figure n° 94 : Schéma de l'installation et des dispositifs de mesure

3. réalisation du traitement :

- la température sur le chantier doit être supérieure à 0°C. Il est préférable de dégager une marge de sécurité en cas de prévisions météorologiques défavorables,
- contrôler que la surface des armatures reçoive au minimum 200A/m²,
- contrôle journalier du fonctionnement de l'installation à savoir :
 - fonctionnement de toutes les zones de réalcalinisation,
 - vérification le système de contrôle du courant (~0,4A) et de sa durée (A.h),
 - contrôle de la solution d'électrolytique et de l'humidité au moyen de sondes hydriques,
 - enregistrement, pour chaque zone de réalcalinisation, du courant fourni et du temps écoulé (A.h).

4. fin de l'opération :

- mesures de l'efficacité de l'opération par la mesure :
 - du pH (se reporter à la **norme NF EN 14630** (Mesure de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphthaléine).
 - de la teneur en chlorures (se reporter à la **norme NF EN 14629** (essai n°12 de la **norme NF EN 1504-10** et **fiche B2-3**),
- démontage de l'installation et lavage de la surface du béton ;
- mise en place d'un revêtement de protection du béton contre de nouvelles pénétrations d'agents agressifs.

Note : l'étendue de la réalcalinisation est mesurée lors des contrôles. **La zone rose autour des barres doit atteindre la plus petite des deux valeurs : 10 mm ou le diamètre « d » de la barre.**

5.3.3.4.5 Réalisation d'un traitement électrochimique de prévention ou de protection cathodique à courant imposé ou non

Le présent article traite de la **prévention et de la protection cathodique de l'acier dans le béton**, voire dans la maçonnerie.

La **norme NF EN ISO 12696** liste les différentes installations de **prévention** ou de **protection cathodique** qu'il est possible de mettre en place.

La **prévention cathodique et la protection cathodique**, visées par cette norme, sont applicables aux structures en **béton armé et précontraint**, ainsi qu'aux **armatures en acier non revêtu ou revêtues d'un revêtement organique**. La norme indique qu'elle est applicable aux structures à **l'air libre, enterrées, immergées ou soumises à la marée**. La norme a un caractère exigeant (norme de performance) et ne donne aucune règle de dimensionnement de l'installation.

La **prévention cathodique** concerne les structures pour lesquelles la corrosion n'a pas encore commencé. Dans ce cas, il faut appliquer à l'interface béton /acier une petite polarisation négative (0,2 à 2 mA/m²) qui empêche l'amorçage de la corrosion.

Note : cette technique s'applique aux structures neuves mais aussi aux structures existantes lorsque le front des agents agressifs n'a pas atteint les armatures.

La **protection cathodique** vise à réduire la vitesse de corrosion à des valeurs négligeables par l'application d'une polarisation négative plus importante (2 à 20 mA/m² pour des aciers non revêtus) mais sans risquer de provoquer la **formation d'hydrogène naissant**.

Les **intensités de courant susvisées** correspondent à la prévention ou la protection cathodique d'une **structure à l'air libre**. Cette intensité est moindre pour une **structure immergée**. Dans le cas d'une **structure enterrée** comme un tunnel, les densités de courant à mettre en œuvre sur les armatures de la face intérieure et celles de la face extérieure (au contact du terrain) de la paroi sont différentes.

Ces deux techniques font appel pour la création de la quantité de courant nécessaire, soit à des **anodes galvaniques** (dites solubles), soit à des **anodes** et un **courant imposé**.

Les différents ensembles anodiques sont détaillés dans l'**annexe C (informative)** de la norme. Cette annexe donne des informations sur les limites d'emploi des différents ensembles, leur utilisation dans les ouvrages neufs et existants (après réparation) soumis à l'atmosphère ou immergés ou enterrés, leur **durée de vie**, leurs performances optimales en matière de transport du courant... Les **anodes** sont regroupées en trois ensembles suivant le milieu dans lequel sont placées les structures d'accueil : air libre, eaux et sols.

L'**entrepreneur**, dans le cadre du **management de la qualité**, doit proposer à l'acceptation du **maître d'œuvre** une **procédure** de réalisation de l'opération adaptée au procédé de **prévention ou de protection cathodique** basée sur l'architecture des phases développées ci-dessous ainsi que des **documents de suivi**.

Conformément à l'article 4.2 de la norme, il convient que la **compétence du personnel** pour le niveau approprié de tâches à accomplir (conception, supervision de l'installation, mise en service, supervision du fonctionnement, mesurages, contrôle et supervision de la maintenance des systèmes) par soit démontrée par :

- une **certification** conformément à la **norme NF EN ISO 15257 de juillet 2017** : Protection cathodique — Niveaux de compétence des personnes en protection cathodique — Base pour un dispositif particulier de certification et par une expérience adéquate en matière de réalcalinisation électrochimique
- ou par toute autre **procédure de pré-qualification équivalente**.

Note : cette norme fait référence aux autres procédés comme la réalcalinisation et l'extraction des chlorures mais les textes de référence ne sont pas à jour. En effet, sont cités les textes **CEN/TS 14038-1 et 2** alors qu'il existe une norme et un projet de norme (se reporter aux articles ci-devant).

Une telle installation de prévention ou protection cathodiques doit avoir une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (durée d'utilisation du projet fixée au marché). Elle doit donc être conçue pour un tel usage.

Une prévention ou une protection cathodique comprend six phases pendant lesquelles doivent être exécutées un certain nombre d'opérations :

1. **conception** : (se reporter à l'**annexe B informative relative au procédé de conception**)

L'étude de conception inclut au minimum les informations suivantes :

- les calculs détaillés ;
- les plans d'installation détaillés ;
- les spécificités détaillées relatives aux matériaux et matériels nécessaires à l'installation ;
- les déclarations ou spécifications détaillées relatives à la méthode d'installation, aux essais, à la mise sous tension à la mise en service et à l'exploitation pendant la **durée d'utilisation du projet fixée au marché**.

Cas d'une structure neuve susceptible d'être contaminée par les chlorures :

L'expérience montre qu'après dépassivation, il s'établit un potentiel acier/béton spécifique appelé **potentiel de piqûration (E_{pit})**. La **prévention cathodique** va permettre d'établir un potentiel en dessous (plus négatif) du potentiel de piqûration de façon qu'aucune zone de piqûration ne s'amorce.

Cas d'une structure existante avec des armatures qui se corrodent :

La **protection cathodique** va permettre d'établir un potentiel acier/béton plus réduit compris entre le **potentiel de protection (E_{prot})** et le **potentiel de corrosion (E_{corr})**. Malheureusement, ces deux potentiels varient en fonction de nombreux facteurs (teneur en chlorures, pH aux lieux anodiques, température, humidité...). Il est donc nécessaire d'interpréter les résultats des mesures pour évaluer les performances du système mis en place (se reporter à l'article 8.6 de la norme).

De plus, aucun **potentiel acier/béton** mesuré à courant coupé ne doit être inférieur à **-1 000 mV** pour de l'acier de BA et à **-900 mV** pour des aciers de précontrainte (mesures effectuées avec une anode de référence Ag/AgCl/KCl 0,5 M). Ces valeurs limites ont pour but d'éviter le **dégagement d'hydrogène**.

Cette **étude de conception** nécessite que soient effectuées par l'**entrepreneur** diverses **opérations préalables**, lesquelles complètent les informations effectuées lors de la mise au point du projet de réparation et jointe au dossier de consultation des entreprises. Ces opérations portent sur :

- la classification d'exposition (structure enterrée, immergée, exposée à la marée, ou aux projections, à air libre abritée ou exposée...);
- l'évaluation de la sensibilité de la structure à la fragilisation par l'hydrogène ou les courants vagabonds si cette structure comporte des éléments précontraints ;
- la mesure des profils de chlorures (profondeur et dosage) ;
- la teneur en humidité du béton plus ou moins variable ;
- la résistivité du béton variable en fonction de son humidité ;
- la mesure de la profondeur de carbonatation ;
- la mesure de l'enrobage et localisation des armatures ainsi que la surface totale des armatures et par lit ; le contrôle et rétablissement, si besoin est, de la continuité électrique des armatures ;
- la détection des **zones où la corrosion est probablement active** avec les réparations à prévoir. Cela impose, suivant le cas, la mesure du potentiel d'électrode acier/béton, celle de la vitesse de corrosion... ;
- la réalisation des travaux de réparation portant sur :
 - le repiquage ou l'enlèvement du béton pollué ou carbonaté,
 - la préparation de la surface du béton avec contrôle de sa cohésion superficielle qui doit au moins être égale à l'adhérence minimale du produit de réparation,
 - l'enlèvement de la rouille des armatures (un décapage total n'est pas nécessaire),
 - la réparation des zones dégradées par ajout de mortier ou de béton mais sans mettre de primaire sur les armatures. Le produit de réparation doit avoir une résistivité ne dépassant de plus de 50 à 200% celle du béton de la structure et une adhérence $\geq 1,5$ MPa.

2. Composants de l'installation de protection cathodique et mise en place du matériel :

A. Ensembles anodiques (se reporter à l'annexe C informative de la norme) :

a) Les anodes pour structures à l'air libre regroupent les :

- **anodes sous forme de revêtements conducteurs :**
 - organiques (éléments conducteurs en carbone),
 - métalliques (éléments conducteurs mis en œuvre par une métallisation à chaud) ;
- **anodes en titane activé**, c'est-à-dire revêtu d'oxydes métalliques mixtes (Ti MMO). Ce sont des anodes sous forme de treillis, fils, bandes, tubes... Ces anodes sont :
 - placées à la surface du béton et enrobées dans un revêtement à base de liants hydrauliques,
 - encastrées dans des rainures pratiquées à la surface du béton,
 - intégrées dans la structure dans des trous forés dans le béton (ou pour une construction neuve, noyées dans le béton) ;

■ **autres ensembles anodiques :**

- revêtements asphaltiques conducteurs,
- matériaux conducteurs à base de ciment (granulats ou fibres de carbone),
- céramiques conductrices (tubes à noyer dans le béton ;

■ **anodes galvaniques :**

- anodes en forme d'anneau noyées dans le béton. Elles sont utilisées lors de réparations mais en cas de fissuration du béton, l'anode se transforme en cathode et ne protège plus les armatures de la corrosion ;

■ **anodes constituées par des métaux projetés à chaud** (se reporter ci-devant aux revêtements conducteurs) : (pm)

■ **anodes constituées de feuilles de zinc :**

- ces feuilles de zinc de 0,25 mm d'épaisseur et livrées en rouleaux sont autocollantes pour être plaquées à la surface du béton ;

■ **anodes en zinc sous forme de treillis :**

- ces treillis sont disposées dans des enceintes renforcées par des fibres de verre ;

■ **anodes individuelles :** (se reporter ci-devant aux anodes galvaniques)

b) Les anodes pour structures immergées comprennent les :

- anodes galvaniques relevant de la norme NF EN 12496 pour l'eau de mer. Ces anodes sont constituées par les métaux suivants : Al/Zn/Indium – Zn – Mg,
- anodes pour courant imposé pour l'eau douce. Ces anodes sont constituées par les métaux suivants : Zn ou Mg ;

c) Les anodes pour structures enterrées comprennent les :

- anodes galvaniques,
- anodes pour courant imposé ;

L'annexe C indique que :

- **les revêtements conducteurs organiques** ont une **durée de vie** comprise entre **5 et 15 ans**, qu'ils sont sensibles à une humidification continue et qu'ils ne doivent pas être utilisés dans les zones soumises aux embruns ou condensantes. Enfin, ils ont une mauvaise tenue à l'usage et l'abrasion ;
- **les anodes en titane activé** ont une **durée de vie** comprise entre **25 et 100 ans** et qu'elles peuvent fonctionner avec des densités de courant assez élevées

B. Capteurs de surveillance :

La performance de l'installation doit pouvoir être contrôlée par la **mesure du potentiel** à l'interface acier/béton au moyen **d'électrodes de références** qui doivent être placées aux points représentatifs de la zone de la structure à protéger. Ces électrodes sont complétées par des **électrodes portables** et **d'autres capteurs** (sondes de dépolarisation [détection d'un changement de potentiel], éprouvettes et sondes macro-piles [mesures des densités de courant locales] et sondes mobiles à connexions fixes).

C. Instrumentation de surveillance :

Cette instrumentation doit permettre d'interroger les différents capteurs et donc de déterminer les performances de l'installation de protection cathodique et celle de fourniture du courant continu (cas où le courant est imposé).

Sont utilisés des voltmètres ayant une résolution minimale de 1mV, une précision de $\pm 1\text{mV}$ et une impédance d'entrée $\geq 10\text{M}\Omega$.

Deux sortes de centrales de mesures sont utilisées : les portables et les permanentes. Ces dernières sont autonomes (passives, c'est-à-dire enregistreuses sur instruction d'un contrôleur ou actives, c'est-à-dire capables d'enregistrer les données et de les exploiter) et sont reliées à un réseau. **Le marché** précise le ou les types de centrale à mettre en place.

D. Système de gestion des données :

■ **Un système de gestion automatique doit être fourni.** Il permet la collecte, l'ordonnancement, le tri et la présentation des données fournies par l'installation. Ce système doit au minimum fournir les informations suivantes :

- l'implantation des électrodes ;
- le type et l'emplacement de chaque capteur ;
- la capacité d'alimentation en courant continu ;
- les enregistrements initiaux avant la mise en service de l'installation ;
- les données enregistrées lors de la mise en service de l'installation ;
- les données en provenance de chaque capteur depuis la mise en service en respectant l'intervalle entre les mesures fixé lors de l'étude ;
- les données concernant le débit de courant fourni par la source de courant depuis la mise en service de l'installation ;
- l'enregistrement de tous les événements, comme les contrôles, les modifications du fonctionnement du système...

■ **Le système** doit être fourni avec sa documentation, ses dispositifs de sauvegarde des données, son système de présentation des données sous forme de tableaux et de graphiques.

E. Câbles à courants continu (prévoir un codage par couleurs et numéros) :

- brun ou rouge entre le générateur de courant continu (borne +) et l'anode ;
- noir ou gris entre le générateur de courant continu (borne -) et l'acier (armature de BA...) ;
- gris ou noir pour le câble d'essai (surveillance) ;
- bleu pour le câble d'électrode de référence ;
- jaunes pour les autres capteurs.

Des exigences de performance sont imposées aux câbles. Par exemple, de permettre le passage du courant de conception majoré ou minoré de 25%...

■ sections des câbles :

- d'alimentation (+ et -) 1 mm²,
- de surveillance 0,5 mm².

Des exigences sur les matériaux d'isolation des câbles figurent également dans la norme de façon à garantir leur tenue pendant une **utilisation de longue durée**.

F. Boîtiers de jonction :

La norme recommande de ne pas utiliser des boîtiers métalliques et de mettre en place des boîtiers résistants aux agressions de l'environnement chimique et mécanique.

G. Alimentations électriques : (courant continu)

Les appareils à utiliser sont, soit des transformateur-redresseurs, soit des redresseurs à commutation. La norme, dans une note, liste d'autres solutions. Elle fixe également les performances que doivent présenter les appareils.

3. Modes opératoires de mise en place :

Au cours de cette opération sont à effectuer :

- la mesure de la tension d'alimentation de sortie, le courant de sortie et le potentiel acier/béton qui doivent pouvoir être mesurés dans chaque zone (courant imposé ou anodes galvaniques) et ce par au minimum deux électrodes de référence ;
- l'installation des points de connexion à l'armature ;
- l'installation des anodes après une préparation de surface, reconstitution du béton des zones de connexion, protection des anodes... ;
- l'installation électrique (mise en place des câbles, connexions diverses... ;

Note : en l'absence d'un dispositif de protection contre un contact (humain ou animal), la tension d'alimentation ne doit pas dépasser 24 V.

- des essais dits « en cours d'installation » qui portent sur :
 - la vérification de la polarité de tous les circuits,
 - la mesure de la continuité de tous les circuits. Les valeurs mesurées (suivant la technique de mesure retenue) doivent être stables et la résistance $< 1 \Omega$,
 - la vérification de l'isolation de tous les circuits.

4. Mise en service de l'installation :

- **La mise en service** impose un certain nombre de vérification et mesures. Il s'agit :
 - d'une inspection visuelle de l'ensemble de l'installation ;
 - de mesures à réaliser avant la mise sous tension (se reporter à article 8.2 de la norme). Elles portent sur :
 - le potentiel acier/béton par rapport à toutes les électrodes de référence permanentes et aux capteurs de polarisation,
 - le potentiel acier/béton par rapport à toutes les électrodes portables aux emplacements prévus lors de la conception,
 - les données des autres capteurs,
 - le fonctionnement du système d'acquisition et de transmission des données avec la certitude que toute l'installation fait partie du système de surveillance.
- **La mise sous tension des systèmes à courant imposé** se fait en respectant les règles suivantes :
 - s'assurer que le recouvrement à base de liant hydraulique ou tout autre revêtement ait acquis les propriétés nécessaires. Par exemple à 20°C : 28 jours pour une construction neuve, 14 jours en réparation pour le mortier de couverture... ;
 - mise sous tension avec un faible courant (10 à 20% de la capacité de l'installation) combinée aux mesures suivantes :
 - potentiel acier/béton par rapport à toutes les électrodes permanentes et portables,
 - tension de sorties et intensités débitées par toutes les sources de courant continu,
 - polarité avec vérification qu'elles sont conformes à la conception.
- **Réglage initial des systèmes à courant imposé :**

La mise sous tension se fait à un niveau permettant d'attendre les objectifs de protection cathodique. Le niveau de courant doit permettre d'enregistrer une variation du potentiel, mesurée à courant établi, dans le sens négatif suffisante (par exemple, 200 mV ou plus). **La performance à long terme est meilleure si la polarisation se fait avec une densité de courant relativement faible.**

La durée de cette **période de polarisation initiale** varie de 7 à 28 jours, elle est plus longue si la densité de courant était faible.

■ Évaluation de la performance initiale de l'installation :

Après la période de polarisation initiale, cette évaluation comprend :

- la mesure de la tension de sortie et de l'intensité du courant dans chacune des zones de l'installation avec un calcul de la résistance du circuit ;
- la mesure, au niveau de toutes les électrodes de référence, des potentiels instantanés à courant coupé. La mesure se fait normalement entre 0,1s et 1s après l'ouverture du circuit de courant continu (cela évite une dépolarisation significative) ;
- la mesure de la dépolarisation du potentiel après la coupure permanente du courant (durée de l'ordre de 25h à intervalles de temps réguliers : 0,5h, 1h, 2h...);
- la mesure des données des autres capteurs ;
- la mesure des potentiels acier/béton à courant enclenché ;

■ Critères de protection et interprétation de l'évaluation de la performance (se reporter à l'article 8.6 et ses différentes notes informatives) :

Les résultats des mesures au cours de l'évaluation doivent respecter les limites suivantes :

- rappel, aucun potentiel à courant coupé ne doit être inférieur à -1 100 mV pour les armatures passives et -900 mV pour les armatures actives⁴⁰ (électrode Ag/AgCl/0,5 M KCl 0,5 M) ;
- un potentiel instantané à courant coupé inférieur à - 720 mV par rapport à une électrode Ag/AgCl/0,5 M KCl 0,5 M ;
- une dépolarisation (décroissance du potentiel) pendant une période maximale de 24 heures d'au moins 100 mV après la coupure,
- décroissance du potentiel pendant une longue période (24 heures ou plus) d'au moins 150 mV après la coupure.

Note : le degré de polarisation trop important est limité avec les **anodes galvaniques en zinc**. La valeur limite de -900 mV est généralement respectée.

■ Réglage de la sortie de courant pour les systèmes à courant imposé

- si l'interprétation de l'évaluation de la performance est satisfaisante, il faut passer aux phases suivantes ;
- si les résultats de l'évaluation ne sont pas conformes, un réglage doit être opéré et une nouvelle évaluation entreprise au bout de 28 jours ;

5. enregistrement et documentation sur l'installation :

- un rapport sur la mise en place et la mise en service doit être rédigé (voir l'article 9.2 de la norme qui détaille les informations à fournir) ;
- un manuel de fonctionnement et de maintenance doit être établi sous le contrôle du spécialiste fixant, entre autre, la **périodicité des opérations de contrôle et de maintenance** ainsi que les **modes opératoires** correspondants (article 9.3 de la norme) ;

6. Exploitation et maintenance :

Normalement, les dispositifs de recueil et de transmission électronique des données (avec seuils d'alerte) limitent les interventions sur le site. Des inspections de routines sont cependant nécessaires ainsi qu'un suivi, au moins une fois l'an, de l'installation.

- la **consistance des inspections de routine** est donnée dans l'article 10.1 de la norme, elle porte sur :
 - la vérification du fonctionnement,
 - l'évaluation des performances ;

⁴⁰ Risque de fragilisation par l'hydrogène naissant (voir le diagramme).

- **la consistance du suivi annuel obligatoire** est donnée par l'article 10.2 de la norme, elle porte sur :
 - la revue des enregistrements des données et des inspections d'essais effectués pendant l'année,
 - l'évaluation des performances,
 - l'examen visuel de l'installation,
 - la revue et l'interprétation des données,
 - le réglage du débit de courant si besoin est,
- **la rédaction d'un rapport** qui précise :
 - le travail effectué,
 - les données collectées,
 - l'interprétation des données et les recommandations concernant les changements sur la périodicité de fonctionnement, de maintenance...
 - les recommandations relatives aux modifications apportées à l'installation.

***Note :** généralement, l'exploitation et la maintenance du système doit être assurée par un prestataire de service. Le marché en fixe le cadre et la durée. En sus, il faut mettre en place une **gestion spécifique** de l'ouvrage à la charge de son **gestionnaire** adaptée à la durée fixée de l'opération et des travaux de maintenance y afférant.*

5.3.3.4.6 Mise en place d'un revêtement actif sur les armatures de béton armé

Les armatures doivent avoir été débarrassées de toute trace de corrosion au **degré DS 2 ou St 2**. Dès que l'armature est décapée, le produit ou le système conforme à la **norme NF EN 1504-7** est mis en œuvre à la brosse ou au pinceau en tenant compte des exigences de la **fiche technique** :

- **soit sur toute la surface de l'armature en évitant de l'appliquer sur le béton** pour ne pas nuire à l'adhérence du matériau de réparation ;
- **soit sur toute la surface de l'armature et du béton** (cas des produits et systèmes qui assurent la protection des armatures tout en améliorant la reprise de bétonnage).

La **fiche technique du produit** donne le **délai d'attente** pour la mise en œuvre du produit ou du système destiné à reconstituer le recouvrement des armatures.

5.3.3.4.7 Mise en place d'un revêtement passif sur les armatures de béton armé

Les armatures doivent avoir été débarrassées de toute trace de corrosion et décapées au **degré DS 2½**. Dès que l'armature est décapée, le produit ou le système conforme à la **norme NF EN 1504-7** est mis en œuvre sur toute la surface de l'armature en évitant de l'appliquer sur le béton car le produit n'a pas été conçu pour améliorer la reprise de bétonnage.

***Note :** il est rappelé qu'en réparation, cette technique est fortement déconseillée, bien qu'il soit possible d'utiliser des **armatures protégées en usine** pour remplacer les armatures corrodées.*

5.3.3.4.8 Réalisation d'une application d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton

Rappel, le **présent GUIDE**, dans plusieurs articles, attire l'attention sur les limites d'emploi des inhibiteurs de corrosion destinés à être appliqués à la surface des bétons, en particulier en présence de chlorures (se reporter aux articles : 3.5.6.3.3.2, 4.2.6.5 et 4.5.4.14 ci-dessus).

La mise en œuvre d'un inhibiteur est effectuée en respectant les **conseils de la notice technique du fabricant**. La **quantité de produit à mettre en œuvre** est celle qui a été fixée à la suite de l'épreuve de convenance.

La mise en œuvre d'un inhibiteur est précédée du repiquage et/ou de l'enlèvement du béton des zones de la structure où la corrosion s'est développée. Les armatures corrodées sont ensuite dérouillées. De plus, pour permettre la pénétration des produits, toute les surfaces de la structure sont décapées pour enlever les anciennes peintures, les anciens revêtements, les salissures, les traces de graisse, les micro-organismes... Enfin, un lavage soigné termine la préparation.

La mise en œuvre d'un inhibiteur de corrosion se déroule normalement comme suit :

1. des moyens de protection sont mis en place contre les intempéries, l'ensoleillement direct... ;
2. un nettoyage général des surfaces à traiter est mis en œuvre ;
3. il faut attendre que les surfaces à traiter soient sèches ;
4. une fois les contrôles effectués et validés, la réparation des zones endommagées peut avoir lieu après purges et repiquages. un produit ou un système de réparation est mis en œuvre pour restaurer en faible ou en forte épaisseur les zones dégradées Cette opération est suivie d'une cure des zones traitées ;
5. après séchage et durcissement des zones réparées, il est procédé à **l'application de l'inhibiteur** sur toute les surfaces ;
6. enfin, une nouvelle préparation de surface est effectuée avant de mettre en œuvre, si c'est prévu par le **marché**, un revêtement de surface conforme à la **norme NF EN 1504-2**. Suivant le cas, il est fait appel à un revêtement d'imperméabilité ou d'étanchéité capable de ponter les fissures, qui peut aussi résister à la pénétration des gaz et de la vapeur d'eau.

5.3.3.4.9 Réalisation de la mise en œuvre d'une imprégnation ou d'un revêtement

Une fois certaines réparations ou renforcements effectués, il peut être nécessaire d'appliquer à la surface du béton une **imprégnation ou un revêtement**, soit pour réduire, voire empêcher la pénétration d'agents agressifs, soit pour des raisons d'aspect esthétique (suppression de l'effet peau de léopard).

Suivant le domaine concerné, la mise en œuvre de ces produits ou systèmes est traitée dans les textes suivants :

■ **Cas du domaine du bâtiment :**

- **NF DTU 42.1** (réfection des revêtements de façade),
- **NF DTU 59.1 de juin 2013** : Travaux de bâtiment - Revêtements de peinture en feuil mince, semi-épais, ou épais - Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux - Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types ;

■ **Cas du domaine du génie civil :**

- **Fascicule 65 du CCTG** (Chapitre 11 : travaux de peinture),
- **NF P95-103** (imprégnations et revêtements de protection).

5.3.3.4.9.1 Réalisation d'une réinjection de conduits de précontrainte

La réalisation d'une telle opération est très complexe. Elle est détaillée dans le **guide FABEM 8**.

Il existe un **système breveté PMD-ATEAV** de traitement des armatures de précontraintes par des **inhibiteurs de corrosion**. L'opération est décrite dans l'illustration ci-après. Se reporter à l'article consacré à ce sujet, article rédigé par le **CEREMA** dans la revue ouvrages d'art.

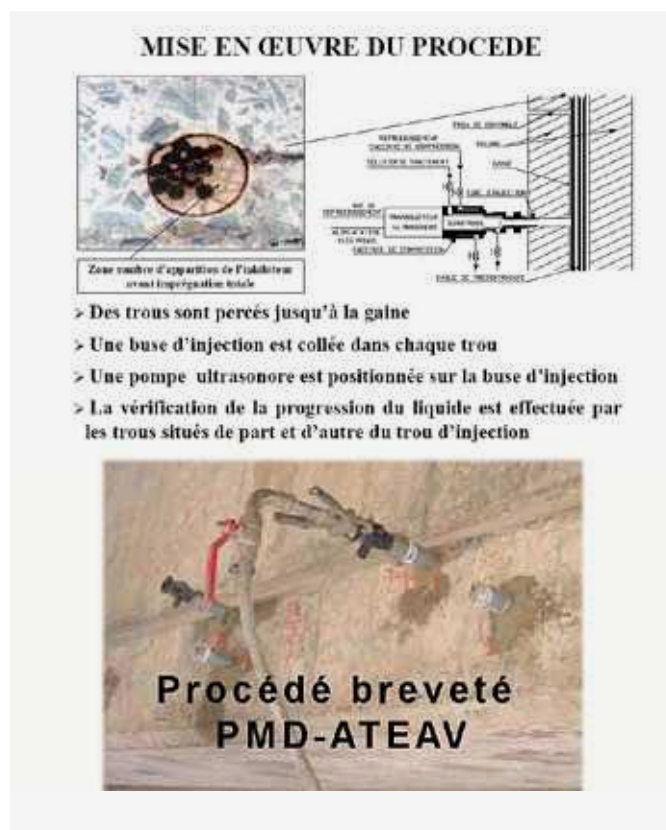


Figure n° 95 : procédé de stabilisation de la corrosion de câbles de précontrainte par inhibiteurs nitriles (crédit photo PMD-ATEAV)

6

Essais et contrôles

- 6.1** Généralités
- 6.2** Contrôles de réception des produits
- 6.3** Épreuves de convenue
- 6.4** Contrôles d'exécution
- 6.5** Réception des travaux

La consistance des **essais**, de l'**épreuve d'étude**, de l'**épreuve de convenance** et des **contrôles de réception et d'exécution** est fixée par le **marché**, qui complète, en tant que de besoin, les dispositions du **présent GUIDE**. Elle est reprise dans les **procédures d'exécution** et les **cadres des documents de suivi de l'exécution du Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ)** à la charge de l'**entrepreneur**.

Parmi les **contrôles**, la plupart relèvent du **contrôle interne**, voire du **contrôle externe** à l'**entreprise** et les autres du **contrôle extérieur**.

Normalement, le **marché comporte un cadre de PAQ** imposant la fourniture d'une **liste minimale de procédures d'exécution** complétée par les **cadres des documents de suivi de l'exécution** et le nombre des **points d'arrêt** ainsi que le **nombre minimal des essais et contrôles à effectuer**. De plus, il faut y ajouter la qualification du personnel affecté à chaque poste de travail. L'**entrepreneur** complète ce cadre dans son offre, en tant que de besoin, pour constituer le **Schéma Organisationnel du Plan Qualité (SOPAQ)** base du **PAQ**.

Les **opérations du contrôle extérieur** relèvent des exigences du **maître de l'ouvrage** en matière d'assurance de la qualité. Elles ne sont donc pas développées dans le **présent GUIDE**. Le **marché** doit cependant traiter de celles qui peuvent interférer avec la **marche du chantier** (opération nécessitant un arrêt partiel ou total du chantier ou pouvant interférer avec certaines phases de travaux).

Les **opérations de contrôle externe** à l'**entreprise** peuvent être demandées par le **marché** ou être proposées par l'**entrepreneur** dans le cadre de sa démarche qualité. Elles ne sont pas développées dans le **présent GUIDE**.

Les **essais et contrôles** à effectuer par l'**entrepreneur** lors « d'une opération de restauration du béton, ou de renforcement structural et/ou de restauration ou de prévention de la passivité des armatures » peuvent être rattachés aux **cinq catégories** suivantes :

- les **épreuves d'étude** (pour mémoire, se reporter à l'article 4.2.8 ci-dessus) ;
- les **contrôles de réception et de stockage des produits** ;
- les **épreuves de convenance** ;
- les **contrôles d'exécution** ;
- la **réception des travaux**.

Les **exigences de contrôle des documents de référence** qui se rapportent, soit au **domaine du bâtiment**, soit à celui du **génie civil**, sont très hétérogènes. La suite du **présent GUIDE** explicite les stipulations des différentes normes et des différents textes à caractère normatif et les complète, si besoin est. Par exemple :

- le **chapitre 7 de la norme NF P 95-101** décrit les **essais et contrôles** à effectuer lors de travaux de réparation. Ces contrôles ne couvrent que la restauration de la surface du béton.
- la **norme NF EN 1504-10** traite des contrôles à effectuer lors de la mise en œuvre des diverses méthodes de réparation et/ou de renforcement et des méthodes de restauration ou de préservation de la passivité dans un tableau unique (le tableau 4), qui s'étend sur dix pages, d'une lecture difficile. Heureusement, son **annexe A informative** explicite en quelques lignes les différents contrôles et essais. Cette norme fixe aussi les valeurs maximales et/ou minimales à respecter, mais pour seulement une partie des caractéristiques (par exemple, température du support, point de rosée, adhérence...). **Cependant, elle ne fixe pas l'importance quantitative des essais à effectuer**. Les essais fixés sont normalement à la charge de l'**entrepreneur**.

Conclusions : le **marché** ne peut donc pas se contenter de viser les **normes traitant des travaux de réparation ou de renforcement** à effectuer ; il doit fixer l'**importance des contrôles** et désigner le ou les **responsables de ces contrôles** : normalement l'**entrepreneur** sauf par exemple, les **contrôles extérieurs** ayant une incidence sur le chantier).

6.2.1 GÉNÉRALITÉS



Figure n°96 : réception par le contrôleur des produits de réparation

Les **contrôles de réception** ont pour but de vérifier que les produits livrés sont conformes aux exigences du **marché** et qu'ils sont stockés conformément aux exigences visées à l'article 4.4 ci-dessus relatif au transport et au stockage des produits. Ils consistent notamment à vérifier les bordereaux de livraison, le marquage des produits, les dates de péremption et le bon état des emballages.

Dans le cas où les produits font l'objet d'une certification reconnue par le marché, aucun essai n'est nécessaire. Dans le cas contraire le **marché** définit la procédure à suivre.

6.2.2 RÉCEPTION DES PRODUITS PRÊTS À L'EMPLOI

Rappel : il s'agit de **produits industriels** qui sont **prêts à gâcher** (simple ajout d'eau avant le malaxage) ou **prédosés** (simple malaxage des constituants). Certains de ces produits ne bénéficient pas du marquage CE et doivent être considérés comme des **produits fabriqués en centrale ou sur le chantier** et donc être soumis à des **contrôles spécifiques de réception** tels que ceux visés ci-après.

6.2.2.1 Réception des produits de réparation normalisés

6.2.2.1.1 Généralités

Les conditions de réception des produits de réparation relevant des **normes européennes** et du **marquage CE** sont visées par les **normes NF EN 1504-8** (relative au contrôle en usine [CPU]) et **NF EN 1504-10** (relative au contrôle sur le chantier).

Sur le chantier, l'**identification** est réduite à la production d'un **document attestant de la certification des produits**.

Note : les **normes françaises relatives aux produits de réparation de la série NF P 18-8** ont pour la plupart été remplacées par les normes européennes. Cela a été aussi le cas pour le fascicule de documentation FD P 18-802 qui traitait en détail des contrôles de réception et des essais à effectuer !**

Il faut noter que le règlement de la Marque NF produits spéciaux ([NF 030])⁴¹ ne traite que du marquage, mais pas des conditions de réception des produits.

⁴¹ La conformité à une marque est décrite dans le **GUIDE STRES 0**.

Sauf disposition contraire du marché les produits et systèmes bénéficiant du **marquage CE** et d'un **système d'attestation de conformité de niveau 2+ ou d'une EVCP de niveau 2+** sont réputés conformes aux **normes** qui les concernent. Le **marché** peut imposer des **essais d'identification rapide** pour les produits et systèmes relevant du **niveau 4** (se reporter aux différents essais d'identification visés par les normes de la série **NF EN 1504-***). Les autres contrôles de la liste ci-après restent applicables, y compris les **prélèvements conservatoires**.

Dans le cas où les **conditions climatiques** de mise en œuvre des produits sur le chantier diffèrent nettement de celles de la norme, il est nécessaire de faire des essais spécifiques lors de l'**épreuve d'étude**.

Le **marché doit préciser que les contrôles de réception prévus par les normes en vigueur sont étendus aux conditions de transport et à celles de stockage qui ne sont pas visées par les normes.**

> Les contrôles portent sur :

- les conditions de transport (conditions de protection des produits contre la chaleur et/ou le froid. En effet, certains produits peuvent ne pas retrouver leurs performances quand ils ont été soumis à des températures excessives) ;
- l'état des emballages (tout récipient présentant des fuites, ouvert, sans étiquette doit être refusé et immédiatement évacué du chantier) ;
- le poids des produits prédosés ;
- la comparaison du **bon de commande** et du **bordereau de livraison**. La concordance porte également sur les étiquettes, emballages, containers, etc., le tout en conformité avec les documents techniques et contractuels ;
- la **remise d'un document** attestant que le produit bénéficie bien du droit d'usage d'une marque pour les **produits certifiés** et, en particulier, pour le **marquage CE** ;
- la conformité du marquage et, en particulier, les dates de péremption des produits et les classes ou catégories des produits (niveaux de performance) ;
- l'**exécution de prélèvements conservatoires** ;
- les **conditions de stockage** (le local doit être équipé d'un thermomètre à maxima et minima) ;
- la température du local dont la mesure est à renouveler pendant la durée du chantier en fonction de l'évolution des conditions météorologiques (en général la température du local doit rester comprise entre 10 et 25°C). **ATTENTION**, au respect du point éclair pour certains produits ;
- etc.

6.2.2.1.2 Réception des produits relevant des normes françaises de la série NF P 18-8**

Note : cela concerne essentiellement les produits de calage.

Les produits de calage bénéficiant de la **marque NF 030** sont réputés conforme aux normes qui les concernent comme les produits relevant du **marquage CE** et sont réceptionnés dans les mêmes conditions.

Si le **marché** le prévoit, des **essais d'identification** sont à effectuer par un **laboratoire** accepté par le maître d'œuvre. Il est préférable de procéder à ces **essais d'identification** ce qui évite d'avoir à effectuer immédiatement les **essais de vérification des caractères normalisés** à cause de la durée de ces deniers.

Note : il faut se reporter aux normes relatives aux produits et aux normes d'essais qui y sont listées afin de choisir les essais qui peuvent être effectués rapidement sur le chantier ou en laboratoire.

Si les **essais d'identification** ne sont pas satisfaisants, il est procédé à une **analyse chimique complète** et aux **essais spécifiques d'efficacité qui portent sur les caractères normalisés**. Dans un tel cas, les produits ne pourront être utilisés qu'à partir du moment où les résultats des essais seront connus et favorables. Un **POINT D'ARRÊT** est lié aux **essais d'identification**.

6.2.2.1.3 Réception des produits relevant des normes européennes de la série NF EN 1504-**

Le **marché** peut donc prévoir des **essais d'identification** et même des **essais spécifiques d'efficacité**. La seule difficulté provient du fait que chaque norme européenne de produits donne dans un ou plusieurs tableaux une **liste d'exigences d'identification très volumineuse** qui a été établie principalement pour le **contrôle en usine et non sur le chantier**.

Le **tableau** qui suit propose, pour les contrôles sur chantier des **essais d'identification** (identification dite « rapide ») et des **essais spécifiques d'efficacité** qui peuvent être prescrits par le **marché**, soit sur les composants, soit sur les mélanges frais ou durcis.

> D'autres essais peuvent être prescrits pour compléter la liste en fonction :

- **des types de produits et systèmes utilisés.** Par exemple, les systèmes de protection peuvent faire appel à des :
 - polymères silanes et siloxanes (produits d'imprégnation),
 - en solution ou dispersion (peintures),
 - résines époxydes,
 - résines polyuréthannes,
 - résines acryliques,
 - liants hydrauliques modifiés par des polymères ;
- **des conditions d'application ou d'utilisation des produits et systèmes,** qui peuvent être :
 - appliqués en intérieur ou en extérieur, sur une paroi verticale ou en sous-face,
 - soumis aux effets du gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage,
 - soumis aux effets du feu,
 - résistants au glissement et au dérapage...

Rappel important : lorsque les conditions environnementales (humidité, température...) risquent de différer des conditions des essais normalisés, il y a lieu de réaliser des **essais de performances** lors de l'**épreuve d'étude**, voire lors de l'**épreuve de convenance**, en liaison avec le **fabricant**.

Contrôles sur chantier	
Essais d'identification	Normes d'essai
Liants polymères réactifs (P) – Mortiers et bétons : polymères (PC) ou de ciment hydraulique polymère (PCC) ou hydraulique(CC)	
Aspect général et couleur	Conformité à la fiche technique du fabricant et à l'étiquetage.
Contrôle du poids de chaque composant	
Produits à base de polymères (P) (PC) et (PCC)	
Analyse granulométrique des composants secs	NF EN 12192-1
Masse volumique	NF EN 12190 (détermination de la masse volumique et de la résistance à la compression) NF EN ISO 2811-1 à 4 (masse volumique des revêtements)
Durée pratique d'utilisation en pot (DPU) des produits (P) et (PC)	NF P 18-810
Temps de raidissement	NF EN 13294

Contrôles sur chantier	
Essais d'identification	Normes d'essai
Produits à base de liants hydrauliques (CC)	
Analyse granulométrique des composants secs	NF EN 12192-1
Masse volumique	NF EN 12190 (détermination de la masse volumique et de la résistance à la compression)
Masse volumique apparente des mortiers frais	NF EN 1015-6
Temps de raidissement	NF EN 13294
Temps de prise	NF EN 196-1
Contrôles spécifiques d'efficacité	Normes d'essai
Systèmes de protection de surface pour béton (1504-2) cas des revêtements⁴²	
Spectre infra-rouge (cas des polymères à 2 composants)	NF EN 1767
Essais d'arrachement sur le support à traiter ou sur le substrat de référence	NF EN 1542
Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau	NF EN ISO 7783
Mesure de la perméabilité au CO ₂	NF EN 1062-6
Mesure de la perméabilité à l'air in situ	Essai BT CRIS
Mesure de l'absorption capillaire et de la perméabilité à l'eau	NF EN 1062-3
Produits de réparation de surface (1504-3)	
Essais d'arrachement sur le support à traiter ou sur le substrat de référence	NF EN 1542
Résistance en compression	NF EN 12190
Consistance des mortiers frais	NF EN 1015-4
Produits de collage structural (1504-4) (béton durci/béton durci ou béton frais/béton durci ou plaques)	
Spectre infra-rouge (cas des polymères à 2 composants)	NF EN 1767
Mesure de l'adhérence sur support à traiter ou sur substrat de référence (humide si collage béton frais/béton durci)	NF EN 12636
Mesure de la résistance en compression	NF EN 12190
Mesure de la résistance au cisaillement (béton frais/béton durci – béton durci/béton durci)	NF EN 12188
Mesure de la résistance au cisaillement (acier/acier)	NF EN 12615
Aptitude à l'application sur des surfaces verticales ou en sous-face	NF EN 1799 (aptitude à l'emploi)
Aptitude à l'application sur des surfaces horizontales	NF EN 1799 (aptitude à l'emploi)
Produits d'injection (1504-5)	
Spectre infra-rouge (cas des polymères à 2 composants)	NF EN 1767
Temps d'écoulement des produits d'injection (cône de March)	NF EN 14117
Essai d'injectabilité en milieu sec ou non-sec.	NF EN 1771
Mesure de l'adhérence par résistance en traction	NF EN 12618-2
Résistance en traction, allongement et module d'élasticité (Produits P)	ou NF EN 1543 ou NF EN ISO 527-1
Résistance à la compression et masse volumique (produits CC)	NF EN 12190
Produits (PC) de scellement (1504-6)	
Résistance à la compression	NF EN 1290
Essai d'arrachement d'une barre de BA	NF EN 1881
Fluage en traction	NF EN 1544
Produits (PCC et CC) de scellement (1504-6) :	
Résistance à la compression	NF EN 1290
Essai d'arrachement d'une barre de BA	NF EN 1881
Produits (PC) de calage (NF P18-822)	
Aptitude à la mise en place	NF P18-833
Fluage en compression	NF P18-835

⁴² Les imprégnations hydrophobes ou non peuvent être testés par des essais spécifiques.

Contrôles sur chantier	
Contrôles spécifiques d'efficacité	Normes d'essai
Produits (PCC et CC) de calage (NF P18-821)	
Aptitude à la mise en place	NF P18-832
Résistance à la compression	NF EN 1290
Produits de protection contre la corrosion des armatures (1504-7)	
Thixotropie	NF EN 13062
Dureté Shore D (à 7 jours)	NF EN ISO 868

Tableau n° 60 : essais d'identification et contrôles spécifiques d'efficacité

6.2.2.2 Réception de certains produits de réparation

6.2.2.2.1 Généralités

> Il s'agit ici des produits et systèmes utilisés :

- dans les traitements électrochimiques ;
- lors de l'application des inhibiteurs de corrosion à la surface des bétons.

6.2.2.2.2 Réception des produits pour une réalcalinisation ou une extraction des chlorures

Les produits, systèmes et matériels utilisés ne sont pas implantés à demeure dans l'ouvrage traité. **L'entrepreneur** détenteur du procédé propose dans la **procédure d'exécution** la liste et la provenance des matériaux et matériels nécessaires à l'opération. **Le marché** peut prévoir que le contrôle de réception porte simplement sur la conformité de la liste, sachant que les **contrôles d'efficacité** permettent de s'assurer de la performance des fournitures.

Les produits utilisés pour la réparation du béton dégradé, le traitement des armatures corrodées... et l'application finale d'un revêtement de protection relèvent de l'article 6.2.2.1 ci-dessus.

6.2.2.2.3 Réception des produits pour une prévention ou une protection cathodique

Les produits, systèmes et matériels utilisés restent à demeure dans l'ouvrage. Ils doivent donc présenter les qualités requises pour fonctionner pendant toute la durée de vie exigée de l'installation (durée d'utilisation du projet). **L'étude technique** effectuée en amont du lancement de la consultation doit définir les exigences de performances nécessaires. **Le marché** reprend ces exigences, qui doivent être adaptées aux propositions de l'entrepreneur lors de la signature du marché, et fixe les **essais et contrôles à effectuer lors de la réception des produits, matériaux et matériels et au cours de l'exploitation**.

Les produits utilisés pour la réparation du béton dégradé, le traitement des armatures corrodées... et l'enrobage des anodes relèvent de l'article 6.2.2.1 ci-dessus.

6.2.2.2.4 Réception des produits inhibiteurs de corrosion sur béton

Le produit approvisionné sur le chantier doit être conforme aux caractéristiques du produit figurant sur la **fiche technique du fabricant**. **Le marché** prévoit un **prélèvement conservatoire**, voire une analyse chimique rapide.

Il faut noter que l'épreuve de convenance permet de s'assurer que la quantité de produit ayant pénétré dans le béton à proximité des armatures est au moins égale à la **concentration minimale** des spécifications du **fabricant**.

6.2.3 RÉCEPTION DES PRODUITS LIVRÉS SUR LE CHANTIER

Note : il s'agit des produits autres que ceux visés à l'article 6.2.2 ci-dessus.

> **Cette réception concerne :**

- les produits industriels ne relevant pas du **marquage CE** (par exemple, certains mélanges en sacs, big-bags... de mortiers ou bétons destinés à la projection) ;
- les produits fabriqués en centrale (bétons et mortiers) ;
- les matériaux de construction.

6.2.3.1 Cas des produits industriels ne relevant du marquage CE

De tels produits industriels peuvent être utilisés en **réparation** mais leur utilisation est subordonnée aux résultats d'une **épreuve d'étude**. Cette épreuve permet de vérifier qu'ils satisfont aux exigences des normes en vigueur (normes de la série **NF EN 1504-**-...**) et à celles du **marché**.

Leur réception sur le chantier peut se faire dans les mêmes conditions que les produits bénéficiant du marquage CE avec **essais d'identification**, voire plus si nécessaire (se reporter à l'article 6.2.2.1 ci-dessus).

6.2.3.2 Cas des produits fabriqués en centrale et des matériaux de construction

> **Cas des produits de réparation fabriqués en centrale :**

Ces produits ont obligatoirement fait l'objet d'une épreuve d'étude pour pouvoir être utilisés.

Leur réception sur le chantier peut se faire dans les mêmes conditions que les produits bénéficiant du **marquage CE** avec **essais d'identification**, voire plus si nécessaire (se reporter à l'article 6.2.2.1 ci-dessus).

> **Cas des autres produits et matériaux traditionnels :**

Ces produits, systèmes et matériaux traditionnels livrés sur un chantier de réparation et/ou renforcement sont des bétons ou des mortiers fabriqués en centrale, qui ne sont pas des produits de réparation, des ciments, des granulats, des adjuvants, des armatures passives ou actives... Tous ces produits et matériaux relèvent **de normes** et de documents d'exécution comme les **normes NF EN 13670/CN et NF DTU 21** ou le **fascicule 65 du CCTG**.

Le marché peut donc s'appuyer sur ces **documents** en les complétant suivant les spécificités des travaux à exécuter pour fixer les **conditions de réception**.

Note : se reporter aux CCTP-types existants.

6.2.4 RÉCEPTION DES PRODUITS FABRIQUÉS SUR LE CHANTIER

> Cas des produits de réparation fabriqués sur chantier :

Lorsque qu'il s'agit de **produits ou systèmes** destinés au traitement du béton dégradé, le **marché** impose que les contrôles prévus pour les produits prêts à l'emploi et normalisés ou certifiés de l'article 6.2.2 ci-dessus soient applicables, après adaptation, aux **différents composants** des **produits fabriqués sur le chantier** et suivant leur nature.

En outre, il impose de procéder à des **contrôles spécifiques** permettant de s'assurer que les produits, ainsi fabriqués à l'état de mélange ou une fois durcis, répondent aux **exigences de performances**, soit de certaines des normes de la série P18-8** encore en vigueur (cas des produits de calages), soit des normes **NF EN 1504-2 à NF EN 1504-7** (produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton).

> Cas des autres produits :

Le **marché** fixe également les conditions de réception des **produits fabriqués sur le chantier** qui, par leur nature ou leur usage, n'appartiennent pas à la famille des produits et systèmes de traitement du béton dégradé, comme par exemple :

- un béton nécessaire à la réalisation d'un massif d'ancrage ;
- un coulis spécial destiné à la réinjection de conduits de précontrainte (se reporter au **guide FABEM 8**).

Leur **réception** se fait dans les mêmes conditions que les **produits et matériaux traditionnels** visés à l'article 6.2.3.2 ci-dessus.

Rappel : les **épreuves d'étude** sont traitées dans l'article 4.2.8 ci-dessus

AVERTISSEMENT, les essais qui sont effectués au cours d'une **épreuve de convenance** étant, le plus souvent, identiques à ceux effectués lors des **contrôles d'exécution**, le **présent GUIDE** a pris le parti de faire les renvois nécessaires sans développer dans le détail l'**épreuve de convenance** relative à chaque méthode.

6.3.1 GÉNÉRALITÉS

La norme **NF P 95-101** rappelle que le **marché** fixe les éventuelles **épreuves de convenance** à réaliser pour vérifier que le choix des produits, des moyens de fabrication et de mise en œuvre ainsi que la qualification du personnel du chantier permettent d'atteindre les exigences spécifiées.

La **notion d'épreuve de convenance** n'apparaît pas dans les **normes européennes** relatives à l'**exécution de travaux** bien que ces normes traitent des **contrôles d'exécution**. À titre d'exemple, c'est le cas des normes :

- **NF EN 13670/CN** : Exécution des structures en béton (annexe nationale à la norme NF EN 13670 de 2013) ;
- **NF EN 1504-10** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton ;
- **NF EN 14487-2** : Béton projeté : Partie 2 : Exécution ;
- Etc.

Les **nouvelles normes françaises de la série NF P 95-1** imposent toutes des épreuves de convenance**.

C'est le cas de la norme homologuée **NF P 95-101**, qui rappelle que le **marché** fixe les éventuelles **épreuves de convenance** à réaliser pour vérifier que le choix des produits, des moyens de fabrication et de mise en œuvre ainsi que la qualification du personnel du chantier permettent d'atteindre les exigences spécifiées.

Cette norme **NF P 95-101** impose deux **épreuves de convenance**, l'une sur l'efficacité de la préparation du support béton et des armatures et l'autre sur la préparation et la mise en œuvre des produits de réparation.

Pour résumer, l'**épreuve de convenance** permet ainsi de valider la **procédure d'exécution des travaux**. Chaque **épreuve de convenance** est normalement associée à un **POINT D'ARRÊT** de l'exécution.

Les **épreuves de convenance** développées ci-après ont été élaborées à partir de l'ossature de ces différents documents et s'appliquent aux différentes **méthodes** « de restauration du béton et/ou de renforcement structural et de restauration ou de conservation de la passivité des armatures » développées dans le **présent GUIDE**.

Le **marché** détaille la **consistance de l'épreuve de convenance de chaque méthode** et fixe ce qui relève des différents contrôles **interne** et **externe**, voire **extérieur** si ce dernier a une incidence sur le déroulement du chantier.

Les stipulations du **marché** sont reprises et complétées, si nécessaire, dans le **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ)**, les **procédures et les documents de suivi de l'exécution**.

Toute épreuve de convenance se déroule normalement en présence du **maître d'œuvre** et/ou de son représentant, lesquels assurent la part des opérations liées au contrôle extérieur. L'entrepreneur effectue son contrôle interne défini par le PAQ et les stipulations du marché.

Note importante : le **marché de maîtrise d'œuvre** se doit de fixer les conditions d'intervention du **maître d'œuvre** : présence sur le chantier, opérations de contrôle extérieur à effectuer (types et quantités), vérification des opérations du contrôle interne, levées des points d'arrêt...

La réalisation des travaux ne peut commencer tant que les **épreuves de convenueance** ne sont pas jugées satisfaisantes. Elles font partie du **POINT D'ARRÊT** dont la levée par le **maître d'œuvre** conditionne l'exécution des travaux.

Note : l'expérience montre que s'affranchir de résultats non satisfaisants à une épreuve de convenueance et exécuter les travaux pour « être efficace et ne pas bloquer le chantier » conduit souvent à un arrêt des travaux et des contentieux.

L'ensemble des constatations effectuées lors des **épreuves de convenueance** doit faire l'objet d'une **synthèse**, qui doit permettre de conclure sur la validité ou non des épreuves et sur les modifications éventuelles à apporter au **Plan d'Assurance de la Qualité** (procédures et document de suivi). Il appartient à l'entrepreneur de rédiger cette synthèse et de la remettre au **maître d'œuvre** qui, après examen, lève ou non le **POINT D'ARRÊT** relatif à l'exécution des travaux.

Chaque **épreuve de convenueance** comporte généralement **plusieurs opérations combinées** étalées dans le temps pendant lesquelles sont effectuées des contrôles :

1. la **préparation de l'opération** (les contrôles portent sur les documents d'exécution, les matériaux, les matériels et le personnel) ;
2. la **préparation des produits nécessaires aux travaux** (les contrôles portent sur la préparation des produits nécessaires pour la préparation des supports ou sur celle des produits à appliquer sur le support béton...) ;
3. la **réalisation des travaux** (les contrôles portent sur la préparation des supports ou sur la mise en œuvre des produits sur le support béton...) ;
4. l'**après réalisation de l'opération** (contrôles après travaux et rédaction de la synthèse des contrôles effectués).

Pour la majeure partie « **des méthodes de réparation et/ou de renforcement ou celles de restauration ou de préservation de la passivité des armatures** », les deux **épreuves de convenueance** essentielles sont les suivantes :

- la préparation du support béton et des armatures ;
- la préparation et la mise en œuvre des produits.

AVERTISSEMENT, les essais qui sont effectués au cours d'une **épreuve de convenueance** étant, le plus souvent, identiques à ceux effectués lors des **contrôles d'exécution**, le **présent GUIDE** a pris le parti de faire les renvois nécessaires sans développer dans le détail l'**épreuve de convenueance** relative à chaque méthode.

Note : pour des méthodes de réparation comme l'ajout de forces, la réinjection des conduits de précontrainte, il peut y avoir plusieurs épreuves de convenueance spécifiques. Ces diverses épreuves de convenueance sont développées dans le guide **FABEM 8**. D'autres le sont dans les différents **GUIDES** du **STRRES**.

Ces deux opérations de convenueance sont nettement séparées dans le présent article mais, sur le chantier, si cela est nécessaire, elles peuvent être enchaînées. Dans ce cas, les résultats de ces deux épreuves doivent être positifs pour obtenir la levée du **POINT D'ARRÊT**.

Dans le cas où l'on souhaite regrouper les **deux opérations de convenueance susvisées**, les contrôles des opérations combinées se déroulent pendant les 5 phases suivantes :

1. la préparation de l'opération ;
2. la préparation du support béton et des armatures ;
3. la préparation des produits à mettre en œuvre sur le support béton ;
4. la mise en œuvre des produits sur le support béton ;
5. l'après réalisation de l'opération.

6.3.2 ÉPREUVE DE CONVENANCE DE PRÉPARATION DU SUPPORT BÉTON ET DES ARMATURES

La consistance de cette **épreuve de convenueance** est normalement fixée par le **marché**, qui complète, si nécessaire, les dispositions du **présent GUIDE**. Elle est, en final, mise au point dans la **procédure de réparation**. Elle fixe, en particulier, les **types** et le **nombre des essais** à effectuer.

L'épreuve concerne le **béton support et les armatures**.

L'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les **surfaces de référence** sur lesquelles sont appliquées les techniques de préparation du support béton et des armatures.

Dans le cas des **autres méthodes de réparation** visées dans le **présent GUIDE**, la **consistance de chacune des épreuves de convenueance de préparation du support** figure déjà dans les normes de la série **NF P95-1****, voire dans les autres **guides de la collection [FABEM]**. Afin d'éviter des redites, le lecteur est invité à se reporter à ces normes et guides. **Les méthodes concernées, les normes et les guides correspondants sont listés dans le tableau :**

Méthodes de réparation	N° des articles et GUIDES du STRRES
Mise en œuvre de produits ou systèmes par projection pour la réparation de surface du béton ou pour des réparations structurales ou non structurales (produit mis en œuvre en forte épaisseur)	6.4.2.4.2 - 6.4.2.4.3 NF P95-102-1 et FABEM 5
Injection de l'interface entre le produit de réparation et/ou de renforcement et le béton de la structure	6.4.2.4.5 – NF P95-103 et FABEM 3
Injection de fissures ou de vides du béton	6.4.2.4.6 – NF P95-103 et FABEM 3
Scellement d'armatures	6.4.2.4.7 – NF P95-101, NF P95-102-1 et FABEM 7
Collage d'armatures passives extérieures au béton (plaques et tissus)	6.4.2.4.10 – NF P95-105 et FABEM 7
Mise en œuvre de forces par précontrainte additionnelle	6.4.2.4.11 – NF P95-104 et FABEM 8
Mise en œuvre de forces par déformations imposées	6.4.2.4.12 - FABEM 8
Réinjection des conduits des armatures de précontrainte	6.4.2.5.7 - FABEM 8
Application d'imprégnations hydrofuges ou non ou de revêtement en complément d'une des autres	NF P95-103 et FABEM 4
Calfeutrement ou le pontage des fissures	NF P95-103 et FABEM 2

Tableau n° 61 : correspondance entre les méthodes, les normes NF P95-1** et les GUIDES du STRRES

Les contrôles à effectuer au cours de l'épreuve de convenue de **préparation du support** pour les méthodes non traitées par les autres guides sont visés dans les articles ci-après. Il s'agit des articles relatifs aux **contrôles d'exécution**. Les articles sont listés dans le tableau ci-dessous.

Méthodes de réparation	N° des articles
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour des réparations de surface des bétons (sauf cas de mise en place par projection)	6.4.2.4.2
Mise en œuvre de produits et systèmes pour des réparations structurales et non structurales (forte épaisseur) (sauf cas de mise en place par projection)	6.4.2.4.3
Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage (béton durci sur béton durci ou béton frais sur béton durci)	6.4.2.4.4
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour le calage d'éléments	6.4.2.4.8
Mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton	6.4.2.4.9
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour : - augmenter le recouvrement des armatures - remplacer le béton carbonaté ou pollué - réalcaliniser le béton carbonaté	6.4.2.5.2
Mise en œuvre de traitements électrochimiques	6.4.2.5.3
Mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur les armatures	6.4.2.5.4
Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface des bétons	6.4.2.5.5

Tableau n° 62 : articles relatifs aux contrôles d'exécution concernant certaines des méthodes développées dans le présent GUIDE

6.3.3 ÉPREUVE DE CONVENANCE DE PRÉPARATION ET DE MISE EN ŒUVRE DES PRODUITS

La consistance de cette **épreuve de convenue** est normalement fixée par le **marché**, qui complète, si nécessaire, les dispositions du **présent GUIDE**. Elle est, en final, mise au point dans la **procédure de réparation**. Elle fixe, en particulier, les **types** et le **nombre des essais** à effectuer.

L'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les **surfaces de référence** sur lesquelles sont appliquées les produits ou systèmes.

Rappel : les **essais** qui sont effectués au cours d'une **épreuve de convenue** étant généralement identiques à ceux effectués lors des **contrôles d'exécution**, le **présent GUIDE** a pris le parti de faire les renvois nécessaires sans développer dans le détail l'**épreuve de convenue** relative à chaque **méthode**.

Pour les méthodes de réparation visées dans le tableau ci-après (identique au Tableau n° 61 ci-dessus), la consistance de l'**épreuve de convenue** est donnée dans les **normes de la série NF P95-1**** et les **GUIDES** du **STRRES n°2 à 8** de la famille **[FABEM]**.

Note : dans tous les guides **FABEM** afin d'éviter des répétitions, les **essais à effectuer** lors de l'**épreuve de convenue** sont identiques à ceux effectués lors des **contrôles d'exécution** relatifs aux 4 phases. Au contraire, dans les **normes NF P95-1****, le contenu des **épreuves de convenue** et celui des **contrôles d'exécution** est détaillé.

Méthodes de réparation	N° des articles			Normes NF P95-1** et GUIDES du STRRES
	Préparation de l'opération	Préparation des produits	Réalisation de l'opération et l'après opération	
Projection de produits ou systèmes (mortiers et bétons)	6.4.3.2	6.4.3.3	6.4.3.4.2	NF P95-102-1 et FABEM 5
			6.4.3.4.3	
Injection de l'interface entre le produit de réparation et/ou de renforcement et le béton de la structure			6.4.3.4.5	NF P95-103 et FABEM 3
Injection de fissures ou de vides du béton			6.4.3.4.6	NF P95-103 et FABEM 3
Scellement d'armatures			6.4.3.4.7	NF P95-101, NF P95-103 et FABEM 7
Collage d'armatures passives extérieures au béton (plaques et tissus)			6.4.3.4.10	NF P95-105 et FABEM 7
Mise en œuvre de forces par précontrainte additionnelle			6.4.3.4.11	NF P95-104 et FABEM 8
Mise en œuvre de forces par déformations imposées			6.4.3.4.11	FABEM 8
Réinjection des conduits des armatures de précontrainte			0	FABEM 8
Application d'imprégnations hydrofuges ou non ou de revêtement en complément d'une des autres	-	-	-	NF P95-103 et FABEM 4
Calfeutrement ou le pontage des fissures	-	-	-	NF P95-103 et FABEM 2

Tableau n° 63 : correspondance entre les méthodes de réparation, les normes NF P95-1** et les guides du STRRES

Pour chacune des autres méthodes de réparation, le tableau ci-après donne la liste des articles sur les contrôles d'exécution relatifs aux différentes phases. Il s'agit des contrôles à exécuter pour valider l'épreuve de convenance correspondante.

Méthodes de réparation	N° des articles		
	Préparation de l'opération	Préparation des produits	Réalisation de l'opération et l'après opération
Mise en œuvre de produits ou systèmes en pour des réparations de surface des bétons (sauf par projection)	6.4.3.2	6.4.3.3	6.4.3.4.2
Mise en œuvre de produits et systèmes pour des réparations structurales et non structurales (forte épaisseur) (sauf par projection)			6.4.3.4.3
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour calage d'éléments			6.4.3.4.8
Mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton			6.4.3.4.9
Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage (béton durci sur béton durci ou béton frais sur béton durci)			

Méthodes de réparation	N° des articles		
	Préparation de l'opération	Préparation des produits	Réalisation de l'opération et l'après opération
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour : - augmenter le recouvrement des armatures - remplacer le béton carbonaté ou pollué - réalcaliniser le béton carbonaté	6.4.3.2	6.4.3.3	6.4.3.5.1
Mise en œuvre de traitements électrochimiques			6.4.3.5.2
Mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur les armatures			6.4.3.5.3
Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface des bétons			6.4.3.5.4

Tableau n° 64 : articles traitant des contrôles d'autres méthodes développées dans le présent guide

6.4.1 GÉNÉRALITÉS

Une grande partie des contrôles d'exécution à effectuer lors de l'exécution des « méthodes de restauration du béton et/ou de renforcement structural et des méthodes de restauration ou de conservation de la passivité des armatures » et plus particulièrement des contrôles d'exécution concernant les méthodes classiques traitant du remplacement des bétons pollués ou carbonatés et du traitement des armatures corrodées sont traités par les normes suivantes :

- **NF EN 1504-10** qui détaille, pour chaque principe de protection et de réparation (fonction) de P1 à P10, la préparation, la réalisation et le contrôle des méthodes de réparation associées ; **NF P95-101** relative aux réparations de surface des bétons ;
- **NF P95-102-1** relative aux réparations par projection de mortiers ou de bétons.

Les trois tableaux qui suivent listent les contrôles et vérifications à effectuer dans tous les cas ou dans les cas fixés par les clauses du marché.

> 1. Cas de la norme NF EN 1504-10 :

Cette norme comporte une partie normative constituée de plusieurs chapitres parmi lesquels les trois suivants recourent les méthodes de réparation classiques traitées par le présent GUIDE :

- **chapitre 7** : préparation du support (béton et armatures) ;
- **chapitre 8** : application des produits et systèmes ;
- **chapitre 9** : contrôle de la qualité.

Cette norme traite en effet des méthodes classiques relatives au remplacement des bétons pollués ou carbonatés et du traitement des armatures corrodées. Il s'agit des méthodes relevant des principes P3 (restauration du béton), P4 (renforcement structural) et P7 (préservation et restauration de la passivité).

Elle traite également des autres méthodes de réparation relevant des autres principes (P1, P2, P5, P6, P8, P9, P10 et P11) à savoir : de la mise en œuvre des injections, du collage des plaques, des revêtements de protection du béton, de la réalcalinisation... en renvoyant, pour certaines méthodes de réparation, à des normes et documents à caractère normatifs existants. Cependant, certaines méthodes de réparation comme la précontrainte additionnelle ne sont pas traitées pas plus que par d'autres textes européens (se reporter aux documents français suivants : la norme NF P95-104 et le guide FABEM 8).

Cette norme comporte quatre annexes informatives qui complètent la partie normative, laquelle ne fixe que des exigences générales. Il s'agit de :

- **l'annexe A** : qui complète de façon détaillée et relativement opérationnelle, en particulier, les chapitres 7, 8 et 9 ;
- **l'annexe B** : qui traite de la vérification de la propreté des surfaces en béton avant la mise en place d'une couche supplémentaire de béton ou mortier ;
- **l'annexe C** : qui traite de la vérification de la rugosité de surface avant la mise en place d'une couche supplémentaire de béton ou mortier au moyen d'un profilomètre ;
- **l'annexe D** : qui traite de la vérification de la microfissuration des surfaces en béton avant la mise en place d'une couche supplémentaire de béton ou mortier par détermination la longueur totale des microfissures sur des carottes prélevées dans une zone définie avec l'aide d'un microscope.

Le tableau ci-après, comme les deux tableaux ci-après ne traite que les méthodes dites classiques.

Références		Liste des exigences et contrôles
Articles concernant la préparation du support béton et des armatures		
Exigences sur l'élimination du béton pollué, carbonaté et dégradé	7.2	- pour chaque technique utilisable (nettoyage, repiquage, limitation de la microfissuration et enlèvement du béton) sont données les exigences à satisfaire mais sans rentrer dans les détails
Exigences sur la préparation des armatures en place dégagées du béton	7.3	- la technique à mettre en œuvre doit satisfaire à des exigences générales (enlèvement de la rouille, détournage...) - en présence d'un béton pollué par les chlorures un lavage à l'eau (pression ≤ 18 MPa, voire jusqu'à 70 MPa si la quantité d'eau requise est limitée) - le niveau de décapage doit atteindre le niveau Sa 2,5 (DS 2,5) si les armatures doivent recevoir un revêtement de protection contre la corrosion non actif (méthode de réparation 11.2)
Exigences avant et pendant la mise en œuvre des produits de réparation en fonction de la nature de ces produits	8.1- 8.2 et 8.3	- les techniques à mettre en œuvre doivent satisfaire les dispositions des normes de référence auxquelles les articles renvoient (NF EN 1504-3 , NF EN 14487-1 et 2 , NF EN 206 , NF EN 13670 ...)
Articles concernant les contrôles d'exécution		
Exigences des dispositions générales	9.1 et 9.2	- les classe d'exécution (niveaux 1, 2 et 3) sont citées avec un renvoi à l'article A.5.2 (annexe A) qui donne dans le tableau A 2 et dans le cadre des trois domaines suivants : réparations non-structurales ou structurales et renforcements des exemples d'opérations avec le niveau à imposer <i>Il est préférable de se reporter aux normes de la série NF P95-1** plus explicites que le tableau A 2</i> Rappel : si un contrôle extérieur est à exiger, le niveau 3 doit être retenu y compris pour des réparations non structurales !
Exigences pour le contrôle de la qualité	9.3	- le tableau 5 de la norme détaille pour les différentes méthodes de réparation ou renforcement les essais et observations à effectuer. Ces contrôles sont à effectuer, soit dans tous les cas, soit dans certains cas. Les cas sont identifiés par les trois puces suivantes : ■ pour tous les usages prévus □ pour certains usages prévus ◆ pour des applications spéciales
Articles concernant les contrôles du support béton et la préparation des armatures (tableau 5 de l'article 9.3)		
Contrôles du support béton avant sa préparation		- □ résistance en compression du béton (NF EN 12504-1 : essais sur carottes prélevées) (NF EN 12504-2 : scléromètre) et (NF EN 12504-3 : arrachement d'une tige scellée). (NF EN 13791 et NF EN 13791/CN : interprétation des mesures sur éprouvettes). - ◆ vibrations de la structure (accéléromètre) - ◆ profondeur de carbonatation (NF EN 14630), teneur en chlorures (NF EN 14629) et autres contaminants (laboratoire)
Contrôles du support béton après sa préparation	9.3	- ■ absence de décollement par sondage au marteau - ■ examen visuel de la propreté ou essai d'essuyage - □ rugosité du support (examen visuel, méthode du tas de sable et profilomètre (Normes : NF EN 1766 : préparation des éprouvettes d'essais de produits de réparation – mesure de la rugosité de surface au tas de sable) (NF EN ISO 3274 : appareils de contact de mesure de la rugosité) et NF EN ISO 4288 : règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface avec des appareils à contact) + Annexe C de la norme) - le contrôle de la rugosité peut faire appel à des plaquettes étalon (surface profile chip set IRCI 3732). <i>Ne figure pas dans le tableau 5 dans la colonne ajout de mortier ou béton</i> - importance de la microfissuration du support tout particulièrement dans le cas d'utilisation pour la préparation du support d'outils à percussion (marteaux-piqueurs...). <i>Ne figure pas dans le tableau 5 dans la colonne ajout de mortier ou béton – Cf. l'annexe D de la norme</i> - □ résistance superficielle à la traction du béton (norme NF EN 1542). La norme explicite la procédure d'interprétation des essais - ◆ résistivité électrique (cas de la protection cathodique...)

Références		Liste des exigences et contrôles
Articles concernant les contrôles du support béton et la préparation des armatures (tableau 5 de l'article 9.3)		
Contrôles de la préparation des armatures existantes	9.3	<ul style="list-style-type: none"> - <input type="checkbox"/> corrosion des armatures existantes - <input checked="" type="checkbox"/> mesure du diamètre des armatures corrodées avec réduction de section - <input checked="" type="checkbox"/> propreté (absence d'oxydes friable et non adhérent, de débris adhérents, de poussière, d'huile...) - préparation au degré DS 2 ou DS 2,5 (cas de la mise en place d'un revêtement sur les armatures) – <i>Ne figure pas dans le tableau 5 dans la colonne ajout de mortier ou béton</i>
Article concernant les contrôles de la réception des produits et systèmes		
Contrôle de réception des produits et systèmes	9.3	<ul style="list-style-type: none"> - <input checked="" type="checkbox"/> identification
Article concernant les contrôles de la préparation des produits avant leur mise en œuvre		
Contrôles de préparation des produits avant leur mise en œuvre	/	<ul style="list-style-type: none"> - <input checked="" type="checkbox"/> consistance du mortier ou du béton – Normes NF EN 12350-1 et 5, NF EN 13395-1 à 4 suivant le produit (béton, mortier, coulis) et la technique de mise en œuvre - teneur en air du béton frais (Norme NF EN 12350-7)
Article concernant les contrôles avant la mise en œuvre des produits		
Contrôles avant mise en œuvre des produits	9.3	<ul style="list-style-type: none"> - <input checked="" type="checkbox"/> température du support, - <input checked="" type="checkbox"/> température ambiante, - humidité atmosphérique et risque de condensation (point de rosée). <i>Ne figure pas dans le tableau 5 dans la colonne ajout de mortier ou béton</i> - <input checked="" type="checkbox"/> précipitations (prévisions météorologiques)
Article concernant les contrôles lors de la mise en œuvre des produits (état frais)		
Contrôles de mise en œuvre des produits	9.3	<ul style="list-style-type: none"> - respect de l'épaisseur du matériau mis en œuvre et de celui des enrobages (contrôle sur produit frais). <i>Ne figure pas dans le tableau 5 dans la colonne ajout de mortier ou béton</i> - respect de la cure pour les produits CC et PCC. <i>Ne figure pas dans le tableau 5 dans la colonne ajout de mortier ou béton</i>
Article concernant les contrôles après la mise en œuvre des produits (état durci)		
Contrôles après mise en œuvre des produits	9.3	<ul style="list-style-type: none"> - <input type="checkbox"/> respect de l'épaisseur du matériau mis en œuvre (Norme NF EN 12504-1 : prélèvement de carottes pour essai de compression), (NF EN 13791 et NF EN 13791/CN : interprétation des mesures sur éprouvettes). - <input type="checkbox"/> respect des enrobages (profomètre, radar) - <input type="checkbox"/> résistance à la compression – cas des bétons (NF EN 12390-1 à 3 : essais sur éprouvettes coulées dans des moules) – cas des bétons et mortiers (NF EN 12504-1 : essais de carottes prélevées in situ) et (NF EN 13791 et NF EN 13791/CN : interprétation des mesures sur éprouvettes) - cas des mortiers de réparation (NF EN 12190) – scléromètre (NF EN 12504-2) - <input type="checkbox"/> absence de décollement par sondage au marteau - <input checked="" type="checkbox"/> résistivité électrique (cas de la protection cathodique...) - <input type="checkbox"/> perméabilité à l'eau liquide (NF EN 1062-3) - <input type="checkbox"/> essai d'arrachement par traction directe suivant l'épaisseur du produit (norme NF EN 1542 : jusqu'à 50 mm et norme NF EN 14488-4/IN1 / +A1 : au-delà de 50 mm) - <input type="checkbox"/> masse volumique du béton durci saturé d'eau (NF EN 12190-7) - <input type="checkbox"/> état de fissuration du produit de réparation sous les effets des retraits (examen visuel, jauges mécaniques...) - <input type="checkbox"/> présence de vide dans ou derrière le matériau de réparation (NF EN 12504-1 : prélèvement de carottes), (NF EN 13791 et NF EN 13791/CN Interprétation des mesures sur éprouvettes) et (NF EN 12504-4 : auscultation dynamique), voire radiographie - <input type="checkbox"/> couleurs et texture des surfaces finies (comparaison avec des surfaces de référence)

Tableau n° 65 : tableau extrait de la norme NF N 1504-10 – Cas des méthodes de réparation avec application de mortier ou de béton

Note : l'adaptation de la norme NF EN 13791/CN à la norme européenne d'août 2019 est en cours de rédaction

C'est au **marché** de fixer les **essais et observations** à effectuer et leur **importance**, sachant que conformément à la légende ci-dessous, certains contrôles sont d'application obligatoire et d'autres non et ce pour :

- tous les usages prévus ;
- certains usages prévus ;
- ◆ des applications spéciales.

> **L'annexe informative A 2 (méthodes de protection et de réparation) complète la partie normative de la norme :**

- **en passant en revue certaines des méthodes de réparation** (par exemple : la transformation de fissures en joints, l'application d'un revêtement de protection sur les armatures, la mise en place d'inhibiteur à la surface du béton...);
- **en complétant les techniques de préparation du béton** (par exemple : le respect d'un angle compris entre 90 et 135° ± 5° pour les bords d'une zone d'enlèvement de béton, le recours à l'eau sous pression...);
- **en complétant les techniques de préparation des armatures béton** (par exemple : le détournage, le niveau de décapage...);
- **en complétant les techniques de mise en œuvre des produits de réparation. Par exemple :**
 - l'obtention d'une bonne adhérence entre le produit de réparation et le support, l'utilisation d'un produit d'accrochage,
 - les applications manuelles, mécaniques [projection] par coulage dans des coffrages),
 - la cure après la mise en œuvre ;
 - en complétant les techniques de protection des armatures contre la corrosion ainsi que l'ajout et le remplacement d'armatures.

> **L'annexe informative A 5 (contrôle de la qualité) complète la partie normative de la norme. Elle fournit :**

- des indications sur les paramètres minimaux et maximaux à considérer comme acceptables pour les essais des caractéristiques de performances (par exemple : température du support, adhérence des produits de réparation...),
- la description des essais de contrôle de la qualité en complément du Tableau n° 65 susvisé :
 - essai et observation n°1 : sondages au marteau,
 - essai et observation n°2 : propreté,
 - essai et observation n°4 : rugosité,
 - essai et observation n°5 : résistance superficielle à la traction du support,
 - essai et observation n°8 : vibrations de la structure par exemple sous le trafic routier...
 - essai et observation n°9 : teneur en eau du support,
 - essai et observation n°10 : température du support,
 - essai et observation n°11 : essai de carbonatation,
 - essai et observation n°12 : teneur en chlorures,
 - essais et observations n°13 et 14 : pénétration d'autre contaminants,
 - essai et observation n°15 : résistivité électrique,
 - essai et observation n°16 : propreté des armatures,
 - essai et observation n°17 : dimensions des armatures existantes,
 - essai et observation n°18 : corrosion des armatures existantes,
 - essai et observation n°20 : identité (marquage, étiquetage, certificat...),
 - essai et observation n°21 : température ambiante,

- essai et observation n°22 : humidité ambiante,
- essai et observation n°23 : précipitations (pluie, neige, rosée, embruns),
- essai et observation n°24 : résistance au vent (anémomètre),
- essai et observation n°25 : point de rosée (donné dans un tableau en fonction de l'humidité atmosphérique et de la température du support),
- essai et observation n°27 : consistance du béton ou du mortier,
- essai et observation n°28 : teneur en air du béton frais,
- essai et observation n°32 : absorption d'eau,
- essai et observation n°34 : épaisseur du matériau de réparation ou de recouvrement,
- essai et observation n°35 : adhérence du matériau de réparation,
- essai et observation n°36 : résistance à la compression,
- essai et observation n°37 : masse volumique du mortier et du béton durcis,
- essai et observation n°38 : fissures de retrait dans le matériau de réparation,
- essai et observation n°39 : présence de fissures et de vides dans le matériau de réparation,
- essai et observation n°40 : position des armatures,
- essai et observation n°41 : adhérence des armatures,
- essai et observation n°43 : essai de charge après réparation ou renforcement,
- essai et observation n°45 : couleur et texture de la surface finie et de la surface d'origine,
- essai et observation n°46 : microfissures.

> 2. Cas de la norme NF P95-101 :

Bien que cette norme ne concerne que les réparations de surface des bétons (produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs), elle est applicable aux **réparations structurales et non structurales et aux renforcements** à condition d'y ajouter les **contrôles complémentaires indispensables** concernant les étalements, l'ajout et le scellement d'armatures de BA, l'injection de fissures, les reprises de bétonnage, l'ajout d'armatures en matériaux composites collées, l'ajout de forces par précontrainte...

Cette norme s'appuie sur la norme **NF EN 1504-10** dont elle facilite l'application et qu'elle complète.

Références	Liste des exigences et contrôles	
Articles concernant les techniques de mise en œuvre de la préparation du support béton et des armatures à l'exécution de la projection		
Exigences générales	6.1	Dispositions générales, accès et échafaudage, contraintes diverses et protection
Exigences sur la préparation des supports	6.2	Consulter les articles ci-dessous
Exigences sur l'élimination des bétons dégradés et/ou pollués ou carbonatés	6.2.1	- méthodes de repiquage (< 1,5 cm) et de purge (> 1,5 cm) voir le tableau
Exigences sur la préparation des armatures en place dégagées	6.2.2	- détournement des armatures – géométrie des surfaces de reprise – enlèvement de la rouille
Exigences sur le nettoyage des supports et des armatures apparentes	6.2.3	- méthodes de nettoyage à mettre en œuvre, (tableau)
Exigences communes sur la qualité du support à obtenir après préparation	6.2.4	- exigences communes – exigences liées au respect d'une cohésion minimale du béton support de 1,5 MPa conformément à la norme NF EN 1542
Exigences sur la mise en œuvre des produits et systèmes	6.3	Consulter les articles ci-dessous
Exigences sur les conditions de transport et de stockage	6.3.1	- respect des prescriptions de la fiche technique du produit pendant le transport, la manutention et le stockage

Références		Liste des exigences et contrôles
Articles concernant les techniques de mise en œuvre de la préparation du support béton et des armatures à l'exécution de la projection		
Exigences sur la préparation des produits	6.3.2	<ul style="list-style-type: none"> - cas des produits fabriqués sur le chantier (CC ou PCC) - cas des produits fabriqués en centrale (CC) - cas des produits industriels prêts à gâcher CC ou PCC - cas des produits industriels prédosés (PC ou PCC)
Exigences sur la mise en œuvre proprement dite des produits	6.3.3	<ul style="list-style-type: none"> - prise en compte des conditions climatiques, en particulier la température - respect des conditions d'application définies suite à l'épreuve de convenance - respect du temps d'utilisation du produit - respect de la cure sauf produits PC - cas d'une application manuelle (produit d'accrochage éventuel, épaisseur des couches, nombre de passes successives, finition) - cas d'une application par coulage (coffrages, vibration sauf BAP, résistance minimale avant décoffrage, cure) - cas d'une application par projection (cf. les normes NF P 95-102-1 et NF EN 14487-1 et 2)
Articles concernant les épreuves d'étude et de convenance et les contrôles d'exécution		
Exigences des dispositions générales	7	<ul style="list-style-type: none"> - Cet article traite de l'épreuve d'étude, de la réception des produits, de l'épreuve de convenance, du contrôle d'exécution des travaux et de la réception des travaux - la classe d'exécution est fixée par le marché (classe 2 ou 3), attention, seul le niveau 3 permet le contrôle extérieur (se reporter aux normes NF EN 13670/CN et NF EN 1504-10 ainsi qu'au fascicule 65 du CCTG)
Exigences concernant l'épreuve d'étude	7.1	<ul style="list-style-type: none"> - ne concerne pas les produits de réparation relevant du marquage CE sauf exigences spécifiques de performances (cas de certains usages prévus ou applications spéciales visées par la norme NF EN 1504-3) - concerne les autres produits industriels ou fabriqués en centrale ou sur le chantier
Exigences concernant les épreuves de convenance	7.2	Consulter les articles ci-dessous
Exigences générales	7.2.1	<ul style="list-style-type: none"> - choix des zones à traiter - fixation au marché des essais à réaliser et des résultats à obtenir - porte sur la préparation du support, la préparation des produits et la réalisation de l'opération
Exigences sur l'acceptation des épreuves de convenance	7.2.2	<ul style="list-style-type: none"> - synthèse des résultats afin ou non de valider l'épreuve - prise en compte des résultats pour améliorer la procédure d'exécution - levé du point d'arrêt
Exigences sur le contenu des épreuves de convenance	7.2.3	Consulter les articles ci-dessous
Exigences sur l'épreuve de convenance de préparation du support	7.2.3.1	<ul style="list-style-type: none"> - l'épreuve est réalisée avec le matériel, le personnel sur une zone choisie en commun - les résultats doivent satisfaire aux exigences de l'article 6.1 susvisé de la norme

Références		Liste des exigences et contrôles
Articles concernant les épreuves d'étude et de convenue et les contrôles d'exécution		
Exigences sur l'épreuve de convenue de préparation des produits et de leur mise en œuvre	7.2.3.2	<ul style="list-style-type: none"> - vérification de l'approvisionnement - vérification du matériel - vérification du personnel (présence et compétence) - vérification du respect de la procédure de préparation des produits - vérification de la mise en place des coffrages nécessaires - vérification des conditions climatiques - vérification de la mise en place des produits (humidification du support et couche d'accrochage si nécessaire, épaisseurs et nombre de couches, temps d'attente entre couches, respect du temps d'utilisation, respect des épaisseurs prescrites aspect de finition, cure) - vérifications des caractéristiques physiques ou chimiques prescrites - contrôle sonore au marteau pour détecter les décollements - contrôle de l'adhérence au support - vérification de la résistance à la compression...
Exigences concernant la réception des produits	7.3	<ul style="list-style-type: none"> - vérification des conditions de transport (respect des températures, bon état des emballages) - vérification de la conformité des produits au contrat des divers produits (bordereaux de livraison, étiquettes, date limite d'emploi, prélèvements conservatoires et essais d'identification) - vérification des conditions de stockage (ensoleillement, humidité, température et durée de stockage)
Exigences concernant les contrôles d'exécution	7.4	Consulter les articles ci-dessous
Exigences concernant les supports préparés en vue de leur acceptation	7.4.1	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle visuel (aspect) - vérification de l'absence de venues d'eau - respect des exigences géométriques (bords des zones à réparer, détourage complet des armatures) - vérification de l'absence de délamination des zones à réparer (sondage au marteau) - contrôle de la propreté du support par un examen visuel au minimum - vérification de la rugosité du support si prescrite au marché, par un examen visuel ou par un essai normalisé (NF EN 1766, NF EN ISO 3274 et 4288) - vérification de la cohésion superficielle du support béton par un essai de traction directe (NF EN 1542) - contrôle du taux d'humidité si le produit de réparation l'exige nécessaire - vérification que les conditions climatiques sont conformes aux exigences des fiches techniques des produits - contrôle, si spécifié au marché, que le béton support ne contient ni polluant et n'est pas carbonaté
Exigences concernant la préparation des armatures	7.4.2	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle des armatures dont la section a été réduite par la corrosion avec mesure du diamètre résiduel - vérification de l'absence d'oxyde friable sur les armatures sauf si un revêtement de protection contre la corrosion est imposé par le marché. Dans ce cas, un contrôle du degré de soin du décapage prescrit doit être pratiqué - vérification de la propreté des armatures par un examen visuel, utilisation d'un chiffon (absence de débris adhérents, de poussière, d'huile...)

Références		Liste des exigences et contrôles
<p align="center">Article concernant les contrôles de la préparation des produits avant leur mise en œuvre</p> <p><i>Note : il n'existe pas d'article spécifique dans la norme, il faut se reporter à l'article 7.2.3.2 qui est relatif à l'épreuve de convenue concernant la préparation et la mise en œuvre des produits</i></p>		
Exigences concernant la préparation des produits avant leur mise en œuvre	7.2.3.2	<ul style="list-style-type: none"> - présence des matériaux et produits nécessaires - présence, propreté et bon état de fonctionnement des matériels et de l'outillage y compris le matériel de secours - respect des dosages, de l'ordre d'introduction des composants, du temps de malaxage et vérification de l'homogénéité des produits mélangés...
Exigence concernant la mise en œuvre des produits	7.4.3	<ul style="list-style-type: none"> - si le marché impose la mise en œuvre d'un revêtement anticorrosion sur les armatures, vérification d'une application uniforme sur les armatures sans débord sur le béton si le produit peut nuire à l'adhérence. De plus, vérification de l'absence de séchage du revêtement et du respect de son temps de mûrissement avant la mise en œuvre du produit de réparation - si une couche d'accrochage est prévue, s'assurer de la régularité de son application, de son absence de séchage et du respect de son temps de mûrissement - en fonction du type de produit de réparation, s'assurer que le taux d'humidité du béton support respecte les exigences de la fiche technique du produit (Cf. le NF DTU 54.1 et les règles professionnelles SEL et les essais avec une bombe à carbure ou une sonde hygrométrique) - contrôle des températures ambiante et du béton support ainsi que le degré d'humidité de l'air et vérification du point de rosée pour éviter toute condensation - après la préparation du produit de réparation (béton ou mortier frais), contrôle de sa consistance, voire de sa teneur en air (cas du gel/dégel). Dans le cas des produits mis en place par projection se reporter à la norme NF P95-102-1 - pendant la mise en œuvre du produit de réparation, s'assurer du respect de la procédure d'exécution, contrôler les épaisseurs mises en place et le respect des enrobages et veiller aux prélèvements destinés aux essais sur le produit frais et durci dans le cadre des contrôles interne et extérieur - après mise en œuvre du produit de réparation, vérification du respect de la cure si nécessaire (cas des produits CC et PCC) - après durcissement du produit de réparation mis en œuvre, s'assurer de l'absence de décollement par un essai au marteau puis contrôler son adhérence au support par un essai de traction directe in situ (NF EN 1542 jusqu'à 50 mm d'épaisseur) ou sur carottes (NF EN 14488-4/IN1 /+A1 au-delà de 50 mm d'épaisseur) - contrôle de la présence ou non de fissures dans le produit de réparation durci (relevé sur un plan de la position, des longueurs et des ouvertures apparentes de fissures) - contrôle de la planéité, de la texture et de la couleur de la surface des zones réparées en fonction des exigences du marché - des vérifications particulières sont à effectuer si le produit de réparation a été mis en place par projection, si un revêtement de protection du béton doit être mis en place...
Réception des travaux	7.6	Se reporter au texte de la norme
Hygiène et sécurité – respect de l'environnement	8	Se reporter au texte de la norme
Responsabilités et garanties	9	Se reporter au texte de la norme

Tableau n° 66 : liste des contrôles (extrait de la norme **NF P95-101** avec compléments)

> **3. Cas de la norme NF P95-102-1 (en révision) :**

La norme NF P95-102-1 s'appuie :

- d'une part, sur les **normes NF EN 1504-10, NF EN 14487-1 et 2** ;
- et, d'autre part, sur la **norme NF P95-101 et les guides ASQUAPRO** qu'elle adapte et complète, en particulier parce que la mise en œuvre de mortiers ou de bétons par projection (voie sèche et voie mouillée) concerne aussi bien les réparations de la surface du béton que des réparations structurales ou des renforcements. Le tableau ci-après, basé sur le **Tableau n° 66** ci-devant, liste uniquement les adaptations et compléments.

Note : la norme NF EN 14487-1 vise essentiellement la composition et la fabrication de mortiers et bétons en centrale ou sur le chantier, même si nombre des exigences sont applicables aux produits industriels. De plus, elle semble privilégier la voie humide.

Références		Liste des exigences et contrôles
Articles concernant les techniques de mise en œuvre de la préparation du support béton et des armatures à l'exécution de la projection		
Exigences générales	6.1	Accès, échafaudages, étalements et coffrages – Contraintes d'exécution
Exigences sur la préparation des supports	6.2	Consulter les articles ci-dessous
Exigences générales sur la qualité du support à obtenir après préparation	6.2.1	- exigences complémentaires en cas de reprise de bétonnage avec l'introduction des classes de rugosité de l'EC 2 partie 1 et de l'EC 2 partie 2 - bien entendu, ici seuls les produits de réparation des types CC et PCC sont visés
Exigences sur le traitement des venues d'eau	6.2.2	- suppression des venues d'eau – maîtrise des sous-pressions pendant le durcissement de produits projetés – Fixation des dispositifs de drainage
Exigences sur l'élimination du béton pollué, carbonaté et dégradé	6.2.3	- méthodes de repiquage (< 1,5 cm) et de purge (> 1,5 cm) sont illustrées par des schémas spécifiques dans la norme NF EN 95-102-1 (sablage, hydro-décapage, outils à percussion...)
Exigences communes sur la qualité du support à obtenir après préparation	6.2.4	- exigences identiques à celles de la norme NF P95-101 (détourage des armatures – géométrie des surfaces de reprise – enlèvement de la rouille) - renvoi à la norme NF P95-101 en cas de protection des armatures contre la corrosion par un revêtement de protection (totalemtent exclu en voie sèche)
Exigences sur le nettoyage du support béton et des armatures après préparation	6.2.5	- exigences identiques à celles de la norme NF P95-101
Exigences particulières avant la mise en œuvre de produits d'accrochage	6.2.6	- solution réservée à la voie mouillée et délicate de mise en œuvre si le ferrailage est dense
Exigences concernant le rajout d'armatures et l'utilisation de fibres	6.3	Consulter les articles ci-dessous
Exigences sur le rajout et le scellement d'armatures	6.3.1	- traite du rajout d'armatures et des règles à appliquer en cas de scellement : mise en œuvre de produits relevant d'un ÉTÉ et de produits relevant de la norme NF EN 1504-6 laquelle présente des insuffisances . Se reporter à l'annexe F (informative) de la norme pour fixer les exigences du marché
Exigences sur l'ajout de fibres	6.3.2	- traite des dispositions générales sur l'ajout de fibres
Exigences sur la projection	6.3.3	- traite des dispositions constructives pour la projection et la pose des armatures en une ou plusieurs phases
Exigences sur la projection de bétons fibrés	6.3.4	- traite des dispositions constructives spécifiques dans le cas des béton projetés fibrés, en particulier au niveau des reprises de bétonnage où un ferrailage complémentaire est à mettre en œuvre
Exigences sur la mise en place ponctuelle de coffrages	6.4	- concerne les dispositions à adopter pour la mise en place des coffrages nécessaires à l'obtention d'une délimitation précise des arêtes
Exigences pendant et après l'exécution de la projection	6.5 (6.5.1 à 6.5.8)	- traite des matériels, du personnel, de l'exécution, des reprises de projection, des températures extrêmes, de la cure, des finitions et tolérances

Références	Liste des exigences et contrôles	
Articles concernant l'évaluation de la conformité		
Exigences des dispositions générales	7.1	<ul style="list-style-type: none"> - Plan de contrôles du MOA validé par le MOE et annexé au marché - la classe d'exécution est fixée par le marché (classe 2 ou 3), attention, seul le niveau 3 permet le contrôle extérieur (se reporter aux normes NF EN 13670/CN et NF EN 1504-10 ainsi qu'au fascicule 65 du CCTG) - la catégorie d'inspection (exigences spécifiques aux normes NF EN 14487-1 et 2 et inconnu dans la norme NF EN 1504-10) est de niveau 2 pour les réparations non-structurales et du niveau 3 pour les réparations structurales et les renforcements - le marché peut majorer la fréquence des essais au début du chantier et pendant les phases critiques (prévoir une multiplication par 4 conformément à la norme NF EN 14487-1) - se reporter obligatoirement au tableau de l'article 6 de la norme NF P95-102-1 qui fixe les exigences de performance d'un béton ou mortier projeté utilisé en réparation ou renforcement (produits industriel marqué ou non CE ou fabriqué en centrale ou sur chantier fibré ou non). Tous les contrôles qui suivent ont pour but de s'assurer du respect de ces exigences. Par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - la résistance du béton jeune - la résistance à la compression - l'adhérence au support (pour tous les types de produits) - la densité - la résistance à la pénétration d'eau - la résistance au gel/dégel - autres contrôles - voir aussi les tableaux 4 à 8 de l'article 5 de la norme NF EN 14487-1
Épreuves d'étude	7.2	<ul style="list-style-type: none"> - la consistance des épreuves est liée au type de mélange (industriel ou non industriel) et au mode de projection VS ou VM - les épreuves d'étude sont indispensables lorsque les essais sur un mortier ou un béton mis en place par coulage ne permettent pas de vérifier les spécificités de ces produits mis en place par projection et durcis (incidence de la modification de la composition du mélange de base dû à la projection tout particulièrement en voie sèche) - la norme NF P95-102-1 détaille les procédures d'essai
Les épreuves de convenance portent sur les points suivants	7.3	<ul style="list-style-type: none"> - généralités (choix des zones représentatives, respect des conditions climatiques, conditions d'accessibilité, d'exécution et d'exploitation de l'ouvrage identiques à celles de la phase chantier, personnel qualifié et matériel adapté et en bon état) - conditions de validation des épreuves de convenance - épreuve de convenance de préparation du support - épreuve de convenance de scellement d'armatures - épreuve de convenance de préparation du mélange de base - épreuve de convenance de projection
Réception des constituants, des mélanges de base, produits et matériaux	7.4	<ul style="list-style-type: none"> - la consistance de la réception concerne les : <ul style="list-style-type: none"> - constituants destinés à la fabrication des mélanges de base des produits non industriels (ciment, granulats, adjuvants...) - mélanges de base des produits non industriels après fabrication - mélanges de base des produits industriels de réparation (norme NF EN 1504-3 et marquage CE) - mélanges industriels non CE - matériaux (aciers de BA, coffrages, etc.)
Contrôles d'exécution	7.5	Consulter les articles ci-dessous
Généralités	7.5.1	La consistance des contrôles d'exécution figure ci-dessous. Un plan de contrôle doit être fourni (liste des points à contrôler, fréquence des contrôles, répartition entre contrôle externe et interne de l'entreprise, voire contrôle extérieur, condition de conservation des corps d'épreuve avant essai, fourniture des PV d'essai, relevé des non-conformités). Toute non-conformité entraîne des mesures correctives et la levée du point d'arrêt après leur validation

Références		Liste des exigences et contrôles
Articles concernant l'évaluation de la conformité		
Contrôle des supports après préparation et avant projection	7.5.2	<ul style="list-style-type: none"> - traitement des venues d'eau - respect des exigences géométriques (bords des zones à réparer, détournage complet des armatures...) - l'absence de décollement (sondage au marteau) - propreté du support - mesure de la cohésion superficielle du support - vérification de l'enlèvement complet du béton pollué ou carbonaté (essais sur prélèvements et avec des réactifs)
Contrôle de la préparation des armatures existantes	7.5.3	<ul style="list-style-type: none"> - mesure du diamètre des armatures corrodées avec réduction de section - vérification de l'enlèvement de la rouille - vérification de la propreté des armatures
Contrôle du scellement des armatures	7.5.4	<ul style="list-style-type: none"> - respect de la mise en œuvre (Cf. annexe F de la norme) - essais d'arrachement prévus au marché - vérification du positionnement des armatures ajoutées et du ferrailage
Contrôle de la mise en place du ferrailage, des coffrages...	7.5.5	<ul style="list-style-type: none"> - la procédure de contrôle s'appuie sur les exigences des articles 6.3 et 6.4 de la norme qui traitent du rajout d'armatures, la mise en place des coffrages...
Contrôle de la préparation et de la mise en œuvre des mélanges de base	7.5.4	<ul style="list-style-type: none"> - description des contrôles et fixation de leur fréquence. Se reporter aux contrôles de la norme NF EN 14487-1 : contrôle du mélange de base (tableau 11), contrôle du béton projeté (tableau 12) - cas d'une projection par VM : au minimum le contrôle porte sur la consistance et la densité du béton frais. D'autres contrôles listés à la suite du tableau sont possibles - cas d'une projection par VS au minimum le contrôle porte sur l'humidité du mélange de base. D'autres contrôles listés à la suite du tableau sont possibles - vérification du respect des conditions climatiques - vérification des coffrages et de l'humidification du support - vérification de la régularité de la couche d'accrochage éventuelle - vérification du respect des règles de projection (distance au support, mouvement de la lance, réalisation des passes, arrêt et reprise de bétonnage, superposition des couches...se reporter à l'article 6.5 de la norme) - vérification de l'épaisseur de béton mise en place - contrôle de la teneur en fibres sur béton frais par la méthode B si le béton est fibré - vérification du respect de la cure et de sa durée - vérification de la réalisation des différents corps d'épreuve et de leur conservation en vue des mesures de la résistance à l'écrasement de carottes, à absorption d'énergie pour les bétons fibrés... - contrôles sur le béton durci (absence de décollement par sondage au marteau, mesure de l'adhérence au support) - respect des exigences de finition de surface (planéité, aspect, couleur, texture...)
Réception des travaux	7.6	se reporter au texte de la norme
Hygiène et sécurité – respect de l'environnement	8	se reporter au texte de la norme
Responsabilités et garanties	9	se reporter au texte de la norme

Tableau n° 67 : liste des exigences et contrôles (extrait de la norme NF P95-102-1 et des normes NF EN 14487-1 et 2 avec compléments)

Le tableau n°11, de la norme NF EN 14487-1 relatif au contrôle du mélange de base après préparation concerne essentiellement la **voie mouillée** et les **mortiers et béton fabriqués en centrale ou sur le chantier** : mesure de la consistance et aussi de la densité ainsi que les paramètres d'enregistrement de la fabrication (teneur en ciment, adjuvants, additions, fibres).

Lorsqu'il s'agit d'un **mortier ou d'un béton industriel** marqué ou non CE, le plus souvent, seuls peuvent être vérifiés la consistance et la densité, voire la quantité d'eau ajoutée.

Lorsqu'il s'agit de la **voie sèche** :

- pour les **mortiers et bétons industriels** marqués ou non CE, il est possible de mesurer l'humidité relative du mélange de base. Les contrôles sur leur composition doivent avoir été effectués lors de la réception des produits,
- pour les **mortiers et bétons fabriqués en centrale ou sur le chantier**, il est possible de procéder au contrôle de leur composition et des paramètres de d'enregistrement de la fabrication.

> 4. Conclusions :

Concernant les opérations de **préparation du support béton et des armatures et la mise en œuvre de mortier ou de béton**, la comparaison de la consistance des **contrôles d'exécution** des trois normes montre qu'il est possible, pour rédiger un **marché**, de s'appuyer sur ceux fixés dans la **norme NF P95-101**. Cependant, dans le cas :

- d'une **réparation structurale ou d'un renforcement**, il est indispensable d'y ajouter les contrôles de la **stabilité de la structure**, des **reprises de bétonnage**, de la **rugosité du support béton et des armatures de couture** en fonction des exigences issues du projet liées à l'application des règles de l'Eurocode 2 ;
- d'un recours aux essais des **annexes B et C de la norme NF EN 1504-10** pour le **contrôle de la propreté du support et sa rugosité** ;
- d'utilisation d'outils de repiquage ou d'enlèvement du béton pouvant « traumatiser » le béton prévoir l'ajout d'un **contrôle de la microfissuration du support** relevant de l'**annexe D de la norme NF EN 1504-10** ;
- d'un recours à la **projection** pour la mise en œuvre de mortier ou de béton fibrés ou non, il convient de rajouter les essais spécifiques de la **norme NF P95-102-1**.

Rappel : les **normes européennes et françaises**, sauf exception, ne précisent pas le **nombre des contrôles** à effectuer ni **qui en est chargé** : c'est normalement l'**entrepreneur**. En effet, les normes ne traitent que rarement des exigences du **contrôle extérieur**. Il est donc indispensable que le **marché** précise en quantité ce qui relève du **contrôle interne et externe** et ce qui relève du **contrôle extérieur** (cas des contrôles ayant une incidence sur le déroulement du chantier).

Pour les **méthodes non traitées ou exclues de la norme européenne**, les **contrôles** à effectuer peuvent être issus de **normes spécifiques** (par exemple, pour certains des traitements électrochimiques), soit des autres **GUIDES du STRRES de la famille FABEM voire ceux des autres familles**.

La consistance de ces **contrôles d'exécution** fixée par le **marché** est en final, mise au point dans la procédure d'exécution relative à l'opération. Sont à fixer, en particulier, les **types** et le nombre des **essais** à effectuer.

Ces différents **contrôles** sont les mêmes que ceux effectués lors des différentes **épreuves de convenue** visées dans l'article 6.3 ci-dessus. Ils portent sur les points suivants :

- la **préparation de l'opération** (les contrôles portent sur les documents d'exécution, les matériaux, les matériels et le personnel) ;
- la **préparation des produits nécessaires aux travaux** (les produits ayant déjà été réceptionnés, les contrôles portent sur la préparation des produits à utiliser) ;
- la **réalisation des travaux** (les contrôles portent, si besoin, est sur la préparation des supports ou sur la mise en œuvre des produits...) ;
- l'**après réalisation de l'opération** (les contrôles portent sur la vérification de l'efficacité des travaux exécutés s'y ajoute la rédaction de la synthèse des contrôles effectués).

Rappel : les contrôles de réception des produits sont effectués lors de leur arrivée sur le chantier. Ils figurent dans l'article 6.2 ci-dessus.

La levée du **POINT D'ARRÊT** relatif à la réalisation de l'opération a lieu lorsque le **maître d'œuvre** valide les résultats des contrôles liés aux **épreuves de convenances**, ceux de préparation du support (béton et armatures) et ceux relatifs à la préparation de l'opération. La mise en œuvre des produits n'est autorisée qu'après validation des contrôles sur la préparation les produits.

6.4.2 CONTRÔLES D'EXÉCUTION SUR LA PRÉPARATION DU SUPPORT BÉTON ET DES ARMATURES

Le présent article donne des lignes directrices ; bien entendu, les essais à effectuer dépendent de la méthode de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre et des techniques de réalisation. Il faut se reporter aux **essais** listés dans les trois tableaux de l'article 6.4.1 ci-dessus.

Note : conformément à l'avertissement formulé dans l'article 6.3 ci-dessus, l'épreuve de convenance porte généralement sur les mêmes points que ceux visés par les contrôles d'exécution.

6.4.2.1 Généralités

La reconnaissance de l'état du support et des armatures fait normalement partie de l'expertise préalable **au diagnostic sur l'état de l'ouvrage** visée par l'article 3.3.2.1 ci-dessus.

L'état du support et des armatures est confirmé par le **relevé contradictoire** visé par les articles 4.1, 4.5.2 et 5.2 ci-dessus.

La qualité du support béton et des armatures à obtenir **après leur préparation** est fixée par l'article 5.2.1.2 ci-dessus.

> **Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation du support béton et des armatures portent sur les points suivants :**

- la préparation de l'opération (matériel, personnel, accès, consignes...) ;
- la réception du support béton après préparation ;
- la réception des armatures apparentes après préparation.

6.4.2.2 Contrôle d'exécution relatif à la préparation de l'opération de préparation du support béton et des armatures

> **Le contrôle d'exécution relatif à la préparation de l'opération de traitement du support béton et des armatures porte sur les points suivants :**

- la validation par le **maître d'œuvre** de l'épreuve de convenance de préparation du support ;
- l'acceptation par le maître d'œuvre de la procédure et des **cadres des documents de suivi** relatifs à l'opération ;
- l'existence des documents donnant **l'état de surface du support relevé contradictoirement** (avec les résultats des essais effectués à cette occasion) et de l'état de surface à obtenir. Ces documents sont à annexer à la procédure ;
- la mise en place des **moyens d'accès** et leur contrôle par le **coordonnateur SPS** et, si nécessaire, par des **organismes habilités** ;

- la mise en place des **dispositifs de protection** pour assurer la préservation de l'environnement, la sécurité et la santé des usagers et des tiers ;
- la mise en place des **dispositifs de protection** pour éviter la pollution par la poussière, les salissures... des surfaces déjà traitées ;
- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du **matériel nécessaire à l'opération** ;
- l'approvisionnement des **matériaux et produits** et la **validation des contrôles** de leur réception ;
- la présence des **fiches techniques** et des **fiches de données de sécurité** des produits à utiliser ;
- la présence d'un **personnel qualifié** et informé des travaux à effectuer ainsi que des consignes à respecter conformément à la procédure ;
- la présence des **équipements d'hygiène et de sécurité** collectifs ou individuels ;
- la présence des **instruments** nécessaires aux mesures, contrôles et essais à effectuer ;
- la présence, si besoin est, des **agents du laboratoire** qui est chargé des contrôles et des essais ;
- le constat que les **conditions climatiques** permettent d'effectuer l'opération.



Photo n° 168 : essai de traction de surface pour la mesure de la cohésion du béton (crédit photo VSL)

6.4.2.3 Principes généraux relatifs aux contrôles de réception du support béton et des armatures

> Les principes généraux qui régissent les contrôles de réception du support et des armatures après, voire avant leur préparation sont les suivants :

- pour la réception du support béton, le contrôle porte sur :
 - l'absence de venues d'eau (traitement efficace) et la solidité des fixations des dispositifs de drainage,
 - l'aspect visuel de la surface traitée et le son franc que rend le béton sain au sondage sonique (absence de délaminations, de vides)... Ces deux tests subjectifs peuvent être complétés par des essais in situ ou en laboratoire,
 - le respect, dans la zone à réparer, des **exigences géométriques** (préparation des bords de la zone, détournage complet des armatures apparentes...),
 - la **méthode de nettoyage** (brossage, aspiration, soufflage, lavage, et...), après le décapage du béton, qui doit être compatible avec l'état du **support sec ou humide** pour pouvoir appliquer le **produit ou système**,
 - l'état de propreté des surfaces nettoyées (absence de poussière, débris, huile, graisse...),



Photo n° 169 : dégageant insuffisant des armatures – absence de détourage (crédit photo Parexlanko)

ATTENTION, il peut y avoir besoin de **contrôler** :

- *une première fois le support et les armatures avant la mise en place des produits et systèmes nécessaire à la réparation et/ou au renforcement,*
- puis, une seconde fois, après une **nouvelle préparation de la surface qui vient d'être réparée**, avant l'application par exemple d'une imprégnation hydrophobe, d'un revêtement de protection...,
- l'**absence de pollution** (chlorures ou autres polluants) et de **carbonatation** du béton support ;
- **pour la réception des armatures apparentes, le contrôle porte sur :**
 - la **stabilité de la structure** qui doit être assurée. Le dégageant d'un grand nombre d'armatures sur de grandes longueurs n'est autorisé que s'il est prévu au marché et si toutes les sécurités corrélatives (étais, contreventements, etc.) ont été mises en œuvre,
 - la **section résistante des armatures** ayant subies une réduction de section due à la corrosion
 - l'efficacité du traitement de décapage des armatures pour enlever la rouille
 - l'efficacité du traitement des armatures contre la corrosion si besoin est,



Photo n° 170 : exemple de travaux nécessitant un étaie provisoire (crédit photo Parexlanko)

La levée du **POINT D'ARRÊT** avant l'exécution des travaux de mise en œuvre des produits et systèmes est liée étroitement à un résultat positif des contrôles de préparation du support béton et des armatures.

La suite du présent article liste et explicite les **contrôles à effectuer** avant et, si nécessaire, après préparation du support pour chacune des **16 méthodes de réparation et/ou de renforcement** traitées dans le **présent GUIDE** (des renvois aux autres guides du **STRRES**, voire à diverses **normes** sont effectués, si besoin est).

6.4.2.4 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton pour une restauration du béton et /ou un renforcement structural

Note : conformément à l'avertissement formulé dans l'article 6.3 ci-dessus, l'épreuve de convenance porte généralement sur les mêmes points que ceux visés par les contrôles d'exécution.

6.4.2.4.1 Généralités

Les surfaces de référence de l'essai de convenance de préparation du support béton peuvent servir pour les contrôles visuels de préparation du support béton.

> **La qualité du support béton à obtenir après sa préparation est fixée par les articles suivants :**

- **5.2.1.2.1 ci-dessus** : relatifs aux tolérances de réalisation ;
- **5.2.1.2.2 ci-dessus** : relatif aux exigences de résultats sur la préparation du support béton ;
- **5.2.1.2.4 ci-dessus** : relatif aux exigences de résultats sur le nettoyage du support béton ;
- **5.2.1.2.5 ci-dessus** : relatif aux exigences particulières de préparation du support en fonction de la nature des produits ou systèmes ;
- **5.2.1.2.6 ci-dessus** : relatif aux exigences particulières de préparation du support en fonction de la méthode de réparation à mettre en œuvre.

Les contrôles à effectuer doivent porter sur le respect des exigences développées dans ces divers articles. Les articles qui suivent listent les points à contrôler en s'appuyant sur les exigences à satisfaire.

Les essais sur le support béton et/ou les armatures pour détecter des phénomènes de corrosion figurent dans l'article 6.4.2.5 ci-dessous. Dans la pratique, ils sont à effectuer en même temps que ceux concernant le support béton.

Rappels de l'article 5.2.1.2 ci-devant : si les armatures sont corrodées, elles doivent être dégagées totalement de leur gaine de béton. Si les armatures reçoivent un revêtement ou une barbotine, il faut mettre en œuvre le mortier ou le béton de réparation en respectant un certain délai de mûrissement.

6.4.2.4.2 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'une réparation de surface du béton (produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs)

Remarque : la majeure partie des contrôles visés dans le présent article est applicable aux autres méthodes de réparation et/ou de renforcement. Il s'agit des contrôles visés dans les trois tableaux de l'article 6.4.1 ci-dessus. L'article explicite dans quels cas ces essais doivent être exécutés.

Les contrôles à effectuer, quelle que soit la technique utilisée pour appliquer en faible épaisseur les produits et systèmes, se déroulent « avant ou après ou bien avant et après » **la préparation du support béton**. Ils portent sur tout ou partie des points suivants :

Note : les essais soulignés doivent être effectués dans tous les cas.

- **la géométrie de la structure et la planéité des parois** doivent respecter les exigences du **marché** (se reporter à la **norme NF DTU 21** et au **fascicule 65 du CCTG** en vigueur). Les mesures de planéité se font à la règle de 2 m et au régllet de 20 cm, celles de verticalité au fil à plomb..., dans le but de procéder :
 - lors de la préparation du support béton :
 - aux corrections, qui peuvent être faites par repiquage, enlèvement, ponçage..., du béton en surépaisseur,
 - aux ragréages localisés pour faire les corrections des manques de béton au droit des flaches existantes, des nids de cailloux...,
 - après mise en œuvre et durcissement des produits et systèmes :
 - aux corrections des défauts de surface (surépaisseurs, trous, balèvres...) qui rendent le support béton inapte à recevoir un traitement de finition (par exemple, les revêtements de protection) ;

Des exigences particulières sont à respecter lorsqu'après la réparation doivent être mises en œuvre et collées ou scellées des armatures (plaques ou tissus) à base de matériaux composites. Se reporter à la **norme NF P95-105**.

- **l'absence de décollements (délaminations, vides...)** est à mesurer par sondage au marteau de toutes les surfaces à préparer, avant et après leur préparation ;

Note : d'autres techniques comme l'impact-écho, la thermographie infrarouge, le radar, les techniques ultrasonores..., qui permettent un contrôle rapide de surfaces importantes, peuvent être utilisées pour repérer les zones de délamination, les feuilletages, les couches de qualités différentes, les vides, les nids de cailloux et les inclusions.



Photo n° 171 : sondage au marteau (crédit photo Parexlanko)

- **la propreté du support** est à mesurer par un examen visuel, un test d'essuyage... ayant pour but de détecter, après la préparation et juste avant la mise en œuvre des produits :
 - la poussière,
 - les détritrus,
 - les salissures,
 - les traces de graisse,
 - les produits de cure,
 - les anciennes imprégnations,
 - les anciens revêtements... ;

Rappel : avant l'application du produit ou du système, le support doit parfois être humidifié, recevoir une barbotine ou un encollage...

- **la rugosité du support** est à mesurer, soit par un **examen visuel**, soit par un des **essais normalisés**, soit par des **plaquettes étalons**. La rugosité est à mesurer dans le cas où la surface est « glacée », si les essais d'adhérence lors de l'épreuve de convenance ont montré sa nécessité, s'il est prévu de procéder après réfection du support béton au collage d'armatures passives extérieures au béton... ;
- **la microfissuration du support** est à mesurer si le matériel utilisé pour le repiquage, voire la purge du béton est à considérer comme traumatisant pour celui-ci (cas des marteaux-piqueurs). Cette microfissuration peut entraîner une baisse de la cohésion superficielle du béton donc le risque de futures délaminations à proximité du plan de reprise entre le béton support et le mortier ou béton ajouté ;
- **la résistance à la traction de la surface du béton (cohésion)** est à mesurer par les **essais normalisés** adaptés de la **norme NF EN 1542** ou de la **norme NF EN 14488-4/IN1/+ A1** sur carottes prélevées in situ. Cette résistance est à mesurer puisque les **normes NF P95-101** et **NF P95-102-1** imposent une **cohésion superficielle du béton $\geq 1,5$ MPa** ;

Interprétation des essais de mesure de la cohésion : sauf prescription contraire du **marché**, une valeur moyenne initiale est obtenue sur au moins cinq valeurs individuelles par zone de mesure. Les valeurs individuelles écartées de plus de ± 20 % de cette valeur moyenne sont exclues. La cohésion superficielle moyenne se calcule sur les valeurs conservées avec un minimum de trois valeurs.

Adaptation des essais de la norme NF EN 1542 : il s'agit d'une norme d'essai « en laboratoire » qui nécessite quelques modifications dans le cas d'essais sur site. Son domaine d'application est normalement limité à une épaisseur de 50 mm du produit de réparation mis en œuvre.

Au-delà de cette épaisseur, il faut se baser sur la **norme NF EN 14488-4/IN1/+ A1** qui concerne normalement le béton projeté. Cette norme permet la réalisation d'essais d'adhérence sur des carottes prélevées sur site.

Les deux types d'essais sont très différents en termes de **difficulté de réalisation** ; en particulier, cette **norme** nécessite la réalisation de carottes de diamètre compris entre 50 et 100 mm et dont la longueur est compatible avec l'obtention après sciage d'un échantillon d'éclatement 2 et dont la zone d'adhérence se situe près du milieu !

- **les vibrations de la structure** sont à mesurer au moyen d'un **accéléromètre** si les travaux d'application du produit ou du système doivent se dérouler sur une ouvrage maintenu en activité (par exemple le maintien de la circulation des poids lourds) ;

Les vibrations sont à redouter, par exemple pour le **béton projeté** mais pas que. **L'épreuve de convenance** doit permettre de savoir si les vibrations peuvent nuire aux caractéristiques du produit ou du système (par exemple, par des mesures d'adhérence relevant de la norme **NF EN 1542...**). De plus, les produits et systèmes à mettre en œuvre doivent avoir satisfait aux exigences de performance pour cette **application spéciale** (application au plafond). Se reporter à la **norme NF P95-102-1** et au **guide FABEM 5** dans le cas du béton projeté.

- **la teneur en eau du support** : cette mesure est à effectuer au moment de la mise en place des produits de réparation. Elle consiste à mesurer l'humidité au moyen d'un **essai de résistivité, de sondes d'humidité...** essentiellement dans le cas où la **fiche technique du produit ou du système** à appliquer limite son emploi en présence d'humidité. Pour les produits et systèmes à base de liants hydrauliques, l'eau libre doit être ressuyée tout en conservant le support humide (se reporter au guide FABEM 4) ;
- **l'absence de venues d'eau** : ce contrôle concerne les travaux de réparation d'ouvrages souterrains de murs de soutènement mais aussi de l'intrados de dalles de couverture de ponts... Ces venues d'eaux doivent être captées ou empêchées par exemple, par la mise en œuvre d'une en chape d'étanchéité... ;
- **l'absence de précipitations** à venir lors de la réalisation des réparations : ce contrôle passe par l'étude des prévisions météorologiques et celui des dispositifs de protection mis en place ;
- **l'absence d'évolution défavorable des conditions thermiques** (froid ou chaleur) ;

- **l'absence de pollution du béton (présence de chlorures...) et de carbonatation** : ce contrôle concerne le cas où les études et investigations préalables ont montré la présence d'agents agressifs dans le béton. Le contrôle (détermination du profil et la teneur en chlorures et pH du béton...) doit permettre de s'assurer que le **béton pollué ou carbonaté a été éliminé** ;

Dans le cas de la mise en place d'un mortier ou d'un béton par projection : les contrôles d'exécution sur la préparation de surface du béton relèvent des **normes NF P95-102-1 et NF EN 14487-2** ainsi que du **guide FABEM 5**. Ils recoupent ceux listés dans le présent article.

6.4.2.4.3 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'une réparation structurale ou non ou d'un renforcement (produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs)

Les **contrôles et essais** visés dans l'article précédent concernant les réparations de surface des bétons sont applicables au cas des réparations structurales ou non et aux renforcements. Il faut y ajouter au minimum les contrôle suivants portant sur :

- **la stabilité de la structure** (intervention du bureau d'études) et des étaitements nécessaires (se reporter aux normes NF EN 13670/CN et NF DTU21 et au fascicule 65 du CCTG ;
- **la réalisation des reprises de bétonnage traversées par des armatures**. Dans le cas des **ouvrages neufs**, ces reprises doivent être conçues conformément aux dispositions des **règles de l'Eurocode 2 parties 1 et 2** ce qui impose de contrôler que la **rugosité de la surface du béton** après préparation est satisfaisante.

Le **tableau ci-après** donne les valeurs des coefficients de **cohésion** (sorte de collage entre les deux bétons mis en œuvre en deux phases) et de **frottement** à prendre en compte conformément aux modifications apportées à l'**EC 2 en juin 2018**.

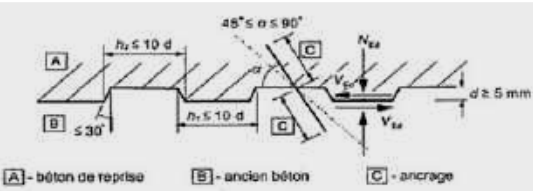
Rugosité de la surface	Cohésion de surface « c_{v1} »	Coefficient de frottement « μ_v »	Caractéristiques de la surface de reprise
Très lisse	0,0095	0,5	Surface coulée au contact de moules en acier, en matière plastique, ou en bois traité spécialement
Lisse	0,075	0,6	Surface présentant des aspérités ne dépassant pas 3 mm (cas d'une surface obtenue après enlèvement de la laitance)
Rugueuse	0,15	0,7	Surface présentant des aspérités d'au moins 3 mm espacées de 40 mm
Très rugueuse	0,19	0,9	Surface présentant des aspérités d'au moins 6 mm espacées de 40 mm
Surface avec indentations sous forme de clés	0,37	0,9	

Tableau n° 68 : tableau extrait des modifications apportées à l'EC 2 en juin 2018

ATTENTION, dans le cas où le projet s'appuie sur la norme NF P95-104 relative aux réparations par précontrainte additionnelle, celle-ci indique dans son annexe A (informative) que la **cohésion n'a pas à être prise en compte** (béton existant ancien : $c_{v1} = 0$) et donne les valeurs des **coefficients de frottement** à prendre en compte en fonction de la technique de préparation de la surface du béton.

Dans le cas d'un ouvrage ancien, le projet de réparation ou de renforcement peut s'appuyer sur des **règles de calcul** parues avant celles des **Eurocodes**. En effet, dans le domaine de la réparation, le marché fixe les **règles de calcul** à adopter (par exemple : **BAEL 99, BPEL 99, EC 2 parties 1 et 2...**) ainsi que les valeurs des coefficients à prendre en compte dans les calculs.

Dans le cas contraire, l'**entrepreneur** les propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** sachant que ce choix peut avoir des **conséquences** sur les quantités de matériaux et produits à mettre en œuvre.

Lorsque la mise en œuvre de produits ou systèmes appliqués en fortes épaisseurs **comporte une reprise de bétonnage** (normalement traversée par des armatures), la réalisation des travaux et des contrôles, suivant le domaine concerné (génie civil ou bâtiment), relèvent des **normes NF EN 13670/CN** et **NF DTU21** et du **fascicule 65 du CCTG**.

Si le produit ou le système est mis en place en **plusieurs passes successives**, il faut contrôler avant chaque passe la qualité du support et veiller à respecter le délai entre les couches fixé par la **fiche technique du produit ou système** ou par les **règles de l'art**.

Rappel : dans le cas de la mise en place d'un mortier ou d'un béton par projection : les contrôles d'exécution sur la préparation de surface du béton relèvent des **normes NF P95-102-1** et **NF EN 14487-2** ainsi que du **guide FABEM 5**. Ils recourent ceux listés dans le présent article.

6.4.2.4.4 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'un collage structural de bétons

> Cas d'un collage béton durci sur béton durci :

Si l'opération porte sur la **réparation d'un élément en béton** dont une partie a été cassée, il suffit de contrôler que :

- les faces des deux morceaux à assembler se conjuguent parfaitement,
- la propreté des deux faces (absence de poussière, de dépôts graisseux...) est assurée,
- la température et l'humidité des deux morceaux permettent de mettre en place la colle conformément aux exigences de la fiche technique.

Si l'opération porte sur l'**assemblage de deux éléments en béton**⁴³, les contrôles sur la préparation du support sont sensiblement identiques à ceux à effectuer lors de la mise en œuvre d'armatures passives extérieures au béton par collage, technique visée par la **norme NF P95-105** et le **guide FABEM 7**. Le marché adapte les tolérances géométriques et de planéité du support aux fonctions que doit remplir l'assemblage et aux sollicitations qu'il peut subir.

> Cas d'un collage béton frais sur béton durci et béton contrecollé :

Dans une telle opération, le collage a pour but d'améliorer l'adhérence entre les deux bétons au niveau de la reprise de bétonnage. L'état du support doit pouvoir permettre d'effectuer la reprise de bétonnage dans les règles de l'art.

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support sont les mêmes que ceux exercés dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs visés par l'article 6.4.2.4.3 ci-dessus.

6.4.2.4.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement durci et le béton support

Ce type d'injection a pour but de compenser les effets des retraits qui ont tendance à créer une fissure au niveau de la reprise de bétonnage. Les contrôles d'exécution à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'une injection de fissures, sont détaillés dans la **norme NF P95-103** et dans le **guide FABEM 3**.

6.4.2.4.6 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton

Les **contrôles d'exécution** à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton, sont détaillés dans la **norme NF P95-103** et dans les **guides FABEM 2** et **FABEM 3**.

43 Ce type d'assemblage concerne davantage le domaine du bâtiment que celui du génie civil, bien qu'un tel assemblage soit parfaitement envisageable lorsque les deux éléments une fois assemblés sont soumis à une forte compression (par exemple, le collage d'un dé d'appui supérieur sous le talon d'une poutre).

Une telle opération doit être précédée d'un **contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures existantes**, car les fissures, les nids de cailloux... favorisent la pénétration des agents agressifs.

Note : en fonction de l'importance des fissures et de leur activité, un traitement des fissures est à mettre en œuvre avant de procéder à l'application d'un produit ou d'un système de réparation compatible. Dans certain cas, un **renforcement structural** est nécessaire. Normalement, l'expertise préalable aux travaux doit avoir détecté une telle insuffisance structurale, sauf si la partie de la structure n'était pas accessible au moment de cette opération.

Une fois le support béton et les fissures préparés, les **mouvements des fissures existantes** peuvent être à mesurer au moyen de jauges électriques ou mécaniques sous les variations thermiques et le passage de charges de référence. De telles mesures sont nécessaires avant l'injection des fissures et la mise en tension des armatures d'une précontrainte additionnelle.

6.4.2.4.7 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de scellement d'armatures de béton armé

Le scellement d'armatures de béton armé est souvent lié à une **opération de renforcement structural** avec mise en place de **produits et systèmes en fortes épaisseurs**. Les armatures de béton armé scellées dans le béton d'une structure sont destinées, soit à remplacer des armatures endommagées, soit à augmenter la section des armatures, tout en assurant, pour certaines, un rôle d'armatures de couture de la reprise de bétonnage.

Une telle opération doit être précédée d'un **contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures existantes**.

Les **contrôles d'exécution** sur la préparation du support portent, d'une part, sur la **préparation des trous** qui doivent présenter les dimensions, la propreté et la rugosité requises et, d'autre part, sur la **préparation du reste du support, voire des armatures existantes**, pour que la reprise de bétonnage puisse être effectuée suivant les règles de l'art.

Les **contrôles d'exécution** à effectuer sur la **préparation des trous**, avant la réalisation des scellements des armatures de béton armé, sont détaillés dans le **fascicule de documentation FD P18-823**, le tableau n°4 de la **norme NF EN 1504-10** et le **guide FABEM 7**.

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la **préparation du reste du support** et des **armatures existantes** sont détaillés dans les articles 6.4.2.4.3 ci-dessus et 6.4.3.5.3 ci-dessous.

6.4.2.4.8 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas de calages d'éléments

Les **contrôles d'exécution** à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'un calage d'éléments sont les mêmes que ceux effectués dans le cas de la mise en place de produits et systèmes sous forme d'un mortier ou d'un béton appliqué en faible ou en forte épaisseur et visés aux articles 6.4.2.4.2 ci-dessus et 6.4.2.4.3 ci-dessus.

Suivant la nature du produit ou du système qui peut être à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques, la température et le degré d'humidité du support doivent respecter les exigences de la **fiche technique**.

Le **marché** fixe la géométrie des pièces à assembler et les tolérances à respecter, de façon que l'épaisseur du mortier ou du coulis soit la plus uniforme possible afin d'éviter des tassements différentiels par fluage. Il est possible de s'inspirer de la **section 10 de la partie 1 de l'Eurocode 2**, qui traite des éléments préfabriqués, ainsi que de la **norme NF EN 13670/CN** et du **fascicule 65 du CCTG**, qui traitent de la fabrication, du transport, de la manutention, du stockage et de la mise en place d'éléments préfabriqués.

Note : l'article B.8.6 des règles **BAEL 91 révisées 99** remplacée par l'**Eurocode 2** donnait des dispositions à respecter dans les assemblages de poteaux préfabriqués. Ces dispositions ne figurent pas dans l'**Eurocode**.

6.4.2.4.9 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton

Il s'agit d'une **opération de remplacement d'armatures existantes endommagées ou d'ajout de nouvelles armatures** qui sont ensuite enrobées par un béton ou un mortier. Pour ce faire, une partie du béton existant de l'élément à réparer ou renforcé doit être enlevé de façon à permettre, d'une part, de positionner les nouvelles armatures pour ménager des longueurs de recouvrement suffisantes avec les armatures conservées et, d'autre part, de mettre en place les armatures de couture nécessaires. La transmission des efforts entre les armatures existantes et les nouvelles peut aussi se faire par des soudures ou au moyen de **dispositifs de rabouillage et d'ancrage des armatures du béton (DRAAB)**.

Au contrôle de préparation du support de l'article 6.4.2.4.3 ci-dessus, il faut ajouter un **contrôle de la géométrie des engravures et défoncés** où doivent être disposées les nouvelles armatures.

Une telle opération doit, normalement, être précédée d'un **contrôle de l'état des armatures existantes vis-à-vis de la corrosion** (importance de la corrosion, diamètre résiduel des barres...) de façon à identifier toutes les armatures et barres à remplacer.

6.4.2.4.10 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton dans le cas de collages d'armatures passives extérieures au béton

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'un collage d'armatures passives extérieures au béton (plaques ou tissu), portent sur la géométrie et la planéité du support (par exemple, les exigences de planéité sont très strictes dans le cas des plaques métalliques), la résistance à la traction du béton support, la rugosité de la surface... Ils sont détaillés dans la **norme NF P95-105**, le tableau n°4 de la **norme NF EN 1504-10** et le **guide FABEM 7**.

Une telle opération (sauf sur une structure très récente peu exposée à des agents agressifs) doit être, **obligatoirement**, précédée d'un **contrôle de l'état des armatures existantes vis-à-vis de la corrosion**, car les délaminations dues à la corrosion des armatures peuvent provoquer la ruine d'un tel renforcement.

6.4.2.4.11 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas d'un l'ajout de forces par précontrainte additionnelle

La mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle nécessite d'effectuer de multiples opérations mettant en jeu, soit des méthodes du **présent GUIDE**, soit d'autres méthodes. Une telle opération fait appel au scellement et l'ajout d'armatures de béton armé, à la création de massifs en béton pour l'ancrage des unités de précontrainte, à la création de déviateurs en béton pour moduler le tracé des câbles, à l'injection des fissures éventuelles... Il y a donc de nombreuses préparations du support en béton à réaliser.

Une telle opération doit être précédée d'un **contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures passives et actives existantes**.

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la **préparation du support dans le cas de l'ajout de forces par précontrainte additionnelle** sont détaillés dans la **norme NF P95-104** et le **guide FABEM 8**.

6.4.2.4.12 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas d'un l'ajout de forces par déformations imposées

La mise en œuvre de déformations imposées peut nécessiter la réalisation de plusieurs opérations mettant en jeu différentes méthodes de réparation ou de renforcement avant de pouvoir exercer les déformations. Diverses méthodes de préparation du support en béton peuvent être nécessaires.

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la **préparation du support dans le cas de l'ajout de forces par déformations imposées** sont détaillés dans le **guide FABEM 8**.

Une telle opération, si besoin est, peut être précédée d'un **contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures existantes**. En cas de corrosion avérée, la réparation doit être effectuée avant de procéder à l'exécution de l'opération d'ajout de forces.

6.4.2.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures

6.4.2.5.1 Généralités

ATTENTION, les surfaces de référence qui ont servi lors de l'épreuve de convenue de préparation des armatures **ne peuvent** servir ensuite pour les contrôles visuels de préparation des armatures, puisque la rouille réapparaît rapidement sur des armatures décapées.

La qualité de préparation des armatures à obtenir est fixée par les articles suivants :

- **5.2.1.2.3 ci-dessus** : relatif aux exigences sur la préparation des armatures ;
- **5.2.1.2.4 ci-dessus** : relatif aux exigences de résultats sur le nettoyage des armatures ;
- **5.2.1.2.6 ci-dessus** : relatif aux exigences particulières de préparation des armatures en fonction de la méthode de réparation à mettre en œuvre.

Les contrôles à effectuer doivent porter sur le respect des exigences développées dans ces divers articles. Les articles qui suivent listent les points à contrôler en s'appuyant sur les exigences à satisfaire.

Dans le cas d'un **ouvrage récent** situé dans un environnement **pas particulièrement agressif** et qui doit subir une **réparation et/ou le renforcement**, il n'est, normalement, **pas nécessaire de contrôler l'état des armatures et la présence d'agents agressifs dans le béton**, sauf en cas de doute sur leur enrobage ou la qualité du béton.

Dans les autres cas, le choix de la méthode de restauration ou de conservation de la passivité des armatures à mettre en œuvre impose de connaître la profondeur de pénétration des agents agressifs et/ou leur dosage... Les mesures correspondantes sont, normalement, à effectuer lors de l'expertise. Il est cependant souhaitable de contrôler **après la préparation du support en béton et, si nécessaire, après le dégagement des armatures corrodées**, les mêmes paramètres.

Les contrôles et essais à mettre en œuvre portent sur tout ou partie des points suivants :

Note : les essais soulignés doivent être effectués dans tous les cas.

- **la position et l'enrobage des armatures** sont à déterminer, par exemple, dans les zones où la profondeur de carbonatation doit être mesurée, si une mesure du potentiel d'électrode est prévue... ;
- **la profondeur de carbonatation** est à mesurer au moyen d'un réactif coloré, en général la phénophtaléine, conformément à la **norme NF EN 14630**. Ensuite, elle est à comparer à l'enrobage des armatures ;
- **la teneur en chlorures** est à mesurer si une telle pollution est à redouter. Les mesures sont effectuées en laboratoire sur des échantillons prélevés sur site conformément à la **norme NF EN 14629**. La mesure s'effectue à diverses profondeurs, de manière à déterminer le profil des chlorures (dosage en fonction de la profondeur). Le profil des chlorures est à comparer à l'enrobage des armatures ;
- **la pénétration d'autres polluants**, par exemple, en cas d'agression chimique, est à mesurer par des prélèvements effectués sur place. Les analyses se font en laboratoire ;
- **la contamination des fissures**, voire des reprises de bétonnage, est à mesurer par analyse de carottes prélevées en place. Une pénétration de polluants est à redouter lorsque les fissures sont soumises à une circulation d'eau... Dans un tel cas, les armatures peuvent être fortement corrodées ;
- **la résistivité électrique apparente** est à mesurer pour détecter les zones de corrosion actives, c'est-à-dire, là où le degré d'humidité du béton est élevé. Dans ces zones, la résistivité apparente est faible. Dans le cas de traitements électrochimiques, il faut mesurer la résistivité apparente du matériau de réparation ;

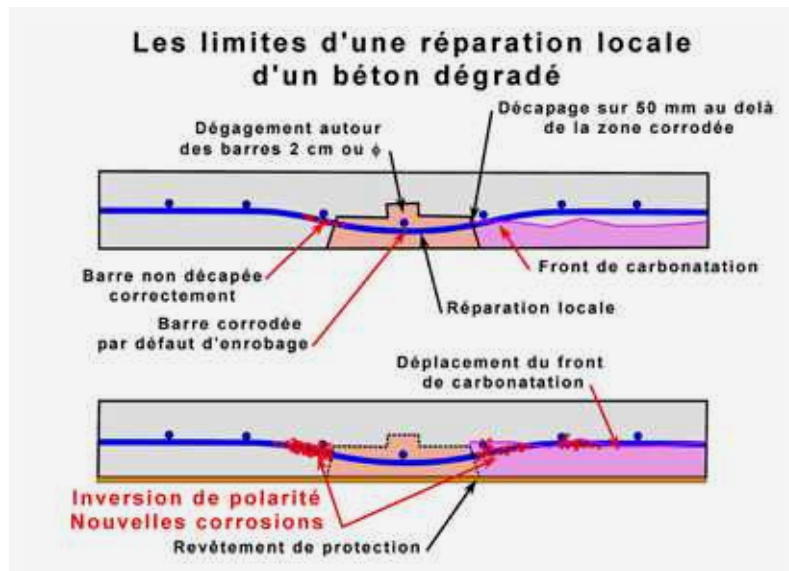


Figure n° 97 : conséquences si les principes à respecter lors du dégagement d'armatures corrodées ne sont pas respectés

- **la corrosion des armatures existantes** peut être estimée par un examen visuel après avoir dégagé les armatures de leur couverture de béton. Cet examen ne permet pas de connaître l'état des autres **armatures non apparentes**. Pour ces dernières, des essais comme la **mesure du potentiel** permettent de détecter la présence d'une corrosion. Dans ce cas, les armatures concernées doivent être dégagées afin de connaître leur état (corrosion avec ou sans réduction de section). Ensuite, elles doivent être débarrassées de la rouille et nettoyées ;
- **la propreté des armatures existantes** est à vérifier si la méthode de réparation impose, soit d'enlever la rouille non adhérente par un moyen manuel ou mécanique (brossage, marteau à aiguilles...), soit de décaper l'armature jusqu'au degré St 2, DS 2 (Sa 2) ou DS 2,5 (Sa 21/2). Il faut non seulement contrôler l'enlèvement de la rouille mais aussi celui de la poussière, des parties friables peu adhérentes et s'assurer de l'absence d'huile ou de graisse ;
- **les dimensions des armatures dégagées de leur gangue de béton** sont à mesurer mécaniquement (par exemple, au pied à coulisse...) dans le cas où la corrosion a entraîné une réduction de la section des armatures passives. Cette mesure est nécessaire pour permettre le recalcul de la capacité portante de la structure ;
- **l'état des armatures passives extérieures** comme les **plats et tôles collées** dans le cas d'une structure existante renforcée par ce procédé (se reporter au **guide FABEM 7**).

6.4.2.5.2 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas du remplacement d'un béton carbonaté ou pollué ou d'une augmentation du recouvrement des armatures

> Dans le cas du remplacement du béton carbonaté ou pollué :

Les contrôles d'exécution de la préparation du support en béton sont les mêmes que ceux nécessaires en cas de mise en œuvre de produits ou de systèmes en faibles ou fortes épaisseurs visés dans les articles 6.4.2.4.2 et 6.4.2.4.3 ci-dessus.

Il faut aussi s'assurer que l'inclinaison des bords des zones où le béton a été enlevé respecte un angle compris entre 90 et $135^\circ \pm 5^\circ$ pour assurer une bonne liaison mécanique du matériau d'apport sur celui d'origine. Si la mise en œuvre d'un revêtement de protection est prévue, la surface, après remplacement du béton, doit respecter les tolérances de forme, de planéité et de texture adaptées au produit.

Les contrôles d'exécution sur la préparation des armatures sont ceux donnant la profondeur de carbonatation, les profils de polluants, la corrosion et la propreté des armatures. Il faut aussi s'assurer que :

- les armatures sont dégagées sur une longueur d'au moins 50 mm au-delà de la partie corrodée,
- les armatures sont dégagées pour respecter la distance minimale (15 mm ou $C_g + 5$ mm) entre l'armature et la surface du support après avoir enlevé le béton d'enrobage (se reporter à l'article 5.2.1.2.3 ci-dessus),
- la distance minimale susvisée est au moins de 20 mm et qu'un lavage soigné à l'eau a été exécuté si le béton est pollué par des chlorures,
- les armatures ont reçu un revêtement de protection contre la corrosion, sous réserve que la méthode de mise en œuvre du matériau de réparation soit compatible avec un tel revêtement,
- que le remplacement des armatures trop corrodées ou nécessaires au renforcement structural ait été effectué et que les enrobages prescrits pourront être respectés (il y a lieu d'effectuer, si nécessaire, le contrôle des scellements, des manchonnages ou des soudures des armatures ajoutées...).

> Dans le cas d'une augmentation du recouvrement des armatures :

Cette opération a pour but de mieux protéger les aciers, d'apporter des alcalins et d'augmenter la résistivité du béton. Les contrôles d'exécution de la préparation du support béton sont les mêmes que ceux nécessaires en cas de mise en œuvre de produits ou de systèmes en faibles épaisseurs visés par l'article 6.4.2.4.2 ci-dessus. Si la mise en œuvre d'un revêtement de protection est prévue, la surface, après mise en place du recouvrement, doit respecter les tolérances de forme, de planéité et de texture adaptées au produit.

6.4.2.5.3 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de traitements électrochimiques

> Dans le cas d'une réalcalinisation et/ou d'une extraction des chlorures :

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures à effectuer sont les suivants (se reporter aux normes **NF EN 14-308-1** et **EN 14-308-2**) :

- les contrôles visés dans les deux articles précédents relatifs aux contrôles de préparation des armatures (position et enrobage des armatures, profondeur de carbonatation, profils de chlorures...);
- les contrôles nécessaires lors d'un remplacement du béton carbonaté ou pollué dans les zones dégradées par la corrosion. Il n'est pas nécessaire de contrôler que les armatures soient décapées « à blanc » ;
- le contrôle de la propreté du support et de l'enlèvement de toutes les parties métalliques (clous, morceaux de ligatures, inserts...) pouvant être la source de courts-circuits ;
- le contrôle de la résistivité des matériaux de réparations anciennes, laquelle doit rester inférieur à 200% de celle du béton de la structure ;
- le contrôle de la résistivité du matériau de réparation, laquelle doit respecter également le seuil de résistivité de 200% ;
- les contrôles de l'état du support, une fois le traitement électrochimique terminé, qui doit être compatible avec la mise en œuvre d'un revêtement de protection...

> Dans le cas d'une prévention ou d'une protection cathodique (se reporter à la norme NF EN ISO 12696) :

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures à effectuer sont les suivants :

- les contrôles visés dans les deux articles précédents relatifs aux contrôles de préparation des armatures (position et enrobage des armatures, profondeur de carbonatation, profils de chlorures...);

- les contrôles nécessaires lors d'un remplacement du béton carbonaté ou pollué dans les zones dégradées par la corrosion. Il n'est pas nécessaire de contrôler que les armatures soient entièrement décapées ;
- le contrôle de la propreté du support et de l'enlèvement de toutes les parties métalliques (clous, morceaux de ligatures, inserts...) pouvant être la source de courts-circuits ;
- le contrôle de la résistivité des matériaux de réparations anciennes, laquelle doit rester inférieure à 200% de celle du béton de la structure ;
- le contrôle de la résistivité du matériau de réparation, laquelle doit respecter également le seuil de résistivité de 200% ;
- les contrôles de l'état du support béton de la structure, de façon à pouvoir mettre en œuvre le produit ou le système servant à l'enrobage de l'anode et appliqué en faible épaisseur. Ces contrôles sont ceux de l'article 6.4.2.4.2 ci-dessus...

6.4.2.5.4 Contrôles d'exécution sur la préparation des armatures dans le cas de la mise en œuvre de revêtements actifs ou non

> Dans le cas d'un revêtement actif :

Les contrôles d'exécution portent sur l'état de propreté et de corrosion des armatures à recouvrir. Il faut s'assurer que les armatures soient décapées au niveau de soin fixé par le marché en fonction de la technique de traitement (brossage manuel ou mécanique, sablage...).

> Dans le cas d'un revêtement non actif :

Les contrôles d'exécution portent sur l'état de propreté et de corrosion des armatures à recouvrir. Il faut s'assurer que les armatures sont décapées au niveau DS 2,5 (Sa 2^{1/2}) « nettoyage – décapage très profond ».

6.4.2.5.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas de la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur béton

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures à effectuer sont les suivants :

- les contrôles visés dans les articles précédents relatifs aux contrôles de préparation des armatures (position et enrobage des armatures, profondeur de carbonatation, profils de chlorures...) ;
- les contrôles nécessaires lors de l'enlèvement du béton carbonaté ou pollué dans les zones dégradées par la corrosion. Les contrôles portent sur le béton support et les armatures ;
- le contrôle de la propreté du support, qui doit être débarrassé de la poussière, des salissures, taches de graisse (se reporter aux articles 6.4.2.4.2 ci-dessus et 6.4.2.4.3 ci-dessus),

Rappel : l'inhibiteur est appliqué après avoir procédé aux **réparations locales** avec ajout de béton ou mortier.

- après l'exécution des réparations locales et une **nouvelle préparation du support**, des contrôles de celui-ci doivent être effectués pour s'assurer de sa propreté, de sa rugosité et du respect des tolérances de forme, de planéité et de texture adaptées au **revêtement de protection** à mettre en œuvre sur l'ensemble des surfaces traitées.

6.4.2.5.6 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton avant mise en œuvre d'une imprégnation ou d'un revêtement

Suivant le domaine concerné, les contrôles sur la préparation du support béton sont traités dans les textes suivants :

> Cas du domaine du bâtiment :

- norme NF DTU 42.1 (réfection des revêtements de façade),
- norme NF DTU 59.1 (revêtements de peinture) ;

> **Cas du domaine du génie civil :**

- fascicule 65 du CCTG (chapitre 11 : travaux de peinture),
- norme NF P95-103 (imprégnations et revêtements de protection).

6.4.2.5.7 Contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte sont développés dans le guide FABEM 8.

6.4.3

CONTRÔLES D'EXÉCUTION DES TRAVAUX DE MISE EN ŒUVRE APRES LA PRÉPARATION DU SUPPORT BÉTON ET DES ARMATURES

Une fois la préparation du support béton et des armatures achevée, la **méthode de réparation ou de renforcement retenue est mise en œuvre**. Ce qui impose les différents contrôles développés ci-après.

Note : conformément à l'avertissement formulé dans l'article 6.3 ci-dessus, l'épreuve de convenance porte généralement sur les mêmes points que ceux visés par les contrôles d'exécution.

6.4.3.1 Généralités

Les contrôles d'exécution des travaux ont pour but de vérifier qu'à tout instant du chantier, l'exécution des travaux est conforme aux spécifications du **marché**, complétées par les enseignements tirés des **épreuves de convenance**. Ils portent sur :

1. les conditions de préparation de l'opération ;
2. les conditions de préparation des produits et systèmes ;
3. les conditions de mise en œuvre des produits et systèmes ;
4. le contrôle des performances obtenues.

Ces différentes phases d'exécution font l'objet de **procédures d'exécution** et leur contrôle de **documents de suivi d'exécution**.

Rappel de l'article 6.4.1 ci-dessus : une grande partie des contrôles d'exécution à effectuer lors de l'exécution « des méthodes de restauration du béton et/ou de renforcement structural et des méthodes de restauration ou de conservation de la passivité des armatures » et plus particulièrement des **contrôles d'exécution** concernant les **méthodes classiques** traitant du remplacement des bétons pollués ou carbonatés et du traitement des armatures corrodées sont traités par les **normes suivantes** :

- NF EN 1504-10 qui détaille, pour chaque principe de protection et de réparation (fonction) de P1 à P10, la préparation, la réalisation et le contrôle des **méthodes de réparation associées** ;
- NF P95-101 relative aux **réparations de surface des bétons** ;
- NF P95-102-1 relative aux **réparations par projection de mortiers ou de bétons**.

Pour les **méthodes non traitées** par ces différentes normes, les essais de contrôle peuvent s'appuyer, soit sur des **normes spécifiques** (par exemple, pour les traitements électrochimiques), soit sur les autres **GUIDES de la famille FABEM**.

Les résultats des contrôles effectués lors de l'exécution d'une opération et/ou après l'exécution de cette opération sont validés par le **maître d'œuvre**. Dans le cas où les résultats ne correspondent aux performances prescrites, les **non-conformités** détectées doivent faire l'objet d'un traitement. **L'entrepreneur** procède à la **mise en conformité** et propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les mesures correctives qu'il compte appliquer.

La levée du **POINT D'ARRÊT** avant **réception des travaux** est liée à l'acceptation des résultats des différents contrôles effectués pendant et après l'exécution des travaux.

6.4.3.2 Contrôles d'exécution lors de la préparation de l'opération

> **1. Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation de l'opération portent sur les points suivants :**

- la présence et la prise de connaissance de tous les **documents nécessaires** (procédure d'exécution, cadres des documents de suivi, fiches techniques et de sécurité des produits et systèmes, modes d'emploi et d'entretien des matériels...);
- le constat de la réalisation des opérations préalables : **l'épreuve de convenue de préparation du support béton et des armatures et la préparation** proprement dite...;
- l'acceptation par le **maître d'œuvre du support béton et des armatures** après leur préparation ainsi que des contrôles associés ;
- l'acceptation par le **maître d'œuvre de la ou des procédures et des cadres des documents de suivi** relatifs à l'opération ;
- la mise en place des moyens d'accès et leur contrôle, suivant leur importance et si nécessaire, par les **organismes habilités** et, en particulier, le **coordonnateur SPS, voire le chargé des ouvrages provisoires (COP)** ;
- la mise en place des **dispositifs de protection** pour assurer la préservation de l'environnement, la sécurité et la santé des usagers et des tiers ;
- la mise en place des **dispositifs de protection** pour éviter la pollution par la poussière, les salissures... des parties en cours de traitement ou déjà traitées ;
- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du **matériel nécessaire à l'opération** ;
- l'approvisionnement des **matériaux, produits et systèmes** ;
- la présence des **fiches techniques** et des **fiches de données de sécurité** des produits et systèmes à utiliser ;
- la présence d'un **personnel qualifié et informé** des travaux à effectuer ainsi que des **consignes** à respecter conformément à la ou aux **procédures d'exécution** ;
- la présence des **équipements d'hygiène et de sécurité collectifs ou individuels** ;
- la présence et le bon état de fonctionnement des **instruments nécessaires aux mesures, contrôles et essais à effectuer** ;
- la présence, si besoin est, des **agents du laboratoire** qui est chargé des **contrôles et des essais** ;
- la vérification que toutes les personnes pouvant se trouver dans l'environnement du chantier ont été informées des **consignes de sécurité à respecter** ;
- la constatation du respect des exigences en matière de **température et d'hygrométrie de l'atmosphère et du support**. Ces mesures sont à renouveler durant toute l'application de la protection, à chaque reprise du travail et en cas de changement climatique. Les moyens de protection contre les précipitations, l'ensoleillement direct... doivent être disponibles sur le chantier et mis en œuvre, si nécessaire ;
- etc.

> **2. Les contrôles d'exécution relatifs à l'état du support béton et aux conditions thermo-hygrométriques avant la mise en œuvre des produits et systèmes :**

Le Tableau n° 65 (norme NF EN 1504-10), le Tableau n° 66 (norme NF P95-101) et le Tableau n° 67 (norme NF P95-102-1) listent les exigences en matière de température et d'hygrométrie pour l'**application des produits et systèmes** lors de la mise en œuvre de la majeure partie des **16 méthodes** « de restauration du béton et/ou de renforcement structural ou de restauration et/ou de préservation de la passivité des armatures ».

Ces exigences sont les suivantes :

- **la température du support** est à mesurer avec un thermomètre de surface. Celle-ci doit normalement être comprise entre +5°C et +30°C ;
- **en cas de précipitations**, le chantier doit mettre en œuvre les dispositifs de protection, sauf lorsque les produits et systèmes peuvent être appliqués sur des supports humides mais non ruisselants ;
- **la vitesse du vent** est à mesurer avec un anémomètre présent en permanence sur le chantier. La vitesse à ne pas dépasser est d'environ 8m/s, soit 30 km/h afin d'éviter une évaporation trop rapide ;
- **la température du support** doit être > +3°C au-dessus du point de rosée ;
- **la température de l'air** est à mesurer avec un thermomètre disponible en permanence sur le chantier ;
- **l'humidité relative de l'air** est à mesurer par les moyens visés par le **fascicule de documentation FD X15-111 de mai 2004** : Mesure de l'humidité de l'air - Généralités sur les instruments de mesure - Guide de choix et d'utilisation ;
- **la teneur en eau du support et des fissures** est à contrôler, soit visuellement (support sec, humide ou mouillé), soit à l'aide de sondes d'humidité. La présence ou non d'humidité est fonction de la nature du produit ou système à mettre en œuvre ou du procédé de réparation utilisé ;
- etc.

La teneur en eau du support béton peut être évaluée visuellement :

- **support sec** : la surface d'une cassure fraîchement produite à une profondeur de 2 cm environ ne devient pas plus claire suite au séchage ;
- **support humide** : la surface a un aspect humide et mat. Elle ne doit pas être recouverte d'une pellicule d'eau luisante. Le réseau de pores du support ne doit pas être saturé d'eau, c'est-à-dire que les gouttes d'eau déposées sur le support en béton doivent être absorbées, en laissant la surface reprendre son aspect mat après un temps bref ;
- **support mouillé** : le réseau de pores peut être saturé d'eau. La surface du béton peut être luisante, mais exempte d'eau libre.

Il est possible d'obtenir une indication visuelle supplémentaire en recouvrant la surface d'un **film de polyéthylène pendant 24 h**. Si aucune humidité n'est visible, la surface et la peau peuvent être considérées comme sèches.

La teneur en eau du support béton peut aussi être évaluée par divers essais :

- **sondes d'humidité relative** ;
- **mesurage de la résistivité électrique** à l'aide de l'essai de sondes et expression des résultats en teneur en eau absolue, après essais en laboratoire. Il existe également un essai de conductivité à deux pôles qui peut être associé à la teneur absolue en eau ;
- **prélèvement d'échantillons sur site** et essais en laboratoire ;
- **la teneur en eau des fissures** peut être observée en prélevant des échantillons ou des carottes et en les examinant.

Certaines des méthodes, comme l'ajout d'armatures passives internes au béton, l'ajout de forces, les traitements électrochimiques et la réinjection des conduits de précontrainte, peuvent faire l'objet d'exigences particulières en matière de température et d'hygrométrie.

6.4.3.3 Contrôles d'exécution lors de la préparation des produits

6.4.3.3.1 Généralités

Les **16 méthodes de réparation ou renforcement visées par le présent GUIDE** utilisent des produits (bétons, mortiers, coulis...) qui appartiennent aux deux familles suivantes :

1. Les produits ou systèmes de réparation de diverses origines :

- **industriels prêts à l'emploi** livrés en sacs, bidons... (concerne tous les produits et systèmes P, PC, PCC et CC). Les mélanges sont livrés prêts à gâcher (ajout d'eau d'un volume fixé au moment du malaxage) ou pré-dosés (tous les constituants sont fournis, seul le mélange est à effectuer par le malaxage). Il s'agit :
 - de produits de réparation bénéficiant du **marquage CE** dans le cadre de la **norme NF EN 1504-3** ;
 - de produits ne bénéficiant pas du marquage CE et qui doivent être considérés comme des produits fabriqués en centrale ou sur le chantier ;
- **non industriels fabriqués en centrale** (essentiellement des produits et systèmes CC, voire PCC) ;
- **non industriels fabriqués sur chantier** (essentiellement des produits et systèmes CC).

RAPPEL, pour être considérés comme des **produits de réparation**, les **produits industriels non marqués CE et ceux fabriqués en centrale ou sur le chantier** doivent présenter les **propriétés et les performances des produits de réparations bénéficiant du marquage CE**. Ils doivent donc faire l'objet d'une **épreuve d'étude** complétée ensuite par une **épreuve de convenance**.

2. Produits (bétons et mortiers traditionnels) élaborés à partir de matériaux usuels (gravillons, sable, ciment, adjuvants...) en centrale ou sur chantier qui relèvent des normes **NF EN 206/CN et NF DTU 21** ou du **fascicule 65 du CCTG**. En cas de mise en place de ces produits par projection, les exigences des **normes NF EN 1448761 et 2 et NF P95-102-1** s'appliquent.

Les **16 méthodes de réparation ou renforcement visées par le présent GUIDE** utilisent, d'autre part, divers **produits de réparations bénéficiant du marquage CE** comme les imprégnations, les revêtements, les produits de collage, les produits d'injection... qui relèvent des autres **normes-produits harmonisées de la série NF EN 1504-***.

Enfin, certaines des **16 méthodes de réparation ou renforcement visées par le présent GUIDE** comme la précontrainte additionnelle, l'ajout de forces, la réinjection des conduits de précontrainte les traitements électrochimiques... font appel à des **produits particuliers**.

Il est nécessaire que le **marché** précise les **contrôles à effectuer et leur nombre** lors de la préparation des différents **produits et systèmes** en s'inspirant des indications ci-après et des dispositions des **normes concernées**.

Note : afin de ne pas alourdir le **présent GUIDE**, seuls les contrôles sur la préparation des **produits de réparation de diverses origines** sont abordés dans les articles suivants.

6.4.3.3.2 Cas de la préparation de produits prêts à l'emploi à base de résines de synthèse ou de liants hydrauliques modifiés par des résines de synthèse

Outre les exigences développées dans les normes existantes (NF EN 1504-10, NF P95-101 et NF P95-102-1 et NF P95-103), les contrôles d'exécution lors de la préparation de ces produits (P, PC et PCC) portent tout particulièrement sur les points suivants :

- les exigences en matière de **température et d'hygrométrie** (voir l'article 6.4.3.2 ci-dessus) ;
- le respect des règles de sécurité liées aux **fiches techniques et fiches de données de sécurité** ;
- le **bon état des « kits » et des contenants** (bidons, sacs, boîtes...) ;
- l'**étiquetage des pots ou des bidons** pour vérifier que le produit est bien celui à mettre en œuvre (nature et couleurs) et que la date de péremption n'est pas dépassée ;

- **la présence des composants nécessaires** à l'élaboration du produit ou système de protection ([base + durcisseur] ou [résine en émulsion + charges] pour les bicomposants, [base + durcisseur + charges] pour les tricomposants...) ;
- **la qualité apparente** des différents composants à l'ouverture des récipients ;
- **le transvasement de la totalité des composants** dans le récipient réservé au mélange (en général celui qui contient la base) et dans **l'ordre fixé par la fiche technique**. Toute erreur à ce niveau risque d'entraîner un défaut de durcissement du produit et la perte de ses performances ;
- **l'outil de malaxage** des composants, qui doit être identique ou le même que celui utilisé durant **l'épreuve de convenance** (même puissance, même vitesse...) afin de minimiser l'inclusion de bulles d'air, l'échauffement du mélange ;
- **le temps de malaxage** ;
- **l'homogénéité du produit** (absence de grumeaux) et de sa **teinte** à la fin du mélange ;
- **le temps de mûrissement** avant utilisation ;
- **la réalisation des prélèvements** qui peuvent être nécessaires pour effectuer les essais liés aux usages des produits (injection, collage, ragréage...) :
 - l'ouvrabilité :
 - **norme NF EN 13395-1 de décembre 2002** : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de l'ouvrabilité Partie 1 : Essai d'écoulement des mortiers thixotropes,
 - **norme NF EN 13395-2 de décembre 2002** : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de l'ouvrabilité Partie 2 : Essai d'écoulement des coulis ou mortiers,
 - **norme NF EN 13395-3 de décembre 2002** : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de l'ouvrabilité Partie 3 : Essai d'écoulement du béton de réparation ;
 - la viscosité : **norme NF EN ISO 3219 de novembre 1994** : Plastiques Polymères/résines à l'état liquide, en émulsion ou en dispersion Détermination de la viscosité au moyen d'un viscosimètre rotatif à gradient de vitesse de cisaillement défini ;
 - la durée de vie en pot ou durée pratique d'utilisation (**DPU**) :
 - **norme NF P 18-810 de décembre 2009** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique Produits à base de résines synthétiques Détermination de la Durée Pratique d'Utilisation (DPU),
 - **norme NF EN ISO 9514 de juin 2019** : Peintures et vernis - Détermination du délai maximal d'utilisation après mélange des systèmes de revêtement multicomposants - Préparation et conditionnement des échantillons et lignes directrices pour les essais ;
 - le temps de raidissement : **norme NF EN 13294 de décembre 2002** : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai Temps de raidissement ;
 - **la dureté Shore D** pour les produits rigides (≥ 60) après polymérisation : **norme NF EN ISO 868 de juillet 2003** : Plastiques et ébonite - Détermination de la dureté par pénétration au moyen d'un duromètre (dureté Shore) ;
- **etc.**

*Note : il est rappelé que la **DPU** sur le chantier ne correspond pas à celle mesurée en laboratoire sur des quantités de composants réduites et dans des conditions de température différentes.*

6.4.3.3.3 Cas de la préparation des produits industriels considérés comme fabriqués en centrale ou sur le chantier

Outre les exigences développées dans les **normes existantes (NF EN 1504-10, NF P95-101 et NF P95-102-1 et NF P95-103, voire NF EN 14487-1 et 2 et NF P95-102-1)**, les **contrôles d'exécution** lors de la **préparation de ces produits industriels** portent tout particulièrement sur les points suivants :

- le respect des règles de sécurité liées aux **fiches techniques** et de **données de sécurité** ;
- **l'étiquetage des sacs** pour vérifier que le produit est bien celui à mettre en œuvre (nature et couleur) et que la date de péremption n'est pas dépassée ;
- **la qualité apparente** du produit à l'ouverture du sac (absence de mottes...) ;
- **la machine de malaxage** des composants, qui doit être identique ou la même que celle utilisée durant l'épreuve de convenance (même capacité, même puissance, même vitesse...) afin d'obtenir le malaxage requis ;
- **la vérification que tous les composants nécessaires** ont été introduits dans l'auge (malaxage ou avec un mélangeur à hélice) ou la cuve (malaxage mécanique) affectée au mélange, dans l'ordre et en respectant les quantités conformément à la procédure d'exécution (normalement, les produits prêts à l'emploi sont prédosés et la totalité de la charge du sac ou du récipient doit être utilisée conformément à la fiche technique) ;
- **la quantité d'eau ajoutée**, qui doit être celle prévue dans la fiche technique (la température de l'eau est à vérifier, si nécessaire) ;
- **le temps de malaxage** ;
- **l'homogénéité du produit** (absence de grumeaux) et de sa teinte à la fin du mélange ;
- **la réalisation des prélèvements** qui peuvent être nécessaires pour effectuer les essais liés aux usages des produits (injection, collage, ragréage...) :
 - l'ouvrabilité : **normes NF EN 13395-1, NF EN 13395-2 et NF EN 13395-3**,
 - temps d'écoulement au cône de Marsh : **norme NF EN 14117 de janvier 2005** : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai Détermination du temps d'écoulement de produits d'injection à base de ciment),
 - le temps de raidissement : **norme NF EN 13294**,
 - le temps de prise :
 - **norme NF EN 13409 de janvier 2003** : Méthodes d'essai pour les mortiers de lissage et/ou d'égalisation à prise hydraulique - Détermination du temps de prise,
 - **norme NF P15-431 de février 1994** : Liants hydrauliques Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal ;
- etc.

6.4.3.3.4 Cas de la préparation des produits fabriqués en centrale et sur le chantier

Les contrôles de fabrication de ces produits sont voisins de ceux appliqués pour la préparation des mortiers et bétons, traditionnels. Ces contrôles sont développés dans les **normes NF EN 206/CN et NF DTU 21** ou le **fascicule 65 du CCTG**, voire les **normes NF EN 14487-1 et 2 et NF P95-102-1** auxquels il convient de se reporter pour rédiger la liste et le contenu des contrôles de préparation des produits. Il y lieu de procéder, d'une part, à la réception des **constituants** et, d'autre part, des **produits après malaxage** sous forme de mélanges secs ou de mortier ou béton frais.

6.4.3.4 Contrôles d'exécution dans le cas d'une restauration du béton et /ou d'un renforcement structural

6.4.3.4.1 Généralités

Le présent article porte à la fois sur les **contrôles d'exécution lors de la réalisation de l'opération** (par exemple, la mise en œuvre de produits ou de systèmes) et sur ceux effectués **après la réalisation de l'opération** (par exemple, après le durcissement des produits et systèmes).

Le marché fixe les contrôles à opérer ainsi que leur nombre en fonction des exigences de performance recherchées.

ATTENTION, les contrôles d'exécution développés dans cet article sont relatifs aux **16 méthodes de réparation ou de renforcement** visées par le **présent GUIDE**. Ils sont présentés dans un **certain ordre qui n'est pas forcément celui dans lequel les travaux doivent s'exécuter** lorsque plusieurs de ces méthodes doivent être associées.

Pour chaque méthode de réparation ou de renforcement (par exemple, l'application d'un produit ou d'un système en faibles ou fortes épaisseurs), les **contrôles concernent les différentes techniques de mise en œuvre** utilisables (par exemple, mise en place manuelle, par projection...).

Les contrôles sont basés sur ceux prescrits par les **normes NF EN 1504-10, NF P95-101, NF P95-102-1, NF P95-103, NF P95-104 et NF P 95-105** ou, pour certaines des méthodes, sur les documents de référence existants (autres normes, documents à caractère normatif...) et les **GUIDES** du **STRRES de la famille FABEM**, le tout avec les compléments qui s'imposent.

Il est conseillé au lecteur de se reporter à l'article 5.3.3 qui décrit dans le détail la réalisation des différentes méthodes de restauration du béton ou de renforcement structural.

> Quelle que soit la méthode de réparation ou de renforcement mise en œuvre, les points suivants doivent faire l'objet de contrôles :

- le respect des **règles de sécurité** ;
- le respect du **plan de contrôle** fixé par le **marché** et adapté, si nécessaire, après les **épreuves de convenance**. Ce plan fixe :
 - la liste des points à contrôler sélectionnés parmi ceux de l'épreuve de convenance,
 - la fréquence des contrôles,
 - la répartition des contrôles entre ceux internes, externes de l'entreprise, voire extérieurs,
 - les conditions de conservation des corps d'épreuve,
 - les conditions de validation des contrôles ;
- le respect des dispositions de la **procédure d'exécution (PAQ)**, des **fiches techniques et des fiches de données de sécurité** ;
- **l'état du support** qui peut nécessiter une humidification préalable (cas des produits à base de liants hydrauliques), le respect d'une teneur en eau limitée pour certains produits, la mise en œuvre d'une barbotine ou d'un primaire d'accrochage pour d'autres. Ces derniers produits imposent de respecter un certain délai avant la mise en œuvre du mortier ou du béton de réparation ou renforcement ;
- l'évolution des **conditions thermiques et hygrométriques de l'atmosphère et du support**, qui fait l'objet des mesures décrites dans l'article 6.4.3.2 ci-dessus (zone d'application soumise à un ensoleillement direct, arrivée de la pluie et/ou du vent, baisse de la température...) et les dispositions prises pour en réduire les effets (mise en place de protection, arrêt de chantier...) ;
- **la protection** contre la poussière, les salissures en provenance de la préparation de surface d'une autre zone ;
- **l'arrêt de l'exploitation de l'ouvrage** si les vibrations sont incompatibles avec l'application des produits et systèmes ;
- les dispositions appliquées en cas **d'incident de chantier** (panne de matériel, mauvaise mise en œuvre...) ;
- la gestion des **documents de suivi de l'exécution**. Les défauts d'exécution doivent faire l'objet d'un relevé sur plans et de **fiches de non-conformité** ;
- les précautions prises, en particulier pour éviter des **reprises de bétonnage trop visibles** lors des interruptions de mise en œuvre (pause déjeuner, fin de journée...) ;
- **les quantités de produits ou de systèmes utilisés** ;
- **la durée des différentes phases** d'une opération ;
- **le personnel affecté** à l'opération ;

- le rendement obtenu (par exemple, au m²) ;
- etc.

Les essais effectués lors des contrôles doivent faire l'objet de **procès-verbaux** rassemblant l'ensemble des résultats et mettant en évidences les **non-conformités**.

En cas de **non-conformité**, l'**entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les actions correctives à entreprendre et ce dernier lève le **POINT d'ARRÊT** après constat de l'efficacité de celles-ci.

Rappel : si des **travaux complémentaires** sont à effectuer avant ou après la réparation ou le renforcement (par exemple, une injection de fissure, l'application d'un revêtement de protection), il faut effectuer les **contrôles d'exécution** correspondants.

6.4.3.4.2 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs

6.4.3.4.2.1 Cas des applications manuelles

> Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- le respect des consignes de la fiche technique et de la procédure d'exécution,
- les produits et systèmes (se reporter à l'article sur la préparation des produits),
- le respect de la durée d'utilisation du produit une fois préparé,
- l'utilisation des outils prévus par la fiche technique et la procédure d'exécution,
- la rigidité des éventuels coffrages classiques ou servant de guide et la solidité de leur fixation,
- le serrage soigné des produits mis en place à la truelle, en particulier en présence d'armatures (le bourrage de l'espace derrière l'armature est indispensable),
- le respect du délai entre les couches successives éventuelles,
- le respect du délai entre la mise en place du produit et le talochage de finition,
- le respect des tolérances sur la géométrie et la rectitude des arêtes,
- le respect de l'épaisseur du produit mis en place à mesurer avant son durcissement et de l'enrobage des armatures (utilisation d'une pige),
- le respect de la texture exigée lors de la finition de surface,
- l'absence de décollement local visible du produit de réparation après sa mise en place, en particulier pour un produit ou un système appliqué en sous-face,
- le respect du délai de décoffrage, à adapter en fonction de la température,
- la réalisation de la cure,
- etc.

> Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- les décollements éventuels du produit de réparation à contrôler par des **sondages au marteau**. Cet essai systématique doit être complété par les essais qui suivent en cas de doute sur la qualité de l'adhérence du matériau de réparation ou de renforcement :
 - l'adhérence du matériau de réparation par un essai d'arrachement. Se reporter à la **norme NF EN 1542**,
 - la présence de vides dans ou derrière le matériau de réparation ou de renforcement. Trois procédés peuvent être utilisés :
 - les ultrasons visés par la norme NF EN 1504-4,
 - la radiographie (cas très exceptionnel) visée par :
 - la **norme NF A09-202 de décembre 1999** : Essais non destructifs Principes généraux de l'examen radiographique, à l'aide de rayons X et gamma, des matériaux béton, béton armé et béton précontraint,

- le fascicule de documentation **FD A09-203 de décembre 1999** : Essais non destructifs Examen radiographique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux béton, béton armé et béton précontraint Exemples de radiogrammes avec leur interprétation,
- et le carottage suivi d'un examen visuel,
- la présence de fissures dans le matériau de réparation par un examen visuel avec, si nécessaire, l'utilisation d'un fissuromètre ou d'un compte-fils,
- la géométrie, la planéité, la couleur et la texture, par un examen visuel avec recours, si nécessaire, à la règle de 2,00 m, au réglet de 20 cm et aux planches (teinte et texture) du **fascicule de documentation FD P 18-503**,
- d'autres essais, suivant les exigences du marché et pour compléter les essais précédents, peuvent être exécutés :
 - l'épaisseur du matériau de réparation ou de recouvrement des armatures une fois durci, par un examen visuel, un carottage ou un profomètre (mesure de l'enrobage). Se reporter aux normes **NF EN 12504-1 de juin 2019** : Essais pour béton dans les structures - Partie 1 : Carottes - Prélèvement, examen et essais en compression, (**NF EN 13791** et **NF EN 13791/CN** Interprétation des mesures sur éprouvettes) et **NF EN 12190 de décembre 1998** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance à la compression pour les mortiers de réparation,
 - la masse volumique du matériau de réparation ou de renforcement durci. Se reporter à la **norme NF EN 12390-7 de juin 2019** : Essais pour béton durci - Partie 7 : Masse volumique du béton durci,
 - la résistance en compression sur éprouvette normalisée (dans le cas où le produit participe à un renforcement structural). Se reporter à la norme **NF EN 12390-3 de juin 2019** : Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes. Un scléromètre peut aussi être utilisé (se reporter à la norme **NF EN 12504-2**),
 - la perméabilité aux liquides. Se reporter à la norme **NF EN 12390-8 de juin 2019** : Essais pour béton durci - Partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression,
 - la perméabilité à l'air par l'**essai BT CRIS**. Se reporter au **guide FABEM 4**,
 - la résistance au glissement et au dérapage. Se reporter à la norme **NF EN 13036-4 de mars 2012** : Caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthode d'essai - Partie 4 : Méthode d'essai pour mesurer l'adhérence d'une surface : L'essai au pendule,
 - etc.

Note : l'adaptation de la norme **NF EN 13791/CN** à la norme européenne d'août 2019 est en cours de rédaction.

6.4.3.4.2 Cas des applications mécanisées

La mise en œuvre mécanisée de produits ou systèmes en faibles épaisseurs fait appel à la projection par voie sèche ou par voie mouillée. Le détail des contrôles spécifiques à effectuer figure dans les **normes NF P95-102-1, NF EN 14487-1**⁴⁴ (norme de spécifications, se reporter aux tableaux 7, 8, 11 et 12) et **NF EN 14487-2** (norme d'exécution) et le **guide FABEM 5**. Les contrôles essentiels sont rappelés ci-dessous. Il faut noter que les contrôles ci-devant relatifs aux applications manuelles sont aussi à mettre en œuvre, sauf ceux relatifs à l'emploi des outils manuels.

Avant d'effectuer les divers contrôles d'exécution, il faut s'assurer que les **contrôles préalables** (moyens d'accès, échafaudages, préparation du support béton et des armatures, ajout d'armatures, mise en place des coffrages...) ont été effectués ainsi que ceux relatifs au respect des exigences des tableaux suivants de la **norme NF EN 14487-1 complétés par la norme NF P95-102-1** :

Tableaux de la norme NF EN 14487-1 :

- n°7 exigences relatives au béton projeté frais,
- n°8 exigences relatives au béton durci (après projection),

⁴⁴ Les différents fascicules disponibles sur le site : www.asquapro.asso.fr complètent la norme européenne sur la formulation et le dimensionnement.

- n°11 contrôle du mélange de base,
- n°12 contrôle des propriétés du béton projeté.
- **Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :**
 - se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
 - les contrôles essentiels lors de la projection portent sur les points suivants :
 - la qualification du porte-lance et ses équipements de protection,
 - la rigidité des fixations des armatures existantes pour limiter leur vibration lors de la projection,
 - l'essai d'affaissement pour les bétons mis en œuvre par voie mouillée (se reporter aux **normes NF EN 12350-1 de juin 2019** : Essais pour béton frais – Partie 1 : prélèvement et appareillage commun et **NF EN 12350-2 de juin 2019** : Essais pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement),
 - l'orientation de la lance de projection et la distance entre celle-ci et la surface à traiter,
 - le remplissage du vide en arrière des armatures existantes,
 - l'épaisseur maximale de la couche et le délai entre les couches,
 - la réalisation d'une couche complémentaire dans le cas où un talochage de finition est requis,
 - la projection dans des moules (**norme NF EN 14488-1 et les guides ASQUAPRO**) pour contrôler les caractéristiques du béton après durcissement sur des carottes à prélever,
 - la teneur en fibres (cas des bétons fibrés),
 - la densité du béton frais une fois projeté,
 - la cure,
 - etc.
- **Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :**
 - se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
 - pour les autres contrôles, il faut se référer aux deux tableaux suivants relatifs, d'une part, aux exigences et, d'autre part, aux contrôles proprement dits de la **norme NF EN 14487-1** complétés par la **norme NF P95-102-1** (Cf. le tableau du paragraphe 5.4) :
 - n°8 exigences relatives au béton durci,
 - n° 12 contrôles de propriétés du béton frais et durci (nombre d'essais minimaux),
 - les essais les plus importants portent sur les points suivants :
 - l'homogénéité du matériau projeté et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons... déjà cités ci-dessus,
 - l'épaisseur du matériau mis en œuvre en complément des vérifications faites sur le béton projeté frais,
 - l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à la norme **NF EN 1542** (épaisseur ≤ 50 mm),
 - la résistance au jeune âge, si besoin est, (**norme NF EN 14488-2**),
 - la densité apparente et la résistance à la compression de carottes prélevées et testées conformément à la **norme NF EN 12504-1** (carottes prélevées après durcissement du béton projeté dans des caisses plates conformes aux exigences des **normes NF EN 14487-1 et NF P95-102-1**), l'interprétation des résultats des mesures relèvent des normes **NF EN 13791 et NF EN 13791/CN**,
 - la perméabilité aux liquides. Se reporter à la norme **NF EN 12390-8** (profondeur de pénétration d'eau sous pression),
 - le module d'élasticité en compression. Se reporter à la norme **NF EN 13412**,
 - l'aspect de surface exigé (planéité, texture, couleurs...),
 - etc.

Note : l'adaptation de la norme NF EN 13791/CN à la norme européenne d'août 2019 est en cours de rédaction

Dans le cas de mise en œuvre d'un béton fibré, des essais spécifiques sont à effectuer : résistance à la flexion au premier pic, résistance ultime à la flexion, résistance résiduelle, teneur en fibres, capacité d'absorption d'énergie conformément aux normes d'essai en vigueur susvisées.

6.4.3.4.3 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs

ATTENTION, ce type de travaux concerne le plus souvent un **renforcement structural**. Il faut s'assurer, lors des contrôles, que les matériaux mis en place participent effectivement à la reprise des efforts dus, soit aux charges appliquées postérieurement au renforcement, soit à l'ensemble des charges appliquées à la structure. Cela implique, par exemple, la mise sur un **éaiement ou un cintre** provisoire suivie d'un décintrement, des vérinages, l'ajout de forces... Il appartient au **marché** de fixer les contrôles spécifiques complémentaires à mettre en œuvre qui relèvent de la topométrie, de l'extensométrie... Se reporter au **guide FABEM 8**.

6.4.3.4.3.1 Cas des applications manuelles

Les contrôles d'exécution à effectuer pendant et après l'opération dans le cas de la mise en œuvre de matériaux en faibles épaisseurs sont utilisables lorsque les épaisseurs sont importantes. Se reporter à l'article 6.4.3.4.2 ci-dessus.

6.4.3.4.3.2 Cas des applications mécanisées

Se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles pendant et après l'opération, qui s'appliquent pour la plupart aux applications mécanisées de matériaux en fortes épaisseurs.

> 1. Cas de la mise en œuvre des produits et systèmes par bétonnage dans des coffrages :

Les différents contrôles à effectuer relèvent de la **norme NF EN 13670/CN**, pour le domaine du bâtiment de la **norme NF DTU 21** et pour le domaine du génie civil du **fascicule 65 du CCTG**, textes auxquels il convient de se reporter pour fixer le détail des contrôles.

■ Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- les ouvrages provisoires éventuels,
- les coffrages et la qualité des parements et des autres surfaces coffrées ou non à obtenir,
- les traitements de surface après durcissement du béton,
- la mise en place des armatures de béton armé existantes ou additionnelles, voire d'armatures de précontrainte⁴⁵,
- la mise en œuvre des bétons :
 - la mesure de la consistance au cône d'Abrams (consulter les normes **NF EN 12350-1** et **NF EN 12350-2**) essai qui est inadapté aux **BHP** lorsque l'affaissement dépasse 20 ± 2 cm et également aux **BAP**,
 - la durée limite de mise en œuvre,
 - les conditions de bétonnage,
 - la vibration nécessaire pour les bétons ordinaires (pour les **BHP**, après étude),
 - la cure indispensable,
- le décoffrage et le décintrement (des opérations préalables sont parfois nécessaires),
- les traitements de surface après durcissement du béton,
- etc.

⁴⁵ Rappel, les travaux sur un ouvrage précontraint nécessitent des précautions particulières pour ne pas mettre en jeu la sécurité de la structure.



Photo n° 172 : contrôle d'étalement d'un BAP
(crédit photo LRPC Clermont - M. Geoffrey)

■ Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
- les autres contrôles essentiels après projection portent sur les points suivants :
 - la résistance à la compression, voire à la traction par fendage à 7 jours et 28 jours d'éprouvettes 16x32 (se reporter à la **norme NF EN 206/CN** et aux **normes d'essai NF EN 12390-3 et NF EN 12390-6 d'avril 2012** : Essais pour béton durci – Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes),
 - l'homogénéité du matériau mis en place et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons, par carottage... déjà cités ci-dessus,
 - l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à la **norme NF EN 1542** (jusqu'à 50 mm d'épaisseur, au-delà il faut procéder à un essai de traction sur carottes prélevées conformément à la **norme NF EN 12504-1** et testées en laboratoire conformément à la **norme NF EN 14488-4/IN1/+ A1 de mai 2008** : Essais pour béton projeté – Partie 4 : adhérence en traction directe sur carottes,
 - etc.

> **2. Cas de la mise en œuvre des produits et systèmes par injection dans des coffrages étanches :**

■ Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- le matériel d'injection et la présence d'un limiteur de pression,
- les coffrages, qui doivent être rigides et étanches (essai à l'air),
- la présence des événements d'injection et de purge,
- la mise en place des armatures de béton armé existantes ou additionnelles, voire d'armatures de précontrainte,
- l'injection :
 - la fluidité du produit à injecter (les valeurs limites sont fixées en fonction des résultats de l'épreuve de convenance),
 - la pression d'injection et le volume injecté,
 - l'exsudation et le ressuage du coulis (les valeurs limites sont fixées en fonction des résultats de l'épreuve de convenance),
 - la purge des événements avant leur fermeture,
 - le maintien de la pression en fin d'injection,
 - la durée limite de mise en œuvre,
 - la cure indispensable,
- le décoffrage et le décintrement (des opérations préalables sont parfois nécessaires),
- les traitements de surface après durcissement mortier ou du béton,
- etc.

- **Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :**
 - se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
 - les autres contrôles essentiels après injection portent sur les points suivants :
 - la résistance à la compression, voire à la traction par fendage à 7 jours et 28 jours d'éprouvettes,
 - l'homogénéité du matériau projeté et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons... déjà cités ci-dessus,
 - l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter aux **normes NF EN 1542 et NF EN 14488-4/IN1/+ A1**,
 - etc.
- > **3. Cas de la mise en œuvre des produits et systèmes par projection :**



Photo n° 173 : projection dans une boîte pour essais sur éprouvettes carottées (crédit photo D. Poineau)

Les contrôles d'exécution sont décrits dans l'article 6.4.3.4.2.2 ci-dessus, dans le norme NF P95-102-1 et dans le guide FABEM 5.



**Restauration du Grand-Rocher
du Zoo de Vincennes
par béton projeté**

Photo n° 174 : restauration du Grand Rocher du Zoo de Vincennes (crédit photo D. Poineau)

6.4.3.4.4 Contrôles d'exécution dans le cas d'un collage structural de bétons**■ Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :**

- l'état du support et sa géométrie (surfaces horizontales, verticales ou en sous-face),
- l'absence de vibrations ou un niveau de vibrations acceptable,
- la durée pratique d'utilisation du produit (DPU). Se reporter aux **normes NF P 18-810 et NF EN ISO 9514**,
- le temps ouvert. Se reporter à la **norme NF EN 12189**,
- la couche d'imprégnation en résine pure (primaire), éventuellement mise en place pour durcir la peau du béton,
- le respect du délai entre la mise en place du primaire et celle de la colle chargée,
- la mise en place de la colle, qui doit recouvrir le béton et non les armatures existantes,
- l'épaisseur du film de colle, à mesurer au moyen d'une pige ou d'une jauge à peigne ou à roue dentée,
- le respect du délai entre la mise en place de la colle chargée et celui de la pose de l'élément de béton durci ou la mise en place du mortier ou du béton frais,
- l'efficacité du serrage (pression) dans le cas du collage béton durci sur béton durci (la colle doit baver latéralement),
- tous les contrôles relatifs au bétonnage, dans le cas d'un collage d'un béton frais sur un béton durci (pour mémoire),
- etc.

■ Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
- le nettoyage des bavures de colle,
- l'évolution de la dureté shore de la colle sur des coupelles (épaisseur de produit > 6 mm et surface > 25 cm²) conservées dans les conditions du chantier (il est nécessaire de connaître les courbes d'évolution de la dureté de la colle en fonction de la température et de l'humidité pour fixer la dureté à atteindre au temps « t ». Normalement, il faut atteindre une **dureté Shore D** de 80, visée par la **norme NF EN ISO 868**,
- l'homogénéité du matériau mis en œuvre (mortier ou béton) et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons, par carottage... déjà cités ci-dessus,
- l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à l'essai n°35 et à la **norme NF EN 1542**,
- etc.

6.4.3.4.5 Contrôles d'exécution dans le cas d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support

Se reporter à la **norme NF 95-103** et au **guide FABEM 3**.

6.4.3.4.6 Contrôles d'exécution dans le cas d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton

Se reporter à la **norme NF 95-103** et au **guide FABEM 3**.

6.4.3.4.7 Contrôles d'exécution dans le cas de scellement d'armatures de béton armé

Se reporter aux **normes NF 95-101** et **NF P95-102-1** et au **guide FABEM 7**. Pour les produits faisant l'objet d'une **ÉTE**, au texte de celle-ci qui définit la procédure de mise en œuvre.

■ Les principaux contrôles d'exécution pendant la réalisation des scellements portent sur les points suivants :

- l'état du support et sa géométrie (surfaces horizontales, verticales ou en sous-face) ;
- les dimensions, la propreté et la rugosité des trous ;

- la présence d'humidité ou de venues d'eau et la compatibilité du produit de scellement à mettre en œuvre ;
 - le respect des conditions thermiques et hygrométriques imposées par le produit de scellement à mettre en œuvre ;
 - l'absence de vibrations ou un niveau de vibrations acceptable ;
 - les conditions de préparation des produits (respect du dosage et du temps de malaxage...) ;
 - la maniabilité des produits de scellement (se reporter aux normes **NF EN 13395-1** : essais d'écoulement de mortiers thixotropes et **NF EN 13395-2** : essais d'écoulement de coulis et mortiers) et leur adaptation à la position et l'orientation des trous réalisés de scellement (verticaux et orientés vers le bas ou le haut, horizontaux, faiblement inclinés) ;
 - la durée pratique d'utilisation du produit, en particulier avec les produits à base de polymères. Se reporter aux **normes NF P 18-810 et NF EN ISO 9514** ;
 - le remplissage des trous avant la mise en place de la barre ;
 - le maintien des barres pendant le durcissement du matériau ;
 - la cure pour les produits à base de liants hydrauliques ;
 - etc.
- **Les principaux contrôles, après durcissement des produits portent sur les points suivants :**
- le respect du positionnement de barres prévu au projet ;
 - le remplissage (aspect, absence de retrait...) ;
 - la **dureté Shore D** sur les produits à base de polymères des types P et PC (se reporter à la **norme NF EN ISO 868**) ;
 - en cas de doute sur la réalisation des scellements, des essais d'arrachement peuvent être prescrits,
 - etc.

La fixation du nombre des **essais d'arrachement in situ** et les conditions d'interprétation des essais sont précisées dans l'article **4.2.5.6.3.3** ci-dessus.

6.4.3.4.8 Contrôles d'exécution dans le cas de calages d'éléments

Rappel, trois techniques de mise en place du produit ou du système de calage sont possibles : coulage d'un coulis fluide, injection d'un coulis fluide et matage d'un mortier sec.

- **Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :**
- se reporter à l'article 6.4.3.4.7 ci-dessus sur la mise en place d'un mortier ou d'un béton par injection, qui liste les contrôles à effectuer,
 - l'ouvrabilité du coulis mis en place par coulage ou injection. Se reporter à la **norme NF EN 13395-2**,
 - la consistance du mortier sec mis en place par matage (se reporter à la **norme NF EN 1015-3 d'octobre 1999** : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais [avec une table à secousses] et aux compléments A1 de mai 2004 et A2 de mai 2007 de cette norme),
 - la durée pratique d'utilisation du produit (cas des PC). Se reporter aux **normes NF P 18-810 et NF EN ISO 9514**,
 - l'évolution de la **dureté Shore D** sur des éprouvettes pour les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la **norme NF EN ISO 868**,
 - etc.
- **Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :**
- le remplissage (aspect, absence de retrait de fissures),
 - la **dureté Shore D** après durcissement sur les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la **norme NF EN ISO 868**,

- l'évolution des déformations et du comportement à la mise en charge et au-delà,
- la résistance à la compression de carottes prélevées sur un élément témoin en cas de doutes sur la qualité de l'exécution,
- etc.

6.4.3.4.9 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton

Se reporter aux **normes NF EN 13670/CN et NF DTU 21 et au fascicule 65 du CCTG**. En cas d'utilisation d'armatures en acier inoxydable ou à base de composites se reporter à l'annexe n°3 du **présent GUIDE**. Des contrôles particuliers sont à effectuer en cas de soudure ou manchonnage. Se reporter au fascicule de documentation **FD A35-029 Septembre 1999** : Armatures pour béton armé - Assemblages soudés - Qualification d'un mode opératoire de soudage - Qualification des soudeurs.

Note : le **FD A35-029 est annulé**.

6.4.3.4.10 Contrôles d'exécution dans le cas de collages d'armatures passives extérieures au béton

Se reporter à la **norme NF P95-105 et au guide FABEM 7**.

6.4.3.4.11 Contrôles d'exécution dans le cas d'un l'ajout de forces par précontrainte additionnelle

Se reporter au **guide FABEM 8**.

6.4.3.4.12 Contrôles d'exécution dans le cas d'un l'ajout de forces par déformations imposées

Se reporter au **guide FABEM 8**.

6.4.3.5 Contrôles d'exécution dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures

6.4.3.5.1 Contrôles d'exécution dans le cas du remplacement d'un béton carbonaté ou pollué ou d'une augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

Se reporter aux **articles 6.4.3.4.2 ci-dessus** qui traitent de la mise en place de produits ou systèmes en faibles épaisseurs et des contrôles à effectuer (sans oublier les contrôles à effectuer lors du traitement des armatures).

6.4.3.5.2 Contrôles d'exécution dans le cas de traitements électrochimiques

6.4.3.5.2.1 Cas de l'extraction des chlorures et de la réalcalinisation

Il n'a pas été jugé utile de lister les contrôles à effectuer pendant le déroulement des opérations et ce, pour les raisons suivantes :

- la **norme NF EN 14038-1** décrit dans le détail les contrôles à effectuer lors d'une réalcalinisation à courant imposé. Un résumé des contrôles figure dans l'article 5.3.3.4.2 ci-dessus consacré à cette méthode ;
- l'article 5.3.3.4.3 ci-dessus décrit les contrôles à effectuer dans le cas d'une extraction des chlorures à courant imposé ;

sachant que la totalité des chlorures ne peut être extraite, il faut s'assurer que le dosage résiduel en chlorures au droit des armatures est nettement inférieur aux valeurs limites (tenir compte du fait que le profil des chlorures relevé en fin de traitement va se modifier avec le temps par diffusion).

- dans le cas où il s'agit de méthodes basées sur des anodes actives, les contrôles sont à élaborer en fonction de la notice technique de l'entreprise détentrice du procédé. Le programme des contrôles est fixé par le **marché** ou est proposé par l'**entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre**. Se reporter à l'article 5.3.3.4.4 ci-dessus
- **les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :**
 - du pH (se reporter à la norme **NF EN 14630** (Mesure de la profondeur de carbonatation). L'épaisseur du béton réalkalinisé autour des armatures doit au moins être de 10 mm,
 - de la teneur en chlorures (se reporter à la norme **NF EN 14629** (fiche B2-3).

Rappel : après ces opérations, un revêtement de protection est à mettre en œuvre. Pour les contrôles d'exécution correspondants, il faut se reporter à la **norme NF P95-103** et au **guide FABEM 4**.

6.4.3.5.2.2 Cas de la prévention ou de la protection cathodique

Il n'a pas été jugé utile de lister ici les contrôles à effectuer pendant le déroulement de l'opération et après celle-ci, c'est-à-dire durant la durée de fonctionnement de l'installation et ce, pour la raison suivante :

> Cas de la prévention ou protection cathodique par courant imposé :

La norme **NF EN ISO 12696** décrit dans le détail les contrôles à effectuer lors d'une prévention ou d'une protection cathodique à courant imposé. Un résumé des contrôles figure dans l'article 5.3.3.4.5 ci-dessus consacré à cette méthode ;

Rappel de trois points importants :

- le respect des seuils de résistivité pour les produits de réparation du béton localement dégradé,
- l'intensité du courant à appliquer, qui est beaucoup plus faible dans le cas d'une démarche de prévention que dans celle d'une protection,
- l'importance à apporter aux opérations de contrôle et de maintenance pendant toute la durée d'exploitation de l'installation.

> Cas de la prévention ou protection cathodique par anodes galvaniques :

Dans ce cas ou si la technique proposée diffère par trop de celle à courant imposé visée ci-dessus, les contrôles sont à élaborer en fonction des exigences de la **norme NF EN ISO 12696** et de la **notice technique de l'entreprise détentrice du procédé**. Le programme des contrôles est proposé par le **marché** ou par l'**entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre**.

6.4.3.5.3 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur des armatures de béton armé

- **Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :**
 - la mise en œuvre du produit sur la totalité de la surface des armatures décapées sans déborder sur le béton si le produit n'a pas aussi le rôle d'améliorer l'adhérence au niveau de la reprise de bétonnage,
 - l'épaisseur de produit mis en œuvre avec l'aide d'une pige ou d'une jauge à peigne ou à roue dentée,
 - la durée pratique d'utilisation (DPU) pour les produits à base de résines synthétiques. Se reporter aux **normes NF P 18-810 et NF EN ISO 9514**,
 - l'évolution de la **dureté Shore D** sur les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la **norme NF EN ISO 868**,
 - etc.
- **Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :**
 - l'aspect des armatures (continuité et épaisseur du feuillet mis en œuvre et durci),

- la mesure de l'épaisseur du feuil sec relève des **normes NF EN ISO 2808 de septembre 2019** : Peintures et vernis — Détermination de l'épaisseur du feuil, **NF EN ISO 19399 de décembre 2017** : Peintures et vernis — Détermination de l'épaisseur par la méthode d'entaille en coin (Méthode de rayer et de forage) et **NF T30-124 de mars 2020** : Peintures et vernis — Mesurage de l'épaisseur du feuil sec — Méthode non destructive à flux magnétique,
- la **dureté Shore D** sur les produits à base de résines synthétiques au bout de 7 jours. Se reporter à la **norme NF EN ISO 868**,
- etc.

6.4.3.5.4 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur béton

Rappel : ces produits restent pour le moment dans le cadre d'applications expérimentales.

- **Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants** :
 - les dosages appliqués au m² de surface en conformité avec le fiche technique et la procédure. Le dosage à appliquer doit tenir compte de l'épreuve de convenance au cours de laquelle la teneur en produit actif au droit des armatures a été contrôlée,
 - la régularité de l'application sur toutes les zones y compris les zones repiquées,
 - le rinçage soigné après pénétration du produit avant la réalisation d'autres travaux comme la mise en place d'un revêtement de protection non compatible avec l'inhibiteur,
 - etc.
- **Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants** :
 - la concentration en produit actif au niveau des armatures à partir de carottes prélevées sur l'ouvrage. Le seuil spécifié par le fabricant doit au moins être atteint,
 - l'évolution dans le temps de la teneur en produit au niveau des armatures,
 - le suivi dans le temps de l'efficacité du traitement par des mesures du potentiel d'électrode ou de vitesse de corrosion,
 - etc.

6.4.3.5.5 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'une imprégnation ou d'un revêtement

Suivant le domaine concerné, le contrôle de la mise en œuvre de ces produits ou systèmes est traitée dans les textes suivants :

> **Cas du domaine du bâtiment :**

- **norme NF DTU 42.1** (réfection des revêtements de façade),
- **norme NF DTU 59.1** (revêtements de peinture) ;

> **Cas du domaine du génie civil :**

- **fascicule 65 du CCTG** (chapitre 11 : travaux de peinture),
- **norme NF P95-103** (imprégnations et revêtements de protection).

Le plus souvent, il s'agit de **produits de protection du béton**, donc les contrôles de la **norme NF P95-103** s'appliquent.

6.4.3.5.6 Contrôles d'exécution dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte

Se reporter au **guide FABEM 8**.

La réception des travaux, dans le cadre de la législation en vigueur, obéit aux exigences du **maître de l'ouvrage**, qui en fixe la consistance et le calendrier dans le **marché**. Le tableau ci-après traite de la **réception des travaux** dans le **domaine du génie civil**.

LA RÉCEPTION DES TRAVAUX (articles 41, 42, 43 du C.C.A.G.)				
N°	Désignation	Entrepreneur	Maître d'œuvre	Responsable du Marché
1	Avis proposant la date d'achèvement des travaux			
	Fait par :	Oui		
	Remis à :		Oui	Oui
2	Exécution des opérations préalables à la réception			
	Faites par :		Oui	
	En présence de :	Oui		Oui (ou représentant)
3	Rédaction d'un PV par :			
	PV signé par :			
	Proposition de réception (avec ou sans réserves ou avec réfaction de prix) à telle date ou proposition de non-réception			
4	Faite par :		Oui	
	À qui :			Oui
	Qui en est informé :	Oui		
5	Décision de réception avec ou sans réserves (4) et fixation de la date de réception avec une éventuelle proposition de réfaction de prix. (5) voire proposition de non réception			
	Faite par :			Oui
6	Notification des décisions de la personne responsable du Marché			
	Faite par :			Oui
	À qui :	Oui	Oui	
6	Prise de possession par le Maître de l'ouvrage			Oui

Tableau n° 69 : diverse opérations à effectuer lors d'une réception

Note : normalement, le **Cahier des Clauses Administratives Générales (CCAG)** limite la durée de la réception à **45 jours** après la **date de réception de l'avis de fin des travaux** sauf **disposition contraire du marché**. Cette durée supérieure à 45 jours est imposée lorsque la durée prévue pour les **opérations préalables à la réception est importante** (réparation ou renforcement lourds nécessitant des essais de chargement spécifiques avec une instrumentation complexe, réalisation d'une inspection détaillée...).

À la fin des travaux, l'**entrepreneur** remet au **maître d'œuvre** l'ensemble des essais réalisés ainsi que l'ensemble des documents du **PAQ**, même si le **marché** a prévu qu'une photocopie de ces documents soit remise au **maître d'œuvre** au fur et à mesure de l'exécution.

Note : la remise des photocopies des documents au fur et à mesure du déroulement du chantier facilite l'organisation du **contrôle extérieur** et assure une **sauvegarde renforcée des documents**.

Le paragraphe 4.2.4.2 du **fascicule 65 du CCTG** liste les éléments à insérer dans le dossier de l'ouvrage réparé ou renforcé.

Parmi les documents, doivent figurer les plans sur lesquels toutes les réparations doivent avoir été reportées, ainsi que les résultats des essais effectués et interprétés.

- Si les travaux concernent la **restauration du béton** combinée, le plus souvent, à une **préservation ou une restauration de la passivité des armatures**, le tout combiné à une ou plusieurs des méthodes développées dans le **présent GUIDE** et si on peut considérer que cette **réparation n'a pas un caractère structural**, il n'est pas nécessaire de faire **d'essais particuliers lors de la réception des travaux**, puisque qu'une surveillance continue des travaux a, normalement, été opérée. Le cas de la **prévention et protection cathodique** est à réserver.

En effet, par exemple, si les travaux comportent une **prévention ou une protection cathodique**, la **réception des travaux** est liée aux résultats positifs de **l'évaluation de la performance initiale**. De plus, le **marché** doit définir les conditions dans lesquelles le **suivi de l'installation** doit être réalisé et qui en est chargé.

- Si les travaux concernent une **réparation à caractère structural** ou un **renforcement** et si ces opérations sont combinées, si nécessaire, à une **préservation ou une restauration de la passivité des armatures**, la **réception des travaux** nécessite de vérifier que la réparation ou le renforcement participe effectivement à la reprise des efforts. **Le marché** doit donc spécifier les essais à effectuer pour en apporter la preuve. Par exemple, pour l'ajout de forces par précontrainte additionnelle, la **norme NF P95-104** et le **guide FABEM 8** explicitent les essais permettant de valider le renforcement.



*Photo n° 175 : pont avant et après travaux de restauration
(crédit photo Parexlanko)*



Photo n° 176 : défauts d'exécution (crédit photo Parexlanko)

Dans le cas d'une **réparation à caractère structural et d'un renforcement**, un **essai de chargement** de l'ouvrage est normalement à prévoir. Dans ce cas, les conditions de réalisation des diverses mesures sont fixées par le **marché** (implantation et nombre des différents appareils de mesure, calculs préliminaires à effectuer...).

Dans le cas des ponts, il faut se reporter au **guide technique Sétra de mars 2004** « Épreuves de chargement des ponts routes et passerelles piétonnes » qui traite également des ouvrages réparés.

Pour constituer un « **point zéro** » de l'ouvrage réparé ou renforcé, les déformations sont généralement mesurées pendant **l'essai de chargement** dans les sections déjà instrumentées pour la réalisation de certains contrôles pendant les travaux.

Une visite de la structure réparée ou renforcée est à effectuer avant et après l'essai de chargement.

Pour s'assurer que les travaux ont été correctement exécutés et qu'il n'y a pas de défauts d'exécution et de désordres apparents le maître de l'ouvrage peut faire réaliser une **inspection détaillée** avant de prononcer la **réception des travaux**.

> Dans le cas du génie civil, la date de réception des travaux marque :

- la fin de la responsabilité contractuelle ;
- le début de la garantie contractuelle dite de « parfait achèvement » (article 44.1 du GGAG) ;
- le début des garanties particulières (article 44.3 du CCAG) ;
- Le début de la responsabilité décennale (article 45 du CCAG).

Note : dans le **domaine du bâtiment**, la responsabilité décennale est remplacée par **l'assurance dommage ouvrage**.

7

Hygiène et sécurité

7.1 Généralités – Guide STRRES 0

7.2 Cas des chantiers de réparation ou de renforcement

Le **GUIDE STRRES 0**, dans son chapitre « **Prévention et sécurité** », contient la majeure partie des mesures à mettre en œuvre sur **les chantiers du BTP**. Il a été réalisé en partenariat avec l'**Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTB)**.



Figure n° 98 : Guide STRRES 0



Figure n° 99 : pictogrammes CLP de la nouvelle réglementation sur l'étiquetage extrait d'un document **INSROPBTP** (crédit photo **INSROPBTP**)

Les différents thèmes suivants, qui concernent plus particulièrement les **travaux de réparation ou de renforcement** d'ouvrages en béton sont traités en détail dans le **GUIDE 0** :

- **L'évaluation des risques** qui peut être réalisée par l'application en ligne sur le **site e-prévention** (voir le paragraphe 2.2.1 du **GUIDE 0**) ;
- **La coordination de sécurité** avec le rôle du **maître d'ouvrage** (voir le paragraphe 2.2.2 du **GUIDE 0**), du **coordonnateur** (voir le paragraphe 2.2.3 du **GUIDE 0**) et les différents documents de sécurité et les informations qui s'y trouvent : **Plan Général de Coordination (PGC)** (voir le paragraphe 2.2.4 du **GUIDE 0**), **Dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage (DIUO)** lorsqu'il existe (voir le paragraphe 2.2.5 du **GUIDE 0**) ;
- **La prévention des risques liés aux réseaux** (gaz, électricité...) qui impose le dépôt de la **Déclaration de Travaux (DT)** puis, au moins 10 jours avant le début des travaux, de la **Déclaration d'Intention de Commencer les Travaux (DICT)** ;
- **La prévention des risques électriques** par contact direct avec une ligne aérienne ou enterrée ou indirect avec une pièce métallique non reliée à la terre et qui est accidentellement mise sous tension ;
- **Le choix des Équipements Individuels de Protection (ÉPI)** pour lequel existent plusieurs fiches de l'OPPBTB, par exemple pour les métiers du gros œuvre et des travaux publics ;
- **La prévention contre le bruit** : des protections doivent être mises en place dès que le niveau de bruit peut dépasser 80 dB(A) ;
- **La prévention contre les effets des gaz et fluides sous pression** en cas de fuites ou de ruptures de canalisations contenant de l'air comprimé, de l'huile ou de l'eau sous haute pression ;
- **La prévention des risques dus aux travaux de soudure et d'oxycoupage** est détaillée dans plusieurs fiches de l'OPPBTB ;
- **Le travail en sécurité en hauteur** à l'aide d'échafaudages de pied (voir le paragraphe 2.3.9.1 du **GUIDE 0**) ou roulants (voir le paragraphe 2.3.9.2 du **GUIDE 0**), de plateformes individuelles roulantes (**PIR**), de plateformes individuelles roulantes légères (**PIRL**) ou d'échelles (voir le paragraphe 2.3.9.3 du **GUIDE 0**), de plateformes élévatrices de personnel, de travaux sur cordes (voir le paragraphe 2.3.9.4 du **GUIDE 0**) ;

- **La prévention du risque chimique** concernant les produits appliqués par :
 - l'évaluation du risque chimique peut être réalisée par l'application en ligne sur le site e-prévention (voir le paragraphe 2.3.10 du **GUIDE 0**), la **Fiche de Données de Sécurité (FDS)** et l'étiquetage associé (voir le paragraphe 2.3.10.a du **GUIDE 0**),
 - la lecture du dossier OPPBTP : « le risque chimique » (voir le paragraphe 2.3.10.a du **GUIDE 0**) qui traite de la prévention et en particulier :
 - la substitution des produits par des produits moins dangereux lorsque c'est possible,
 - la ventilation mécanique (extraction des polluants et renouvellement d'air),
 - la protection respiratoire par appareils filtrants ou isolants,
 - la protection cutanée par combinaisons étanches et gants appropriés ;
- **La prévention du risque « incendie-explosion »** lié à l'utilisation de produits classés et étiquetés « **inflammables** » tels que : solvants, décapants, produits de réparation à base de résines solvantées, etc. Il est conseillé de supprimer ce risque en utilisant des produits non classés inflammables tels que : peintures, résines et colles en phase aqueuse, solvants et décapants à base de bio-esters (soja, colza ou tournesol), etc. En cas d'impossibilité technique d'utiliser de tels produits de substitution mais aussi si **l'atmosphère est chargée en poussières inflammables**, il est nécessaire de mettre en place des mesures de prévention adaptées au **risque incendie/explosion** :
 - ventilation des locaux avec extraction des polluants,
 - vérification des concentrations en gaz, vapeurs et poussières de l'atmosphère de travail,
 - interdiction de produire : flamme nue, étincelles, sources de chaleur,
 - information et formation du personnel complétées par l'affichage des consignes (sécurité, prévention, premiers secours),
 - mise à disposition des moyens d'extinction adaptés,
 - gestion du chantier comme une zone à atmosphère explosives (ATEX) ce qui impose la mise en œuvre des mesures de prévention correspondant à la réglementation ATEX (pour en savoir plus, consulter le **guide INRS ED 945**) ;
- **La protection contre les polluants** qui peuvent être libérés lors de la préparation des supports (ponçage, décapage, sablage, grenailage etc.). Le risque dépend de la nature des supports et du procédé de préparation retenu. Ainsi on pourra être amené à se prémunir contre le risque respiratoire provoqué par la libération d'amiante (voir le paragraphe 2.3.10.b du **GUIDE 0**), de plomb (voir le paragraphe 2.3.10.c du **GUIDE 0**) ou de silice libre (voir le paragraphe 2.3.10.d du **GUIDE 0**).



Photo n° 177 : équipements de protection individuelle (ÉPI)
 (crédit photo Poineau)



FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ : Béton Projeté RIG

1. IDENTIFICATION

1. *Désignation commerciale* : BP RIG (Résistance Initiale Garantie)
2. *Société* :
Siège social et fabrication: **t-mix SAS**
116 avenue des Arrivaux
38070 St Quentin-Fallavier
Téléphone : **04 74 95 91 11** fax : **04 74 95 36 55**
3. *Type d'utilisation* : micro-béton projeté par voie sèche.
4. *Autre donnée* : fiche technique produit.

2. INFORMATIONS SUR LES COMPOSANTS

1. Mélange de ciment gris, granulats et adjuvant.
2. Composant apportant un danger : ciment CAS 65997-15-1 Xi R36/37/38-43 c<50%
3. Substance, composants ayant des valeurs limites d'exposition professionnelles : aucune connue de cette catégorie n'est présente.

3. IDENTIFICATION DES DANGERS

1. Risque d'effet irritant pour les yeux.
2. Risque d'effet sensibilisant pour les yeux.

4. MESURES DE PREMIERS SECOURS

1. Contact avec la peau : rincer à l'eau. Si la poudre est sèche, éliminer la poussière puis laver abondamment.
2. Contact avec les yeux : rincer immédiatement et soigneusement à l'eau, contacter éventuellement un ophtalmologiste.
3. Inhalation importante : amener le patient en dehors de la zone empoussiérée et consulter un médecin si nécessaire.
4. Des crèmes de protection existent contre les manifestations allergiques.

5. INFLAMMATION ET EXPLOSION

Produit ininflammable classé M0.

6. MESURES À PRENDRE EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE

1. Précautions individuelles : éviter le contact avec les yeux et la peau.
2. Précaution pour la protection de l'environnement : éviter le rejet dans les égouts ou eaux de surface.
3. Déversement accidentel : aspirer le produit pour le transférer dans un conteneur avant élimination. Les éléments qui composent le béton durci sont définitivement fixés et insolubles.

1/3

Figure n° 100 : Fiche de Données de Sécurité sur un mélange industriel pour béton projeté (extrait d'un document de la société t-Mix)

L'entrepreneur doit s'assurer du respect de la législation du travail en matière d'hygiène et de sécurité.

Le Code du Travail impose une coordination des travaux dans les deux cas suivants :

- intervention pour travaux d'une **entreprise dite extérieure** dans l'établissement d'une autre **entreprise dite utilisatrice**. C'est le chef de l'entreprise utilisatrice qui assure la coordination générale ;
- **chantier temporaire ou mobile** où interviennent au moins **deux entreprises**. Un coordonnateur de sécurité et de protection de la santé (coordonnateur SPS) est requis sur le chantier.

Des **précautions particulières** sont à appliquer au cours de certaines opérations. La liste ci-après, non limitative, donne quelques exemples de travaux de réparation ou renforcement présentant des risques particuliers.

- **la préparation du support béton et des armatures nécessite de tenir compte des risques dus :**
 - aux poussières et projections lors d'un « sablage » à sec,
 - aux projections, bruit et au jet d'eau lors d'un décapage à l'eau sous haute pression,
 - à l'effondrement de la structure si les armatures doivent être dégagées sur de grandes longueurs ;
- **la mise en œuvre des produits et systèmes de réparation** doit tenir compte que certains composants sont toxiques (diluants réactifs des résines époxydiques, solvants, constituants des polyuréthanes, etc.), corrosifs (liants minéraux à base de silicates, ciments, liants organiques de nature basique, etc.) ou encore inflammables (solvants, etc.).
- **les traitements électrochimiques à courant imposé** nécessitent de tenir compte des risques électriques ;
- **l'ajout de forces par précontrainte additionnelle** implique le recours à un personnel spécialisé connaissant les risques spécifiques liés à la mise en tension d'armatures de précontrainte...

8

Gestion des déchets du chantier⁴⁶

⁴⁶ Consulter le guide de la FNTF de 2005 intitulé : les principes de gestion des déchets de chantier.

8.1 Rappel des obligations

8.2 Cas des chantiers de réparation ou de renforcement des structures en béton

Le livre V de la partie réglementaire du Code de l'Environnement donne la liste des déchets. Certains d'entre eux sont **considérés comme dangereux** (marqués par un astérisque) s'ils contiennent **des concentrations** (pourcentage en poids) **suffisantes de certaines substances**.

> **L'élimination des déchets comporte deux filières :**

- **l'élimination** proprement dite dans des installations d'élimination des déchets par mise en décharge ou par incinération ;
- **leur valorisation** par tri, recyclage et réutilisation, soit sur place, soit hors du chantier, soit en centre spécialisé.

> **L'élimination des déchets est réalisée en tenant compte de la classe du déchet :**

■ **cas des déchets de classe I (les déchets industriels spéciaux ou DIS, aussi appelés déchets dangereux) :**

- les DIS sont éliminés dans des installations, soit de stockage, soit d'incinération autorisées,
- ils sont soumis à une traçabilité de leur origine à leur destination au moyen d'un bordereau de suivi des déchets industriels (BSDI),
- ils doivent recevoir un certificat d'acceptation préalable du gestionnaire de l'installation d'élimination des déchets avant de pouvoir être déposés dans celle-ci,
- ils sont contrôlés lors de leur admission dans l'installation d'élimination des déchets afin de vérifier s'ils sont bien conformes aux déchets autorisés dans cette installation ;

■ **cas des déchets de classe II (déchets industriels banals ou DIB) :**

- les déchets d'emballages industriels ou commerciaux peuvent être soumis à l'obligation de valorisation si les quantités de déchets produites sont importantes (>1 100 litres / semaine),
- les autres déchets DIB, s'ils ne sont pas valorisés, sont éliminés dans des installations, soit de stockage, soit d'incinération autorisées ;

■ **cas des déchets de classe III (les déchets industriels inertes) :**

- les déchets industriels de classe III, s'ils ne sont pas valorisés, sont stockés dans une décharge de classe III autorisée.

Un chantier est considéré comme **une installation classée** s'il peut présenter des dangers ou des inconvénients pour la commodité du voisinage, la santé, la sécurité, la salubrité publique, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement. Cette installation est alors soumise à **autorisation ou déclaration** suivant la gravité des dangers ou des inconvénients qu'elle présente.

Les contraintes sont imposées par des lois et décrets qui sont regroupés dans le **Code de l'Environnement**⁴⁷

> **Les principales précautions et protections à prendre vis-à-vis de l'environnement concernent :**

- les tiers, les ouvrages et, d'une façon générale, le site ;
- le respect de la réglementation en matière de déchets solides ou liquides de chantier ;
- le respect de la réglementation concernant le bruit ;
- les risques d'incendie,
- etc.

> **Le maître de l'ouvrage rédige la notice de respect de l'environnement (NRE), intégrée aux pièces écrites du marché, qui fixe les responsabilités et les exigences en matière d'environnement. Cette notice précise :**

- dans une synthèse, les contraintes environnementales et les sites où ces mesures doivent s'appliquer ;
- la nature des démarches administratives devant être assurées par le **maître de l'ouvrage, le maître d'œuvre ou l'entrepreneur** ;

⁴⁷ Consulter le site : www.legifrance.gouv.fr.

- les exigences en matière de management et de suivi de l'environnement.

L'entrepreneur organise le chantier et prend toutes les précautions particulières de façon à limiter tous les risques de pollution de l'environnement lors de l'exécution des travaux.

L'entrepreneur doit gérer les produits ainsi que les déchets générés par l'utilisation de ces produits conformément à la **législation en vigueur** en tenant compte des dispositions **du marché** et de la **NRE** susvisée.


L'entrepreneur doit demander avant tout début des travaux les **autorisations nécessaires de démarrage des travaux et les certificats d'acceptation préalable pour les déchets dangereux (DIS)**. Il doit tenir compte des sujétions liées à la récupération, au transport et au traitement de tous les déchets générés par les travaux.

14 - INFORMATIONS RELATIVES AUX TRANSPORTS

Transporter le produit conformément aux dispositions de l'ADR pour la route, du RID pour le rail, de l'IMDG pour la mer, et de l'ICAO/IATA pour le transport par air (ADR 2007 - IMDG 2006 - ICAO/IATA 2007).

UN1263-PEINTURES (y compris peintures, laques, émaux, couleurs, shelles, vernis, cires, encaustiques, produits d'apprêt et bases liquides pour laques) ou MATIÈRES APPARENTÉES AUX PEINTURES (y compris solvants et diluants pour peintures)

ADR/RID	Classe	Code	Groupe	Étiquette	Ident.	QL	Dispo.
	3	F1	III	3	50	L07	163 640E 650



*Non soumis à cette réglementation si Q<450l

IMDG	Classe	2 ^e Étiq.	Groupe	QL	FS	Dispo.
	3	-	III	5 L	F-E,B-E	163 223 944 955


*Non soumis à cette réglementation si Q<30l

IATA	Classe	2 ^e Étiq.	Groupe	Passager	Passager	Cargo	Cargo	note
	3	-	III	309	60 L	310	220 L	A3 A/2
	3	-	III	Y309	10 L	-	-	-


15 - INFORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

La classification de cette préparation a été exécutée conformément à la directive dite <Toutes Préparations> 1999/45/CE et de ses adaptations. A aussi été pris en compte la directive 2004/73/CE portant 29^{ème} adaptation à la directive 67/548/CEE (Substances dangereuses).

Classement de la Préparation :



Nocif



Inflammable

Contient du :

601-022-00-9	XYLENE
Contient du	2-BUTANONE-OXIME. Peut déclencher une réaction allergique.
616-014-00-0	

Risques particuliers attribués à la préparation et conseils de prudence:

R 52/03	Nocif pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique.
R 58	Irritant pour la peau.
R 20/21	Nocif par inhalation et par contact avec la peau.
R 10	Inflammable.
S 38/37	Porter un vêtement de protection et des gants appropriés.
S 23	Ne pas respirer les vapeurs.
S 16	Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
S 01	Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales/la fiche de données de sécurité.

Tableaux des maladies professionnelles selon le Code du Travail:

Tableau N° 64 - Affections engendrées par les solvants organiques liquides à usage professionnel: hydrocarbures liquides aliphatiques, cycliques saturés, insaturés et leurs mélanges; hydrocarbures halogénés liquides; dérivés nitrés des hydrocarbures aliphatiques; alcools; glycols; éthers de glycol; cétones; aldéhydes; éthers aliphatiques et cycliques, dont le tétrahydrofurane; esters; diméthylformamide, diméthylacétamide; acétonitrile; propionitrile; pyridine; diméthylsulfone; diméthylsulfoxyde.

Figure n° 102 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) (crédit photo Parexlanko)

Certains composants utilisés lors des travaux de traitement de surfaces sont **toxiques** (diluants réactifs de résines époxydiques, solvants, constituants des polyuréthanes, etc.), **corrosifs** (liants minéraux à base de silicates, ciments, liants organiques de nature basique, etc.) ou encore **inflammables** (solvants, etc.). Ils peuvent donc être considérés comme dangereux et relever de la catégorie des déchets industriels spéciaux (DIS).

Même lorsque cela n'est pas imposé par la réglementation, un **maître de l'ouvrage** a intérêt à évaluer les types de déchets que l'ensemble des opérations de réparation ou de renforcement de son ouvrage (par exemple, lors de la préparation du support) va générer, sachant que certains des déchets peuvent provenir de l'ouvrage existant (produits de démolition) et d'autres des travaux. Cela peut permettre :

- d'une part, d'éviter des **surprises désagréables en cours de travaux**, comme la découverte de produits amiantés ;
- d'autre part, aux clauses du **marché**, de prendre en compte la **gestion des déchets** et, si possible, de leur valorisation sous forme de clauses environnementales. De telles clauses sont autorisées par le **Code des Marchés Publics**.

L'**entrepreneur**, lors du **choix des produits**, se doit de proposer au **maître d'œuvre**, parmi ceux utilisables, c'est-à-dire ayant la même efficacité globale (propriétés mécaniques et chimiques, facilité de mise en œuvre et coût), ceux qui sont les **moins dangereux pour la santé du personnel qui les utilise et qui sont les moins polluants** pour l'environnement.

L'**entrepreneur** se doit d'organiser son chantier pour faciliter le **tri des déchets**. En effet, par exemple, le mélange de déchets de catégories différentes peut conduire à classer la totalité des déchets en **DIS**, dont le coût de traitement est très supérieur à celui des deux autres catégories.

Il est donc nécessaire de bien identifier les méthodes et les techniques utilisées lors de travaux de restauration du béton ou de renforcement structural, qui génèrent les volumes les plus importants de déchets appartenant aux trois classes. Il convient de citer :

- les techniques de préparation du support et des armatures qui génèrent :
 - des déchets de diverses classes lors de l'enlèvement des revêtements existants,
 - des mélanges de matériaux, les uns issus de la structure (débris de béton, poussières...) et les autres de la technique utilisée (par exemples, des abrasifs minéraux ou métalliques lors d'un « sablage » à sec ou de l'eau chargée de débris lors d'une hydrodémolition) ;
- les techniques de projection de mortiers ou de bétons, surtout par voie sèche, qui génèrent, à cause des rebonds, des déchets inertes en fortes quantités ;
- les collages et les injections à l'aide de produits à base de résines de synthèses, qui peuvent générer des **DIS** ;
- les traitements électrochimiques, comme l'extraction des chlorures et la réalcalinisation, qui produisent des volumes importants de cellulose à recycler ;
- etc.

9

Fiche synthétique du PAQ

La réalisation de travaux de mise en œuvre d'un produit ou d'un système pour la restauration du béton et/ou le renforcement structural combinés avec une restauration ou une préservation de la passivation des armatures comporte plusieurs opérations enchaînées les unes aux autres. Chaque opération peut faire l'objet d'une **procédure d'exécution** et d'un **cadre de document de suivi d'exécution**, mais tous ces différents documents peuvent être regroupés dans une **procédure d'exécution principale** (par exemple, la procédure de remplacement du béton carbonaté ou pollué...) et un **cadre des documents de suivi d'exécution principal**.

Il est rappelé que le **marché fixe**, en s'inspirant des dispositions du **présent GUIDE** :

- les stipulations (prescriptions de moyens et spécifications de produits) à respecter, ainsi que la consistance des essais et contrôles. Ces obligations sont reprises dans les **procédures** et les **cadres des documents de suivi** ;
- ce qui relève des contrôles interne, extérieur voire externe ;
- un cadre de **PAQ** avec la liste minimale des **procédures d'exécution** et des **cadres de documents de suivi d'exécution** à fournir ;
- le calendrier et les conditions de présentation au **maître d'œuvre** des différents documents constituant **le SOPAQ et le PAQ** au fur et à mesure du déroulement de l'opération chantier (de la remise des offres à la signature du marché et de la période de préparation des travaux à leur réception)⁴⁸.

La fiche ci-après sous forme d'un tableau complète en tant que de besoin et en tenant compte des stipulations du **présent GUIDE**, la **fiche de reprise du béton dégradé du guide de 2000 du STRRES** relative à la rédaction d'un **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ)**.

Bien entendu, cette **fiche très générale** doit être **adaptée à la méthode de réparation et/ou de renforcement** à mettre en œuvre. En effet, par exemple, la fiche sur le remplacement du béton carbonaté ou pollué diffère fortement de celle sur une protection cathodique.

Il est possible de consulter également :

- le **guide du SETRA de novembre 1997** : Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art ;
- le **guide SETRA, SNCF, FNTP et MFQ de décembre 1997** : Guide pour une démarche d'assurance qualité – études de conception de d'exécution d'ouvrages de génie civil ;
- le **guide de décembre 1991, SETRA, SNCF, TP de France et SNBATI** : Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la Qualité – Exécution des ouvrages en béton armé et précontraint ;
- le **fascicule 65 du CCTG**.



Figure n° 103 : guide du STRRES 2000 relatif à la rédaction des PAQ des travaux de réparation

⁴⁸ Le schéma de l'assurance qualité sur le chantier de la page 13 du guide de rédaction d'un **PAQ du STRRES** donne dans le détail les **actions qualité** à entreprendre et le **calendrier** à respecter.

REPRISE DU BÉTON DÉGRADÉ Points sensibles, critiques et d'arrêts						
Rep	Désignation	Intervention du contrôle interne			Intervention du contrôle externe à l'entreprise (1)	Intervention du contrôle extérieur (2) du Marché
		Points sensibles (3)	Points critiques (4)	Points d'arrêts (5)		
1	PAQ, pendant le période de préparation des travaux : mise au point du document d'organisation générale et établissement des documents suivants : - les procédures d'exécution ; - les cadres des documents de suivi .		Oui			Oui
2	PAQ, avant toute réalisation d'une opération : mise au point des procédures d'exécution et des cadres des documents de suivi correspondants		Oui	Oui		Oui
3	PAQ, pendant la réalisation d'une opération : respect des procédures, renseignement des documents de suivi et information du maître d'œuvre (6)		Oui			Oui
4	Choix des produits et des matériels					
	La consultation fixe la famille du produit et les caractéristiques à respecter, voire une technique d'exécution — L'entrepreneur propose une ou des solutions - Le marché entérine la ou les solutions. (7)					
	Une épreuve d'étude est nécessaire pour choisir le produit lorsque les exigences à satisfaire sortent du domaine d'emploi de la norme (8)		Oui	Oui		Oui
5	Contrôle et réception des produits					
	Transport, réception et stockage		Oui	Oui		Oui
	Essais d'identification rapide et/ou contrôle des caractères normalisés		Oui	Oui		Oui
6	Relevé contradictoire de l'état du support		Oui			Oui
7	Épreuve de convenance de préparation du support		Oui			Oui
8	Épreuve de convenance d'une opération					
	Préparation générale de l'épreuve (documents nécessaires et organisation de l'ensemble des opérations)		Oui			Oui
	Préparation du support (béton et armatures)		Oui			Oui
	Préparation des produits		Oui			Oui
	Réalisation de l'épreuve		Oui			Oui
	Après réalisation de l'épreuve		Oui			Oui
9	Contrôles d'exécution d'une opération		Oui			Oui
	Préparation du support (béton et armatures)		Oui			Oui
	Préparation de l'opération		Oui			Oui
	Préparation des produits		Oui			Oui

REPRISE DU BÉTON DÉGRADÉ Points sensibles, critiques et d'arrêts						
Rep	Désignation	Intervention du contrôle interne			Intervention du contrôle externe à l'entreprise (1)	Intervention du contrôle extérieur (2) du Marché
		Points sensibles (3)	Points critiques (4)	Points d'arrêts (5)		
10	Levée du point d'arrêt avant travaux		Oui	Oui		Oui
	Réalisation de l'opération (mise en œuvre des produits)		Oui			Oui
	Après réalisation de l'opération		Oui	Oui		Oui
(pm)	Travaux complémentaires (injection, collage, revêtement de protection...)	Reprendre la présente fiche à partir de la tâche n°2				
11	Réception des travaux					
	Remise des résultats des essais		Oui			Oui
	PAQ : remise au maître d'œuvre de l'ensemble des documents originaux constituant le PAQ		Oui	Oui		Oui
	Vérifications diverses					Oui

Tableau n° 70 : liste des points sensibles, critiques et d'arrêt, relative à une opération de reprise d'un béton dégradé

Légende :

(1) : il s'agit d'une surveillance et assistance du contrôle interne effectuée par un représentant indépendant de la direction du chantier. Il doit être prévu au **marché**.

(2) : il s'agit du **maître d'œuvre** du client (voire du client) ou d'un organisme habilité par lui (laboratoire ou bureau d'études).

(3) : un **point sensible** est un point de l'exécution qui doit particulièrement retenir l'attention. Dans le présent tableau, l'ensemble des points sensibles n'a pas été développé.

(4) : un **point critique** est un point de l'exécution qui nécessite une matérialisation du contrôle interne sur un document de suivi d'exécution ainsi qu'une information préalable du contrôle extérieur pour que ce dernier puisse effectuer son contrôle, s'il le juge nécessaire. L'intervention du contrôle extérieur n'est pas indispensable à la poursuite de l'exécution.

(5) : un **POINT D'ARRÊT** est un point critique pour lequel un accord formel du **maître d'œuvre** (ou d'un organisme habilité par lui) est nécessaire à la poursuite de l'exécution. Les délais de préavis et les délais de réponse du **maître d'œuvre** sont fixés dans le **marché** ainsi que les dispositions à prendre à l'issue du délai de réponse en l'absence de réaction du **maître d'œuvre** (**situation très anormale**). Les points d'arrêt doivent être prévus au **marché**.

(6) : le **marché** peut prévoir qu'un double (photocopie) des documents de suivi renseignés soit remis au **maître d'œuvre** au fur et à mesure du déroulement des travaux (une facilité pour le contrôle extérieur). Il est rappelé que l'ensemble des documents originaux constituant le PAQ doit être remis au **maître d'œuvre** au moment de la réception des travaux.

(7) : ce point recouvre les périodes de préparation du projet, de consultation des entreprises, de jugement des offres, de mise au point et de signature du **marché**.

(8) : si cette épreuve est prévue au **marché**.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE SUR LA PATHOLOGIE ET L'AUSCULTATION DES OUVRAGES

A. DANS LE DOMAINE DES OUVRAGES D'ART

- [1] LCPC : Nomenclature des parties des ouvrages d'art en béton armé, précontraint et en maçonnerie éditée en 1976 ;
- [2] MEL : Fascicules associés à l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du Ministère de l'Équipement (ITSEOA). Par exemple, le fascicule n°31 relatif aux ponts en béton non armé et en béton armé, le fascicule n°32 relatif aux ponts en béton précontraint, le fascicule n°12 relatif aux appuis (piles et culées)... ;
- [3] MEL : Guides d'évaluation des ouvrages (ponts et murs de soutènement) par la méthode IQOA du Ministère de l'Équipement complétés par des documents contenus dans la valise de formation ;
- [4] LCPC : Guide technique relatif aux défauts apparents des ouvrages en béton de 1973 ;
- [5] LCPC : Guide technique relatif aux défauts apparents des parements en béton de 1991 ;
- [6] ENPC : Maintenance et réparation des ponts (désordres et leurs origines, méthodes d'auscultation, techniques de réparation...) – Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1997) ;
- [7] SETRA : Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art de novembre 1997 ;
- [8] LCPC : Manuel méthodologique relatif à l'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art de février 1999 ;
- [9] Rapport franco-britannique : Post-tensionned concrete bridges – Ponts en béton précontraint par post-tension – Rapport franco-britannique sur l'état de l'art (historique, inventaire, problèmes, méthodes d'investigation, méthodes de réparation et conclusions) – édition Thomas Telford à Londres en 1999 ;
- [10] LCPC : Le guide technique de surveillance et d'auscultation des VIPP (viaducs à travées indépendantes à poutres préfabriquées post-contraintes) de 2000 ;
- [11] AFGC : Documents scientifiques et techniques - Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion de 2003 ;
- [12] LCPC : Guide technique : Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel de 2020 ou 2021. Avant ces nouvelles recommandations, des recommandations étaient parues en 2003 inspirées des recommandations Rhône-Alpes ;
- [13] LCPC : Guide méthodologique relatif à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne de novembre 2003 ;
- [14] Christian Crémona : Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants – Ponts - Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (2003) ;
- [15] Rapport franco-britannique : Management of bridges – Gestion des ponts - Rapport franco-britannique sur l'état de l'art (inventaire, inspection auscultation, évaluation des ponts [force portante]...), – édition Thomas Telford à Londres (2005) ;

- [16] LCPC : Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie – Méthodes d'essai des LCP de décembre 2005 ;
- [17] LCPC : Recommandations provisoires pour la protection et la réparation des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne d'octobre 2010 ;
- [18] IFSTTAR : Gestion des ponts en Europe – Projet européen BRIME – Collection et recherches des LPC – Série ouvrages d'art n° 49 de 2010 ;
- [19] CEREMA : Guide sur la conception des réparations structurelles et des renforcements d'ouvrages d'art de février 2016 ;
- [20] LCPC : Guide technique : Prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne de 2007 (voir les nouvelles recommandations de 2017) ;
- [21] IFSTTAR : Guide technique : Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne de 2017 ;
- [22] CEREMA : Note d'information ouvrages d'art – Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure de novembre 2018 ;
- [23] CEREMA : Méthodologies d'évaluation des risques (cas des murs en Terre Armée – Cas des buses métalliques) ;
- [24] CEREMA : Surveillance et entretien courant des ponts routiers (guide méthodologique à l'usage des communes).

B. DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT

- [25] ITBTP : La pathologie des murs de soutènement – Série gros œuvre n°10 des Annales de l'ITBTP ;
- [26] ITBTP : La pathologie des toitures–terrasses et des ouvrages enterrés - Série gros œuvre n°11 des Annales de l'ITBTP ;
- [27] ITBTP : Les toitures–terrasses pathologie du gros œuvre - Série gros œuvre n°19 des Annales de l'ITBTP ;
- [28] ITBTP : La pathologie des constructions en béton armé – Série gros œuvre n°23 des Annales de l'ITBTP ;
- [29] Frédéric Offeinstein : Compatibles incompatibles ou comment associer les matériaux de construction – Éditions du Moniteur 1987 ;
- [30] CD-Rom édité par la SMABTP sur la prévention des désordres dans le domaine du bâtiment (2003) ;
- [31] Sites internet : Fiches sur les pathologies, les sinistres et la prévention des désordres disponibles sur certains sites tels que : www.cstb.fr, www.smabtp.fr, www.qualiteconstruction.com, www.bienconstruire.com...

C. DANS LE DOMAINE DE L'AUSCULTATION



**Photo n° 178 : guide AFGC-COFREND de 2005
(crédit photo AFGC- COFREND-Presses ENPC)**

- [32] ITBTP : Moyens modernes de contrôle non destructif et in situ - Série essais et mesures n°172 des Annales de l'ITBTP ;
- [33] ITBTP : Évaluation de la qualité des bâtiments et de leurs équipements par des méthodes non destructives - Série essais et mesures n°178 des Annales de l'ITBTP ;
- [34] AFGC-CEFRACOR : La réhabilitation de béton armé dégradé par la corrosion – Guide AFGC-CEFRACOR de 2003 ;
- [35] AFGC COFREND : La méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton – Guide AFGC et COFREND de 2005.

D. DIVERS (CONSULTER LES SITES)

- [36] Bibliothèques : ENPC, ENTPE, ESTP...
- [37] Éditeurs : Dunod, Eyrolles, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, éditions du Moniteur...

TABLE DES FIGURES

- FIGURE N° 1 : LES TROIS INTERVENANTS
- FIGURE N° 2 : DIFFERENTS TRAITEMENTS DES FISSURES
- FIGURE N° 3 : LES NORMES DES SERIES NF P 95-1** ET NF EN 1504-**
- FIGURE N° 4 : EXTRAIT DE L'ARRET TRANNOY DU CONSEIL D'ÉTAT DU 2 FEVRIER 1973
- FIGURE N° 5 : DISPOSITIONS DES ARMATURES DANS DES OUVRAGES ANCIENS
- FIGURE N° 6 : LES 4 NIVEAUX DE DEGRADATIONS PAR LE FEU (EXTRAIT DE LA METHODE D'ESSAI DES LCPC N°62)
- FIGURE N° 7 : COURBES D'ISO-VITESSE (EXTRAIT DE LA METHODE D'ESSAI DES LCPC N°62)
- FIGURE N° 8 : SCHEMA DES FISSURES DE RESSUAGE
- FIGURE N° 9 : FISSURATION ANARCHIQUE A LA SURFACE D'UNE PIECE MASSIVE
- FIGURE N° 10 : INCIDENCE DES RETRAITS THERMIQUES SUR LES PIECES MINCES ET MASSIVES ET DANS LES ZONES DE REPRISE DE BETONNAGE
- FIGURE N° 11 : DIAGRAMME MONTRANT L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU DE LA PEAU D'UN BETON AVEC LE TEMPS
- FIGURE N° 12 : CONSEQUENCES D'UNE ABSENCE OU D'UNE INSUFFISANCE DES ARMATURES DE PEAU
- FIGURE N° 13 : REPRISE DE BETONNAGE POUVANT ETRE SOUMISE A UN PASSAGE D'EAU
- FIGURE N° 14 : TRACES ESPACE-TEMPS D'UN BETON HOMOGENE SANS OU AVEC UNE FISSURE
- FIGURE N° 15 : DEVIATION DES ONDES SONORES AU DROIT D'UNE FISSURE
- FIGURE N° 16 : REPORT DES FISSURES SUR UN PLAN (ICI IL S'AGIT DE FISSURES A CARACTERE STRUCTURAL)
- FIGURE N° 17 : ZONES PREFERENTIELLES D'ATTAQUE PAR L'EAU DE MER D'UNE STRUCTURE
- FIGURE N° 18 : ATTAQUES CHIMIQUES DANS UNE CANALISATION D'EAUX USEES EN BETON
- FIGURE N° 19 : DIAGRAMME DE POURBAIX POUR UN ACIER DANS DES EAUX DE PH DIFFERENTS
- FIGURE N° 20 : DIAGRAMME DE POURBAIX EN PRESENCE DE CHLORURES
- FIGURE N° 21 : LE DEVELOPPEMENT DE LA CORROSION DES ARMATURES : CAS DU BETON FISSURE ET CAS DU BETON NON FISSURE
- FIGURE N° 22 : FIGURE MONTRANT DES ZONES DE PENETRATION PREFERENTIELLE DES AGENTS AGRESSIFS (CAS DE LA CARBONATATION)
- FIGURE N° 23 : FORMATION DE MACRO-CELLULES DE CORROSION APRES UNE REPARATION LIMITEE A LA ZONE ANODIQUE CORRODEE SANS TENIR COMPTE DE LA PENETRATION D'AGENTS AGRESSIFS DANS LE BETON ADJACENT (EXTRAIT D'UN ARTICLE DU PROFESSEUR RAUPACH DE L'UNIVERSITE D'AIX-LA-CHAPELLE DATE DU 13 JUILLET 2006)
- FIGURE N° 24 : PHOTOS INITIALE ET TRANSPOSITION GRAPHIQUE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- FIGURE N° 25 : PRINCIPE DE MESURE DU GEO-RADAR (CREDIT PHOTO FREYSSINET)

- FIGURE N° 26 : RESULTAT D'UNE MESURE BRUTE AU GEO-RADAR ET APRES INTERPRETATION DONNANT LA POSITION DES ARMATURES DE BA ET DE CABLES DE PRECONTRAINTE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- FIGURE N° 27 : PRINCIPE DE MESURE DU POTENTIEL D'ELECTRODE
- FIGURE N° 28 : RESULTATS D'UNE MESURE DE POTENTIEL (CREDIT PHOTO CEBTP – G. TACHE)
- FIGURE N° 29 : RELEVÉ DES VALEURS DES POTENTIELS D'ELECTRODE SUR UN POTEAU
- FIGURE N° 30 : RELEVÉ DES COULURES ET DES ENROBAGES DES ARMATURES
- FIGURE N° 31 : « EAU FOSSILE » CAUSE DE LA RUPTURE
- FIGURE N° 32 : PLAN DE CABLAGE D'UNE POUTRE ET EMBLACEMENT DES CLICHES (EXTRAIT DU GUIDE METHODOLOGIQUE SUSVISE)
- FIGURE N° 33 : PRINCIPE DU PROCEDE (CREDIT PHOTO CEREMA CENTRE-EST ET SUD-OUEST)
- FIGURE N° 34 : PRINCIPE DU PROCEDE (CREDIT PHOTO PROCEDE USCAN SIXENSE-IFSTTAR)
- FIGURE N° 35 : TASSEMENT D'UNE FONDATION ANCIENNE SUPPOSEE SUR PIEUX FAUTE D'INVESTIGATIONS LORS DU REMPLACEMENT DES PALPLANCHES EN BOIS
- FIGURE N° 36 : RELEVÉ DES DESORDRES DE L'INTRADOS DU TABLIER
- FIGURE N° 37 : DEMI-COUPÉ LONGITUDINALE ET DEMI COUPÉ TRANSVERSALE DU PONT DE LA NEUVILLETTE
- FIGURE N° 38 : RAPPEL DIFFERENTES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES FISSURES
- FIGURE N° 39 : PRINCIPE DE REALISATION DU PONTAGE D'UNE FISSURE
- FIGURE N° 40 : FISSURATION D'UNE POUTRE-CAISSON SOUS LES EFFETS DES RETRAITS
- FIGURE N° 41 : RELEVÉ DE LA FISSURATION DU CHEVETRE (CREDIT PHOTO CÉTÉ D'AIX-EN-PROVENCE - M. BROQUET)
- FIGURE N° 42 : LES QUATRE CAS A CONSIDERER POUR LE CHOIX DE LA METHODE DE REPARATION LA MIEUX ADAPTEE (ICI DANS LE CAS D'UNE CARBONATATION)
- FIGURE N° 43 : LES QUATRE CAS A CONSIDERER POUR LE CHOIX DE LA METHODE DE REPARATION LA MIEUX ADAPTEE (ICI DANS LE CAS D'UNE CHLORURATION)
- FIGURE N° 44 : DESORDRES LOCALISES
- FIGURE N° 45 : SCHEMA ILLUSTRANT LE RECOURS AUX METHODES PREVENTIVES
- FIGURE N° 46 : EXEMPLE DE CAS LIMITE
- FIGURE N° 47 : RAPPEL : EVOLUTION DE LA CORROSION DES ARMATURES SUIVANT QUE LE BETON EST OU NON FISSURE
- FIGURE N° 48 : PRINCIPE A SUIVRE POUR LE DETOURAGE ET LE DECAPAGE DES ARMATURES CORRODEES
- FIGURE N° 49 : IMAGE EXTRAITE D'UNE COMMUNICATION DU PROFESSEUR RAUPACH DE L'UNIVERSITE D'AIX-LA-CHAPELLE
- FIGURE N° 50 : PRINCIPES DE LA DECHLORURATION ET DE LA REALCALINISATION PAR COURANT IMPOSE
- FIGURE N° 51 : PRINCIPE DE REALISATION D'UNE PROTECTION CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSE (MAL PLACEE)

- FIGURE N° 52 : PRINCIPE DU DISPOSITIF DE DETENSION DITE CONTROLÉE
- FIGURE N° 53 : CAUSE DU TASSEMENT DE LA PILE DU PONT D'ŒUILLY
- FIGURE N° 54 : PRINCIPES DE REPARATION D'UN HOURDIS INFÉRIEUR PAR INJECTION DE BÉTON OU PAR BÉTON PROJÉTÉ
- FIGURE N° 55 : PRINCIPE DE RENFORCEMENT D'UNE POUTRE PAR AJOUT DE BÉTON ET D'ARMATURES
- FIGURE N° 56 : PRINCIPE DE RENFORCEMENT D'UN POTEAU, VIS-A-VIS DES CHARGES D'EXPLOITATION SEULES, PAR AJOUT DE BÉTON ET ARMATURES
- FIGURE N° 57 : PRINCIPE DE RENFORCEMENT D'UNE PILE, VIS-A-VIS DES CHARGES PERMANENTES ET D'EXPLOITATION, AVEC MISE EN CHARGE PAR VERINAGE
- FIGURE N° 58 : PRINCIPE DE RÉALISATION D'UN RENFORCEMENT D'UNE DALLE ET D'UNE POUTRE PAR BÉTON CONTRECOLLE
- FIGURE N° 59 : DIAGRAMME DES DÉFORMATIONS DANS LE CAS D'UN PHASAGE (SECTION EN BA)
- FIGURE N° 60 : DIAGRAMME DES DÉFORMATIONS DANS LE CAS D'UNE ADAPTATION (SECTION EN BA)
- FIGURE N° 61 : PRINCIPES DE RENFORCEMENT D'UNE POUTRE A L'EFFORT TRANCHANT PAR ÉTRIERS ACTIFS EXTERIEURS
- FIGURE N° 62 : PRINCIPES DE RENFORCEMENT DE L'ÂME D'UNE POUTRE-CAISSON PAR DES BARRES DE PRECONTRAINTE INTERNES ET EXTERIEURES
- FIGURE N° 63 : PRINCIPE DE RENFORCEMENT A L'EFFORT TRANCHANT DU VIADUC DE SAINT-ISIDORE (AUTOROUTE A 8)
- FIGURE N° 64 : PRINCIPES DE RENFORCEMENT D'UNE POUTRE PAR PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE LONGITUDINALE
- FIGURE N° 65 : LA PRÉPARATION D'UNE OPÉRATION DE RÉPARATION PAR L'ENTREPRENEUR
- FIGURE N° 66 : EXTRAIT D'UNE FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ (FDS) DE LA SOCIÉTÉ PAREXLANKO
- FIGURE N° 67 : LES QUATRE MODES DE RUPTURE POUVANT ÊTRE OBTENUS LORS D'UN ESSAI D'ARRACHEMENT
- FIGURE N° 68 : RUPTURE PAR ARRACHEMENT D'UN CÔNE DE BÉTON (ESSAI NON CONFINÉ)
- FIGURE N° 69 : LES TROIS TEXTES (ETAG 001 – TR23 – DÉE 330087-00-0601)
- FIGURE N° 70 : ESSAI NON-CONFINÉ A GAUCHE ET ESSAI CONFINÉ A DROITE
- FIGURE N° 71 : MODE D'ÉVALUATION DES COURBES CONTRAINTES/DÉPLACEMENTS
- FIGURE N° 72 : CONDITIONS D'ADHÉRENCE BONNES ET MÉDIOCRES EXTRAITES DE L'EUROCODE 2 PARTIE 1-1
- FIGURE N° 73 : EXEMPLE D'ÊTE LE 14/0423 BASE SUR L'ETAG 001
- FIGURE N° 74 : JONCS DE DIVERSES SECTIONS COLLES DANS DES ENCOCHES
- FIGURE N° 75 : SCHEMA D'UNE BARRE PRF AVEC UNE TÊTE D'ANCRAGE
- FIGURE N° 76 : PRINCIPE D'UNE INJECTION SOUS PRESSIION D'UN MORTIER OU D'UN MICRO-BÉTON
- FIGURE N° 77 : DISPOSITIONS A RESPECTER POUR LE DÉGAGEMENT DES ARMATURES

- FIGURE N° 78 : DISTANCE MINIMALE A RESPECTER ENTRE LA BARRE ET LE BETON LORS DE LA PREPARATION DU SUPPORT
- FIGURE N° 79 : PRINCIPE D'UNE REPRISE DE BETONNAGE AVEC REDANS
- FIGURE N° 80 : DIAGRAMME DE MOLLIER POUR LA DETERMINATION DU POINT DE ROSEE
- FIGURE N° 81 : EXEMPLE CLASSIQUE DE REPARATION DE SURFACE DU BETON
- FIGURE N° 82 : PRINCIPE DE COFFRAGE POUR LA REPARATION DE L'ABOUT D'UNE DALLE EN ENCORBELLEMENT (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- FIGURE N° 83 : PRINCIPE DE LA CHEMINEE DE BETONNAGE POUR LA REPARATION D'UNE POUTRE
- FIGURE N° 84 : PRINCIPE DE REPARATION PAR INJECTION D'UN MORTIER OU D'UN MICRO-BETON
- FIGURE N° 85 : LES DEUX METHODES DE PROJECTION (CREDIT PHOTO CETU)
- FIGURE N° 86 : GEOMETRIE DES ECHAFAUDAGES
- FIGURE N° 87 : PRINCIPES A APPLIQUER POUR LA REPARATION ET LE RENFORCEMENT D'UNE POUTRE PAR BETON OU MORTIER PROJETE
- FIGURE N° 88 : CONDUITE DE LA LANCE DE PROJECTION PAR LE PROJETEUR DU BAS VERS LE HAUT AVEC DES MOUVEMENTS ELLIPTIQUES
- FIGURE N° 89 : PRINCIPE DE MISE EN CHARGE D'UN RENFORCEMENT VIS-A-VIS DES CHARGES PERMANENTES ET D'EXPLOITATION D'UN POTEAU SUPPORT D'UN PLANCHER-CHAMPIGNON
- FIGURE N° 90 : JOINT HYDRO-EXPANSIF ASSURANT L'ETANCHEITE D'UNE REPRISE DE BETONNAGE (CREDIT-PHOTO SNAAM)
- FIGURE N° 91 : PRINCIPE DE REALISATION DE L'INJECTION DE LA PERIPHERIE D'UNE REPRISE DE BETONNAGE
- FIGURE N° 92 : RAPPEL DU PRINCIPE DE DETOURAGE DES ARMATURES ET DE D'ENLEVEMENT DE LA ROUILLE
- FIGURE N° 93 : RAPPEL DU TRAITEMENT DES BORDS DE LA ZONE CONCERNEE
- FIGURE N° 94 : SCHEMA DE L'INSTALLATION ET DES DISPOSITIFS DE MESURE
- FIGURE N° 95 : PROCEDE DE STABILISATION DE LA CORROSION DE CABLES DE PRECONTRAINTTE PAR INHIBITEURS NITRILES (CREDIT PHOTO PMD-ATEAV)
- FIGURE N° 96 : RECEPTION PAR LE CONTROLEUR DES PRODUITS DE REPARATION
- FIGURE N° 97 : CONSEQUENCES SI LES PRINCIPES A RESPECTER LORS DU DEGAGEMENT D'ARMATURES CORRODEES NE SONT PAS RESPECTES
- FIGURE N° 98 : GUIDE 0 DU STRRES
- FIGURE N° 99 : PICTOGRAMMES CLP DE LA NOUVELLE REGLEMENTATION SUR L'ETIQUETAGE EXTRAIT D'UN DOCUMENT INSROPPBTP (CREDIT PHOTO INSROPPBTP)
- FIGURE N° 100 : FICHE DE DONNEES DE SECURITE SUR UN MELANGE INDUSTRIEL POUR BETON PROJETE (EXTRAIT D'UN DOCUMENT DE LA SOCIETE T-MIX)
- FIGURE N° 101 : SYMBOLES DE DANGER (EXTRAIT D'UN DOCUMENT WEBER ET BROUTIN)
- FIGURE N° 102 : EXTRAIT D'UNE FICHE DE DONNEES DE SECURITE (FDS) (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- FIGURE N° 103 : GUIDE DU STRRES 2000 RELATIF A LA REDACTION DES PAQ DES TRAVAUX DE REPARATION

TABLE DES PHOTOS

- PHOTO N° 1 : FILETS DE PROTECTION SOUS LE PONT EN BETON ARME DE CARROUAL A ERQUY (COTES D'ARMOR) CONÇU PAR HAREL DE LA NOË ET ACTUELLEMENT DESAFFECTE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 2 : LE GUIDE LCPC-SETRA DE 1996 ET LE GUIDE DE L'AFGC DE 2003 (CREDIT PHOTO AFGC, LCPC ET SETRA)
- PHOTO N° 3 : DESORDRES D'UN RESERVOIR D'EAU POTABLE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 4 : ADAPTATION DU MATERIEL DE VERINAGE AUX EMPLACEMENTS DISPONIBLES ET RENFORCEMENTS POUR EQUILIBRER LES EFFORTS CONCENTRES (CREDIT PHOTO VSL - M. LOUBEYRE)
- PHOTO N° 5 : DIFFERENTS DESORDRES DE STRUCTURES EN BETON ARME ET PRECONTRAIT (PHOTOMONTAGE)
- PHOTO N° 6 : GUIDE DU LCPC DE 1991
- PHOTO N° 7 : BETON AFFECTE PAR L'ECAILLAGE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 8 : BETONS AFFECTES PAR LE GEL INTERNE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 9 : BETON APRES UN INCENDIE (CREDIT PHOTO CETU)
- PHOTO N° 10 : ETAT DE LA PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE D'UN VIPP APRES UN INCENDIE (CREDIT PHOTO CEREMA)
- PHOTO N° 11 : FISSURES DE RESSUAGE
- PHOTO N° 12 : FISSURE NON TRAVERSANTE
- PHOTO N° 13 : FISSURE TRAVERSANTE
- PHOTO N° 14 : UTILISATION D'UN FISSUROMETRE SAUGNAC (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 15 : UTILISATION D'UN COMPTE-FILS (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 16 : A GAUCHE DE L'IMAGE, SE TROUVE UN CAPTEUR DE DEPLACEMENT ET A DROITE UNE JAUGE DE DEFORMATION (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 17 : EROSION HYDRAULIQUE DU RADIER DE LA CHUTE DES BOIS PRES DE CHAMONIX (CREDIT PHOTO WEARGRIT)
- PHOTO N° 18 : TRACES DE CALCITE DUES AU PASSAGE DE L'EAU A TRAVERS LE BETON FAUTE D'UNE CHAPE D'ETANCHEITE EFFICACE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 19 : DEGRADATIONS DU BETON PAR UNE ATTAQUE SULFATIQUE EXTERNE (CREDIT PHOTO LCPC)
- PHOTO N° 20 : DEGRADATIONS DU BETON D'UNE PILE DUES A L'EAU D'UNE LAGUNE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 21 : EXEMPLES D'ALCALI-REACTION ET D'ATTAQUE SULFATIQUE INTERNE (CREDIT PHOTO D. POINEAU ET LCPC)
- PHOTO N° 22 : GUIDE DU LCPC DE 2003 (CREDIT PHOTO LCPC)
- PHOTO N° 23 : GUIDE DU LCPC DE 2007 (CREDIT PHOTO LCPC)
- PHOTO N° 24 : EXEMPLE DE CORROSION AVEC POLARISATION CATHODIQUE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)

- PHOTO N° 25 : MANIFESTATIONS VISUELLES DE LA CORROSION (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 26 : FILET DE PROTECTION CONTRE LES CHUTES DE MORCEAUX DE BETON (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 27 : EXEMPLE DE DESORDRES EXTREMES DUS A LA CORROSION – GRAND ROCHER DU ZOO DE VINCENNES AVANT REHABILITATION – ENCORBELLEMENT D'UN PONT (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 28 : PASSAGE D'EAU AU TRAVERS DE LA FISSURE D'UNE DALLE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 29 : FISSURE AVEC PASSAGE D'EAU ET CONSEQUENCES DE LA CORROSION LOCALISEE AINSI INDUITE (CREDIT PHOTO DDE54)
- PHOTO N° 30 : FISSURE DE RETRAITS GENES (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 31 : CONSTAT D'UNE NOUVELLE CORROSION QUELQUES ANNEES APRES UNE REPARATION MAL EXECUTEE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 32 : INSPECTION DETAILLEE DU PONT DE LA CAILLE 74 (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 33 : DEFAT D'ENROBAGE, CAUSE DE LA CORROSION DES ARMATURES (CREDIT PHOTO LRPC DE STRASBOURG)
- PHOTO N° 34 : RELEVÉ DE LA POSITION DES ARMATURES DE BETON ARME AVEC UN PACHOMETRE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 35 : MESURE DE LA PROFONDEUR DE CARBONATATION (CREDIT PHOTO LERM)
- PHOTO N° 36 : PONT DE CREVECHAMPS, CORROSION PAR DISSOLUTION D'ARMATURES DE PRECONTRAINTE INTERNES AU BETON (CREDIT PHOTO LRPC DE STRASBOURG)
- PHOTO N° 37 : FISSURES DE CORROSION FISSURANTE SOUS TENSION SUR UN FIL D'UN TORON (CREDIT PHOTO LRPC DU BOURGET)
- PHOTO N° 38 : PRESENCE DE LA PATE BLANCHE DANS UN CONDUIT DE PRECONTRAINTE EXTERIEURE INJECTEE AU COULIS DE CIMENT (CREDIT PHOTO SERVICES TECHNIQUES DE LA REUNION)
- PHOTO N° 39 : EXTRAIT DE LA NOTE D'INFORMATION N°3 DE NOVEMBRE 2018 DU CEREMA
- PHOTO N° 40 : FISSURATION D'UNE POUTRE ISOSTATIQUE EN BETON PRECONTRAINTE (CREDIT PHOTO LRPC D'AIX-EN-PROVENCE)
- PHOTO N° 41 : TRACE DE CALCITE SOUS LE TALON D'UNE POUTRE D'UN VIPP (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 42 : ANCRAGE SANS PROTECTION (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 43 : DEFAT DE BETONNAGE SOUS LE TALON D'UNE POUTRE PREFABRIQUEE CONSTATE APRES UN SONDAGE AU MARTEAU (CREDIT PHOTO LRPC DE STRASBOURG)
- PHOTO N° 44 : LE FOUETTEMET DU CABLE, ICI UN 12T15, EST LA CONSEQUENCE DE LA RUPTURE PAR CORROSION DE CETTE ARMATURE DE PRECONTRAINTE EXTERIEURE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 45 : CLICHE RADIOGRAPHIQUE D'UN CABLE DE PRECONTRAINTE (CREDIT PHOTO LR)

- PHOTO N° 46 : FENETRE MONTRANT L'ABSENCE DE COULIS ET LA CORROSION DES TORONS (CREDIT PHOTO LR)
- PHOTO N° 47 : PIQUES AVEC TACHES NOIRES SYMPTOMES D'UNE CORROSION FISSURANTE SOUS TENSION (EXTRAIT DU GUIDE TECHNIQUE VIPP DU LCPC D'OCTOBRE 2001)
- PHOTO N° 48 : NON PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE DIFFUSION DES EFFORTS CONCENTRES SOUS LES ANCRAGES ET DE L'EFFET D'ECHELLE DANS CE PONT-DALLE A NERVURE ETROITE ET TRES LARGES ENCORBELLEMENT ET, DE PLUS BIAIS (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 49 : RUPTURE PAR CORROSION D'UNE ARMATURE DE PRECONTRAINT EXTERIEURE AU BETON ENGENDREE PAR LA PRESENCE « D'EAU FOSSILE » LIEE A UNE INJECTION MAL EXECUTEE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 50 : CONSEQUENCES DE L'ABSENCE D'UNE ETANCHEITE SOUS TROTTOIR ET D'UNE NON REFECTION DE CELLE-CI EN TEMPS UTILE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 51 : CONSEQUENCES SUR LE TABLIER D'UN PONT DU CHOC DE BATEAU N'AYANT PAS RESPECTE LE GABARIT DE NAVIGATION (CREDIT PHOTO DU CÉTÉ DE LYON)
- PHOTO N° 52 : CONSEQUENCES STRUCTURALES SUR LE TABLIER (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 53 : PROCEDURE DE SCIAGE D'UNE PARTIE D'UN ENCORBELLEMENT D'UN PONT EN BETON PRECONTRAIT NON PORTEE A LA CONNAISSANCE DU CHARGE DE L'OPERATION (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 54 : CONSEQUENCES 6 CABLES DE PRECONTRAINT SECTIONNES DANS LA POUTRE DE RIVE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 55 : APPLICATION D'UN REVETEMENT DE PROTECTION SUR LA CORNICHE D'UN PONT (CREDIT PHOTO LCPC)
- PHOTO N° 56 : RECOMMANDATIONS DES LPC POUR LA FORMULATION DES BETONS DURCIS SOUMIS AU GEL (2003)
- PHOTO N° 57 : ETAT DE DESORGANISATION DU BETON DU HOURDIS (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 58 : LE TABLIER SUR CINTRE PARTIEL APRES DEMOLITION DU HOURDIS (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 59 : LE TABLIER APRES RECONSTITUTION DU FERRAILLAGE DU HOURDIS ET AVANT BETONNAGE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 60 : VUE GENERALE DU PONT DE LA CAILLE EN HIVER (CREDIT PHOTO DDE 74)
- PHOTO N° 61 : ETAT DU BETON D'UN DES BANDEAUX DE L'ARC (CREDIT PHOTO DDE 74)
- PHOTO N° 62 : BANDEAU APRES PURGE DU BETON DESORGANISE, SCHELLEMENT DE NOUVELLES ARMATURES ET AVANT BETONNAGE PAR PROJECTION (CREDIT PHOTO DDE 74)
- PHOTO N° 63 : VUE DE L'ARC APRES PROJECTION ET AVANT MISE EN PLACE D'UNE CHAPE D'ETANCHEITE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 64 : VUE DE L'ARC AVEC SA CHAPE D'ETANCHEITE NON ADHERENTE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)

- PHOTO N° 65 : REPIQUAGE DU BETON ENDOMMAGE AU MARTEAU-PIQUEUR (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 66 : PURGE DU BETON ENDOMMAGE EN COURS (CREDIT PHOTOS FREYSSINET)
- PHOTO N° 67 : PURGE TERMINEE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 68 : PROJECTION DE BETON SUR UNE PAROI VERTICALE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 69 : PROJECTION DE BETON EN SOUS-FACE D'UNE DALLE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 70 : TRAVAUX DE FINITION DES PAREMENTS A LA REGLE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 71 : VUE DE LA SOUS-FACE D'UNE DALLE RECONSTITUEE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 72 : REVETEMENT DE PROTECTION ET D'ETANCHEITE APRES REPARATIONS LOCALES (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 73 : REVETEMENT ARME ASSURANT UNE PROTECTION LOCALISEE D'UNE FISSURE (CREDIT PHOTO SIKAI)
- PHOTO N° 74 : DEBUT DE MISE EN PLACE DES COFFRAGES D'UNE NERVURE ET SCELLEMENT D'ARMATURES DE BA DANS LES PAROIS (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 75 : DETAIL DU FERRAILLAGE D'UNE NERVURE – A NOTER LE COUPLEUR LIMITANT LE NOMBRE DES RECOUVREMENTS (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 76 : ARMATURES DE JONCTION ENTRE LES PAROIS DE LA PILE ET LA NERVURE SCHELLES DANS DES RESERVATIONS DE LA NERVURE (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 77 : RENFORT EN TISSU DE FIBRES DE CARBONE (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 78 : VUE DES NERVURES ET DES RENFORTS EN TISSU DE FIBRES DE CARBONE COLLES EQUIPEES DE DISPOSITIFS ANTI POUSSEE AU VIDE (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 79 : INJECTION DES FISSURES (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 80 : REVETEMENT DE PROTECTION APRES MISE EN ŒUVRE SUR LE PAREMENT D'UNE PILE (CREDIT PHOTO DU DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME)
- PHOTO N° 81 : EROSION HYDRAULIQUE DU RADIER DE LA CHUTE DES BOIS PRES DE CHAMONIX (CREDIT PHOTO WEARGRIT)
- PHOTO N° 82 : REPARATION DU RADIER DE LA CHUTE DES BOIS PRES DE CHAMONIX (CREDIT PHOTO WEARGRIT)
- PHOTO N° 83 : UN DES DEUX MASSIFS DE FONDATION DU PONT DE LA CAILLE AVANT MISE EN ŒUVRE DU BETON PROJETE (CREDIT PHOTO DDE 74)
- PHOTO N° 84 : TRAVAUX EN COURS SUR UN DES DEUX MASSIF DE FONDATION DU PONT DE LA CAILLE (CREDIT PHOTO DDE 74)
- PHOTO N° 85 : ATTAQUE DU BETON PAR DES EAUX AGRESSIVES (CREDIT PHOTO FREYSSINET)

- PHOTO N° 86 : IMPORTANCE DE LA FISSURATION (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 87 : CEINTURAGE DES PYLONES PAR DES BANDES DE TISSUS COMPOSITE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 88 : CEINTURAGE DE LA BASE DES PYLONES EN COURS DE BETONNAGE PAR PROJECTION (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 89 : DETAIL DU CEINTURAGE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 90 : ETAIEMENT DES DEUX TRAVEES REPOSANT SUR LE CHEVETRE (CREDIT PHOTO CÉTÉ D'AIX-EN-PROVENCE - M. BROQUET)
- PHOTO N° 91 : MISE EN PLACE DU FERRAILLAGE DU NOUVEAU CHEVETRE (CREDIT PHOTO CÉTÉ D'AIX-EN-PROVENCE - M. BROQUET)
- PHOTO N° 92 : CORROSION D'UNE ARMATURE DE BETON ARME REVETUE D'EPOXY (EXTRAIT D'UNE REVUE US)
- PHOTO N° 93 : GUIDE DE L'AFGC DE JUILLET 2004 (CREDIT PHOTO AFGC)
- PHOTO N° 94 : CORROSION PAR INVERSION DE POLARITE APRES REPARATION (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 95 : PHASES 1 ET 2 D'UNE REPARATION PAR ENLEVEMENT DU BETON POLLUE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 96 : PHASES 3, 4 ET 5 D'UNE REPARATION PAR ENLEVEMENT DU BETON POLLUE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 97 : REPARATION PAR ENLEVEMENT DU BETON POLLUE TERMINEE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 98 : RESULTATS D'UN DECAPAGE DES ARMATURES AU MOYEN D'ABRASIFS AU PONT DE LIMAY (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 99 : APPLICATION D'UN REVETEMENT ANTICORROSION SUR DES ARMATURES DE BA (CREDIT PHOTO WEBER ET BROUTIN)
- PHOTO N° 100 : EXTRACTION ET REALCALINISATION PAR ANODE ACTIVE PHASE 1 (CREDIT PHOTO IFSTTAR / FREYSSINET)
- PHOTO N° 101 : EXTRACTION DES CHLORURES ET REALCALINISATION PAR ANODE ACTIVE PHASE 2 (CREDIT PHOTO IFSTTAR / FREYSSINET)
- PHOTO N° 102 : EXTRACTION ELECTROCHIMIQUE DES CHLORURES PAR COURANT IMPOSE – MISE EN ŒUVRE DU MATERIEL (CREDIT PHOTO IFSTTAR)
- PHOTO N° 103 : EXTRACTION ELECTROCHIMIQUE DES CHLORURES PAR COURANT IMPOSE – CONNECTEURS ET DISPOSITIFS DE CONTROLE (CREDIT PHOTO IFSTTAR)
- PHOTO N° 104 : PROTECTION GALVANIQUE (CREDIT PHOTO FOSROC)
- PHOTO N° 105 : ANODE EN CARBONE (CREDIT PHOTO CARBOCATH)
- PHOTO N° 106 : ANODE EXTERIEURE SUR UN PIEU METALLIQUE (CREDIT PHOTO GRIMALDI)
- PHOTO N° 107 : APPLICATION D'UN INHIBITEUR DE CORROSION A LA SURFACE DU BETON (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 108 : GUIDE DU LCPC SUR LA PROTECTION DES BETONS DE 2002 (CREDIT PHOTO LCPC)
- PHOTO N° 109 : EFFETS DE LA DETENSION BRUTALE DE CABLES EXTERIEURS LONGS PROTEGES PAR UN COULIS DE CIMENT (CREDIT PHOTO D. POINEAU)

- PHOTO N° 110 : AMORTISSEURS ELASTO-PLASTIQUES (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 111 : DISPOSITIFS DE GUIDAGE (CREDIT PHOTO L. LABOURIE DU CEREMA)
- PHOTO N° 112 : EXEMPLE D'EJECTIONS DE TETES D'ANCRAGE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 113 : RUPTURE D'UNE DES POUTRES EN BETON ARME DU PONT D'ŒUILLY (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 114 : DESORDRES DU HOURDIS INFERIEUR DUS A UNE POUSSEE AU VIDE LOCALE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 115 : RENFORCEMENT EN TISSUS COMPOSITE DES ABOUTS DES POUTRES DU PONT SUR LA DROME (CREDIT PHOTO RCA - M. TROUILLET)
- PHOTO N° 116 : RENFORCEMENT DES POUTRES DE LA PASSERELLE DU BARRAGE DE PIZANÇON (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 117 : RENFORCEMENT DU HOURDIS SUPERIEUR DU PONT DE GUIGNICOURT PAR BETON CONTRECOLLE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 118 : TABLIER PROVISoire POUR LE MAINTIEN DE LA CIRCULATION ET FERRAILLAGE DE L'ELARGISSEMENT DU PONT DE BELLEVUE (CREDIT PHOTO CÉTÉ DE L'OUEST - M.D. GUILLOT)
- PHOTO N° 119 : BETONNAGE DU DERNIER PLOT DE L'ELARGISSEMENT DU PONT DE BELLEVUE (CREDIT PHOTO CÉTÉ DE L'OUEST - M. D. GUILLOT)
- PHOTO N° 120 : RENFORCEMENT DE POUTRES FLECHIES PAR PLAQUES DE COMPOSITES (PULTRUDES) (CREDIT PHOTO VSL)
- PHOTO N° 121 : RENFORCEMENT DE POUTRES EN BETON ARME A L'EFFORT TRANCHANT PI A 6 A ARCUEIL (CREDIT PHOTO VSL – M. LOUBEYRE)
- PHOTO N° 122 : FRETTAGE DE POTEAUX PAR COMPOSITES (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 123 : RENFORCEMENT A L'EFFORT TRANCHANT PAR ETRIERs ACTIFS EN ACIER INOXYDABLE DU PONT DE LABERAUDIE (CREDIT-PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 124 : RENFORCEMENT PAR PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE D'UN OUVRAGE DE LA CORNICHE A MARSEILLE (CREDIT PHOTO COMMUNAUTE URBAINE DE MARSEILLE)
- PHOTO N° 125 : MOYENS D'ACCES NECESSAIRES POUR L'EXECUTION DES TRAVAUX (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 126 : LE GUIDE TECHNIQUE SUR LA REPARATION DES BETONS D'AOUT 1996 (CREDIT PHOTO LCPC-SETRA)
- PHOTO N° 127 : RECOMMANDATIONS DE L'AFGC POUR L'EMPLOI DES BAP DE JANVIER 2008 (CREDIT PHOTO AFGC)
- PHOTO N° 128 : GUIDE DE L'AFGC SUR LES BFUP DE JANVIER 2002 (CREDIT PHOTO AFGC)
- PHOTO N° 129 : ENCOLLAGE AVANT POSE DE TISSUS EN COMPOSITES (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 130 : REALISATION D'UN CALAGE POUR UNE REPRISE EN SOUS-ŒUVRE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 131 : DRAAB BARTEC (CREDIT PHOTO BARTEC)
- PHOTO N° 132 : ACIERS ET ARMATURES DE BETON ARME INOXYDABLES (CREDIT PHOTO CIMBETON)

- PHOTO N° 133 : ACIERS DE BETON ARME GALVANISES AU GRAND ROCHER DU ZOO DE VINCENNES (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 134 : BARRE PRF AVEC REVETEMENT SABLE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 135 : BARRES PRF TYPE COMBAR (CREDIT PHOTO SCHÖCK)
- PHOTO N° 136 : DIVERSES ARMATURES COMPOSITES SOUS FORME DE PLAQUES (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 137 : PRECONTRAINTE PROVISOIRE POUR LE REMPLACEMENT DE LA PRECONTRAINTE EXTERIEURE DE L'OUVRAGE DE VAL DURANCE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 138 : OPERATION DE DECHLORURATION (CREDIT PHOTO DIRECTION DES ROUTES)
- PHOTO N° 139 : EXEMPLE DE FIBRES METALLIQUES EN FONTE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 140 : BOITES DE RESINES : BASE ET DURCISSEUR (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 141 : EXTRAIT D'UNE FICHE TECHNIQUE (DOCUMENT SIKA TOP 122)
- PHOTO N° 142 : PREPARATION D'UN MORTIER DE REPARATION A BASE DE LIANTS HYDRAULIQUES (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 143 : HUMIDIFICATION DU SUBSTRATUM (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 144 : EXECUTION D'UNE REPARATION DE SURFACE MANUELLEMENT (CREDIT PHOTO FOSROC)
- PHOTO N° 145 : MACHINE A PROJETER LE BETON EN VOIE SECHE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 146 : PROJECTION EN COURS (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 147 : PLANCHES MATERIALISANT LE COFFRAGE D'UNE POUTRE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 148 : EVENTS POUR L'INJECTION DE LA SURFACE DE REPRISE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 149 : REMPLISSAGE DES TROUS AVANT SCellement DE BARRES (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 150 : SCellement D'ARMATURES DE BETON ARME (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 151 : MANCHON DE JONCTION (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 152 : OPERATION D'EXTRACTION DES CHLORURES-REALCALINISATION SUR UNE POUTRE D'UN IMMEUBLE (CREDIT PHOTO FREYSSINET)
- PHOTO N° 153 : RESULTAT D'UN DECAPAGE PAR SABLAGE A SEC (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 154 : SACS D'ABRASIF SANS SILICE POUR SABLAGE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 155 : RESULTATS D'UNE HYDRODEMOLITION : ENLEVEMENT COMPLET DU BETON ET FERRAILLAGE INTACT (CREDIT PHOTO J.M. LACOMBE)
- PHOTO N° 156 : RESULTAT D'UN DECAPAGE LEGER A L'EAU SOUS PRESSION (CREDIT PHOTO D. POINEAU)

- PHOTO N° 157 : INCIDENCES NEFASTE DU MARTEAU-PIQUEUR SUR LE FERRAILLAGE (CREDIT PHOTO POINEAU)
- PHOTO N° 158 : ETAIEMENT PROVISOIRE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 159 : TOUTES LES ARMATURES CORRODEES DOIVENT ETRE DEGAGEES (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 160 : ENTASSEMENT DE BARRES DANS UNE STRUCTURE ANCIENNE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 161 : MAUVAISE APPLICATION D'UN REVETEMENT ANTICORROSION : LES ACIERS N'ONT PAS ETE DETOURES ET LE PRODUIT A ETE AUSSI APPLIQUE SUR LE BETON (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 162 : EXEMPLE DE REPARATION PRESENTANT LE RISQUE D'UNE INVERSION DE POLARITE (CREDIT PHOTO X)
- PHOTO N° 163 : EXEMPLE DE SOUDURES DE BARRES DE BETON ARME (CREDIT PHOTO SIKA)
- PHOTO N° 164 : MISE EN PLACE DE MORTIER DE REPARATION A LA TRUELLE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 165 : MISE EN ŒUVRE D'UN MORTIER AUTO-NIVELANT (CREDIT PHOTO SIKA)
- PHOTO N° 166 : BARRES SCELLEES AU PONT DE CHALONS-EN-CHAMPAGNE (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 167 : MASSIF D'ANCRAGE DE LA PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE LONGITUDINALE AU PONT DE CHALONS-EN-CHAMPAGNE (CREDIT PHOTO SETRA)
- PHOTO N° 168 : ESSAI DE TRACTION DE SURFACE POUR LA MESURE DE LA COHESION DU BETON (CREDIT PHOTO VSL)
- PHOTO N° 169 : DEGAGEMENT INSUFFISANT DES ARMATURES – ABSENCE DE DETOURAGE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 170 : EXEMPLE DE TRAVAUX NECESSITANT UN ETAIEMENT PROVISOIRE (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 171 : SONDRAGE AU MARTEAU (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 172 : CONTROLE D'ETALEMENT D'UN BAP (CREDIT PHOTO LRPC CLERMONT - M. GEOFFREY)
- PHOTO N° 173 : PROJECTION DANS UNE BOITE POUR ESSAIS SUR EPROUVETTES CAROTTEES (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 174 : RESTAURATION DU GRAND ROCHER DU ZOO DE VINCENNES (CREDIT PHOTO D. POINEAU)
- PHOTO N° 175 : PONT AVANT ET APRES TRAVAUX DE RESTAURATION (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 176 : DEFAUTS D'EXECUTION (CREDIT PHOTO PAREXLANKO)
- PHOTO N° 177 : EQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE (ÉPI) (CREDIT PHOTO POINEAU)
- PHOTO N° 178 : GUIDE AFGC-COFREND DE 2005 (CREDIT PHOTO AFGC- COFREND-PRESSES ENPC)

LISTE DES TABLEAUX

- TABLEAU N° 1 : PRINCIPALES MODIFICATIONS APPORTEES AU GUIDE FABEM 1 DE 2008
- TABLEAU N° 2 : LISTE ET CLASSIFICATION DES DIFFERENTES METHODES DE REPARATION OU DE RENFORCEMENT TRAITEES EN TOUT OU PARTIE DANS LE GUIDE FABEM 1
- TABLEAU N° 3 : CORRESPONDANCES ENTRE LES DENOMINATIONS FRANÇAISES USUELLES ET EUROPEENNES.
- TABLEAU N° 4 : EXTRAIT DE LA NORME NF EN 1504-3
- TABLEAU N° 5 : TABLEAU ISSU DU PROJET BRIME
- TABLEAU N° 6 :
- TABLEAU N° 7 : TABLEAU DONNANT L'INDICE DE RESISTANCE A L'ABRASION (ESSAI CNR)
- TABLEAU N° 8 : TABLEAU DONNANT UN INDICE DE RESISTANCE AUX CHOCS EN FONCTION DU VOLUME DE L'EMPREINTE DANS LE MATERIAU (ESSAI CNR)
- TABLEAU N° 9 : TABLEAU EXTRAIT DU FASCICULE DE DOCUMENTATION FD P18-011
- TABLEAU N° 10 : TABLEAU ISSU DE L'ANCIENNE NORME ASTM TOTALEMENT OBSOLETE
- TABLEAU N° 11 : PROBABILITE DE LA VITESSE DE CORROSION EN FONCTION DE LA RESISTIVITE DU BETON
- TABLEAU N° 12 : VITESSE ET NIVEAU DE CORROSION EN FONCTION DE L'INTENSITE DU COURANT DE CORROSION
- TABLEAU N° 13 : TABLEAU D'INTERPRETATION DES MESURES DE PERMEABILITE
- TABLEAU N° 14 : CORRESPONDANCE ENTRE LES NORMES DE LA SERIE NF P95-100 ET LES GUIDES FABEM
- TABLEAU N° 15 : REPRISE DES EPAUFRURES SUPERFICIELLES ET DES DEFAUTS DE PLANEITE
- TABLEAU N° 16 : REPRISE D'UNE EPAUFRURE D'ANGLE
- TABLEAU N° 17 : METHODES DE REPARATION DES DESORDRES DUS AU DEGEL/DEGEL ET ECAILLAGE
- TABLEAU N° 18 : METHODES DE REPARATION DES DESORDRES DUS A UN INCENDIE
- TABLEAU N° 19 : DEGRADATIONS DUES AUX EFFETS DES DIFFERENTS RETRAITS
- TABLEAU N° 20 : DEGRADATIONS DUES AUX EFFETS DE L'EROSION ET/OU DES CHOCS
- TABLEAU N° 21 : METHODES DE REPARATION DES DESORDRES D'ORIGINE CHIMIQUE (EAUX PURES OU ACIDES)
- TABLEAU N° 22 : METHODES DE REPARATION DES DESORDRES DUS A DES RGI
- TABLEAU N° 23 : METHODES CURATIVES DE RESTAURATION DE LA PASSIVITE DES ARMATURES
- TABLEAU N° 24 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTES METHODES CURATIVES DE RESTAURATION DE LA PASSIVITE DES ARMATURES
- TABLEAU N° 25 : DUREES DE VIE DES DIFFERENTS SYSTEMES ANODIQUES

- TABLEAU N° 26 : FAMILLES DE REPARATIONS
- TABLEAU N° 27 : METHODES DE REPARATION DES DESORDRES D'ORIGINE MECANIQUE
- TABLEAU N° 28 : COMPARAISON DES CLASSES FRANÇAISES ET EUROPEENNES DE TENUE AU FEU
- TABLEAU N° 29 : PHOTOCOPIE DU TABLEAU B.1 DE L'ANNEXE B DE LA NORME EN 1504-3 (NOTER LA TRADUCTION INAPPROPRIÉE)
- TABLEAU N° 30 : TABLEAU RECAPITULATIF DE CERTAINES APPLICATIONS PREVUES ET DES APPLICATIONS PARTICULIERES
- TABLEAU N° 31 : PRINCIPES ET METHODES DE REPARATIONS VISES PAR LA NORME NF P95-101
- TABLEAU N° 32 : TABLEAU ISSU DE LA NORME NF P95-101
- TABLEAU N° 33 : EXTRAIT DU GUIDE TECHNIQUE SETRA-LCPC DE 1996
- TABLEAU N° 34 : EXTRAIT DU GUIDE TECHNIQUE SETRA-LCPC DE 1996
- TABLEAU N° 35 : EXTRAIT DE LA NORME EN 1504-3
- TABLEAU N° 36 : PERFORMANCES EXIGEES DES DIFFERENTS PRODUITS POUR BENEFICIER DU MARQUAGE CE (TABLEAU N°3 EXTRAIT DE LA NORME EN 1504-3)
- TABLEAU N° 37 : EXTRAIT DU TABLEAU A 1 DE L'ANNEXE A DE LA NORME NF P95-101
- TABLEAU N° 38 : EXTRAIT DE LA NORME NF P95-102-1
- TABLEAU N° 39 : TABLEAU EXTRAIT DU FASCICULE 65 DU CCTG
- TABLEAU N° 40 : EXTRAIT DE LA NORME EN 1504-4
- TABLEAU N° 41 : SYNTHESE DES TABLEAUX 1 ET 3 DE LA NORME EN 1504-6
- TABLEAU N° 42 : TABLEAU A.1 EXTRAIT DE L'ANNEXE A DU DÉE (EAD) 330087-00-0601 DE MAI 2018
- TABLEAU N° 43 : TABLEAU A.4 EXTRAIT DE L'ANNEXE A DU DÉE (EAD)
- TABLEAU N° 44 : TABLEAU 1 D'APRES LA NORME NF P 18-821
- TABLEAU N° 45 : TABLEAU 1 D'APRES LA NORME NF P 18-822
- TABLEAU N° 46 : LISTE DE FABRICANTS DE BARRES ET ARMATURES PRF
- TABLEAU N° 47 : PRINCIPALES PROPRIETES DES FIBRES
- TABLEAU N° 48 : PRINCIPALES PROPRIETES DES RESINES UTILISEES COMME MATRICES
- TABLEAU N° 49 : PRINCIPAUX TEXTES DE REFERENCE.
- TABLEAU N° 50 : EXIGENCES DE LA NORME EN 1504-7
- TABLEAU N° 51 : TABLEAU EXTRAIT D'UN DOCUMENT DE L'OFRS
- TABLEAU N° 52 : METHODES DE REPIQUAGE ET D'ENLEVEMENT DU BETON - TABLEAU INSPIRE DE LA NORME NF P95-101
- TABLEAU N° 53 : METHODES DE NETTOYAGE – TABLEAU INSPIRE DE LA NORME NF P95-101
- TABLEAU N° 54 : CHOIX DES TECHNIQUES DE PREPARATION DU SUPPORT (INSPIRE DU GUIDE TECHNIQUE DU LCPC DE DECEMBRE 2002 SUR LA PROTECTION DES BETONS)

- TABLEAU N° 55 : TABLEAU D'UN EXTRAIT PARTIEL DE LA NORME NF EN ISO 12944-4
- TABLEAU N° 56 : DOCUMENTS DE REFERENCE SUR LES TECHNIQUES DE PREPARATION DU SUPPORT DANS LE CADRE DES METHODES DE
- TABLEAU N° 57 : PRINCIPES ET METHODES DE REPARATION VISES PAR LA NORME NF P95-102-1
- TABLEAU N° 58 : ADJUVANTS UTILISABLES EN VS ET VM
- TABLEAU N° 59 : DELAIS DE CURE (EXTRAIT DE L'ANNEXE F DE LA NORME NF EN 13670/CN)
- TABLEAU N° 60 : ESSAIS D'IDENTIFICATION ET CONTROLES SPECIFIQUES D'EFFICACITE
- TABLEAU N° 61 : CORRESPONDANCE ENTRE LES METHODES, LES NORMES NF P95-1** ET LES GUIDES DU STRRES
- TABLEAU N° 62 : ARTICLES RELATIFS AUX CONTROLES D'EXECUTION CONCERNANT CERTAINES DES METHODES DEVELOPPEES DANS LE PRESENT GUIDE
- TABLEAU N° 63 : CORRESPONDANCE ENTRE LES METHODES DE REPARATION, LES NORMES NF P95-1** ET LES GUIDES DU STRRES
- TABLEAU N° 64 : ARTICLES TRAITANT DES CONTROLES D'AUTRES METHODES DEVELOPPEES DANS LE PRESENT GUIDE
- TABLEAU N° 65 : TABLEAU EXTRAIT DE LA NORME NF N 1504-10 – CAS DES METHODES DE REPARATION AVEC APPLICATION DE MORTIER OU DE BETON
- TABLEAU N° 66 : LISTE DES CONTROLES (EXTRAIT DE LA NORME NF P95-101 AVEC COMPLEMENTS)
- TABLEAU N° 67 : LISTE DES EXIGENCES ET CONTROLES (EXTRAIT DE LA NORME NF P95-102-1 ET DES NORMES NF EN 14487-1 ET 2 AVEC COMPLEMENTS)
- TABLEAU N° 68 : TABLEAU EXTRAIT DES MODIFICATIONS APPORTEES A L'EC 2 EN JUIN 2018
- TABLEAU N° 69 : DIVERSE OPERATIONS A EFFECTUER LORS D'UNE RECEPTION
- TABLEAU N° 70 : LISTE DES POINTS SENSIBLES, CRITIQUES ET D'ARRET, RELATIVE A UNE OPERATION DE REPRISE D'UN BETON DEGRADE

Annexe 1

Documents de référence



Photo 1 : quelques-unes des normes nécessaires pour la rédaction de la collection des guides du STRES

Avertissement sur la validité des normes : une norme fait appel pour son application à des documents de référence. Si ceux-ci sont :

- datés, seule l'édition citée s'applique ;
- non datés, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

Note : pour de plus amples informations sur la hiérarchie des textes et la réglementation européenne, le lecteur est invité à se reporter au **GUIDE 0** (introduction commune à tous les guides du **STRRES**).

Il est rappelé que la **Directive Produits de Construction (DPC)** a été remplacées par le **Règlement Produits de Construction (RPC)** en 2013 mais que toutes les normes harmonisées n'ont pas été révisées pour respecter le **RPC** et tous les **Agréments Techniques Européens (ATE)** n'ont pas encore été transformés en **Évaluations Techniques Européennes (ÉTE)**...

Le site du **Règlement Produits de Construction** est consultable sur le site : www.rpcnet.fr. Ce site donne de nombreuses informations dont les principales sont listées ci-dessous :

■ **La liste des organismes notifiés :**

- organismes d'évaluation technique (OET) : CEREMA et CSTB,
- organismes et laboratoires notifiés : AFNOR Certification, IFSTTAR (devenu Université G. Eiffel), CEREMA, CEBTP... ;

■ **La liste des produits bénéficiant du marquage CE ;**

■ **Des documents d'application :**

- la liste des normes harmonisées,
- les guides d'Évaluations Techniques Européennes (ÉTE),
- les guides d'Agréments Techniques Européens (ATE)
- les règlements, recommandations, directives,
- les documents interprétatifs (exigences essentielles),
- les mandats du CEN ;

■ **Des informations complémentaires :**

- une foire aux questions (FAQ),
- des définitions,
- des liens utiles,
- une bibliographie.

Voir également les sites :

- Commission Européenne : www.europe.eu,
- Comité Européen de Normalisation (CEN) : www.cen.eu,
- Organisation Européenne d'Évaluation Technique (OEET ou EOTA) : www.eota.eu.

Un outil de suivi des normes intitulé « Norm'Info » a été mis en place par l'AFNOR afin de permettre à chacun (acteur investi dans la normalisation ou non) d'être informé et de participer à la vie des normes volontaires. Accessible à travers le lien « www.norminfo.afnor.org », il permet de créer des alertes sur les sujets et structures qui jugées intéressantes, de suivre et commenter le parcours des normes volontaires tout au long du processus d'élaboration.

Sur le site de l'AFNOR¹, on peut consulter :

- L'ensemble des normes en vigueur : www.boutique.afnor.org/recherche/resultats ;
- L'ensemble des normes publiées et annulées : www.boutique.afnor.org/recherche/resultats/categorie/normes/statut-norme/toutes

Pour se procurer une norme précise, l'une des solutions suivantes est possible :

- Aller sur le site de l'AFNOR (www.afnor.org), cliquer sur la rubrique « **ACHETER UNE NORME** » puis sur « **ACCÉDER À LA BOUTIQUE** », ensuite saisir la référence ou un mot clé de cette norme (par exemple, **NF P95-100** ou **P95-100** ou **95-100** [voire **P951**** pour obtenir toute la série des normes]) dans le cadre intitulé « **Mots clé, référence ...** » sur la page qui s'ouvrira dans un nouvel onglet et, enfin cliquer sur le bouton de recherche ;
- Aller directement dans la « **BOUTIQUE ÉDITIONS** » de l'AFNOR (www.boutique.afnor.org), cliquer sur « **Entrer dans la boutique** », saisir la référence ou un mot clé de cette norme et cliquer sur le bouton de recherche.

ATTENTION, le texte complet de la norme n'est pas consultable : on trouve, au mieux, le titre, l'objet de la norme et son sommaire avec parfois cependant un extrait.

Si la norme a été supprimée, il faut cliquer sur « + de critères » et sélectionner dans les produits recherchés le terme : « **normes** » et, de plus, il faut sélectionner « **inclure les normes annulées** » dans la recherche. Si celle-ci ne peut aboutir, il faut appeler l'AFNOR par téléphone.

Si on ne connaît pas l'intitulé d'une norme, il faut :

- soit taper un « **mot-clé** » et lancer la recherche,
- soit taper un « **mot-clé** » et cliquer sur « + de critères » qui ouvre une **recherche assistée** qu'il suffit de suivre. Apparaissent dans ce processus **3 axes de recherche** : « **métiers, secteurs et thèmes** ». Il est préférable de choisir « **secteurs** » comme celui de la « **construction** » car, le plus souvent, la recherche est plus rapide. **Ensuite**, parmi les critères de recherche apparaît le **code ICS**, il s'agit du code de la famille de la norme cherchée. Par exemple : bâtiment et matériaux, techniques de construction, construction des ponts...

Indice de classement des normes : l'AFNOR attribue aux normes nationales un indice de classement dont le numéro est le même que celui de la norme (par exemple, la norme **NF P95-103** [traitement des fissures et protection du béton] a pour indice de classement : **P95-103**). Il n'en est pas de même pour les normes européennes ou internationales homologuées en normes françaises (par exemple, la norme **NF EN 1504-2** [systèmes de protection de surface pour béton] a pour indice de classement : **P18-901-2**).

^{1/} Le site de l'AFNOR a souvent été modifié aussi la procédure à suivre décrite dans certains des autres guides FABEM n'est plus à jour

SITE DE LA MARQUE NF : aller sur « www.marque-nf.com » puis, il faut :

- soit taper un **mot clé** dans l'onglet recherche ;
- soit cliquer sur **produits industriels et produits de consommation** en bas de la page :
 - s'ouvre alors un ensemble d'icônes relatives à diverse catégories comme : « équipements de chantier », « matériaux de construction »...,
 - un clic par exemple sur « matériaux de construction » ouvre, une liste des différentes **marques NF** avec les différents produits bénéficiant de la **marque NF**,
 - si on choisit : **Produits spéciaux** pour construction en béton hydraulique (**NF 030**) on peut obtenir la liste des entreprises et de leurs produits certifiés :
 1. produits de calage
 2. produits de scellement
 3. produits de réparation structurale
 4. produits de collage structural
 5. produits d'injection.

Note : le sigle **NF 030** correspond à la référence du règlement de certification des produits spéciaux pour construction en béton hydraulique.

5.1 GÉNÉRALITÉS

Il s'agit des **normes, fascicules de documentation, fascicules du CCTG, guides et autres documents connexes** relatifs à la **protection et la réparation** des structures en béton dans les domaines des **ouvrages d'art, du génie civil et du bâtiment**.

NOTA IMPORTANT : dans les différents tableaux qui suivent, les normes citées (titre et date de valeur) dans le **GUIDE FABEM 1** apparaissent dans les cases de couleur verte. Attention, cependant, une norme citée liste dans son article « références normatives » toute une série de normes. Toutes ces normes ne figurent pas forcément dans les tableaux ci-après.

Les normes qui doivent être disponibles sur le chantier sont celles qui concernent le **marché** et/ou les **travaux** et/ou les **contrôles** imposés par le **marché**.

L'état d'avancement incomplet de la **normalisation européenne sur les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton** ne permet pas encore actuellement d'y faire totalement référence. Cependant, les **normes européennes** de la série **NF EN1504-**** se sont substituées **en très grande en partie**², aux normes françaises de la série **P18-8**** en vigueur. Il en a été tenu compte et elles figurent dans les tableaux ci-après avec l'échéancier correspondant.

5.2 NORMES EUROPÉENNES DE LA SÉRIE 1504-**

- Les normes européennes de la série 1504-** qui sont transposées en normes française comprennent :
 - Une norme consacrée aux définitions :
 - **NF EN 1504-1 décembre 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 1 : Définitions ;
 - Six normes produits et systèmes :
 - **NF EN 1504-2 d'avril 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le béton (Révision en cours depuis mars 2014),
 - **NF EN 1504-3 de février 2006** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : réparation structurale et non structurale (Révision en cours depuis avril 2015),
 - **NF EN 1504-4 de mars 2005** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 4 : collage structural (Révision en cours depuis mars 2014),
 - **NF EN 1504-5 de juillet 2013** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 5 : produits et systèmes d'injection du béton,
 - **NF EN1504-6 de novembre 2006** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 6 : ancrage de barres d'acier d'armatures,

^{2/} Par exemple, la norme **NF EN 1504-6** ne traite pas des produits de calage. Les normes **XP P18-821** et **XP P18-822** qui viennent d'être révisées sont applicables.

- **NF EN1504-7 de novembre 2006** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 7 : protection contre la corrosion des armatures (Révision en cours depuis juin 2015, voir aussi la **PR NF EN1504-7** de novembre 2015) ;
- **une norme consacrée aux contrôles en usine** :
- **NF EN 1504-8 de juin 2016** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et EVCP - Partie 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation et vérification de la constance des performances (EVCP) ;
- **une norme explicitant la méthodologie à suivre lors d'une opération de protection, de réparation et/ou du renforcement d'une structure en béton** :
- **NF EN1504-9 de novembre 2008** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 9 : Principes généraux d'utilisation des produits et systèmes ;
- **une norme consacrée à la mise en œuvre sur le chantier et au contrôle qualité** :
- **NF EN1504-10 de d'octobre 2017** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux ;

Note : la mise en application des normes produits et systèmes de la série **1504-**** est un peu facilitée par la norme **NF EN1504-10** qui traite de la mise en œuvre des produits et systèmes ainsi que des contrôles d'exécution. Cependant, cette norme ne traite pas du nombre des essais, de la consistance des **épreuves d'étude** et de **convenance** lesquelles sont totalement exclues. De plus, les exigences en matière de **contrôle de réception** des produits sont réduites au minimum (il n'y a aucun prélèvement conservatoire ni d'essai d'identification)... Les développements du présent **GUIDE FABEM 1**, mais aussi ceux des autres **GUIDES FABEM** auxquels il renvoie, complètent, en tant que de besoin, les normes européennes.

- **La série des six normes 1504-**** relatives aux produits de réparation fait l'objet **du mandat de la Communauté Européenne M/128**, qui établit les conditions du **marquage CE**. Ces normes, ont le statut de normes harmonisées (voir le site www.dpcnet.org/scr qui donne la liste des normes harmonisées).
- **Ces diverses normes de la série 1504-**** renvoient en tant que de besoin à des normes d'essai EN-ISO ou EN. Ces normes d'essais remplacent en grande partie les normes d'essais de la série **P18-8****. Cependant, certaines normes françaises d'essais de la série n'ont pas d'équivalent à l'échelon européen (voir le tableau ci-après).

Note : les projets de révision des normes : **NF EN 1504-2, NF EN 1504-3, NF EN 1504-7** ont été mis à l'enquête en 2014 et 2015, mais ces nouveaux textes ne sont pas encore approuvés. Ces projets s'appuient sur le **Règlement Produits de Construction (RPC)** qui a remplacé la **Directive Produit de construction (DPC)** en 2013. Cette substitution a une incidence le contenu des normes et tout particulièrement sur l'introduction de l'**EVCP** et la modification de l'annexe **ZA** qui ne contient plus de modèle d'étiquette ni du sigle **CE**.

5.3 NORMES FRANÇAISES

Il s'agit :

- Des normes d'exécution de la série **NF P95-10*** sur la réparation et le renforcement des structures en béton et en maçonnerie listées dans le **Tableau 1** ci-après ;
- Des normes françaises homologuées ou expérimentales et des fascicules de documentation de la série **P18-8**** encore en vigueur et relatifs aux **produits spéciaux** destinés aux constructions en béton hydraulique listés dans le **Tableau 2** ci-après.

Les normes :

- **NF P95-101 de juin 2017** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés,
- **et NF P95-103 de juin 2014** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Traitement des fissures et protection du béton – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés,
- **et NF P95-104 de juillet 2020**: Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Précontrainte additionnelle – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés,

Prendent en compte les apports des normes européennes. Elles contiennent des dispositions qui n'apparaissent pas dans la norme **NF EN 1504-10** (comme la notion **d'épreuves d'étude et de convenue**, un article sur le **choix des produits...**).

- **La norme (NF P95-102-1** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés) est cours de révision ;
- **La norme (NF P95-105** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Collage d'armatures passives additionnelles en PRF– Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés) est en cours de rédaction.

5.3.1 Normes françaises de la série P95-10*relatives à l'exécution des réparations

Note : la marque « **Rév** » indique les textes en cours de révision et la marque « **Réd** » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de norme	Norme	Date de publication	Observations
Spécifications, de travaux et de contrôle	NF P95-101 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.	Juin 2017	
	« Rév » NF P95-102-1 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.	Avril 2002	Parution 2021
	NF P95-103 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Traitement des fissures et protection du béton – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.	Juin 2014	
	NF P95-104 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie Précontrainte additionnelle - Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle.	Juillet 2020	
	« Réd » NF P95-105 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Collage d'armatures passives additionnelles en PRF - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.		En cours de rédaction

Tableau 1 : normes de la série NF P95-1**

5.3.2 Normes françaises de la série P18-8** relatives aux produits de réparation pour béton

La plupart des normes et fascicules de documentation de cette série ont été supprimés, celles et ceux qui n'ont pas d'équivalence européenne restent en vigueur. Ils et elles figurent dans le tableau ci-après.

Les normes conservées sont incorporées dans le nouveau référentiel de la **Marque NF produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique (règlement NF 030)** qui prend en compte les normes européennes de la série **NF EN1504-**.**

Note : la marque « *Rév* » indique les textes en cours de révision et la marque « *Réd* » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de norme	Normes de produits et d'essais	Date de publication	Observations
Performance	NF P 18-805 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Dosage en liant actif.	Février 2015	
	NF P 18-807 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Perte au feu à + 450 degrés Celsius et teneur en cendres à + 950 degrés Celsius.	Novembre 1989	
	NF P 18-810 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Détermination de la Durée Pratique d'Utilisation (DPU)	Décembre 2009	La DPU diffère du temps ouvert (Cf. la norme NF EN 12189)
Produits de calage			
Spécifications	NP P 18-821 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de liants hydrauliques – Caractères normalisés et garantis.	Août 2013	
	NF P 18-822 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de résines synthétiques – Caractères normalisés et garantis	Décembre 2009	
Conception, calcul et exécution	FD P 18-823 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de scellement à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques – Recommandations pour le dimensionnement des scellements de barres d'armature dans le béton	Avril 2020	Obsolète
Performances	NF P18-832 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de calage à base de liants hydrauliques - Essai d'aptitude à la mise en place.	Mai 2012	
	NF P 18-833 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de résines de synthèse – Essai d'aptitude à la mise en place.	Août 2014	
	XP P 18-835 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de résines de synthèse – Essai de fluage en compression à + 23 degrés Celsius et + 70 degrés Celsius	Avril 1993	

Type de norme	Normes de produits et d'essais	Date de publication	Observations
Produits de calage			
Performances	XP P 18-837 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et/ou scellement à base de résines synthétiques – Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfate.	Avril 1993	
Produits de réparation de surface du béton			
Performances	NF P 18-855 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvettes à surface sciée	Juillet 2016	
Produits de réparation de surface du béton			
Performances	XP P 18-893 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques pour injection dans des structures en béton - Essai de fragilité au choc	Octobre 1992	
Performances	XP P 18-897 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques pour injection dans des structures en béton - Essai de tenue de l'adhérence sous circulation d'eau.	Novembre 1994	

Tableau 2 : normes de la série P18-800 encore en vigueur

Nota : les essais de performance servent également à la sélection des produits.

5.3.3 Normes françaises relatives aux travaux de bâtiment (normes-DTU et NF DTU)

Type de norme	Norme	Date de publication	Observations
Mise en œuvre du béton			
Conception, travaux et contrôles	NF DTU 21 - Travaux de bâtiment - Exécution des ouvrages en béton - Partie 1-1 : cahier des clauses techniques types - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux (CGM) - Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types - Référence commerciale des parties P1-1, P1-2 et P2 du NF DTU 21	Juin 2017	
Travaux de revêtements de sols			
Conception, travaux et contrôles	NF DTU 54.1 : Travaux de bâtiment - Revêtements de sol coulés à base de résine de synthèse - Partie 1-1 : cahier des clauses techniques - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux - Partie 2 : cahier des clauses spéciales.	Février 2018	
Travaux de peinture			
Conception, travaux et contrôles	NF DTU 42.1 : Norme d'exécution des travaux – Réfection des façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymères	Novembre 2007	
	NF DTU 59.1 : Travaux de bâtiment - Revêtements de peinture en feuil mince, semi-épais, ou épais - Partie 1-1 : cahier des clauses techniques types - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux - Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types	Juin 2013	

Type de norme	Norme	Date de publication	Observations
Travaux de peinture			
Conception, travaux et contrôles	NF X15-110 Juillet 1994 : Mesure de l'humidité de l'air - Paramètres hygrométriques.	Juillet 1994	
	NF X15-113 Décembre 1997 : Mesure de l'humidité relative de l'air - Hygromètre à variation d'impédance (capacitif et résistif).	Décembre 1997	
	NF X15-118 : Mesure de l'humidité de l'air - Psychromètres – Caractéristiques.	Décembre 1996	

Tableau 3 : normes-DTU et NF DTU

5.3.4 Textes français (fascicules de documentation, guides d'emploi et normes) relatifs aux matériaux et à leur mise en œuvre lors de travaux de réparations

5.3.4.1 Fascicules de documentation et guides d'emploi

Note : la marque « **Rév** » indique les textes en cours de révision et la marque « **Réd** » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de document	Fascicules de documentation et guides d'emploi	Date de publication	Observations
Fascicules de documentation et guides			
Conception et de contrôle	FD A09-203 de décembre 1999 : essais non destructifs Examen radiographique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux béton, béton armé et béton précontraint Exemples de radiogrammes avec leur interprétation.	Décembre 1999	
	FD A 35-029 : Armatures pour béton armé – Assemblages soudés – Qualification d'un mode opératoire de soudage – Qualification des soudeurs.	Septembre 1999	Fascicule annulé
	FD P15-010 : Lians hydrauliques - Guide d'utilisation des ciments.	Octobre 1997	
	FD P18-011 : Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons.	Mars 2016	
	FD P18-456 : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction - Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance.	Novembre 2004	
	FD P18-464 : Béton - Dispositions pour la prévention des phénomènes d'alcali-réaction. (Ce fascicule donne les critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction).	Avril 2014	Alcali-réaction
	FD P18-503 : Surfaces et parements du béton – Éléments d'identification.	Novembre 1989	
	FD P18-541 : Béton – Guide pour l'élaboration du dossier carrière dans le cadre de la prévention de l'alcali réaction.	Juin 2015	Alcali-réaction
FD P18-542 : Granulats – Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.	Novembre 2017		

Type de document	Fascicules de documentation et guides d'emploi	Date de publication	Observations
Fascicules de documentation et guides			
Conception et de contrôle	FD P18-823 : Produits de scellement à base de liants hydrauliques ou à base de résines synthétiques - Recommandations pour la conception et le dimensionnement des scellements de barres d'armature dans le béton armé	Avril 2020	Texte en révision
	GA P 18-902 : Guide d'application - Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil.	Septembre 2014	(Cf. NF EN 1504-2)

Tableau 4 : fascicules de documentation et guides d'emploi

5.3.5 Normes françaises produits et matériaux

Note : la marque « **Rév** » indique les textes en cours de révision et la marque « **Réd** » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de document	Normes	Date de publication	Observations
Normes granulats			
Spécifications et de contrôles	NF P 18-545 : Granulats – Éléments de définition, conformité et codification.	Septembre 2011	
	PR NF P 18-545 : Granulats – Éléments de définition, conformité et codification.	Septembre 2019	
Additions			
Spécifications et de contrôles	NF P18-508 : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité.	Janvier 2012	
	NF P18-509 : Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité.	Septembre 2012	
Liants hydrauliques			
Spécifications et de contrôles	NF P15-302 : Liants hydrauliques – Ciments à usage tropical – Composition, spécifications et critères de conformité.	Septembre 2006	
	NF P15-314 : Liants hydrauliques – Ciment prompt naturel.	Février 1993	
	NF P15-317 : Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer.	Septembre 2006	
	NF P15-318 : Liants hydrauliques - Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.	Septembre 2006	
	NF P15-319 : Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.	Janvier 2014	
Armatures et dispositifs pour béton armé			
Spécifications et de contrôles	NF A35-014 : Aciers pour béton armé - Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable.	Février 2018	
	NF A 35-015 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables lisses – Barres et couronnes.	Juillet 2019	
	NF A 35-020-1 : Produits en acier – Dispositifs de rabotage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 1 : prescriptions relatives aux performances mécaniques (support de la marque NF 254).	Novembre 2017	

Type de document	Normes	Date de publication	Observations
Armatures et dispositifs pour béton armé			
Spécifications et de contrôles	NF A35-020-1/A1 : Produits en acier - Dispositifs de rabotage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 1 : prescriptions.	Avril 2020	
	NF A35-020-2-1 : Produits en acier - Dispositifs de rabotage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 2-1 : méthode d'essai pour dispositif de rabotage.	Novembre 2017	
	NF A35-020-2-2 de novembre 2017 : Produits en acier - Dispositifs de rabotage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 2-2 : méthode d'essai pour les dispositifs d'ancrage et les coupleurs à souder.	Novembre 2018	
	NF A 35-024 : Aciers pour béton armé - Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm.	Juillet 2019	
	NF A 35-025 : Produits en acier – Barres et couronnes pour béton armé – Fils destinés à la fabrication d'armatures pour béton armé galvanisées à chaud.	Décembre 2017	
	NF A 35-027 : Produits en acier pour béton armé – Armatures.	Décembre 2015	
	NF A 35-028 : Aciers pour béton armé – Treillis raidisseurs.	Avril 2020	
	NF A35-080-1 : Aciers pour béton armé - Aciers soudables - Partie 1 : barres et couronnes - Aciers pour béton armé - Aciers soudables - Partie 1 : Barres et couronnes.	Mai 2020	
	NF A35-080-2 : Aciers pour béton armé - Aciers soudables - Partie 2 : treillis soudés.	Décembre 2013	
Armatures de précontrainte			
Spécifications et de contrôles	NF A35-035 : Produits en acier – Fils lisses et torons de précontrainte à 7 fils revêtus par immersion à chaud de zinc ou d'alliage de zinc	Juillet 2019	
	XP A35-037-1 : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 1 : prescriptions générales.	Mai 2003	
	XP A35-037-2 : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 2 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés coulissants (type P).	Mai 2003	
	XP A35-037-3 : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 3 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés adhérents (type SC).	Mai 2003	
	NF A35-045-1 : Aciers de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales.	Novembre 2018	
	NF A35-045-2 : Aciers de précontrainte – Partie 2 : fils.	Novembre 2018	
	NF A35-045-3 : Aciers de précontrainte – Partie 3 : torons.	Novembre 2018	
	NF A35-045-4 : Aciers de précontrainte – Partie 4 : barres.	Novembre 2018	
Produits sidérurgiques			
Spécifications et de contrôles	NF A35-503 de juin 2008 : Produits sidérurgiques - Exigences pour la galvanisation à chaud d'éléments en acier.	Juin 2008	

Type de document	Normes	Date de publication	Observations
Produits de calage			
Spécifications et de contrôles	NF P18-821 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de calage à base de liants hydrauliques - Caractères normalisés garantis	Août 2013	
	NF P18-822 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de calage à base de résines synthétiques - Caractères normalisés garantis	Décembre 2009	

Tableau 5 : normes françaises de produits et matériaux

5.3.6 Normes françaises d'essai

Note : la marque « **Rév** » indique les textes en cours de révision et la marque « **Réd** » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
Contrôles	NF A 09-202 : Essais non destructifs – Principes généraux de l'examen radiologique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux béton, béton armé.	Décembre 1999	
Granulats			
Performances	XP P18-543 : Granulats - Étude pétrographique des granulats appliqués à l'alcali-réaction.	Novembre 2017	
	XP P18-544 : Granulats - Déterminer les alcalins solubles dans l'eau de chaux.	Juin 2015	
	XP P18-594 : Granulats – Méthodes d'essai de réactivité.	Juillet 2015	
Normes bétons			
Performances	XP P18-420 : Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.	Mai 2012	
	NF P18-424 : Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau	Mai 2008	Gel sévère et forte saturation en eau
	NF P18-425 : Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau	Mai 2008	Gel faible ou modéré
	NF P18-454 : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Essai de performance.	Décembre 2004	
	NF P18-470 : Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécification, performance, production et conformité	Juillet 2016	
Mortiers			
Performances	NF P15-431 : Liants hydrauliques Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal.	Février 1994	
Produits spéciaux – Produits de calage et scellement			
Performances	NF P18-810 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits à base de résines synthétiques - Détermination de la Durée Pratique d'Utilisation (DPU).	Décembre 2009	
	NF P18-837 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits de calage et/ou scellement à base de liants hydrauliques - Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates.	Avril 1993	

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
Peintures et revêtements			
Performances	NF T 30-124 : Peintures – Détermination de l'épaisseur du feuil sec – méthode non destructive à flux magnétique.	Mars 2020	
Normes aciers pour BA			
Performances	NF A35-020-2-1 de novembre 2017 : Produits en acier - Dispositifs de rabotage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 2-1 : méthode d'essai pour dispositif de rabotage.	Novembre 2017	
	NF A35-020-2-2 de novembre 2017 : Produits en acier - Dispositifs de rabotage et dispositifs d'ancrage d'aciers pour béton armé à verrous ou à empreintes – Partie 2-2 : méthode d'essai pour les dispositifs d'ancrage et les coupleurs à souder.	Novembre 2017	

Tableau 6 : normes françaises d'essai

5.3.7 Normes françaises de travaux

Type de norme	Normes travaux	Date de publication	Observations
Exécution des structures en béton			
Conception et mise en œuvre	NF P18-451 : Béton – Exécution des structures en béton – Règles spécifiques pour les BFUP.	Décembre 2018	

Tableau 7 : normes françaises de travaux

5.4

TEXTES EUROPÉENS (FASCICULES DE DOCUMENTATION, GUIDES D'EMPLOI ET NORMES) RELATIFS AUX MATÉRIAUX ET À LEUR MISE EN ŒUVRE

5.4.1 Normes européennes produits et matériaux

Note : la marque « Rév » indique les textes en cours de révision et la marque « Réd » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de norme	Normes européennes produits et matériaux	Date de publication	Observations
Granulats			
Spécifications et de contrôles	NF EN 12620 : Granulats pour bétons.	Août 2003	
	NF EN 12620/ IN1 : Granulats pour béton.	Juin 2008	
	NF EN 12620+A1 : Granulats pour béton.	Juin 2008	
	NF EN 13055 : Granulats légers.	Mai 2016	

Type de norme	Normes européennes produits et matériaux	Date de publication	Observations
Liants hydrauliques			
Spécifications et de contrôles	NF EN 413-1 : Ciment à maçonner - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité.	Septembre 2012	(ciments utilisés pour la confection de mortiers destinés à réaliser des enduits)
	NF EN 197-1 : Ciments – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	Avril 2012	
	NF EN 197-4 : Ciments – Partie 4 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants de haut-fourneau à faible résistance à court terme.	Décembre 2004	
	NF EN 459-1 : Chaux de construction – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	Octobre 2002	
	NF EN 14216 : Ciments – Composition et critères de conformité des ciments à faible chaleur d'hydratation.	Février 2016	
Adjuvants			
Spécifications et de contrôles	NF EN 934-1 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 1 : exigences communes.	Avril 2008	
	NF EN 934-2 + A1 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Août 2012	
	NF EN 934- 3 + A1 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 3 : adjuvants pour mortiers à maçonner - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Octobre 2012	
	NF EN 934- 4 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 4 : adjuvants pour coulis pour câbles de précontrainte - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Août 2009	
	NF EN 934- 5 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Décembre 2007	
	NF EN 934- 6 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 6 : échantillonnage, contrôle et évaluation de la conformité.	Mars 2009	
Additions			
Spécifications et de contrôles	NF EN 450-1 : Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité.	Octobre 2012	
	NF EN 450-2 : Cendres volantes pour béton – Partie 2 : évaluation de la conformité.	Octobre 2005	
	NF EN 13263-1/IN1 : Fumée de silice pour béton – Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité.	Mai 2009	
	NF EN 13263-1 +A1 : Fumée de silice pour béton – Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité.	Mai 2009	
	NF EN 13263-2/IN1 +A1 : Fumée de silice pour béton – Partie 2 : évaluation de la conformité.	Mai 2009	
	NF EN 13263-2 +A1 : Fumée de silice pour béton – Partie 2 : évaluation de la conformité.	Mai 2009	

Type de norme	Normes européennes produits et matériaux	Date de publication	Observations
Eau			
Spécifications et de contrôles	NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons – spécifications d'échantillonnage, d'essai et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.	Juillet 2003	
Fibres			
Spécifications et de contrôles	NF EN 14889-1 : Fibres pour béton - Partie 1 : fibres d'acier - Définitions, spécifications et conformité.	Novembre 2006	
	NF EN 14889-2 : Fibres pour béton - Partie 2 : fibres de polymère - Définition, spécifications et conformité.	Novembre 2006	
Bétons			
Spécifications et de contrôles	NF EN 206/CN : Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206	Décembre 2014	
	NF EN 206/IN1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.	Novembre 2016	
	NF EN 206/A1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.	Novembre 2016	
	NF EN 13055-1 : Granulats légers – Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers.	Décembre 2002	
Armatures et dispositifs pour béton armé			
Spécifications et de contrôles	NF EN 10080 : Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – Généralités.	Septembre 2005	
	NF EN 10088-1 : Aciers inoxydables - Partie 1 : liste des aciers inoxydables	Décembre 2014	
	NF EN 10088-3 : Aciers inoxydables - Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage général	Décembre 2014	
	NF EN 10088-5 : Aciers inoxydables - Partie 5 : conditions techniques des livraisons pour les barres, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage de construction	Juillet 2009	
	NF EN 10204 : Produits métalliques - Types de documents de contrôle.	Janvier 2005	S'applique à la réception de tous les produits métalliques (tôles, plaques, barres, pièces forgées ou moulées...
Armatures de précontrainte, gaines et tubes			
Spécifications et de contrôles	PR NF EN 10138-1 : Armatures de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales.	Janvier 2001	
	PR NF EN 10138-2 : Armatures de précontrainte – Partie 2 : fils.	Janvier 2001	
	PR NF EN 10138-3 : Armatures de précontrainte – Partie 3 : torons.	Janvier 2001	
	PR NF EN 10138-4 : Armatures de précontrainte – Partie 4 : barres.	Janvier 2001	

Type de norme	Normes européennes produits et matériaux	Date de publication	Observations
Armatures de précontrainte, gaines et tubes			
Spécifications et de contrôles	PR NF EN 10369-1 : Armatures de précontrainte – Torons de précontrainte protégés et gainés - Partie 1 : prescriptions générales.	Juillet 2019	
	PR NF EN 10369-2 : Armatures de précontrainte – Torons de précontrainte protégés et gainés - Partie 2 : torons coulissants.	Juillet 2019	
	PR NF EN 10369-3 : Armatures de précontrainte – Torons de précontrainte protégés et gainés - Partie 3 : torons adhérents.	Juillet 2019	
Gaines et tubes pour conduits de précontrainte			
Spécifications et de contrôles	NF EN 523 : Gaines en feuillard d'acier pour câbles de précontrainte – terminologie, prescriptions, contrôle de qualité.	Janvier 2004	
	PR NF EN 10255 : Tubes en acier non-allié filetables, soudables et aptes à d'autres méthodes d'assemblage - Exigences et méthodes d'essai - Tubes en acier non allié soudables et filetables ;	Juin 2015	
	NF EN 10255/IN1 : Tubes en acier non-allié soudables et filetables – Conditions techniques de livraison.	Juillet 2007	
	NF EN 10255+A1 : Tubes en acier non-allié soudables et filetables – Conditions techniques de livraison.	Juillet 2007	
	NF EN 10210-1 : Profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins - Partie 1 : conditions techniques de livraison.	Juillet 2006	
	NF EN 10210-2 : Profils creux de construction finis à chaud en aciers - Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de section.	Mai 2019	
	NF EN 10216-1 : Tubes sans soudure en acier pour service sous pression - Conditions techniques de livraison - Partie 1 : tubes en acier non allié avec caractéristiques spécifiées à température ambiante.	Avril 2014	
	NF EN 10217-1 : Tubes soudés en acier pour service sous pression - Conditions techniques de livraison - Partie 1 : tubes en acier non allié, soudés électriquement et soudés à l'arc immergé, avec caractéristiques spécifiées à température ambiante.	Avril 2019	
	NF EN 12201-1 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau – Polyéthylène (PE) – Partie 1 : généralités.	Novembre 2011	
	NF EN 12201-2/IN1 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) - Partie 2 : tubes.	Novembre 2013	
	NF EN 12201-2+A1 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) - Partie 2 : tubes.	Novembre 2013	
	NF EN 12219-1 : Profils creux de construction soudés formés à froid en aciers non alliés et à grains fins - Partie 1 : conditions techniques de livraison.	Août 2006	
	NF EN 12219-2 : Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers - Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de section.	Mai 2019	

Type de norme	Normes européennes produits et matériaux	Date de publication	Observations
Gaines et tubes pour conduits de précontrainte			
Spécifications et de contrôles	NF EN 10305-3 : Tubes de précision en acier - Conditions techniques de livraison - Partie 3 : tubes soudés calibrés à froid.	Juin 2016	
Produits d'injection des conduits de précontrainte			
Spécifications et de contrôles	NF EN 447 : Coulis pour câbles de précontrainte – Prescriptions pour coulis courants.	Décembre 2007	
Aciers de construction			
Spécifications et de contrôles	NF EN 10025-1 : Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 1 : conditions techniques générales de livraison.	Mars 2005	
	NF EN 10025-2 : Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 2 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés.	Août 2019	
	NF EN 10025-3 : Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à l'état normalisé/laminage normalisant.	Août 2019	
Matériaux de chapes			
Spécifications et de contrôles	NF EN 13813 : Matériaux de chape et chapes - Matériaux de chapes - Propriétés et exigences.	Juin 2013	Différents essais d'usure
Échafaudages			
Spécifications et de contrôles	NF EN 12811-1 : Équipements temporaires de chantiers - Partie 1 : échafaudages - Exigences de performance et étude.	Août 2004	

Tableau 8 : normes européennes produits et matériaux

5.4.2 Normes européennes d'essais

Note : la marque « **Rév** » indique les textes en cours de révision et la marque « **Réd** » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de norme	Normes européennes d'essais	Date de publication	Observations
Produits de collage			
Performances	NF EN 1799 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Essais de détermination de l'aptitude à l'emploi des colles structurales à appliquer sur les surfaces en béton.	Février 1999	
	NF EN 12189 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination du temps ouvert (produits de collage).	Août 1999	
Granulats			
Performances	NF EN 1367-1 : Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altération des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel.	Août 2007	

Type de norme	Normes européennes d'essais	Date de publication	Observations
Bétons			
Performances	NF EN 12390-1 : Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules.	Novembre 2012	
	NF EN 12390-2 : Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.	Juin 2019	
	NF EN 12390-3 : Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.	Juin 2019	
	NF EN 12390-6 : Essais pour béton durci – Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes.	Avril 2012	
	NF EN 12390-7 : Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci.	Juin 2019	
	NF EN 12390-8 : Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression.	Juin 2019	
	NF EN 12390-13 : Essai pour béton durci - Partie 13 : détermination du module sécant d'élasticité en compression.	Février 2014	
	NF EN 12504-1 : Essais pour béton dans les structures - Partie 1 : Carottes - Prélèvement, examen et essais en compression.	Juin 2019	
	NF EN 12504-2 : Essais pour béton dans les structures Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement.	Mars 2013	Utilisation du scléromètre
	NF EN 12504-3 : Essais pour béton dans les structures - Partie 3 : détermination de la force d'arrachement.	Juin 2005	
	NF EN 12504-4 : Essais pour béton dans les structures Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son.	Mai 2005	
	NF EN 13791 : Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton.	Août 2019	La norme NF EN 13791/CN est en cours de mise à jour
	NF EN 14629 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage du taux de chlorure d'un béton durci.	Juillet 2007	
NF EN 14630 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphthaléine.	Février 2007		
Béton projeté			
Performances	NF EN 12350-1 : Essais pour béton frais – Partie 1 : prélèvement et appareillage commun.	Juin 2019	Voie mouillée
	NF EN 12350-2 : Essais pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement.	Juin 2019	Voie mouillée
	NF EN 12350-3 : Essais pour béton frais – Partie 3 : essai VEBE.	Juin 2019	
	NF EN 12350-4 : Essais pour béton frais – Partie 4 : indice de serrage.	Juin 2019	
	NF EN 12350-5 : Essais pour béton frais – Partie 5 : Essais pour béton frais - Partie 5 : essai d'étalement à la table à choc.	Juin 2019	

Type de norme	Normes européennes d'essais	Date de publication	Observations
Béton projeté			
Performances	NF EN 12350-7 : Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité.	Juin 2019	
	NF EN 14488-2 : Essais pour béton projeté Partie 2 : résistance à la compression au jeune âge du béton projeté.	Octobre 2006	
	NF EN 14488-3 : Essais pour béton projeté - Partie 3 : résistances à la flexion (au premier pic, ultime et résiduelle) d'éprouvettes parallélépipédiques en béton renforcé par des fibres.	Juillet 2006	
	NF EN 14488-4/IN1 : Essais pour béton projeté - Partie 4 : adhérence en traction directe sur carottes.	Mai 2008	
	NF EN 14488-4/ + A1 : Essais pour béton projeté - Partie 4 : adhérence en traction directe sur carottes.	Mai 2008	
	NF EN 14488-5 : Essais pour béton projeté - Partie 5 : détermination de la capacité d'absorption de l'énergie d'une dalle-éprouvette renforcée par des fibres.	Juillet 2006	
Critères d'adhérence			
Performances	NF EN 13036-4 : Caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthode d'essai - Partie 4 : méthode d'essai pour mesurer l'adhérence d'une surface : l'essai au pendule	Mars 2012	
Ciments			
Performances	NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances.	Septembre 2016	
Mortiers			
Performances	NF EN 1015-3 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses).	Octobre 1999	
	NF EN 1015-3 + A1 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses).	Mai 2004	
	NF EN 1015-3 + A2 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses).	Mai 2007	
	NF EN 1015-4 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 4 : détermination de la consistance des mortiers frais (par pénétration du piston).	Octobre 1999	
	NF EN 1015-6 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais.	Octobre 1999	
	NF EN 1015-17 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 17 : détermination de la teneur en chlorure soluble des mortiers frais.	Février 2001	
	NF EN 13409 : Méthodes d'essai pour les mortiers de lissage et/ou d'égalisation à prise hydraulique - Détermination du temps de prise.	Janvier 2003	
Produits de réparation			
Performances	NF EN 1542 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de l'adhérence par traction directe.	Juillet 1999	
	NF EN 1543 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais.	Juin 1998	

Type de norme	Normes européennes d'essais	Date de publication	Observations
	Produits de réparation		
Performances	NF EN 1544 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesure du fluage sous charge de traction maintenue des produits à base de résines synthétiques (PC) pour le scellement d'ancrage des barres d'armature - Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton.	Mars 2007	
	NF EN 1766 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Bétons de référence pour essais.	Avril 2017	
	NF EN 1767 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Analyse par spectrométrie infrarouge.	Août 1999	
	NF EN 1770 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais.	Juin 1998	
	NF EN 1771 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de l'injectabilité et essai de fendage.	Janvier 2005	
	« Rév » NF EN 1881 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Essai des produits de scellement d'ancrage par la méthode de l'arrachement.	Juillet 2007	
	NF EN 12188 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'adhérence acier sur acier pour la caractérisation des produits de collage structural.	Septembre 1999	
	NF EN 12189 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination du temps ouvert (produits de collage).	Août 1999	
	NF EN 12190 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance à la compression pour les mortiers de réparation.	Décembre 1998	
	NF EN 12192-1 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Analyse granulométrique - Partie 1 : méthode d'essai applicable aux composants secs des mortiers prêts à l'emploi.	Août 2002	
	NF EN 12614 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Détermination de la température de transition vitreuse des polymères.	Avril 2005	
	NF EN 12615 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Méthodes d'essais - Détermination de la résistance au cisaillement.	Septembre 1999	
	NF EN 12617-4 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Partie 4 : détermination du retrait et du gonflement.	Novembre 2002	
	NF EN 12618-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Partie 1 : capacité d'adhérence et d'allongement des produits d'injection à ductilité limitée.	Janvier 2004	

Type de norme	Normes européennes d'essais	Date de publication	Observations
	Produits de réparation		
Performances	NF EN 12618-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Partie 2 : détermination de l'adhérence des produits d'injection, après cycles thermiques ou non - Adhérence par résistance en traction.	Février 2005	
	NF EN 12636 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Détermination de l'adhérence béton sur béton.	Septembre 1999	
	NF EN 12637-3 : Produits et systèmes de protection et de réparation de structures en béton - Méthodes d'essai - Compatibilité des produits d'injection - Partie 3 : effet des produits d'injection sur les élastomères.	Mars 2004	
	NF EN 13057 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de l'absorption capillaire.	Décembre 2002	
	NF EN 13062 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la thixotropie des produits de protection des armatures.	Octobre 2003	
	NF EN 13294 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Temps de raidissement.	Décembre 2002	
	NF EN 13295 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de la pénétration d'ions chlorure.	Septembre 2004	
	NF EN 13395-1 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de l'ouvrabilité - Partie 1 : essai d'écoulement des mortiers thixotropes.	Décembre 2002	
	NF EN 13395-2 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de l'ouvrabilité - Partie 2 : essai d'écoulement des coulis ou mortiers.	Décembre 2002	
	NF EN 13395-3 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de l'ouvrabilité - Partie 3 : essai d'écoulement du béton de réparation.	Décembre 2002	
	NF EN 13395-4 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la maniabilité - Partie 4 : application de mortier de réparation en sous-face.	Décembre 2002	
	NF EN 13396 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Mesurage de la pénétration d'ions chlorure.	Septembre 2004	
	NF EN 13412 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination du module d'élasticité en compression.	Décembre 2006	
	NF EN 13529 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Résistance aux fortes attaques chimiques.	Janvier 2004	
NF EN 13584 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination du fluage en compression des produits de réparation.	Mars 2004		

Type de norme	Normes européennes d'essais	Date de publication	Observations
Produits de réparation			
Performances	NF EN 13687-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique Partie 1 : cycles de gel-dégel avec immersion dans des sels de déverglaçage.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique Partie 1 : cycles d'averses d'orage.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique Partie 3 : cycles de gel-dégel sans immersion dans des sels de déverglaçage.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-4 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique Partie 1 : cycles thermiques à sec.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-5 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique Partie 5 : résistance au choc de température.	Décembre 2002	
	NF EN 13894-1 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton Méthodes d'essai - Détermination de la fatigue sous charge dynamique Partie 1 : pendant le durcissement.	Février 2004	
	NF EN 13894-2 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai Détermination de la fatigue sous charge dynamique Partie 2 : après durcissement.	Avril 2003	
NF EN 14117 : Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination du temps d'écoulement de produits d'injection à base de ciment.	Janvier 2005		
Revêtements et peintures			
Performances	NF EN 1062-3 : Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de revêtements pour maçonnerie et béton extérieurs - Partie 3 : détermination de la perméabilité à l'eau liquide.	Mai 2008	
	NF EN 1062-6 : Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de revêtements pour maçonnerie et béton extérieurs - Partie 6 : détermination de la perméabilité au dioxyde de carbone.	Octobre 2002	

Tableau 9 : normes européennes d'essai

5.4.3 Normes européennes de conception

Note : la marque « Rév » indique les textes en cours de révision et la marque « Réd » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de document	Fascicules de documentation et guides	Date de publication	Observations
Eurocodes			
Conception et calculs	NF EN 1990 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des constructions ou Eurocode 0.	Mars 2003	
	NF EN 1990/A1 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des constructions	Juillet 2006	
	NF EN 1990/A1/NA : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des constructions (annexe nationale)	Décembre 2007	
	NF EN 1990/NA : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des constructions (annexe nationale)	Décembre 2011	
	NF EN 1992-1-1 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.	Octobre 2005	
	NF EN 1992-1-1/A1 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.	Février 2015	
	NF EN 1992-2 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 2 : ponts en béton - Calcul et dispositions constructives.	Mai 2006	Se reporter à la norme : NF EN 1992-2/NA
	NF P18-710 : Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)	Avril 2016	Concerne le BFUP

Tableau 10 : normes européennes de conception

5.4.4 Normes européennes de travaux

Note : la marque « Rév » indique les textes en cours de révision et la marque « Réd » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de document	Fascicules de documentation et guides	Date de publication	Observations
Exécution des structures en béton			
Conception et mise en œuvre	NF EN 13670 : Exécution des structures en béton.	2013	
	NF EN 13670/CN : Exécution des structures en béton (annexe nationale).	Février 2013	Voir NF P18451 (mise en œuvre BFUP)
Béton projeté			
Conception et mise en œuvre	NF EN 14487-1 : Béton projeté – Partie 1 : définition, spécification et conformité.	Mars 2006	
	NF EN 14487-2 : Béton projeté – Partie 2 : exécution.	Août 2007	
Procédés électrochimiques			
Conception et mise en œuvre	NF EN 14038-1 : Réalcalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures – Partie 1 : réalcalinisation.	Mai 2016	
	NF EN 14038-2 : Réalcalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures – Partie 2 : extraction des chlorures.	Octobre 2020	
	Protection cathodique de l'acier dans le béton.		Voir norme ISO : NF EN ISO 12696

Tableau 11 normes européennes de travaux

5.5 DOCUMENTS D'ÉVALUATION EUROPÉENS (DÉE OU EAD)

Ces documents (**DÉE** ou **EAD**) ont remplacé les guides d'agrément techniques (**GATE** ou **ETAG**) liés à la Directive Produits de Construction (**DPC**). Ils permettent à un produit ou un procédé d'obtenir une Évaluation Technique Européenne (**ÉTE** ou **ATE**) et ensuite le **marquage CE**.

Type de document	Fascicules de documentation et guides	Date de publication	Observations
Produits de scellement			
De spécifications, de conception et de contrôle	DÉE : 330087-00-0601 : système pour le scellement de barres avec un mortier.	Mai 2018	
	DÉE : 31522-00-0601 : barres scellées avec un mortier soumises à des sous des actions sismiques.	Juillet 2018	En révision
Procédés de précontrainte			
De spécifications, de conception et de contrôle	DÉE n°160004-00-0301 traite des procédés de précontrainte.	Septembre 2016	Voir OJEU 2017/C 435/07
	DÉE n°160027-00-0301 traite des produits d'injection	Septembre 2016	

Tableau 12 : documents d'évaluation européens

5.6 NORMES INTERNATIONALES TRANSPOSÉES EN NORMES EUROPÉENNES ET FRANÇAISES

Note : la marque « **Rév** » indique les textes en cours de révision et la marque « **Réd** » indique les nouveaux textes en cours de rédaction.

Type de norme	Norme NF EN ISO	Date de valeur	Observations
Management			
Gestion	NF ISO 55000 : Gestion d'actifs - Aperçu général, principes et terminologie.	Juillet 2014	
	NF ISO 55001 : Gestion d'actifs – Systèmes de management – Exigences.	Juillet 2014	
	NF ISO 55002 : Gestion d'actifs – Lignes directrices pour l'application de l'ISO 55001.	Juillet 2019	
Calcul et recalcul des ouvrages			
Conception et calculs	ISO 13822 : Bases du calcul des constructions – Évaluation des constructions existantes.	Août 2010	
Procédés électrochimiques			
Conception et mise en œuvre	NF EN ISO 1527 : Protection cathodique - Niveaux de compétence des personnes en protection cathodique - Base pour un dispositif particulier de certification.	Juillet 2017	
	NF EN ISO 12496 : Anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines.	Août 2013	
	NF EN ISO 12696 : Protection cathodique de l'acier dans le béton.	Février 2017	

Type de norme	Norme NF EN ISO	Date de valeur	Observations
Abrasion			
Performances	NF EN ISO 5470-1 : Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique - Détermination de la résistance à l'usure - Partie 1 : appareil d'essai d'abrasion Taber.	Septembre 2017	
	NF EN ISO 5470-2 : Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique - Détermination de la résistance à l'usure - Partie 2 : appareil d'essai d'abrasion Martindale.	Mai 2004	
Préparation de surfaces métalliques			
Performances	NF EN ISO 8501-1 : Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés - Évaluation visuelle de la propreté d'un subjectile - Partie 1 : degrés de rouille et degrés de préparation des subjectiles d'acier non recouverts et des subjectiles d'acier après décapage sur toute la surface des revêtements précédents.	Septembre 2007	
	NF EN ISO 12944-4 : Peintures et vernis - Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture - Partie 4 : types de surface et de préparation de surface.	Décembre 2017	
Soudures			
Qualification	NF EN ISO 9606-1 : Épreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion – Partie 1 : aciers.	Août 2017	
	NF EN ISO 17660-1 : Soudage - Soudage des aciers d'armatures - Partie 1 : assemblages transmettant des efforts.	Décembre 2008	
	NF EN ISO 17660-2 : Soudage - Soudage des aciers d'armatures - Partie 1 : assemblages non transmettants.	Décembre 2008	
Polymères et plastiques			
Performances	NF EN ISO 527-1 : Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 1 : principes généraux.	Septembre 2019	
	NF EN ISO 868 : Plastiques et ébonite – Détermination de la dureté par pénétration au moyen d'un duromètre (dureté Shore).	Juillet 2003	
	NF EN ISO 3219 : Plastiques Polymères/résines à l'état liquide, en émulsion ou en dispersion - Détermination de la viscosité au moyen d'un viscosimètre rotatif à gradient de vitesse de cisaillement défini.	Novembre 1994	
	NF EN ISO 9514 : Peintures et vernis - Détermination du délai maximal d'utilisation après mélange des systèmes de revêtement multicomposants - Préparation et conditionnement des échantillons et lignes directrices pour les essais.	Juin 2019	
	NF EN ISO 11357-3 : Plastiques - Analyse calorimétrique différentielle (DSC) - Partie 3 : détermination de la température et de l'enthalpie de fusion et de cristallisation - Plastiques - Analyse calorimétrique différentielle (DSC) - Partie 3 : Détermination de la température et de l'enthalpie de fusion et de cristallisation.	Mai 2018	
Peintures et revêtements			
Performances	NF EN ISO 2808 : Peintures et vernis – Détermination de l'épaisseur du feuil.	Septembre 2019	
	NF EN ISO 2811-1 : Peintures et vernis - Détermination de la masse volumique - Partie 1 : méthode pycnométrique.	Mai 2016	

Type de norme	Norme NF EN ISO	Date de valeur	Observations
Peintures et revêtements			
Performances	NF EN ISO 2811-2 : Peintures et vernis - Détermination de la masse volumique - Partie 2 : méthode par immersion d'un corps (plongeur).	Avril 2011	
	NF EN ISO 2811-4 : Peintures et vernis - Détermination de la masse volumique - Partie 3 : méthode par oscillation	Avril 2011	
	NF EN ISO 2811-3 : Peintures et vernis - Détermination de la masse volumique - Partie 4 : méthode du cylindre sous pression.	Avril 2011	
	NF EN ISO 2812-1 : Peintures et vernis - Détermination de la résistance aux liquides - Partie 1 : immersion dans des liquides autres que l'eau - Peintures et vernis - Détermination de la résistance aux liquides - Partie 1 : Immersion dans des liquides autres que l'eau	Décembre 2017	
	NF EN ISO 3868 : Revêtements métalliques et autres revêtements non organiques - Mesurage de l'épaisseur - Méthode basée sur le principe de Fizeau d'interférométrie à faisceaux multiples.	Avril 1995	
	NF EN ISO 7783 : Peintures et vernis - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle.	Novembre 2018	
	ISO 14656 : Poudre époxy et matériau de réparation pour le revêtement des armatures en acier pour béton.	Décembre 1999	
	NF EN ISO 19399 : Peintures et vernis - Détermination de l'épaisseur par la méthode d'entaille en coin (Méthode de rayer et de forage).	Décembre 2017	
Humidité de l'air			
Mesures	NF EN ISO 4677-1 : Atmosphères de conditionnement et d'essai — Détermination de l'humidité relative — Partie 1 : Méthode utilisant un psychromètre à aspiration.	Octobre 1985	Norme annulée (se reporter aux normes NF X15-110-1, 13 et 18)
	NF EN ISO 4677-1 : Atmosphères de conditionnement et d'essai — Détermination de l'humidité relative — Partie 2 : Méthode utilisant un psychromètre fronde.	Octobre 1985	Norme annulée
État de surface			
Performances	NF EN ISO 3274 : Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : méthode du profil - Caractéristiques nominales des appareils à contact (palpeur).	Mars 1998	
	NF EN ISO 4288 : Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : méthode du profil - Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface.	Mars 1998	

Tableau 13 : normes ISO transposées

5.7 NORMES D'AUTRES PAYS

Type de norme	Normes	Date de publication	Observations
Mesures	ASTM C 876-09 : mesure du potentiel d'électrode	2009	Voir RILEM IC 154-ECM et fiches B2-4

Tableau 14 : normes d'autres pays

5.8 DIFFÉRENTES MARQUES NF

1. Marque NF030 : produits spéciaux destinées aux constructions en béton hydraulique :

Cette marque recouvre exactement l'ensemble des produits relevant des normes de la série **P 18-8**** et des normes de la série **1504-**** concernant les produits de réparation du béton. Elle garantit :

- la conformité du produit certifié aux exigences de la norme de spécifications (les caractères normalisés garantis) à laquelle elle se réfère ;
- l'existence, dans la chaîne de production et de distribution, d'une organisation de la qualité reconnue.

Pour de plus amples détails, il faut se référer **au règlement de la marque référencé NF 030**.

Rappels :

- *les caractères normalisés peuvent comporter plusieurs niveaux ou classes de performance... Les valeurs correspondantes figurent obligatoirement dans la notice technique du produit et peuvent figurer sur l'étiquette de marquage ;*
- **la marque NF peut se superposer à un marquage CE si le produit satisfait à des exigences supplémentaires ou à une organisation de la qualité plus élevée que celle fixée par la norme européenne.**

Remarque : à ce jour, la **marque-NF 030** ne traite pas des **produits et systèmes pour la protection des bétons**.

2. Marque NF /AFCAB :

Il existe une marque relative aux **aciers de béton armé (NF 139)**, aux armatures (**NF 254**) et une sur les **dispositifs de rabouillage**.

3. Marques NF relatives aux bétons et constituants :

Il existe plusieurs marques NF : liants hydrauliques (**NF 002**), granulats (**NF 041**) et adjuvants (**NF 085**).

4. Marque NF 114 : tubes en polyéthylène pour réseaux de distribution de gaz combustibles, réseaux de distribution d'eau potable, irrigation et applications industrie, eau non potable, assainissement sous pression et confinement de transport d'électricité.

5.9 FASCICULES DU CCTG

Fascicule	Date de valeur	Observations
Fascicule 65 : Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension.	2018	Références normatives non à jour.
Fascicule 56 du CCTG : protection des ouvrages métalliques contre la corrosion.	2004	
Fascicule 67 titre 1 : étanchéité des ponts-routes	1985	
Fascicule 67 titre III : étanchéité des ouvrages souterrains	1992	

Tableau 15 : fascicules du CCTG

5.10 GUIDES, RÈGLES PROFESSIONNELLES ET DOCUMENTS TECHNIQUES

Document	Date de valeur	Observations
AFGC		
AFGC : Guide de l'AFGC : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion.	Novembre 2003	
AFGC : provisoires de l'AFGC : bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).	Janvier 2002, mars 2003 puis révision juin 2013	
AFGC : Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique – Recommandations provisoires - Guide AFGC de décembre 2003 – Texte basé sur les règles BAEL.	Décembre 2003	
AFGC : Guide de l'AFGC – Documents scientifiques et techniques : Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages.	Juillet 2004	
AFGC : Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique – Recommandations provisoires - Guide AFGC de juin 2007. Texte de 2003 actualisé.	Juin 2007	
AFGC : Documents scientifiques et techniques de l'AFGC - Recommandations sur l'emploi du béton autoplaçant (BAP).	Janvier 2008	
AFGC : Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique – Recommandations provisoires - Guide AFGC de février 2011. Texte basé sur l'Eurocode 2.	Février 2011	
AFGC : Guide sur la pérennité du béton précontraint.	2014	
AFGC : Renforcements parasismiques de structures en béton armé par matériaux composites de juin 2015. Texte basé sur l'Eurocode 8 et la réglementation nationale (nouvelles zones sismiques).	Juin 2015	

Document	Date de valeur	Observations
Divers documents		
ACQPA : Règlement de la marque ACQPA (revêtements de protection).	Version 14	
AFTES : recommandations concernant les arrêts d'eau.	2016	
Annales de l'ITBTP : Recommandations professionnelles pour l'exécution des reprises de bétonnage (document CEBTP/FFB/ Sétra de 2000).	Février 2001	
ASQUAPRO : Guides ASQUAPRO relatifs au béton projeté.		Voir le site de l'ASQUAPRO
Cimbéton : Collection technique Cimbéton : n° T 81 béton armé d'inox – Le choix de la durée.	Avril 2004	
Cimbéton : Collection technique Cimbéton : n° T 48 bétons et ouvrages d'art - Durabilité du béton.	Novembre 2004	
CISMA : Recommandations pour la réalisation d'essais sur chevilles sur site ou chantier.	2013	
Concrete Society : TR 055 : Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials (2nd edition).	Décembre 2016 et février 2018	
TR 053 de l'EOTA: Recommendations for job-site tests of metal injection anchors for use in masonry.	Avril 2016	
LCPC et IFSTTAR		
LCPC : Note d'information technique du LCPC : Mise en peinture des bétons du génie civil.	Avril 1978	
LCPC : Guide technique LCPC : Défauts d'aspect des parements en béton.	1991	(Cf. également le FD P 18-503)
LCPC-SETRA : Guide technique LCPC-SETRA : Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton.	Août 1996	
LCPC : Guide technique LCPC : Mise en peinture des bétons de génie civil.	Juin 1999	
LCPC : Manuel du LCPC : Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art.	Février 1999	
LCPC : Guide méthodologique du LCPC relatif à la surveillance et à l'auscultation des Viaducs à Travées Indépendantes à Poutres Précontraintes (VIPPP)	Avril 2000 et octobre 2001	
LCPC : Guide technique LCPC : Protection des bétons par application de produits à la surface du parement.	Décembre 2002	
LCPC : Recommandations des LPC pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel	2003	Nouvelles recommandations prévues en 2021
LCPC : Guide méthodologique LCPC : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne	Novembre 2003	
LCPC : Guide technique du LCPC pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (formation différée d'ettringite)	2007	Obsolète voir le texte de 2017
LCPC : Recommandations provisoires du LCPC pour la protection et la réparation des ouvrages atteints de réaction de gonflement interne du béton.	Octobre 2010	
LCPC : Guide d'application : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil.	Septembre 2014	

Document	Date de valeur	Observations
LCPC et IFSTTAR		
LCPC : Guide technique du LCPC pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (formation différée d'ettringite)	2017	
IFSTTAR : Cahiers de l'IFSTTAR : Méthodes d'auscultation et méthodologies de diagnostic.		Disponibles sur le site de l'IFSTTAR (université G. Eiffel) sous le vocable : cahier interactif
SETRA et CEREMA		
SETRA : Guide SETRA, SNCF, TP de France et SNBATI : Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la Qualité – Exécution des ouvrages en béton armé et en béton précontraint	Décembre 1991	Nécessite quelques adaptations (suppression des niveaux de PAQ...)
SETRA : Guide du SETRA : Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art.	Novembre 1997	
SETRA : Guide technique Sétra « Épreuves de chargement des ponts routes et passerelles piétonnes	Mars 2004	
SETRA : Guide SETRA, SNCF, FNTP et MFQ : Guide pour une démarche d'assurance qualité – études de conception de d'exécution d'ouvrages de génie civil	Novembre 2007	
CEREMA : Guide CEREMA : Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art.	Février 2016	
STRRES		
STRRES : Guide de rédaction d'un PAQ - Plan d'Assurance Qualité – STRRES	Septembre 2000	
STRRES : Guides du STRRES : FABEM 1, 2, 3, 5, 6, 7 et 8 + FAFO 1	Dates de parution sur le site	Téléchargement sur le site : www.strres.org

Tableau 16 : documents techniques

5.11 DOCUMENTS DIVERS

Document	Observations
Directive Produits de Construction 89/106/CEE du 21 décembre 1988	Abrogation le 01 juillet 2013
Règlement Produits de Construction (UE) n°305/2011 du 9 mars 2011	Mise en application le 01 juillet 2013
Assurance Construction : Loi 78-12 du 4 janvier 1978 modifiée (articles 1792, 1792-1, 1792-2, 1792-3, 1792-4, 1792-5, 1792-6 et 2270 du Code Civil).	JO du 5 janvier 1978 et mises à jour (voir Légifrance)
Tenue au feu : arrêtés du 21 novembre 2002 et du 22 mars 2004 publiés aux journaux officiels du 31 décembre 2002 et du 1 ^{er} avril 2004. L'arrêté de 2004 a été modifié par l'arrêté du 14 mars 2011...	

Tableau 17 : documents divers

Annexe 2

Historique du béton armé

Il y a lieu, en premier, de rappeler la « **barque en ciment armé** » de Lambot Joseph Louis de 1848 exposée à l'exposition universelle de 1855, la première passerelle en ciment armé de Monier Joseph réalisée au château de Chazelet dans l'Indre en 1875 et la construction des premiers ponts en béton armé à la fin du 19e siècle, tels les ponts de Châtellerault, œuvre de Hennebique, et de la rue Valette à Perpignan, œuvre de Simon Boussiron.

Cette invention française a été rendue possible grâce aux travaux de Louis Vicat qui inventa le ciment artificiel en 1817.



Photo n° 1 : barque de Lambot (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 2 : passerelle de Chazelet de Monier 1875 (crédit photo Doct. Sid French)



Photo n° 3 : pont de la rue Valette à Perpignan (1899) (Extrait de Ponts de France éditions ENPC)

Progressivement, des progrès ont été réalisés dans la **composition du béton frais** (Fréret 1906, Faury 1936), dans sa **fabrication** (bétonnières à partir 1920), dans sa **mise en œuvre** (début de la vibration 1920), ainsi que dans la conception et les dispositions constructives des ouvrages.

Cependant, il faut remarquer que l'évolution de la réglementation a été plus lente. Pour s'en convaincre, il suffit :

- de comparer entre elles les règles calcul de 1906 et de 1934 et ensuite à celles de 1964¹. Seules, ces dernières marquent la première grande évolution avec, par exemple, la prise en compte du **comportement à rupture du béton armé**, tout en conservant des **formules de calcul aux contraintes admissibles**,
- de savoir que **le cahier des charges de 1913 (ancêtre du CCTG)** relatif aux caractéristiques, que doivent présenter les matériaux, n'a été modifié qu'en 1958 !

1.1

ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON, DES ACIERS DE BÉTON ARMÉ ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Périodes	Valeur de la résistance	Type d'essai	Notations	Résistances de référence en fonction du dosage en ciment exprimé en kg/m ³ (pour le projet)		
				300	350	400
1906	Minimale	Cubes 20x20	R ₉₀ ou N ₉₀ R ₂₈	160 kg/cm ² 107 kg/cm ²	180 kg/cm ² 120 kg/cm ²	200 kg/cm ² 133 kg/cm ²
1920	Minimale	Cubes 20x20	R ₉₀ ou N ₉₀	160 kg/cm ²	180 kg/cm ²	200 kg/cm ²
1934	Minimale	Cubes 20x20	R ₉₀	215 kg/cm ²	235 kg/cm ²	250 kg/cm ²
1945	Moyenne sur 6 éprouvettes	Prismes à base carrée b x b et de 4b de longueur ou cubes de 10 à 20 cm en fonction grosseur du granulat	n ₉₀	230 kg/cm ²	255 kg/cm ²	285 kg/cm ²
1960	Nominale	Cylindres 16x32, plus de 12 essais	σ' ₂₈	230 bars	270 bars	300 bars
1980	Caractéristique	Cylindres 16x32, le nombre d'échantillons est variable	f _{ck}	25 MPa	30 MPa	35 MPa

Tableau n° 1 : évolution de la méthodologie de mesure des caractéristiques du béton

¹ Principes repris des règles dites BA 60.

1.2 DES ORIGINES AUX ANNÉES 50 À 60

1.2.1 Le béton

Il y a lieu de noter dans ce tableau, que la **methodologie de mesure de la résistance des bétons** n'a pas évoluée pendant cette période. Dès débuts du béton armé aux années 1960, la résistance a été mesurée sur des **épreuves cubiques** (20 cm x 20 cm) et à **90 jours** d'âge (les ciments durcissaient relativement lentement). Pour le béton précontraint, la situation a perduré jusqu'en 1965. La résistance des épreuves prélevées sur le chantier devait atteindre la valeur fixée par les exigences du marché ce qui posait des problèmes lorsque certains résultats étaient en dessous de la valeur exigée.

1.2.2 Les aciers de béton armé

De même, jusqu'aux années 50, seuls les **ronds lisses de limite élastique de l'ordre de 24 kgf/mm²** ont été utilisés.

À noter cependant qu'à peu près tous les **diamètres, de 2 à 50 mm** ($\Phi = 2, 3, 11, 13, 17\dots$) ont été employés jusqu'en 1940, qui marque le début de la normalisation des aciers de béton armé.

Cependant, quelques particularités sont à signaler :

- les dispositions constructives des pièces en béton armé étaient propres aux différents constructeurs, Monier, Boussiron, Hennebique... Par exemple, Hennebique utilisait des **étriers en fer plat** dans ses constructions (25 mm x 3 mm...),
- pendant et après la seconde guerre mondiale, ont été utilisés des **aciers de récupération** de formes diverses et même des rails (la méfiance s'impose lors de l'expertise des ouvrages de cette époque).

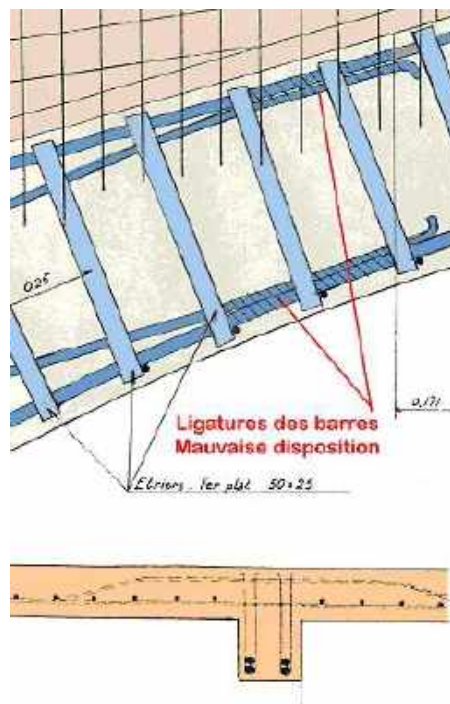


Figure n° 1 : ferrailage Hennebique d'après les plans d'une passerelle à Auxerre des années 1910

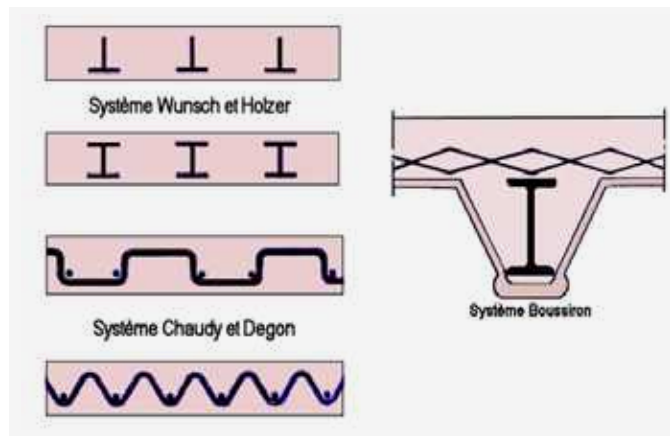


Figure n° 2 : exemples des dispositions de ferrailage anciennes

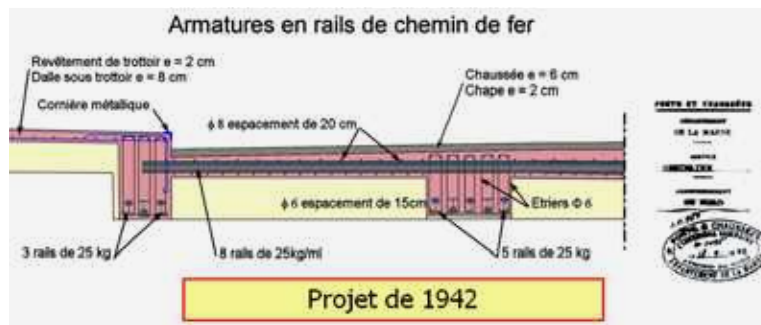


Figure n° 3 : exemple d'utilisation de rails pour le ferrailage d'un pont

1.3 DEPUIS LES ANNÉES 50 À 60

Les règles de calcul du BA de 1964, le titre VI du fascicule 61 du Cahier des Prescriptions Communes (CPC), ont introduit la mesure de la résistance du béton sur **cylindre à 28 jours** et ont remplacé le **kgf/cm²** par le **bar** (1 daN/cm²). Elles ont introduit également une interprétation statistique des résultats des mesures et la notion de résistance nominale (20% des éprouvettes pouvaient ne pas atteindre la valeur exigée).

Ensuite, les règles du Béton Armé aux États Limites (BAEL 80/83) qui ont remplacé la résistance nominale par la **résistance caractéristique**. Le mégapascal (MPa) a remplacé le bar (1 MPa = 1 N/mm² = 10 bars).

Les **notions d'états limites** sont nettement plus anciennes. En effet, elles apparaissent officiellement en 1971 avec les **Directives Communes au Calcul des Constructions (DC 71)** et en 1973 avec l'**Instruction Provisoire n°2 relative au calcul du béton précontraint (IP2)**.

1.3.1 Le béton

De nos jours, dans un recalcul, il faut pouvoir estimer la **résistance du béton** à partir des informations trouvées du **dossier de l'ouvrage** comme les **résultats des mesures sur éprouvettes** opérées lors des contrôles sur le chantier, voire de mesures d'écrasement de carottes prélevées in-situ.

1.3.1.1 Cas de l'utilisation des résultats des mesures effectuées pendant la construction de l'ouvrage

Les formules développées ci-après permettent de passer de la résistance moyenne à la résistance nominale et à la résistance caractéristique.

- Résistance moyenne :

$$f_{cm} = \frac{\sum f_{ci}}{n} \text{ avec } f_{ci} \text{ "le résultat d'une essai" } n \text{ "le nombre des essais."}$$

- Résistance nominale si le nombre des essais est grand (>30) :

$$f_{cn} = f_{cm} - 0,8s_n \text{ avec } s_n \text{ "l'écart quadratique moyen } s_n = \sqrt{\frac{\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}{n}}$$

- Résistance caractéristique : (se reporter à la circulaire 73.153 du 13 août 1973 dite IP2)

$$f_{ck} = \min i (\sigma_{k1}; \sigma_{k2}) \text{ avec } \sigma_{k1} = f_{cm} (1 - 0,07k_n) \text{ et } \sigma_{k2} = (f_{cm} - k_n s_n)$$

$$\text{Avec : } k_n = 1,28 + \frac{3,87}{(n-1)^{1/3}}$$

Le coefficient k_n dépend du nombre « n » des essais d'écrasement comme indiqué dans le tableau suivant :

n	15	30	50	100
k_n	1,94	1,69	1,57	1,46

Tableau n° 2

Note : le nombre d'éprouvettes ne respectant pas la valeur exigée est limitée à 5% (fractile)

- Passage de la résistance sur cube à celle sur cylindre :

Pour passer de la résistance du béton mesurée sur cube à la résistance mesurée sur cylindre, il est possible de s'appuyer :

- Sur l'article de J.R. Robinson des Annales des Ponts et Chaussées de juillet et août 1965 qui indique la fourchette suivante :

$$\frac{f_{c,cylindre}}{f_{c,cube}} = 0,83 \text{ à } 0,9$$

- Sur la RILEM et le CEB (Comité européen du Béton devenu en 1998 la FIB) donnent les fourchettes suivantes :

Conditions des essais	Cubes non surfacés sans introduction de plaques de carton	Cubes surfacés avec introduction de plaques de carton	Organismes
$\frac{f_{c,cylindre}}{f_{c,cube}}$	0,7	0,9	Rilem
	0,75	0,9	CEB

Tableau n° 3 : formules RILEM et CEB

■ **Passage de la résistance à 90 jours à celle à 28 jours :**

Ensuite, pour passer de la résistance à 90 jours à la résistance à 28 jours, il faut tenir compte de l'évolution de la résistance du béton entre 28 et 90 jours :

$$f_{c, 90} \approx 1,2 f_{c, 28}$$

pour les bétons à base de ciments courants,

$$f_{c, 90} \approx 1,10 \text{ à } 1,15 f_{c, 28}$$

pour les bétons à base de ciments à haute résistance initiale.

■ **Passage de la résistance moyenne à la résistance nominale ou à la résistance caractéristique :**

Pour opérer ces transformations, il suffit de s'appuyer sur :

- l'article de J.R. Robinson susvisé,
- l'instruction provisoire de calcul du BP de 1973 (dite IP2) et aux règles BAEL 83,
- l'ouvrage « Maintenance et Réparation des Ponts » aux presses de l'ENPC (page 194).

$$f_{cn} = f_{cm} - 0,8 s_n$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64 s_n$$

Attention, le coefficient pondérateur de l'écart quadratique dépend du nombre des essais. Ici, le coefficient 1,64 correspond à environ une trentaine d'essais d'écrasement.

Dans ces expressions, f_{ci} est le résultat de l'écrasement d'une éprouvette, f_{cm} la résistance moyenne des n essais, s_n l'écart quadratique moyen, f_{cn} la résistance nominale et f_{ck} la résistance caractéristique.

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}{n}}$$

Il est possible d'en déduire :

$$f_{ck} = 0,7 \text{ à } 0,85 f_{cn}$$

$$f_{ck} \approx 0,7 \text{ à } 0,85 f_{cm}$$

1.3.1.2 Cas de l'utilisation des résultats des mesures effectuées sur l'ouvrage existante l'ouvrage

Détermination de la résistance d'un béton en place :

Dans un premier temps, des **carottages in situ** vont permettre d'obtenir des carottes (respectant un élanement de 2) qui sont tout d'abord soumises à une auscultation dynamique pour mesurer la **vitesse du son** dans le béton, puis qui sont écrasées pour déterminer la **résistance du béton**. On obtient ainsi des relations entre la vitesse du son et la résistance du béton.

Dans un second temps, une **auscultation dynamique** va permettre de déterminer des zones où la vitesse du son est constante, donc des zones où le béton présente des caractéristiques mécaniques identiques. Comme, par ailleurs, les relations entre la vitesse du son et la résistance du béton ont été mesurées, il est possible de fixer la résistance du béton des différentes parties de la structure.

- **Norme NF EN 12504-4 de mai 2005** : Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son ;
- **Norme NF EN 12504-1 de juin 2019** : Essais pour béton dans les structures - Partie 1 : carottes — Prélèvement, examen et essais en compression.

Les ajustements tenant compte des dimensions transversales des carottes ne sont pas nécessaire si les exigences de la norme sont respectées. Dans le cas contraire, la formule suivante permet de passer de la résistance mesurée sur une éprouvette de diamètre Φ et de hauteur h (Φ et h sont exprimés en centimètres) à la résistance d'une éprouvette 16x32 (Article de Petersons de la revue RILEM 1971, Vol 7 n°24) :

$$\frac{f_{c,\frac{\Phi}{h}}}{f_{c,\frac{16}{32}}} = 0,64 + \frac{1}{\frac{h}{\Phi} + \frac{\Phi}{20}}$$

Recommandation de l'IFSTTAR (université G. Eiffel) : carottier fixé solidement sur la structure, (chevilles et boulons) élanement des carottes ≥ 2 et diamètre minimal des carottes $\geq 3d_g$ et nombre minimal de carottes par zone de mesure ≥ 3 .

Se reporter à la fiche **méthodologie de diagnostic (D1-7)** de l'IFSTTAR relative l'évaluation de la résistance du béton in-situ.

1.3.2 Les aciers de béton armé

Bien que des barres torsadées en acier doux, inventées par Ransome, aient été utilisées aux U.S.A. dès 1880 en vue d'améliorer l'adhérence acier/béton, les véritables **aciers à haute adhérence** n'ont commencé à être utilisés en France que vers les années 50.

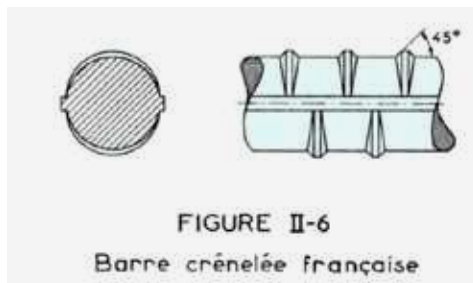


Figure n° 4 : barre crânelée utilisée jusque vers 1959

Pour les aciers de béton armé utilisés entre 1958 et 1978, il y a lieu d'être attentif lors du recalcul d'un ouvrage, car les valeurs des limites élastiques dépendaient du diamètre des barres. Par exemple :

- aciers HA : $\phi \leq 20$ mm $f_e = 42$ kgf/mm² et $\phi \geq 25$ $f_e = 40$ kgf/mm² ;
- aciers Tentor : $f_e = 45$ kgf/mm² ;
- aciers Breteuil DN : $\phi \leq 16$ $f_e = 42$ kgf/mm² et $\phi = 20$ et 25 $f_e = 39$ kgf/mm².

Remarque : se reporter à l'ouvrage « Maintenance et Réparation des Ponts » aux presses de l'ENPC, page 199, qui donne des précisions sur les conditions de réception des armatures de béton armé.

Le tableau ci-après résume l'évolution des aciers pour béton armé depuis les années 1900 :

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité f_e	Limite de rupture f_r	Allongement à rupture A %	Coefficient de fissuration η	Coefficient de scellement Ψ	Observations	
De 1900 à 1958 environ	Article 30 du cahier des charges générales de 1913 modifié à diverses reprises	Ronds lisses Ac 42	~24 kgf/mm ²	42 à 50 kgf/mm ²	25	/	/	Généralement soudable, pliable et dépliable mais à contrôler	
		Ac 54	36 kgf/mm ²	54 à 64 kgf/mm ²	18	/	/	Ces aciers ont pu être utilisés dans des pièces fortement comprimées	
De 1958 à 1965	Aciers doux	Ronds lisses Adx	24 kgf/mm ² si $\phi \leq 25$ mm 21 à 22 kgf/mm ² si $\phi > 25$ mm	33 à 50 kgf/mm ²	/	1	(*)	Soudables, rarement utilisés dans les ponts	
		Ac 42	24 kg/mm ²	42 à 50 kgf/mm ²	25	1	(*)	Aciers soudables normalement utilisés pour les ponts	
	Aciers Durs	Aciers durs Ac 55	32 kg/mm ²	55 à 65 kgf/mm ²	>16	1	(*)	Ces ronds lisses en acier mi-dur et dur ont pu être utilisés dans des pièces fortement comprimées	
		Ac 65	36 kgf/mm ²	65 à 85 kgf/mm ²	12	1	(*)		
		Ac 75	40 kgf/mm ²	>75 kgf/mm ²	6	1	(*)		
	Cahier des charges du 8 avril 1958.	Armatures HA en acier doux écroui	Aciers Tentor (TT) soudable avec précautions	50 kgf/mm ²	58 kgf/mm ²	21	1,6	(*)	(*) d'après le CCBA 68 $\psi_s = \frac{1,5\eta_d}{\sqrt{2}}$
Voir les fiches d'homologation des aciers à haute adhérence des règles BA 60 éditées par la documentation technique du bâtiment et des travaux publics (9 rue Lapérouse 75016 Paris)		Acier Tor (T) soudable avec précautions		42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > 25$ mm	48,5 kgf/mm ²	14	1,6	(*)	
		Acier Caron (C) soudable avec précautions		42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > 25$ mm	50 kgf/mm ²	14	1,6	(*)	

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement à rupture A %	Coefficient de fissuration η	Coefficient de scellement Ψ	Observations
De 1958 à 1965	Note technique C 12 n°1 du SCET du 22/02/1964 sur les conditions d'utilisation des armatures HA non visés par les fiches BA 60 ci-après :	Armatures HA en acier naturellement dur Acier crénelé	40 kgf/mm ²					Normalement non soudables (teneur en C trop élevée). Ne pas déplier et pliage délicat à basse température. Acier fabriqué jusqu'à 1959.
	Fiches BA 60 N°1 du 4/1/61 N°2 du 4/1/61	Acier Nersid (N) non soudable	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 16$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi \geq 20$ mm	50 kgf/mm ² 48 kgf/mm ²	12	1,6	(*)	
	N°2bis du 2/2/65 N°3 du 4/1/61 N°3bis du 9/7/63	Acier Créloi (SE) non soudable	45 kgf/mm ² si $\phi = 8$ mm 42 kgf/mm ² si $\phi = 10$ et 12 mm 40 kgf/mm ² si ϕ de 14 à 25 mm	55 kgf/mm ² 50 kgf/mm ²	12		(*)	
	N°4 du 31/1/61 N°5 du 6/10/61 N°6 du 10/10/61	Acier Breteuil (BR) non soudable	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 16$ mm 39 kgf/mm ² si $\phi = 20$ à 25 mm	48 kgf/mm ² 58 kgf/mm ²	12	1,6	(*)	
	N° 7 du ? N°8 du 13/2/63 N°9 du 24/4/63	Fil Ardox 5400 (AX) non soudable	54 kgf/mm ²	56 kgf/mm ²	12	1,6	(*)	
		Acier Hi-Bond-A (HBA) soudable ou non soudable	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi \geq 25$ mm	63 kgf/mm ² 58 kgf/mm ²	20	1,6	(*)	Il existait deux sortes de barres, les unes en acier dur non soudable et les autres en acier soudable
De 1966 à 1978	Aciers doux Normes NF A35-015 et 35-016 du 30/12/66	Fe E 22 (ex Adx)	22 kgf/mm ²	34 à 50 kgf/mm ²	22	1	1	

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement à rupture A %	Coefficient de fissuration η	Coefficient de scellement Ψ	Observations
De 1966 à 1978	Titre 1 ^{er} du fascicule 4 du CPC – Décret 67856 du 11/9/67 et circulaire n°71 du 26/10/66 Circulaire n°12 du 8 février 1968	Ronds lisses Fe E 18	Environ 18 kgf/mm ² valeur non garantie	33 kgf/mm ²	18	/	/	Nuance dont l'utilisation était interdite pour les ponts
	Fascicule 65 du CPC annexé à la circulaire du 13/8/69	Fe E 24 (ex Ac 42)	24 kgf/mm ²	42 à 50 kgf/mm ²	25	1	1	
	Circulaire 76-64 du 3 mai 1976 relative à l'agrément et au contrôle des armatures à haute adhérence en acier pour béton armé	Fe E 34	34 kgf/mm ²	60 à 72 kgf/mm ²	16	1	1	
	Aciers HA	Armatures HA Fe E 40 A	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > 20$ mm	48,5 kgf/mm ²	14	1,6	1,5	Diamètre < 40
		Fe E 40 B (acier de relaminage)	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > 20$ mm	48,5 kgf/mm ²	12	1,6	1,5	Mandrins de pliage > ceux des Fe E 40 A
		Armatures HA nouvelles : Fe E 45	45 kgf/mm ²	52 kgf/mm ²	12	1,6	1,5	
Armatures HA nouvelles : Fe E 50		50 kgf/mm ²	57,5 kgf/mm ²	10	1,6	1,5		
De 1978 à 1983	Aciers doux Nouvelles normes NF A 35-015 du 15/6/78 Nouvelles normes NF A 35-016 du 15/6/78 et NF A 35-019 et NF A 35-020 d'avril 80 (fils à haute adhérence)	Ronds lisses	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	Pas de changement par rapport à la période 67-78.
	Aciers HA	Armatures HA nouvelles : Fe TE 45	440 N/mm ²	480 N/mm ²	8	1,3 si $\phi < 6$ mm 1,6 si $\phi \geq 6$ mm	1,5	Introduction de 4 types d'armatures : 1 : acier naturellement dur, 2 : acier écrouis sans réduction de section,

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité f_e	Limite de rupture f_r	Allongement à rupture A %	Coefficient de fissuration η	Coefficient de scellement Ψ	Observations
De 1978 à 1983		Armatures HA nouvelles : Fe E 50	490 N/mm ²	540 N/mm ²	8	1,3 si $\phi < 6$ mm 1,6 si $\phi \geq 6$ mm	1,5	3 : acier écrouis avec forte réduction de section, 4 : treillis soudés
De 1983 à 1995	Aciers doux Nouveau titre 1 ^{er} du fascicule 4 du CCTG annexé au décret 83-251 du 29/3/83	Ronds lisses : Fe E 215	215 N/mm ²	330 à 390 N/mm	22	1	1	Le nouveau fascicule fait référence aux normes pour les diamètres 6 à 40 mm
	Création de la procédure d'homologation par le décret 83-252 du 29/3/83	Fe E 235	235 N/mm ²	410 à 490 ² N/mm ²	25	11	1	
	Aciers HA Nouvelles normes : NF A 35-015 du 20/7/84 NF A 35-016 du 30/12/86 NF A 35-019 du 20/7/84	Aciers HA Fe E 400 1 Fe E 400 2 Fe E 400 3	400 N/mm ²	440 N/mm ²	12 sur 5 d 12 sur 5 d 5 réparti	1,6	1,5	Les normes introduisent 3 catégories (1, 2 et 3) et 3 paramètres de forme : - armatures à verrous transversaux obliques en croissant
	1973 : création de l'AFCAB (Association Française de Certification des Armatures pour Béton).	Fe E 500 1 Fe E 500 2 Fe E 500 3	500 N/mm ²	550 N/mm ²	12 sur 5 d 8 sur 5 d 5 réparti	1,6	1,5	- armatures torsadées à froid à verrous transversaux obliques en croissant - armatures à empreintes. Diamètres de 6 à 40 mm
		Fe TE 400	400 N/mm ²	480 N/mm ²	12 sur 5d	1,3 si $\phi > 6$ mm 1,6 si $\phi \geq 6$ mm	1,5	Introduction des 3 paramètres de forme : - à empreinte, - à verrous,
		Fe TE 500	500 N/mm ²	550 N/mm ²	8 sur 5 d	1,6	1,5	- à nervures continues, dans les diamètres 6 à 16 mm

Tableau n° 4 : évolution des caractéristiques des aciers de BA depuis les années 1900



Photo n° 4 : aciers Caron et Tor des années 60 (crédit photo D. Poineau)

En ce qui concerne les dispositions constructives, jusqu'aux années 1950/1960, il y a lieu de noter :

- l'absence de cadres périphériques dans les talons des poutres ;
- l'utilisation de barres relevées, y compris dans les dalles ;
- l'utilisation du **frettage généralisé** sous forme d'armatures en spirale pour admettre des contraintes de compression plus élevées dans le béton ;

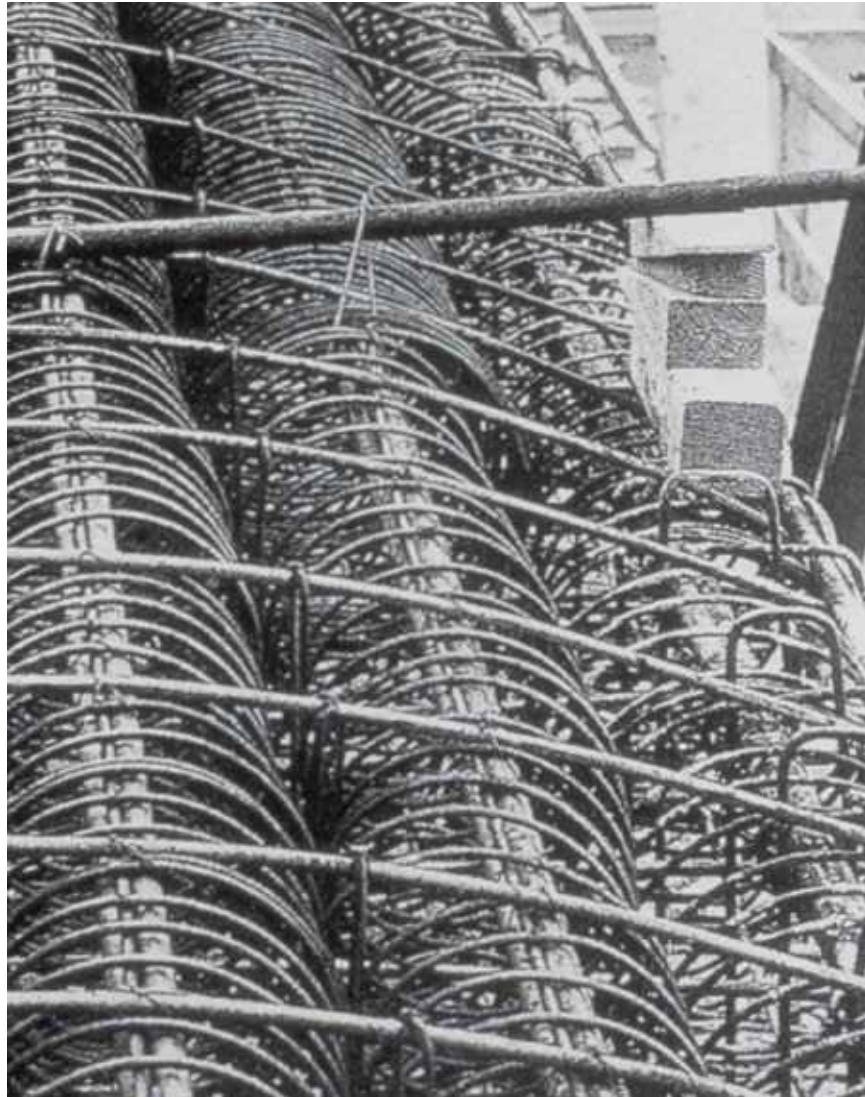


Photo n° 5 : frettage au pont en arc de Châtelguyon 1932-1934
(crédit photo l'Art de l'Ingénieur 1997)

- l'absence ou une faible présence d'armatures de peau le long des âmes des poutres et dans les parties comprimées ;
- l'absence d'un enrobage minimum pour les étriers ;

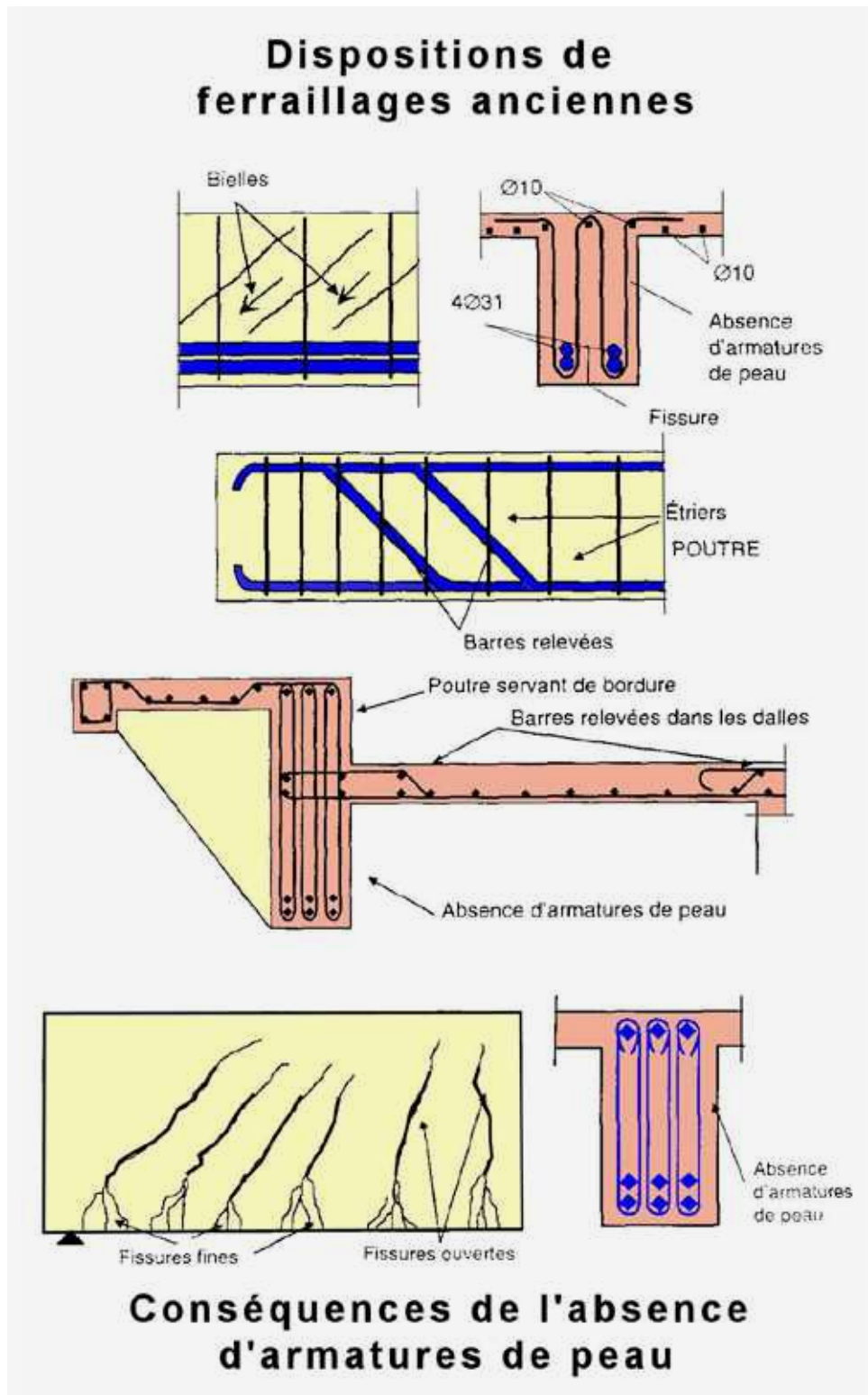


Figure n° 5 : dispositions constructives anciennes

- la géométrie des poutres de rive réduite de moitié par rapport aux poutres centrales (les dalles étant supposées articulées sur les poutres, les poutres de rive étaient donc moins sollicitées) ;

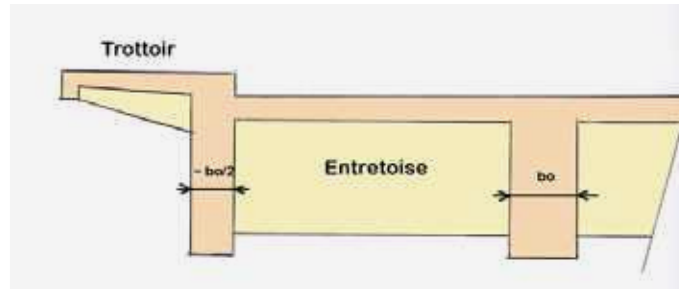


Figure n° 6 : coupe transversale d'un pont ancien

- le recours aux poutres cantilever (plus faciles à calculer car isostatiques) ;
- l'absence de chape d'étanchéité des travées indépendantes (le béton comprimé était considéré comme étanche !). En outre, lorsque des chapes d'étanchéité ont été utilisées, elles étaient de faibles performances ;
- l'utilisation fréquente et ce, jusque vers les années 50, de coffrages en planches grossières avec, à cause des fuites de laitance, un enduit de finition comme pour les bâtiments...

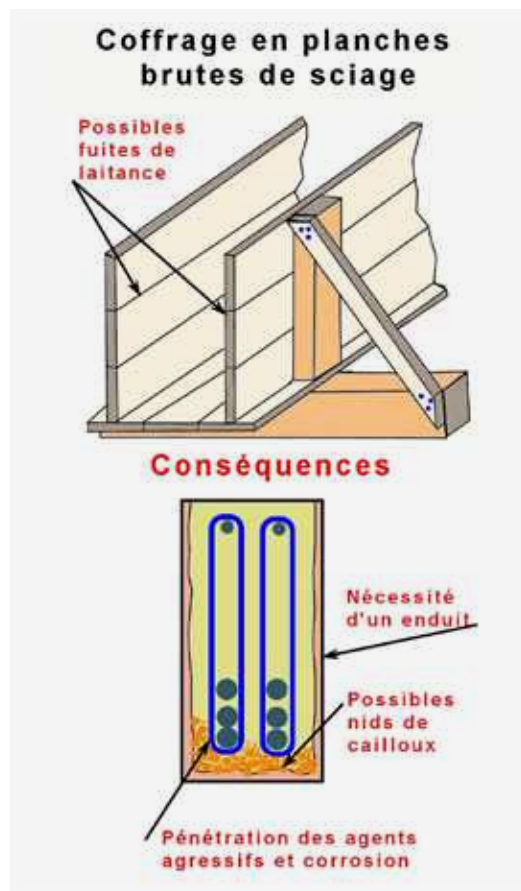


Figure n° 7 : coffrage en planches brutes de sciage

Il est possible de diviser cette évolution en cinq périodes :

- 1^{ère} période, des débuts du béton armé aux années 1900 ;
- 2^e période, des années 1900 aux années 60 ;
- 3^e période, des années 60 aux années 80 ;
- 4^e période, des années 80 à 2010 ;
- 5^e période depuis 2010.

Note : il est possible de consulter les règles anciennes sur le site du CEREMA.

3.1 PÉRIODE 1 DES DÉBUTS DU BÉTON ARMÉ AUX ANNÉES 1900

Cette première période se caractérise par l'**absence de règles de calcul officielles**. Chaque constructeur (Boussiron, Hennebique, Monnier...) avait breveté ses dispositions constructives et mis au point ses propres règles de calcul. Il faut se plonger dans les livres techniques de cette époque pour retrouver les lignes directrices communes à tous les constructeurs et qui allaient permettre de rédiger les **premières règles de calcul de 1906**.

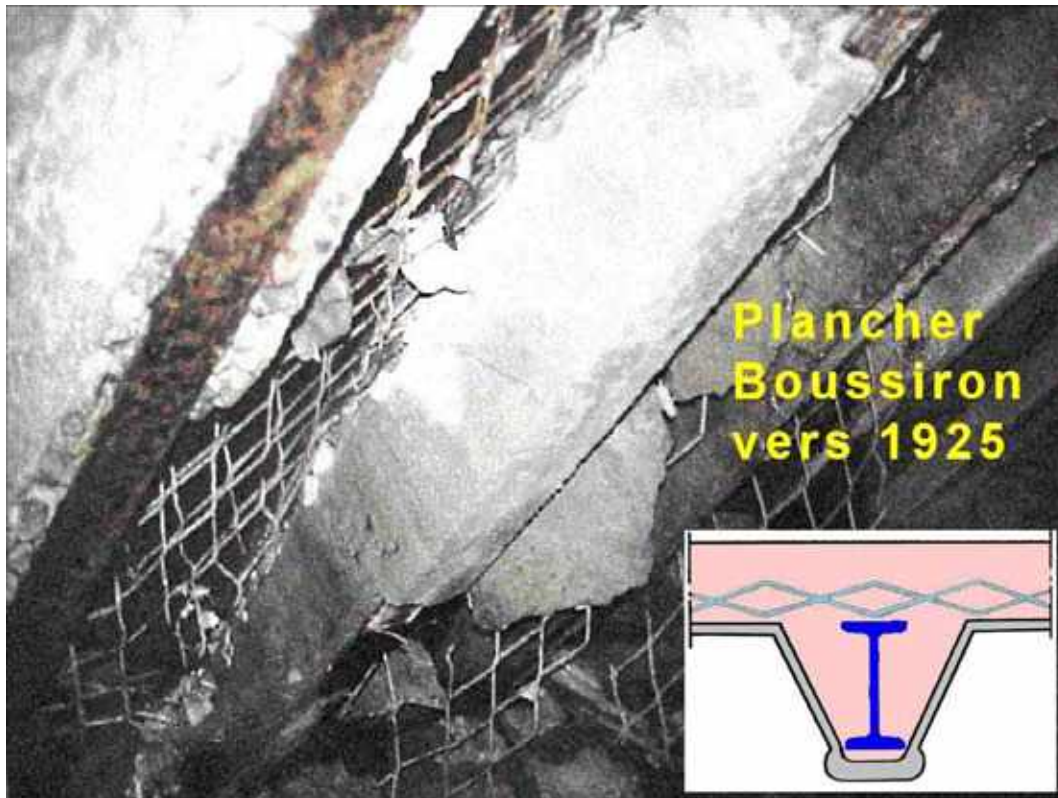


Photo n° 6 : plancher Boussiron (crédit photo Jean-Paul Persy)

3.2 PÉRIODE 2 DES ANNÉES 1900 AUX ANNÉES 60

Cette seconde période recouvre **les règles de calcul de 1906 et celles de 1934**, auxquelles ont été associées les règles de charges civiles de 1891, de 1927 (introduction du **coefficient de majoration dynamique** en 1927/1934) et de 1958/1960.

Il s'agit de règles de calcul dites aux **contraintes admissibles**, mais sans **aucune pondération** des charges permanentes et de service dans les combinaisons d'actions. Dans l'ensemble, ces règles de calcul n'ont que peu évolué durant toute cette période². À ces règles, il faut ajouter les **règles BA 45** relatives au calcul des ossatures des bâtiments.

Dans les règles de 1906, le béton était considéré comme un **matériau parfaitement élastique** : les effets du **retrait et du fluage (déformations différées)** étaient ignorés.

Dans les règles de 1934 : les effets du **retrait** étaient pris en compte ($\sim 2 \cdot 10^{-4}$) mais ceux du **fluage** étaient ignorés.

3.3 PÉRIODE 3 DES ANNÉES 60 AUX ANNÉES 80

Cette troisième période recouvre les **règles de 1960 pour le bâtiment (BA 60), 1964, 1968** (règles CCBA 68) **et 1970** auxquelles ont été associées les règles de charges civiles de 1960, de 1971 et leur réédition de 1981.

Il s'agit là encore de **règles de calcul aux contraintes admissibles**, mais avec **pondération des actions variables dans les combinaisons d'actions**. De plus, les **contraintes limites varient en fonction du type de sollicitation appliquée** (compression simple, flexion simple, flexion composée...). Le **comportement à rupture des sections a ainsi été intégré**, tout en conservant les **méthodes de calcul classiques basées sur la théorie de l'élasticité**. Cela a permis de **relever fortement les valeurs des contraintes limites**. C'est ainsi que la **contrainte admissible de compression du béton en flexion simple σ_b pouvait atteindre deux fois la contrainte admissible en compression simple σ_{bc}** . À noter :

- les règles CCBA de 68 et 70 étaient applicables à la fois aux ponts et bâtiments ;
- les calculs sous les sollicitations pondérées du 1^{er} et du 2^{ème} genre, celles du 2^{ème} genre pouvant être plus défavorables lorsqu'il n'y a pas proportionnalité des contraintes aux efforts (renversement du sens du moment fléchissant et flexion composée par exemple) ;
- utilisation de la résistance nominale pour les bétons ;
- les contraintes limites du béton en fonction de la classe du ciment, de l'épaisseur des pièces et du niveau de contrôle sur le chantier ;
- des règles de vérification des pièces vis-à-vis du flambement, nettement moins évoluées que les règles actuelles ;
- les règles de limitation de la fissuration³, qui n'ont été que rarement appliquées.

² Dans le domaine du bâtiment, des règles spécifiques sont apparues en 1945 (BA 45) et également en 1960 (BA 60).

³ Ces règles de fissuration sont à l'origine des règles de fissuration des règles BAEL et aussi de celles de l'Eurocode 2.

3.4 PÉRIODE 4 DES ANNÉES 80 AUX ANNÉES 2010

Cette quatrième période recouvre les **différentes règles de calcul aux états limites** appelées respectivement **BAEL 80, BAEL 83, BAEL 91 et enfin BAEL 99**. Ces règles de calcul ont été associées aux règles de charges de 1971 et à leur réédition de 1981.

Les **règles BAEL 80** ont été peu utilisées, car les **règles CCBA 70** pouvaient être utilisées concurremment. Les **règles BAEL 83** se sont substituées aux **règles CCBA 70** lorsque ces dernières ont été abrogées le 31 décembre 1984 par le décret du 7 octobre 1983.

Outre l'introduction des **états-limites**, les règles BAEL font référence aux valeurs **caractéristiques des actions** et aux **résistances caractéristiques** des matériaux contrairement aux règles CCBA.

***Nota :** dans l'annexe D des règles BAEL, la pondération des charges de calcul des ponts par différents coefficients (1, 1,07, 1,2) pour passer de la valeur nominale à la valeur caractéristique suivant le type de charge et l'état limite considéré est « une cuisine » destinée à ne pas entraîner de bouleversements dans le dimensionnement des ponts tout en assurant une cohérence avec les Directives Communes au Calcul des Constructions de 1979. Les DC 79 ont fixé les bases nécessaires à l'élaboration de règles de calcul cohérentes, aussi bien dans le domaine du béton que celui des fondations....*

***Remarque :** les règles BAEL ont été associées au fascicule 65 puis au fascicule 65A. Ces deux textes regroupent les règles d'exécution des structures en béton.*

Les règles de calcul les plus récentes sont les **règles BAEL 99**. Elles diffèrent peu des règles BAEL précédentes.

3.5 PÉRIODE 5 DEPUIS LES ANNÉES 2010

À compter du **1^{er} janvier 2010**, cette période voit l'introduction des **Eurocodes** dans le domaine des ouvrages d'art.

Ces règles qui sont également basées sur les **états-limites** et le **semi-probabilisme** comme les règles précédentes (BAEL et BPEL) :

- **l'Eurocode 0** donne les bases du calcul des structures. Ces règles concernent à la fois le bâtiment, les ouvrages d'art (ponts, passerelles...) et les ouvrages de génie civil mais aussi le BA et le BP.
- **les règles de calcul du béton armé relèvent de l'Eurocode 2 : EC 2 partie 1 et EC 2 partie deux (ponts)** s'appuient sur des règles de charges que sont l'**EC1 parties 1-1** (actions générales), 1-4 (actions du vent), 1-5 (actions thermiques) ... mais aussi l'**EC 1 partie 2** (actions sur les ponts dues au trafic).

Ces règles européennes ont introduit également des **règles de mise en œuvre** comme la norme **NF EN 1370/CN** qui a été heureusement complétée par le **fascicule 65 du CCTG de 2018**.

Le tableau ci-après liste des principaux Eurocodes concernant les ouvrages en béton.

Référence Norme NF EN	Date de valeur	Objet	Existence d'une annexe nationale
Eurocode 0			
NF EN 1990	Mars 2003	Eurocodes structureaux - Bases de calcul des structures.	NF EN 1990/NA décembre 2011
NF EN 1990/A1	Juillet 2006	Eurocodes structureaux - Bases du calcul des structures : Annexe A2 : applications aux ponts.	NF EN 1990/A1/NA
NF EN 1990-2002/A1 : 2005/AC : 2010	Intégration programmée	Corrigendum	
Eurocode 1 : actions sur les structures			
NF EN 1991-1-1	Mars 2003	Actions sur les structures : Partie 1-1 : actions générales - Poids volumiques, poids propre et charges d'exploitation des bâtiments.	NF P06-111-2/mai 2004 NF P06-111-2/A1 mars 2009
NF EN 1991-1-2	Juillet 2003	Actions sur les structures : Partie 1-2 : actions générales – Actions sur les structures exposées au feu.	NF EN 1991-1-2/NA Février 2007
NF EN 1991-1-3 NF EN 1991-1-3/A1	Avril 2004 Octobre 2015	Actions sur les structures : Partie 1-3 : actions générales - Charges de neige.	NF EN 1991-1-3/NA Mai 2007 NF EN 1991-1-3/NA/A1 Juillet 2011
NF EN 1991-1-4 NF EN 1991-1-4/A1	Novembre 2005 Octobre 2010	Actions sur les structures : Partie 1-4 : actions générales - Actions du vent.	NF EN 1991-1-4/NA Mars 2008 NF EN 1991-1-4/NA/A1 Septembre 2012 NF EN 1991-1-4/NA/A2 septembre 2012
NF EN 1991-1-5	Mai 2004	Actions sur les structures : Partie 1-5 : actions générales - Actions thermiques.	NF EN 1991-1-5/NA Février 2008
NF EN 1991-1-6	Novembre 2005	Actions sur les structures : Partie 1-6 : actions générales - Actions en cours d'exécution.	NF EN 1991-1-6/NA Mars 2009
NF EN 1991-1-7 NF EN 1991-1-7/A1	Février 2007 Août 2014	Actions sur les structures : Partie 1-7 : actions générales – Actions accidentelles.	NF EN 1991-1-7/NA Septembre 2008
NF EN 1991-2	Mars 2004	Actions sur les structures : Partie 2 : actions sur les ponts dues au trafic.	NF EN 1191-2/NA Mars 2008
NF EN 1991-3	Avril 2007	Actions sur les structures : Partie 3 : actions induites par les appareils de levage et les machines.	NF EN 1191-3/NA Janvier 2010
NF EN 1991-4	Mai 2007	Actions sur les structures : Partie 4 : actions dans les silos et réservoirs.	NF EN 1191-4/NA Novembre 2007
Eurocode 2 : calcul des structures en béton armé et précontraint			

Référence Norme NF EN	Date de valeur	Objet	Existence d'une annexe nationale
NF EN 1991-3	Octobre 2005 et février 2015	Calcul des structures en béton : règles générales et règles pour les bâtiments.	NF EN 1992-1-1/NA Mars 2016
NF EN 1991-4	Octobre 2005 Mai 2019	Calcul des structures en béton : règles générales – Calcul du comportement au feu.	NF EN 1992-1-2/NA Octobre 2007 NF EN 1992-1-2/NA/A1 Mars 2017 NF EN 1992-1-2/NA/A2 En cours d'élaboration
NF EN 1990	Mai 2006	Calcul des structures en béton – Partie 2 : ponts en béton - Calcul et dispositions constructives. Corrigendum	NF EN 1992-2/NA Avril 2007
NF EN 1990	Décembre 2006	Calcul des structures en béton – Partie 3 : silos et réservoirs.	NF EN 1992-3/NA Novembre 2016
NF EN 1990	Septembre 2018	Conception et calcul des éléments de fixation pour béton	NF EN 1992-4/NA Avril 2019

Tableau n° 5 : liste des principaux Eurocodes concernant les structures en béton (octobre 2020)

Avant d'entreprendre l'expertise ou le recalcul d'un ouvrage en béton armé, il est donc nécessaire de se mettre dans la « **peau de son concepteur** » en s'imprégnant des **documents de l'époque** (cours de béton armé, règlement de calcul, circulaires sur les bétons et les armatures...) et, bien entendu, du dossier de l'ouvrage, car les règles de calcul et les dispositions constructives peuvent être directement liées aux désordres constatés.

ATTENTION, dans le cas contraire, on risque de commettre de grossières erreurs aux lourdes conséquences !

Exemple d'erreur grave : lors de l'expertise d'un pont des années 1970, l'ingénieur chargé de cette étude a supposé que les étriers étaient constitués par des barres Fe E500 alors qu'en 1970 quasiment dans tous les ouvrages, seules les barres de type Fe E 400 étaient utilisées sous le sigle Fe E 40 ($f_e = 40 \text{ kg/mm}^2$) comme le montre le Tableau n° 3 ci-devant.



Photo n° 7 : pont de Boutiron dans l'Allier construit vers 1912 par Freyssinet (crédit photo D. Poineau)

Annexe 3

Les aciers inoxydables

1.1 DÉFINITION D'UN ACIER INOXYDABLE

Un acier inoxydable satisfait au minimum à la composition suivante :

- teneur en chrome >10,5% en poids ;
- teneur en carbone < 1,2% en poids ;
- teneur en fer : le reste ;
- ajouts possibles : nickel, molybdène, niobium...

À ceci s'ajoutent divers traitements thermiques (trempe, revenu...) et physiques (laminage à chaud ou à froid, écrouissage, tréfilage...) pour améliorer ses propriétés (résistance, facilité de façonnage...).

En fin de fabrication (cas particulier du laminage à chaud), l'acier inoxydable doit être débarrassé des oxydes par un traitement mécanique (brossage, grenailage...) ou chimique (acides forts), de façon que se forme au contact de l'air une **couche passivante protectrice** (oxydes et hydroxydes de chrome) de très faible épaisseur. **Cette couche est auto-réparatrice** en cas de blessure, **sous réserve** que l'acier soit au contact de l'air, ce qui impose qu'il ne soit pas recouvert de boues, de salissures compactes...

1.2 LES DIFFÉRENTS FAMILLES D'ACIERS INOXYDABLES

Il existe quatre familles d'aciers inoxydables :

- 1) les aciers inoxydables ferritiques (< 12%Cr, résistance élevée mais façonnage délicat, magnétiques),
- 2) les aciers inoxydables austénitiques (résistance moindre mais façonnage facile et bonne résistance à la corrosion, **non magnétiques** donc non détectables au pachomètre. Ils sont utilisés pour la confection des ferrailages, par exemple des pièces réservées à l'IRM...dans les hôpitaux...),
- 3) les aciers inoxydables austino-ferritiques appelés duplex (résistance élevée, façonnables et bonne tenue à la corrosion),
- 4) les aciers inoxydables martensitiques (non utilisés en construction).

> 1. Normes européennes :

La série des normes NF EN 10088-* traite des aciers inoxydables comme suit :

- **NF EN 10088-1 de décembre 2014** : Aciers inoxydables – Partie 1 : liste des aciers inoxydables ;
- **NF EN 10088-2 de décembre 2014** : Aciers inoxydables – Partie 2 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour usage général ;
- **NF EN 10088-3 de décembre 2014** : Aciers inoxydables – Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils machines, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier de résistance à la corrosion pour usage général ;
- **NF EN 10088-4 d'août 2009** : Aciers inoxydables – Partie 4 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour usage de construction ;
- **NF EN 10088-5 de juillet 2009** : Aciers inoxydables – Partie 5 : conditions techniques de livraison pour les barres, fils machines, fils, profils et produits blancs en acier de résistance à la corrosion pour usage de construction ;

> **2. Normes françaises :**

- **NF A35-014 de février 2018 :** Aciers pour béton armé - Aciers inoxydables soudables - Barres et couronnes - Aciers pour béton armé - Barres, fils machine et fils en acier inoxydable ;

> **3. Autres textes de référence :**

- Guide T.81 de CIMbéton ;
- Notice technique UGITECH...

La structure cristalline du fer pur est à l'origine des différentes appellations :

- un fer pur à moins de 910°C a une structure cristalline (assemblage d'atomes) de type cubique centrée appelée **structure ferritique** ;
- entre 910°C et 1400°C, la structure cristalline est cubique à faces centrées, appelée **structure austénitique** ;
- au-delà et jusqu'à la fusion, la structure redevient cubique centrée ;
- un chauffage à haute température d'un acier inoxydable chargé en carbone suivi d'un refroidissement brutal (trempe) conduit à la **structure martensitique**.

1.3

LES DIFFÉRENTES NUANCES D'ACIERS INOXYDABLES

Dans une même famille, suivant la **composition chimique de l'acier**, il existe **diverses nuances** dont les propriétés peuvent être fort différentes comme le montre le tableau ci-après.

Composants	Incidences sur les propriétés
Azote (N)	Augmente la résistance à certaines corrosions
Chrome (Cr)	Augmente la résistance à certaines corrosions
Nickel (Ni)	Augmente la déformabilité si > 10%
Niobium (Nb)	Augmente la résistance au fluage
Molybdène (Mo)	Augmente la résistance aux chlorures
Titane (Ti)	Augmente la résistance à certaines corrosions
Soufre	Augmente la sensibilité à la corrosion
Manganèse	Augmente la sensibilité à la corrosion
Carbone	Augmente la sensibilité à la corrosion

Tableau n° 1 : incidences des composants

ATTENTION, un choix d'une **nuance d'acier inadaptée à un environnement agressif donné** (par exemple, les chlorures) peut se traduire par une corrosion sévère, telle que la corrosion cavernueuse qui détruit le métal par l'intérieur.

Les aciers inoxydables sont désignés, soit symboliquement, soit numériquement :

Désignation symbolique	Signification des sigles
X 2 Cr Ni Mo N 22-5-3	X = acier allié 2 = 2% de carbone 22 = 22% de chrome 5 = 5% de nickel 3 = 3% de molybdène N traces d'azote

Tableau n° 2 : désignation des aciers inoxydables

Désignation numérique de la forme : **1. XXXX** (« 1. » désignant l'acier, c'est le numéro du groupe de matériaux).

Le premier groupe de X (XX) indique la composition comme le montre le tableau suivant :

Composants	Désignation numérique			
	Ni	Mo	Nb	Ti
40	< 2,5%	Sans	Sans	Sans
41	< 2,5%	Avec	Avec	Avec
43	≥ 2,5%	Sans	Sans	Sans
44	≥ 2,5%	Avec	Avec	Avec
45	Additions particulières			

Tableau n° 3

Le second groupe de X (XX) est le numéro d'ordre du Comité Européen de Normalisation (CEN).

Exemple de désignation numérique : **1.4462**

2.1 LA NORMALISATION

La norme NF A35-014 : traite des barres et couronnes soudables en acier inoxydable de diamètre 5 à 40 mm. Elle concerne les classes techniques suivantes :

- B500A, B500B et 500C,
- B650A, 650B et 650C,
- B750A, 750B et 750C.

Le chiffre correspond à la valeur de la **limite d'élasticité** exprimée en MPa (N/mm²). Les armatures de béton armé appartiennent aux classes 500 à 750.

La composition de l'acier est à choisir en fonction des **classes d'exposition** auxquelles est soumise la structure.

Exemple : Acier duplex de nuance **1.4462**.

Symbole : X2 Cr Ni Mo N 22-5-3

Composition chimique :

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni
≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,035	≤ 0,015	0,10-0,22	21-23	/	2,50-3,50	4,50-6,50

Tableau n° 4 : composition chimique d'un acier inoxydable duplex 1.4462

Les petits diamètres (< 12 ou 18 mm) sont fabriqués par laminage à froid et les autres diamètres par laminage à chaud.

2.2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ACIERS INOXYDABLES

Suivant leurs nuances, les aciers inoxydables présentent des propriétés physiques différentes comme le montre le tableau ci-après.

Propriétés physiques	Acier au carbone	Aciers austénitiques	Aciers duplex
Coefficient de dilatation thermique entre 20°C et 100°C	10	16	13
Coefficient de conductivité thermique à 20°C (W.m-1 K-1)	40	15	15
Résistivité Ω.mm ² m-1)	18-20	73-75	80
Module d'élasticité à 20°C (GPa)	18-20	193-195	200
Magnétique ou non	Oui	Non	Oui

Tableau n° 5 : tableau extrait du site UGITECH

2.3

CHOIX DE LA NUANCE EN FONCTION DES CLASSES D'ENVIRONNEMENT

La résistance à la corrosion des armatures de béton armé en acier inoxydable pour un milieu donné est mesurée par le **potentiel de piqûres**. Plus il est élevé, meilleure est la tenue de l'acier à ce type de corrosion.

Le tableau suivant (**DONNÉ À TITRE INDICATIF**) est inspiré du document suisse visé dans le présent texte ; il donne l'indice de résistance aux piqûres WS ($WS = \% Cr + 3,3\% Mo + 0\% N$) et la classe de résistance à la corrosion des principaux aciers pour armatures disponibles sur le marché français.

	Familles et nuances	Désignation	Indice de résistance aux piqûres WS	Classe de résistance à la corrosion
Aciers ferritiques				
	1.4511	X 3 Cr Nb 17	17	2
Aciers duplex				
Haute tenue à la corrosion + hautes caractéristiques mécaniques	1.4462	X 2 Cr Ni Mo N 22-5-3	31	3
Aciers austénitiques				
Austénitique basique	1.4301	X 5 Cr Ni 18-10	18	2
Austénitique + N	1.4311	X 2 Cr Ni N 18-10	18	2
Austénitique + Mo	1.4401	X 5 Cr Ni Mo 17-12-2	23	3
Austénitique + Mo + N	1.4429	X 2 Cr Ni Mo N 17-13-3	26	3
Austénitique + Mo	1.4436	X 3 Cr Ni Mo N 17-13-3	26	3
Austénitique + Mo + Ti	1.4571	X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12-2	23	3
Austénitique à très haute résistance à la corrosion	1.4539	X 1 Cr Ni Mo Cu 25-20-5	41	4
Nouvel austénitique	1.4597	X 8 Cr Mn Cu Nb 17-8-3	Idem 4301	2

Tableau n° 6 : indices de résistance aux piqûres et à la corrosion

Le document précise que l'**indice de résistance aux piqûres WS**, bien que n'ayant aucune justification scientifique, est une règle empirique utilisable. Le document suisse conseille dans le tableau ci-après et pour les ouvrages neufs les indices WS suivants, qui excluent de fait les aciers ferritiques.

Durée de vie souhaitée	Sollicitation due aux chlorures	Indice de résistance à la piqûration WS et classe de résistance à la corrosion
> 70 à 100 ans sans remise en état	Moyenne ou forte	>17 / 20
	Élevée ou très élevée avec fissures, écoulement des eaux et enrobage < 3 cm	>23 / 30 voire 31 / 34 (parties difficilement accessibles...)

Tableau n° 7 : choix de l'indice de résistance aux piqûres

Teneurs en chlorures probables à terme du béton :

Quantification	Quantité de chlorures en % de la masse de ciment
Faible	$\leq 0,6\%$
Moyenne	$0,6\% < \leq 1,5\%$
Élevée	$1,5\% < \leq 5\%$
Très élevée	$> 5\%$

Tableau n° 8 : qualification des teneurs en chlorures

Nota : le document suisse exclut les **aciers duplex en cas de risque d'incendie** à cause de leur fragilisation à partir de 475°C. En fait, les aciers duplex ont un comportement au feu légèrement moindre que les aciers austénitiques mais, nettement meilleur que les aciers ordinaires qui voient leur résistance mécanique chuter à partir de 400°C

Le tableau qui suit (**DONNÉ À TITRE INDICATIF**) est un montage réalisé à partir, d'une part, du guide T.81 de CIMbéton et, d'autre part, de la notice technique UGITECH (www.ugine-savoie.com). Il propose un choix de nuances en fonction des classes d'exposition à l'environnement de la **norme NF EN 206/CN**. D'autres nuances peuvent être utilisées mais il est nécessaire de consulter un spécialiste en corrosion. Le tableau qui suit montre que le recours à un spécialiste indépendant est recommandé.



Photo n° 1 : armatures de béton armé en acier inoxydable (crédit photo F. Moulinier)

Classe d'exposition		Nuances			
		Satisfaisantes en qualité prix	Exigences de sécurité accrues	Déconseillées	Envisageables sur avis d'un expert
XC : corrosion induite par la carbonatation					
Sec ou humide en permanence	XC1	1.4511	1.4597	Sans objet	Sans objet
Humide, rarement sec	XC2	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
Humidité modérée	XC3	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
Alternances d'humidité et de séchage	XC4	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
XD : corrosion induite par les chlorures autres que marins					
Humidité modérée	XD1	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
Humide, rarement sec	XD2	1.4401	1.4429	1.4511	1.4301 1.4597
		1.4436	1.4539		
		1.4571	1.4462		
Alternances d'humidité et de séchage	XD3	1.4401	1.4429	1.4511	1.4301 1.4597
		1.4436	1.4539		
		1.4571	1.4462		
XS : corrosion induite par les chlorures en mer					
Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact avec l'eau de mer	XS1	1.4401	1.4539 1.4462	Autres nuances	1.4301 1.4597
		1.4429			
		1.4436			
		1.4571			
Immergé en permanente	XS2	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet
Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	XS3	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet
XF : attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage					
Saturation en eau modérée sans agent de déverglaçage (*)	XF1	1.4597	1.4301	Sans objet	1.4511
Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage	XF2	1.4401	1.4429	1.4511	1.4301 1.4597
		1.4436			
		1.4571			
Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage (*)	XF3	1.4597	1.4301	Sans objet	1.4511
Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage	XF4	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet
XA : attaques chimiques (Tableau n°2 NF EN 206-1)					
Faible agressivité chimique	XA1	1.4597	1.4301	Sans objet	1.4511
Agressivité chimique modérée	XA2	1.4401	1.4429	1.4511	1.4301 1.4597
		1.4436			
		1.4571			
Forte agressivité chimique	XA3	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet

Tableau n° 9 : choix des nuances

Classes d'exposition	Sous-classes	Nuances aciers duplex
Classes XC (carbonatation)	XC	1.4062
Classes XD (chlorures d'origine non marine)	XD 1 et XD2	1.4062
	XD3	1.4632
Classes XS (chlorures d'origine marine)	XS1	1.4362
	XS2 et XS3	1.4462
Classes XF (gel/dégel et fondants)	XF1 et XF2	1.4362
	XF3 et XF4	1.4462
Classes XA (attaques chimiques)	XA1	1.4362
	XA2 et XA3	1.4462

Tableau n° 10 : tableau extrait du site UGITECH

2.4 COMPATIBILITÉ ENTRE LES ACIERS NORMAUX ET LES ACIERS INOXYDABLES

Rappel, les tableaux de classification de la résistance à la corrosion des métaux en fonction de leur potentiel normal montrent qu'un **acier normal** au contact d'un **acier inoxydable**, lequel a le potentiel le plus élevé, va se transformer en anode et se sacrifier au bénéfice de l'acier inoxydable qui se transforme en cathode.

Lors d'une réparation, les armatures en aciers normal vont être dégagées et débarrassées de toute trace de corrosion. Des armatures de peau en acier inoxydable (voire des armatures de renfort) peuvent être mises en place **sans contact avec les armatures en acier ordinaire** et le tout va être enrobé dans un mortier ou un béton.

Le développement qui suit sur le comportement vis-à-vis de la corrosion d'armatures mixtes comportant des armatures en acier inoxydable et des armatures en acier normal est extrait de l'article 4.5 du document suisse.

2.4.1 Cas d'une pénétration de chlorures après réparation

1^{er} cas : tant que l'acier inoxydable et l'acier normal restent passifs (faible teneur en chlorures du béton), les deux types d'aciers ne subissent qu'une très faible corrosion, puisque le courant de corrosion à l'état passif est très peu élevé. **Il n'y a donc pas d'incompatibilité entre les deux matériaux ;**

2^{ème} cas : si la nuance de l'acier inoxydable n'a pas été correctement choisie, dès que le dosage en chlorures autour des armatures en acier inoxydables atteint le seuil de corrosion, des piqûres (anodes) vont se former à la surface de l'acier inoxydable. Les surfaces de l'inoxidable non touchées ont une fonction de cathode et il en est de même des armatures en acier normal situées en deuxième lit dans une zone moins chargée en chlorures. La surface des anodes étant faible par rapport à la surface des cathodes, le courant de corrosion va être important et la corrosion relativement active¹. **Il faut donc éviter ce cas de figure par un bon choix de nuance ;**

3^{ème} cas : si la nuance d'acier inoxydable a été correctement choisie, le taux de chlorure va finir par atteindre le **seuil critique** au niveau des armatures en acier normal avec formation de piqûres. Cependant, comme l'enrobage de ces aciers est important, la teneur en oxygène, le taux d'humidité et la teneur en chlorures sont plus faibles que dans le deuxième cas et la vitesse de corrosion est donc plus faible (des essais montrent une réduction du courant de corrosion variant entre 3 à 6). **Il se développe une corrosion voisine de celle qui se produirait s'il n'y avait pas d'armatures en acier inoxydable.**

¹ Dans le document suisse il est fait référence à une étude FHWA 1998 de McDonald où il a été constaté sur des éprouvettes de laboratoire que l'acier inoxydable pouvait avoir un moins bon comportement lorsqu'il était en contact avec un acier non allié que lorsqu'il était en contact avec un acier inoxydable de même nuance.

2.4.2 Cas d'une carbonatation

1^{er} cas : tant que le front de carbonatation n'atteint pas les armatures, les deux aciers restent passifs, comme dans le cas d'une pénétration de chlorures ;

2^{ème} cas : lorsque le front de carbonatation atteint l'acier inoxydable, aucune corrosion ne peut se produire puisque l'acier inoxydable ne se corrode pas à l'air libre (en l'absence de chlorures...) ;

3^{ème} : dans le cas où l'enrobage est important et le mortier ou le béton de réparation sont de qualité, la durée de la carbonatation est longue ce qui met pratiquement l'acier normal à l'abri de la corrosion. Cependant, si elle se produit, la carbonatation étant homogène, la corrosion de l'acier ordinaire sera généralisée, mais avec une surface anodique importante et donc un courant de corrosion faible.

2.5

PRÉCAUTIONS À PRENDRE LORS DE LA MISE EN ŒUVRE D'ARMATURES EN ACIER INOXYDABLE

- 1. le stockage des armatures en acier inoxydable** doit être séparé de celui des armatures en acier normal, car des taches de rouille sur un acier inoxydable peuvent amorcer une corrosion ;
- 2. la coupe et le façonnage** des armatures en acier inoxydable doivent être effectués avec des outils en acier inoxydable ou non métalliques (plastique, céramique...) ;
- 3. le façonnage par chauffage des armatures en acier inoxydable** est **formellement déconseillé**, car il modifie les propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion de l'acier ;
- 4. les ligatures entre les armatures en acier inoxydable** doivent être effectuées à l'aide de fils en acier inoxydable doux ou d'attaches en plastique (prévoir les mêmes précautions pour les cales et écarteurs) ;
- 5. le soudage entre des armatures en acier inoxydable** dépend de la famille des aciers à souder. Il est :
 - a) facile entre les aciers austénitiques à faible teneur en carbone ($C < 0,03\%$) ou entre les aciers stabilisés au titane ou au niobium,
 - b) plus délicat avec les aciers duplex ou ferritiques, avec des risques de pertes des caractéristiques mécaniques ou de résistance à la corrosion.

ATTENTION, toute soudure doit être nettoyée, soit avec une brosse non métallique, soit par sablage ou grenailage, pour éviter toute corrosion localisée !



Photo n° 2 : corrosion d'un acier inoxydable au droit de soudures
(crédit photo D. Poineau)

Annexe 4

L'hydrodémolition

Le graphique ci-dessous, extrait de la revue « Concrete Engineering International » d'avril 1981, donne la relation entre le débit et la pression d'eau à adopter en fonction des travaux à exécuter.

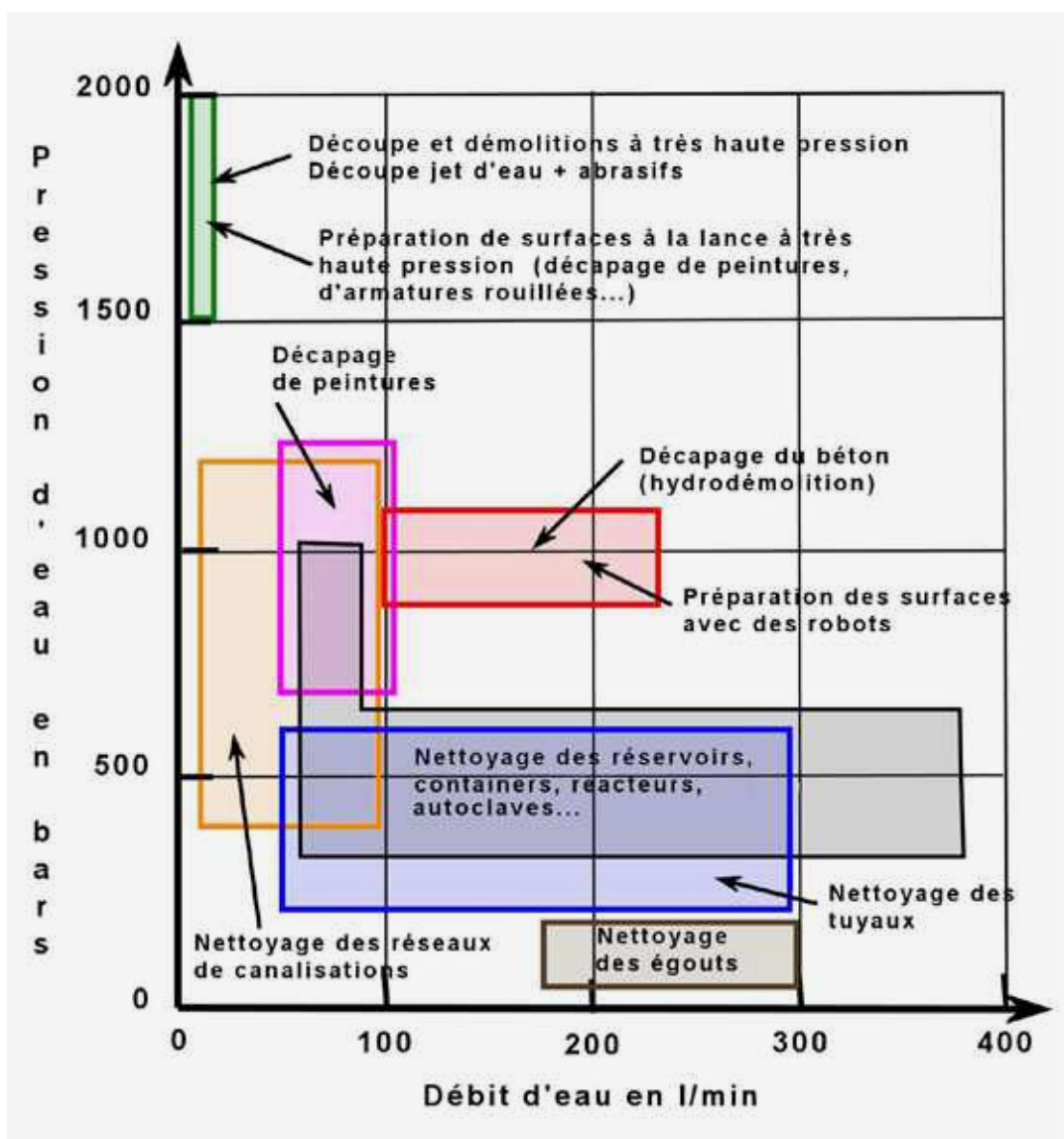


Figure n° 1 : relation entre pression et débit (d'après le document de M. Momber)

1.1 ENLÈVEMENT PRÉCIS DE PETITS VOLUMES DE BÉTON DANS DES EMPLACEMENTS D'ACCÈS DIFFICILE



Photo n° 1 : lance manuelle en action lors d'une démonstration
(crédit photo D. Poineau)

Il s'agit de travaux difficiles et coûteux. On utilise une lance manuelle équipée d'une buse unique (mono buse) avec une pression très élevée de 150 MPa à 250 MPa (soit 1500 à 2500 bars), avec un débit d'eau de 12 à 25 l/mn (la forte pression compense en partie le faible débit d'eau). Le rendement est faible et ne dépasse pas 0,5 m³ par jour.

1.2 ENLÈVEMENT DE PETITES ÉPAISSEURS DE BÉTON

Il s'agit des travaux au cours desquels il faut procéder à l'enlèvement de la laitance, à la création d'une surface rugueuse, au décapage du béton sur moins d'un centimètre d'épaisseur... Par exemple, pour permettre la mise en place d'une chape d'étanchéité ou pour exécuter un ragréage de faible épaisseur, ...

Bien entendu, si les caractéristiques du béton (résistance) ne sont pas homogènes sur toute sa surface, des trous risquent de se former dans les zones les plus faibles, en particulier, si le porte-lance n'est pas parfaitement entraîné.

1.2.1 Cas du traitement de petites surfaces

Pour le décapage de petites surfaces, il faut utiliser une lance à buses multiples.



Photo n° 2 : lance à buses multiples

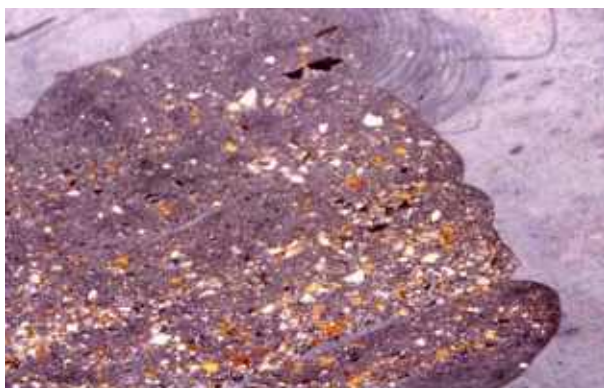


Photo n° 3 : résultats d'un décapage léger (crédit photo D. Poineau)

1.2.2 Cas du traitement de grandes surfaces

Pour le décapage de grandes surfaces, il faut utiliser une lance à buses multiples fixée sur une tête rotative, montée elle-même sur un robot alimenté par une pompe à haute-pression (~ 110 à 120 MPa) et à fort débit (150 à 250 l/mn). Le rendement peut atteindre 50 m²/heure.



Photo n° 4 : appareil de décapage des sols (crédit photo Rivard)

1.3

DESTRUCTION DE GROS VOLUMES DE BÉTON SUR DES ÉPAISSEURS IMPORTANTES AVEC MISE À NU DE PLUSIEURS COUCHES D'ARMATURES

Pour la destruction de gros volume de béton armé, il faut utiliser une lance à buse simple (mono buse), montée sur un robot alimenté par une pompe à haute-pression et à fort débit. Le robot est équipé d'un bras télescopique orientable dans toutes les directions, qui permet de travailler au sol par bande pouvant atteindre 2 m de large et sur les murs et voiles verticaux ou inclinés dans les mêmes conditions.

La pression atteint 110 à 120 MPa (1 100 à 1 200 bars) pour un débit d'eau de 150 à 250 l/mn. Le rendement d'une telle machine peut atteindre un taux de destruction de 10 m³ de béton par jour.

Remarque : pour le travail dans des lieux où le robot ne peut pas accéder, il est possible d'utiliser un cadre métallique qui va guider la buse sur son parcours vertical et horizontal (se reporter à la photo des démolitions des déviateurs du pont de Bergerac ci-après).



Photo n° 5 : robot Conjet en démonstration (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 6 : démolition limitée au béton de mauvaise qualité d'un déviateur du pont de Bergerac (crédit photo J.M. Lacombe)

Les ouvriers doivent revêtir une combinaison spéciale, des bottes renforcées une protection des oreilles (bruit), un casque avec visière, des gants (consulter les fiches CNRS de janvier 1995).



Photo n° 7 : tenue de protection (crédit photo D. Poineau)



Photo n° 8 : opérateur avec protection phonique (crédit photo J.M. Lacombe)



Photo n° 9 : dispositifs de protection au viaduc d'Orgemont (crédit photo D. Poineau)

Pour limiter les projections, les buses sont placées sous des capots. Dans le cas où les capots ne peuvent être utilisés, il faut mettre en place des protections de l'ordre de 2,50 m de hauteur. Même avec les capots, des projections se produisent, aussi, il faut aussi prévoir des écrans de protection.

Lorsque la démolition concerne toute l'épaisseur de la pièce, il faut placer un cintre sous l'ouvrage avec un robuste plancher recouvert de panneaux de tôle ondulée, qui sont très efficaces pour absorber les effets du jet d'eau.



Le comité de pilotage du guide Reprise des bétons dégradés (FABEM 1) était composé de :

Christian TRIDON, président du STRRES
Bernard FARGEOT, président d'honneur du STRRES
Hubert LABONNE, vice-président d'honneur du STRRES
Philippe ARVILLE, EIFFEL
Didier CHABOT, COFEX
Gil CHARTIER, RCA
Damien COLOMBOT, BAUDIN-CHATEAUNEUF
Gérard COLLE, COFEX
Xavier JULLIAN, SOLETANCHE BACHY
Jean-Pierre GADRET, SOLETANCHE BACHY
Christian TOURNEUR, FREYSSINET

Le guide FABEM 1 a été rédigé par : **Daniel POINEAU** et **Yves MOUTON**, experts

*

* *

Le comité de pilotage du guide révisé Reprise des bétons dégradés (FABEM V2) était composé de :

Christian TRIDON, président du STRRES
Gérard COLLE, Vice-président d'honneur du STRRES
Patrick BLONDELLE, DEMATHIEU BARD
Lionel LLOBET, COFEX Méditerranée
Julien NICOLI, BTPS Atlantique
Christophe PAULARD, TECHNIREP
Jean-François RIBES, NGE Génie Civil
Sylvain ROMOEUF, Société ROMOEUF
Michel FRAGNET, expert
Christian TOURNEUR, expert
Régis DORBESSAN, OPPBTP
Marie-Thérèse MBIBA, FNTP

La révision du guide FABEM 1 a été assurée par : **Daniel POINEAU**, expert

Ce document a été réalisé avec le concours
de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)



