LES RENFORCEMENTS PAR ARMATURES CARBONE COLLEES

Emmanuel FERRIER

Professeur,
Université LYON 1

STRRES

NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

PLAN

- L'historique
- Les différents dispositifs (tissus, lamelles etc…)
- Les avis techniques
- Les principes de fonctionnement
- Comment peut-on s'assurer de la bonne efficacité du dispositif

PLAN

- **L'historique**
- Les différents dispositifs (tissus, lamelles etc…)
- Les avis techniques
- Les principes de fonctionnement
- Comment peut-on s'assurer de la bonne efficacité du dispositif

Introduction : Exemple de Pathologies de Structures

Protéger

- *Assurer l'étanchéité*
- *Limiter la corrosion*

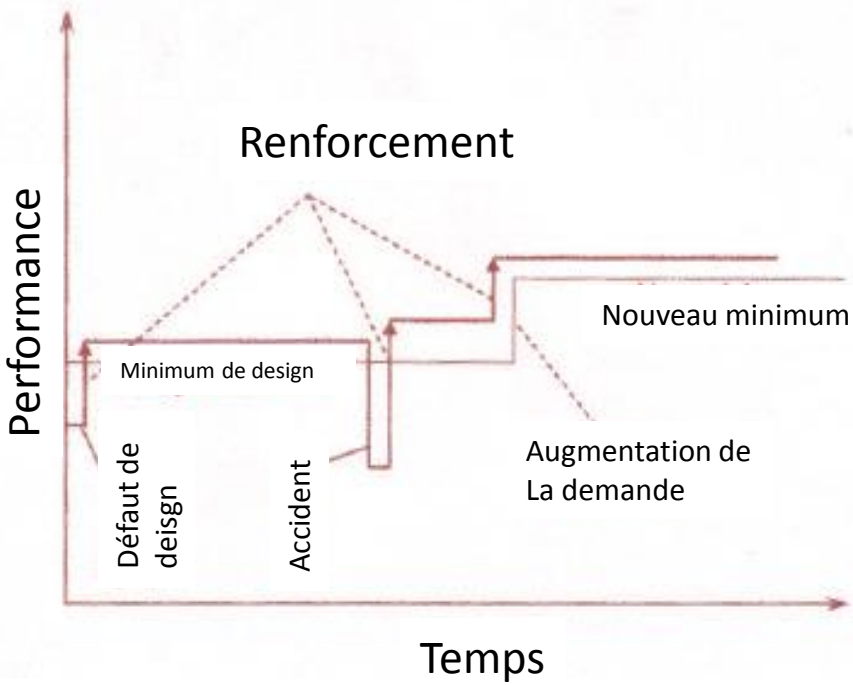
Réparer

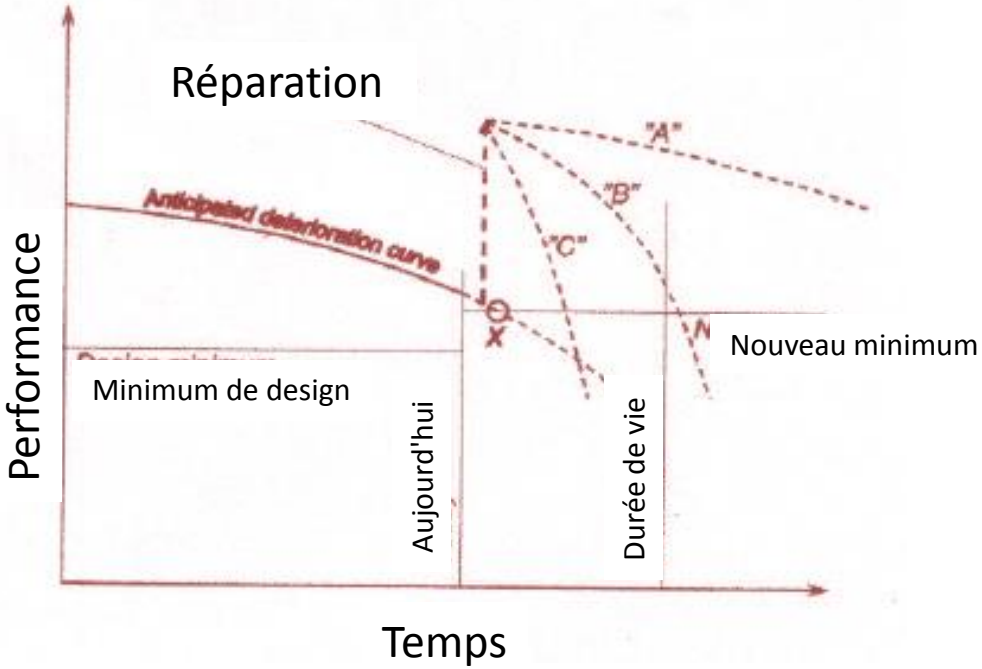
- *Compenser les pertes en rigidité*
- *Augmenter la résistance*

Renforcer

- *Améliorer les performances*
- *Améliorer la durabilité de l'ouvrage*

Stratégie de renforcement

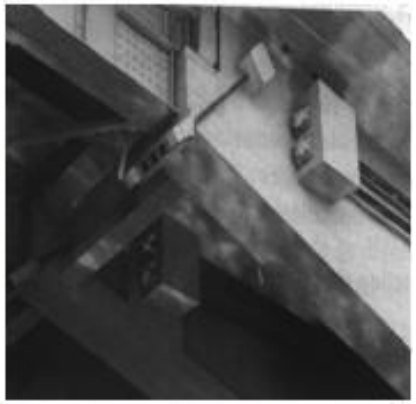




Procédés Technologiques de Réparation

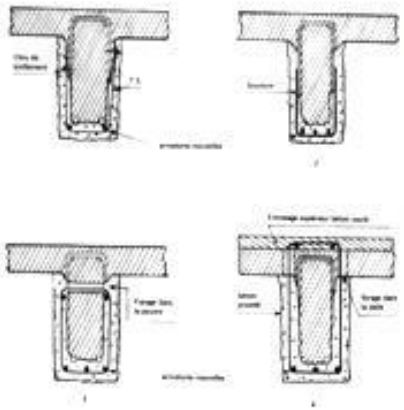
Traitement du matériau

- *Injection des zones fissurées*
- *Ragréage*
- *Peinture*



Traitement structural

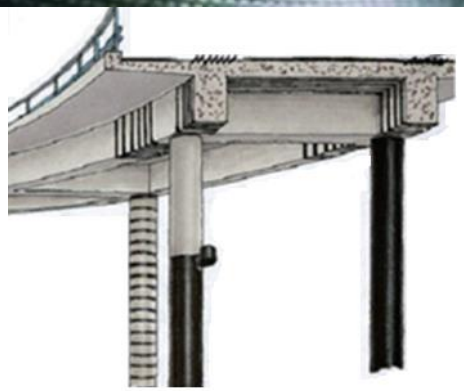
- *Béton projeté Venuat (1982), Resse (1982)*
- *Placage et collage de tôle acier Hermite (1967), Bresson (1971)*
- *Précontrainte additionnelle par câbles d'acier Poineau (1985)*
- *Réparation par composite*



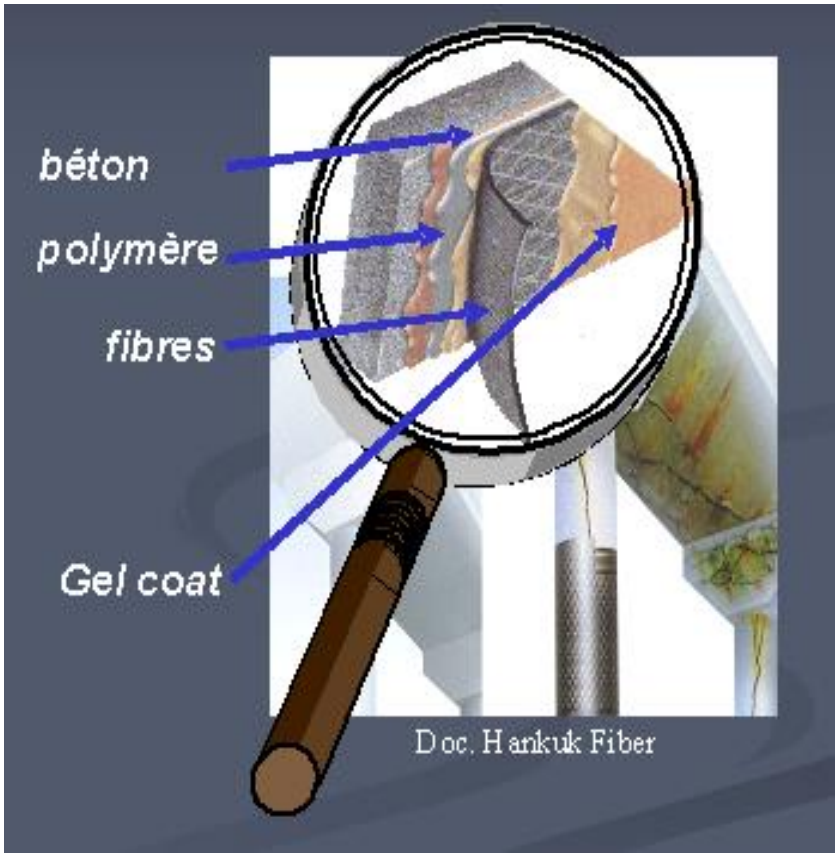
Collage de tôles d'acier

Il y a 20 ans…

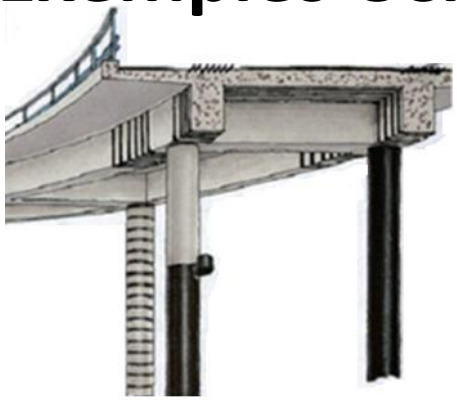
Renforcement par Polymère renforcé de fibres



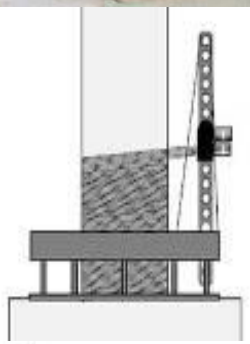
Renforcement par PRF

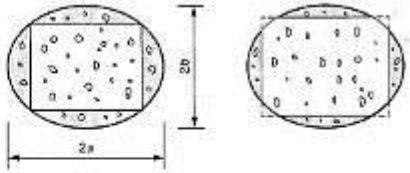


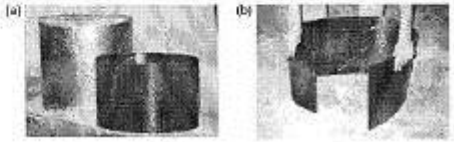
Exemples USA, Japon, France



Renforcement par PRF



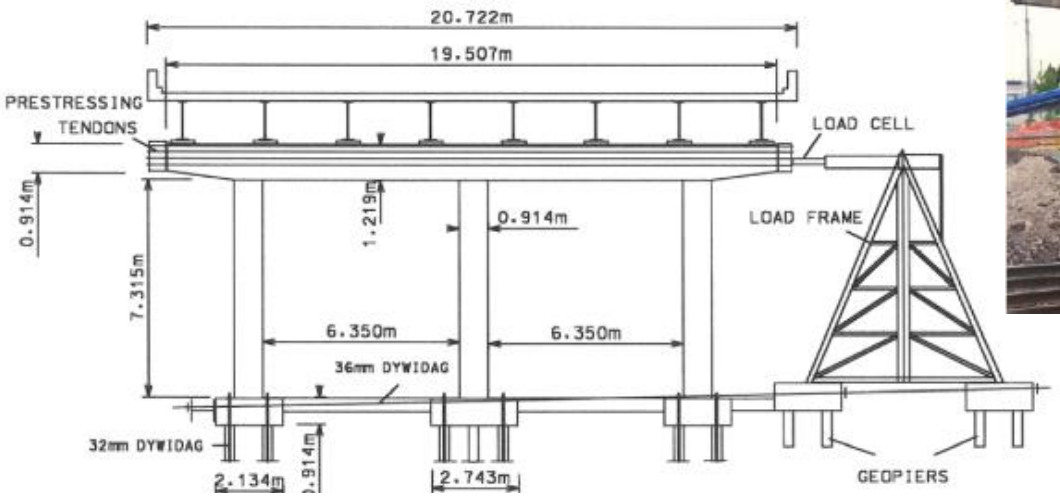


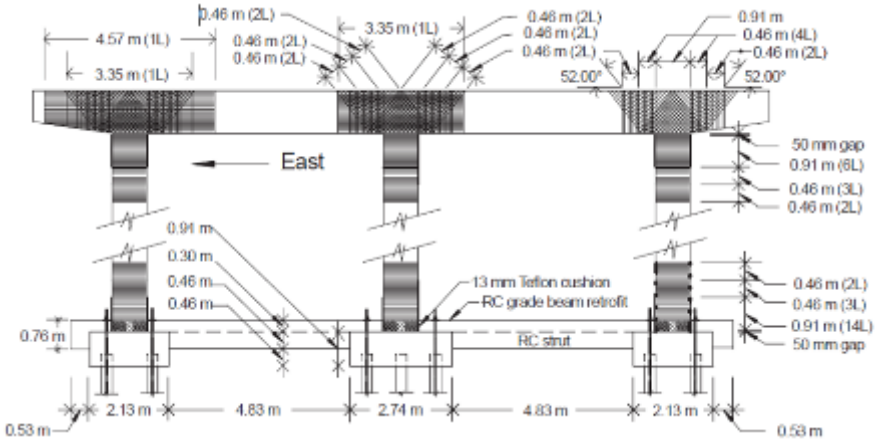


Renforcement des ponts, Pantelides USA

Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Beam-Column T-Joints in Bridge Piers with FRP Composite Jackets

by C.P. Pantelides and J. Gergely





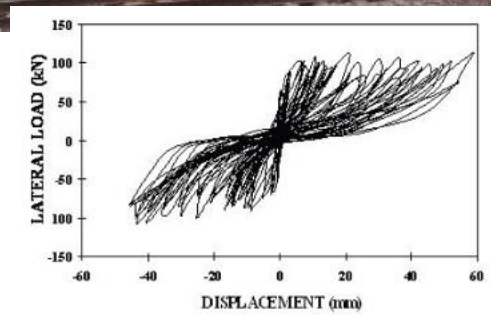
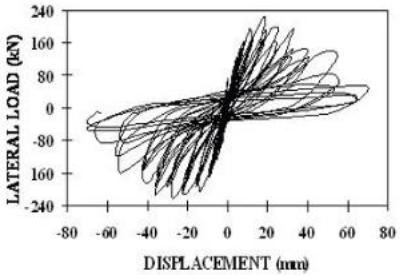
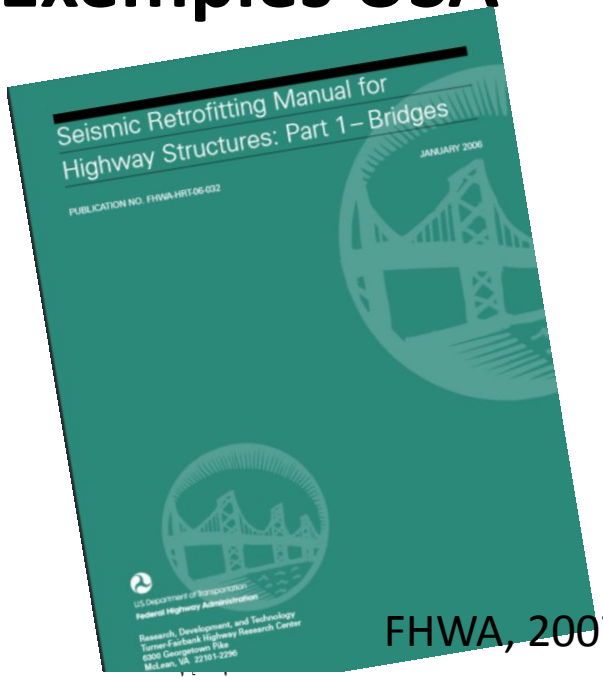


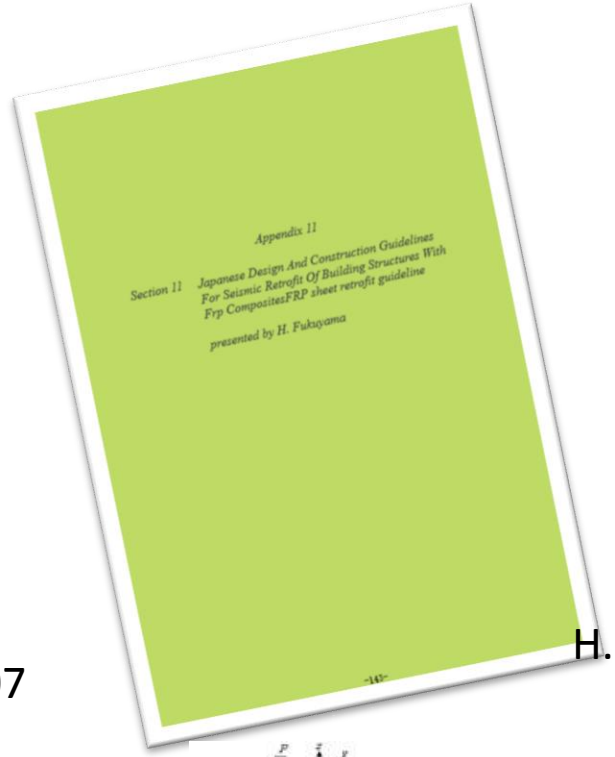
Figure 2 - Hysteresis for as-built beam-column joint. (1 kN = 0.225 kips, 1 mm = 0.039 in.)



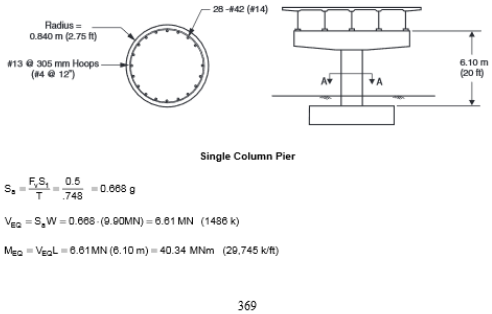
Exemples USA

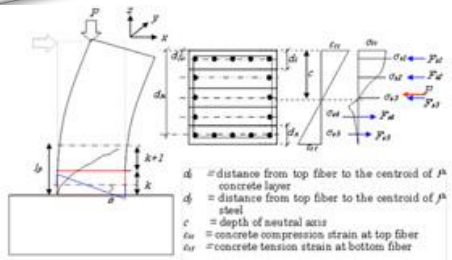


FHWA, 2007



H. Fukuyama, 1999





Exemples USA

Piles de Pont – Californie, USA

Pont de l'autoroute US-87 (années '90):
2005→ mise a jour du poids de la circulation
→ inspections de la suffisance sismique

➡ Renforcement des piles

➢Système Tyfo® en fibres de verre a enveloppé la base pour renforcement à l'effort tranchant ✚ protection contre la corrosion

➢En 2007 le séisme d' Alum Rock (5.6Mw), le plus fort après Loma Prieta (1989), a frappé la région de Californie.

➡ Aucun dommage

Exemples USA

Renforcement à l'effort tranchant des poteaux

Réparation d'urgence a la suite d'un événement sismique important

Hôtel Nikko, Beverly Hills: endommagé par le séisme Landers en1992→ Dégâts aux poteaux courts → renforcement à l'effort tranchant

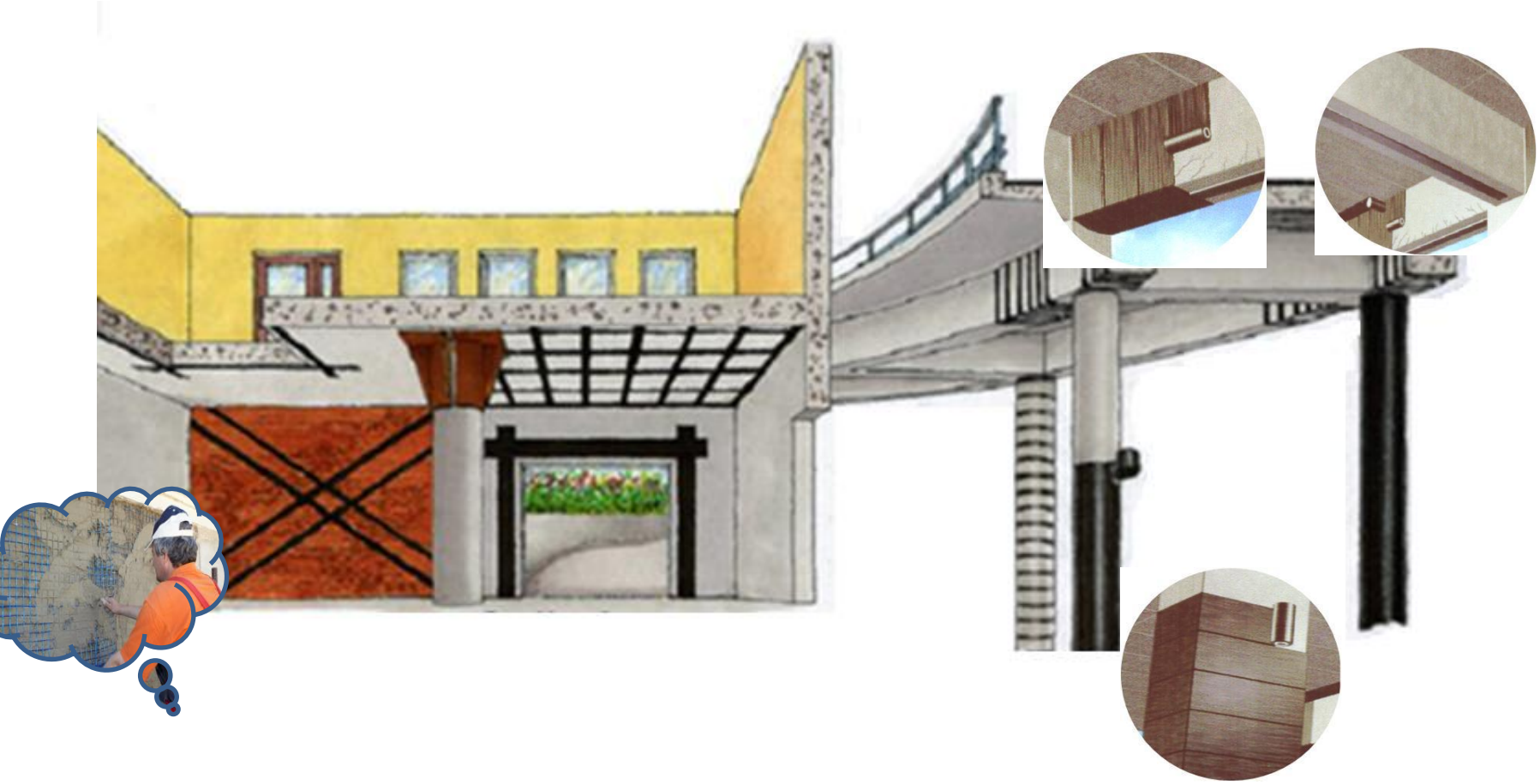
Séisme de Northridge→ comportement du bâtiment amélioré, aucun dégât aux poteaux

Pico & Overland Garage, LA→ réparation d'urgence des poteaux après le séisme de Northridge, 1994

FYFE Tyfo FIBRWRAP Systems

Aujourd'hui…

Renforcement par PRF



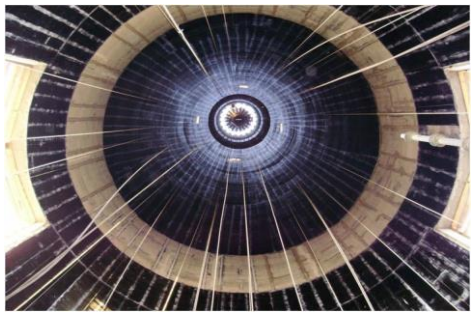
Source : Sika

Renforcement d'ouvrage d'exception par PRF

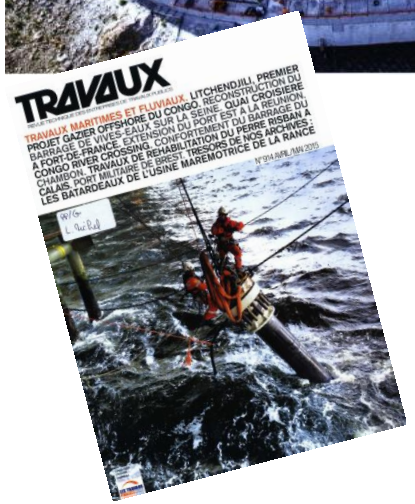
The West Gate bridge.

The strengthening work.

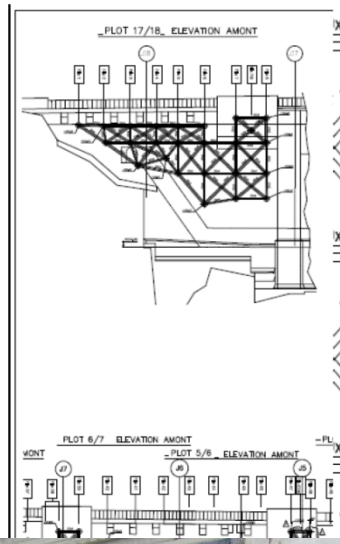
Renforcement par PRF



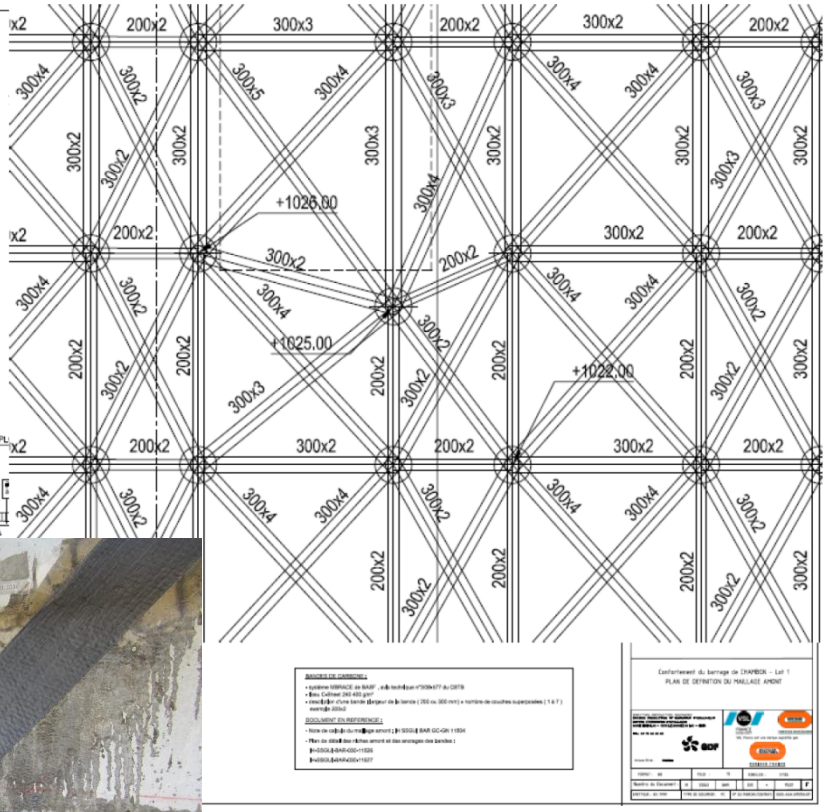
Exemples France Barrage du Chambon



Source Travaux, mai-juin 2015



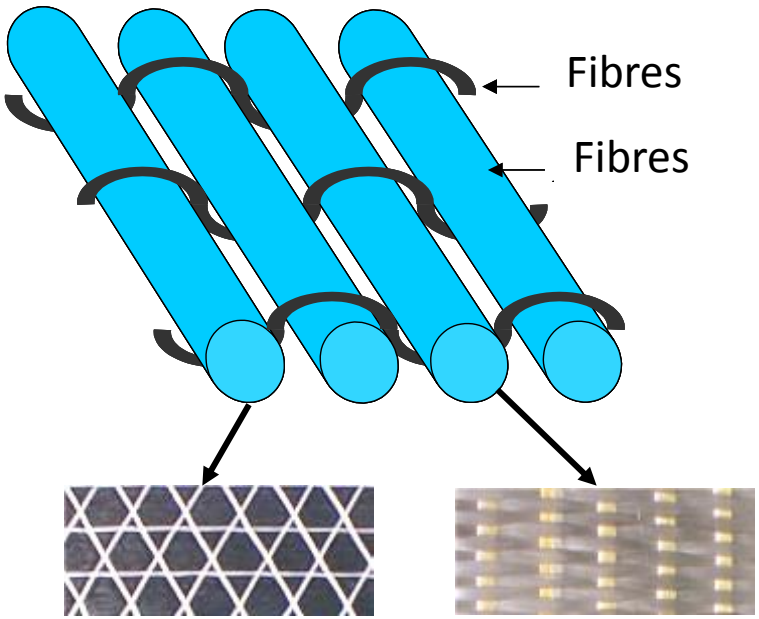
Barrage du Chambon



PLAN

- L'historique
- **Les différents dispositifs (tissus, lamelles etc…)**
- Les avis techniques
- Les principes de fonctionnement
- Comment peut-on s'assurer de la bonne efficacité du dispositif

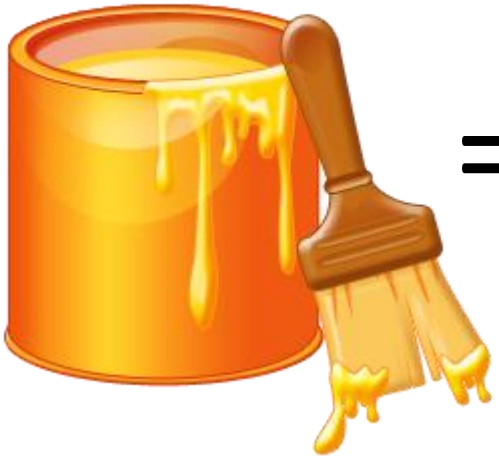
Qu'est-ce qu'un PRF?



Carbone Glass E

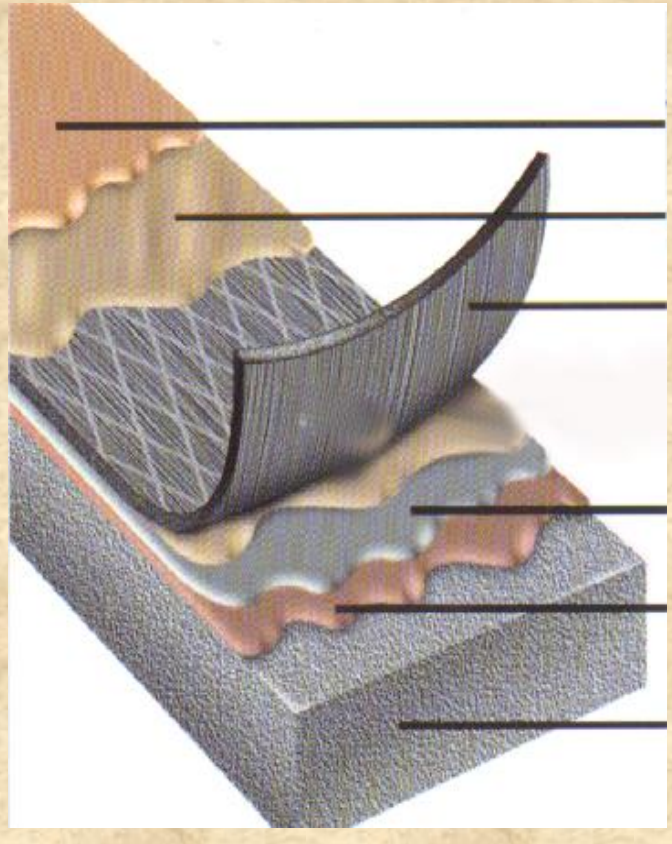
30% < %volume < 60%

+



= PRF

Qu'est-ce qu'un PRF?



protection

Couche d'imprégnation

fibres

Couche d'imprégnation

Primaire

Support en béton

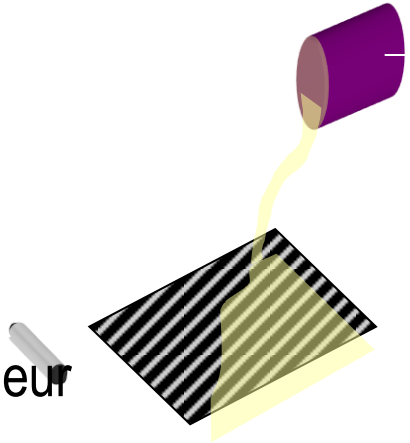
Doc. Hamkuk ind.

PRF stratifié au contact

Utilisation d'un tissus souple

Imprégnation du tissus et du support

Collage sur le support



Polymère joue le rôle de l'adhésif et de résine d'imprégnation

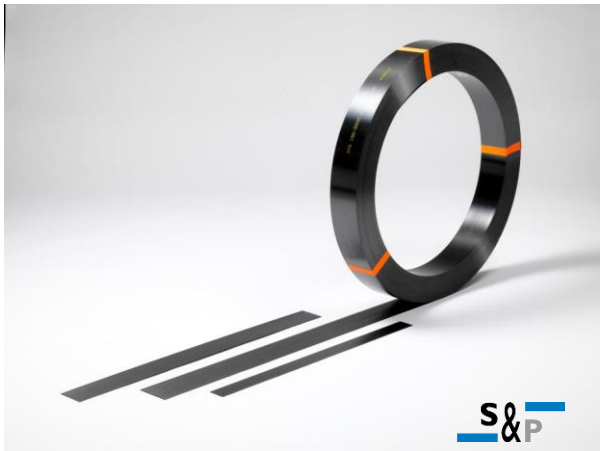
PRF pultrudé collé

Utilisation de lamelle pultrudés

Utilisation d'une colle époxy chargée

Collage sur support béton

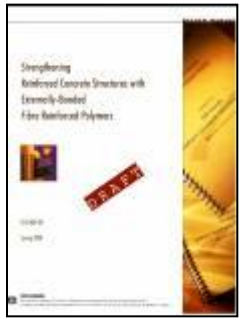
Peu flexible, pour support plan

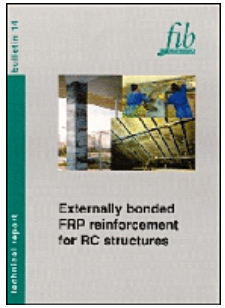


PLAN

- L'historique
- Les différents dispositifs (tissus, lamelles etc…)
- **Les avis techniques**
- Les principes de fonctionnement
- Comment peut-on s'assurer de la bonne efficacité du dispositif

Recommandations et Règles de calcul existantes





Recommandations AFGC

- Renforcement de poutres (flexion, effort tranchant)
- Renforcement de poteaux
- Renforcement de dalles

Recommandations AFGC

AFGC — RENFORCEMENTS PARASISMIQUES DE STRUCTURES BETON ARME PAR MATERIAUX COMPOSITES

Composition du groupe de travail

Coordination du groupe : Emmanuel FERRIER (LGCIE – Université LYON 1)
Et Marc QUIERTANT (IFSTTAR)

Secrétaire technique : Laurent MICHEL (LGCIE – Université LYON 1)

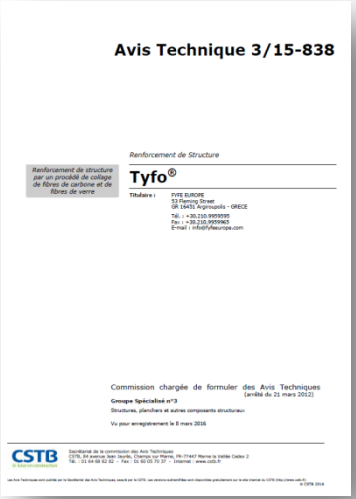
Participants ayant contribué à l'élaboration du document technique :

ASHTARI	Nader	APAVE
BIGAUD	David	Université Angers
BLAISE-MARTIN	Xavier	MAPEI
BUCHIN-ROULIE	Vanessa	Freyssinet
CASTELLAN	Bernard	AC45
CHATAIGNER	Sylvain	IFSTTAR
DESPREZ	Cédric	IFSTTAR
DEVEAUD	Jean-Paul	SETRA/CTOA/DGOI
DUBREUIL	Julien	NUVIA-TS
DUTHOIT	Alexis	[illegible]
FECHNER	Jean-Pierre	CEMEX
FERRIER	Emmanuel	Université LYON1
FORET	Gilles	IFSTTAR
GERAUD	Vincent	VSL France
GICQUEL	Yvon	Sika France
GRACIA	Marie	Freyssinet
HENAULT	Jean-Marc	EDF
KAZANTZIDOU-FIRTINIDOU	Danai	FYFE Europe SA
LACAUX	Emmanuel	Vinci construction
LI	Alex	Université Reims
LITIQUE	Marc	Fibrwrap Construction France
MARNAC	Sandrine	CETE SO/DALETT/OAB
MERCIER	Julien	Freyssinet
MICHEL	Laurent	Université LYON1
PAILLE	Jean-Marie	Socotec
PERIT	Victor	NUVIA-TS
QUIERTANT	Marc	IFSTTAR
RASSELET	Johannès	BOUYGUES Construction
RIVART	Vincent	SPPM
RIZARD	Fabien	SETRA/CTOA/DGOI
SADONE	Raphaëlle	CETE Lyon/DLL/OASMD/DOA
SIMON	Alain	Eiffage TP
TAILLADE	Frédéric	IFSTTAR
TESSIER	Marc	Fibrwrap Construction
THEVENIN	Pierre-Eric	Bureau Veritas
VIVIER	Aurélie	Systra

Version provisoire

36 personnes, 111 pages

Avis Technique


Avis Technique 3/15-838

Renforcement de Structure

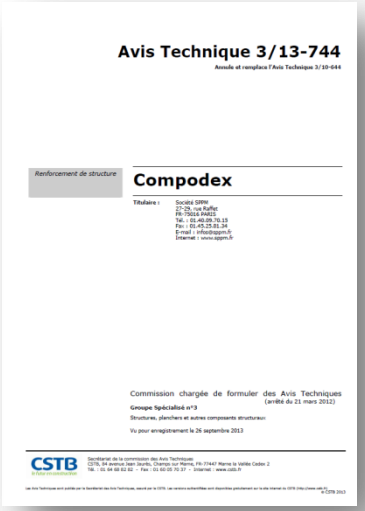
Renforcement de structure par un procédé de collage de fibres de carbone et de fibres de verre

Tyfo®

Titulaire : FYFE EUROPE
53 Fleming Street
GR 16451 Argiroupolis - GRECE
Tél. : +30.210.9959595
Fax : +30.210.9959965
E-mail : info@fyfeeurope.com

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 21 mars 2012)
Groupe Spécialisé n°3
Structures, planchers et autres composants structuraux
Vu pour enregistrement le 8 mars 2016

CSTB


Avis Technique 3/13-744

Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-644

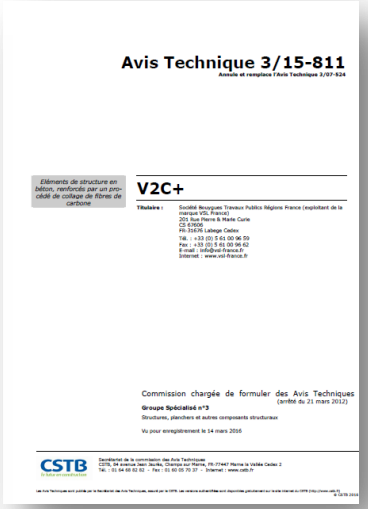
Renforcement de structure

Compodex

Titulaire : Société SIKA
27-29, rue Raffet
FR-75016 PARIS
Tél. : 01.40.09.70.15
Fax : 01.45.25.81.34
E-mail : info@sikaparis.fr
Internet : www.sikaparis.fr

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 21 mars 2012)
Groupe Spécialisé n°3
Structures, planchers et autres composants structuraux
Vu pour enregistrement le 26 septembre 2013

CSTB


Avis Technique 3/15-811

Annule et remplace l'Avis Technique 3/07-624

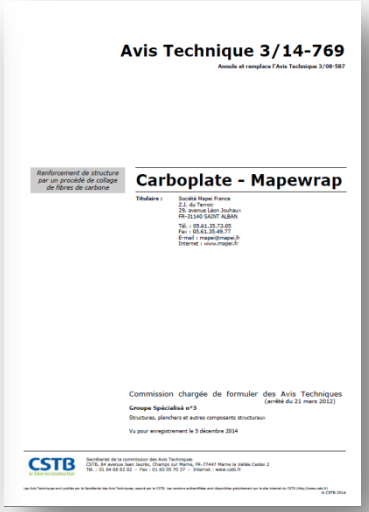
Éléments de structure en béton, renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone

V2C+

Titulaire : Société Bouygues Travaux Publics Régions France (exploitant de la marque VSL France)
205 Rue Pierre & Marie Curie
CS 67606
FR-31676 Labège Cedex
Tél. : +33 (0) 5 61 00 96 59
Fax : +33 (0) 5 61 00 96 62
E-mail : vsl@vsl-france.fr
Internet : www.vsl-france.fr

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 21 mars 2012)
Groupe Spécialisé n°3
Structures, planchers et autres composants structuraux
Vu pour enregistrement le 14 mars 2016

CSTB


Avis Technique 3/14-769

Annule et remplace l'Avis Technique 3/08-587

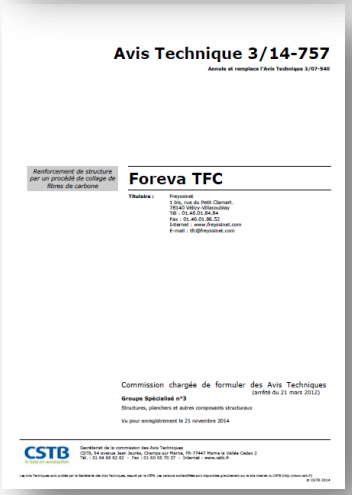
Renforcement de structure par un procédé de collage de fibres de carbone

Carboplate - Mapewrap

Titulaire : Société Mapei France
2.2, du Tarnet
29, avenue Léon Jouhaux
FR-31140 SAINT ALBAN
Tél. : 05.61.35.73.05
Fax : 05.61.35.48.77
E-mail : mapei@mapei.fr
Internet : www.mapei.fr

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 21 mars 2012)
Groupe Spécialisé n°3
Structures, planchers et autres composants structuraux
Vu pour enregistrement le 5 décembre 2014

CSTB


Avis Technique 3/14-757

Annule et remplace l'Avis Technique 3/07-540

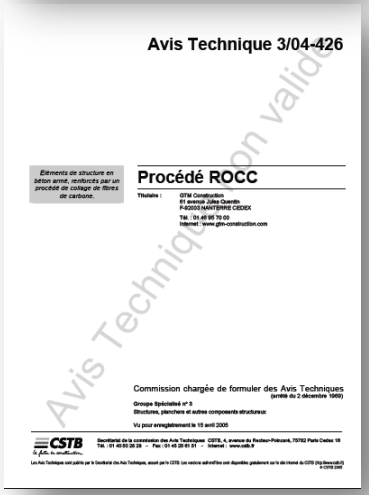
Renforcement de structure par un procédé de collage de fibres de carbone

Foreva TFC

Titulaire : Freyssinet
1 bis, rue du Petit Clamart
78140 Vélizy-Villacoublay
Tél. : 01.46.01.84.84
Fax : 01.46.01.96.52
Internet : www.freyssinet.com
E-mail : tfc@freyssinet.com

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 21 mars 2012)
Groupe Spécialisé n°3
Structures, planchers et autres composants structuraux
Vu pour enregistrement le 21 novembre 2014

CSTB


Avis Technique 3/04-426

Éléments de structure en béton armé, renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone.

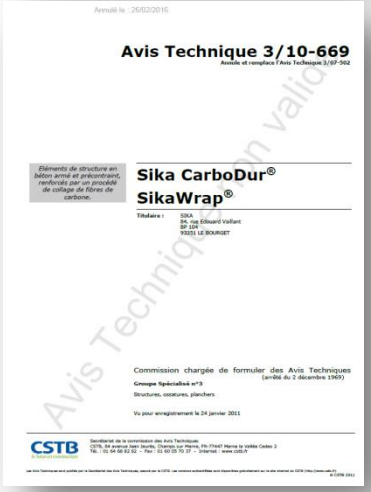
Procédé ROCC

Titulaire : GTM Construction
61 avenue Jules Quentin
F-92000 NANTERRE CEDEX
Tél. : 01.49 95 70 00
Internet : www.gtm-construction.com

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 2 décembre 1969)
Groupe Spécialisé n° 3
Structures, planchers et autres composants structuraux
Vu pour enregistrement le 15 avril 2005

CSTB

Avis Technique non valide


Annulé le : 26/02/2016

Avis Technique 3/10-669

Annule et remplace l'Avis Technique 3/07-562

Éléments de structure en béton armé et précontraint, renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone.

Sika CarboDur®
SikaWrap®

Titulaire : SIKA
84, rue Edouard Vaillant
BP 12
93350 LE BOURGET

Commission chargée de formuler des Avis Techniques (arrêté du 2 décembre 1969)
Groupe Spécialisé n°3
Structures, ossatures, planchers
Vu pour enregistrement le 24 janvier 2011

CSTB

Avis Technique non valide

Avis Technique

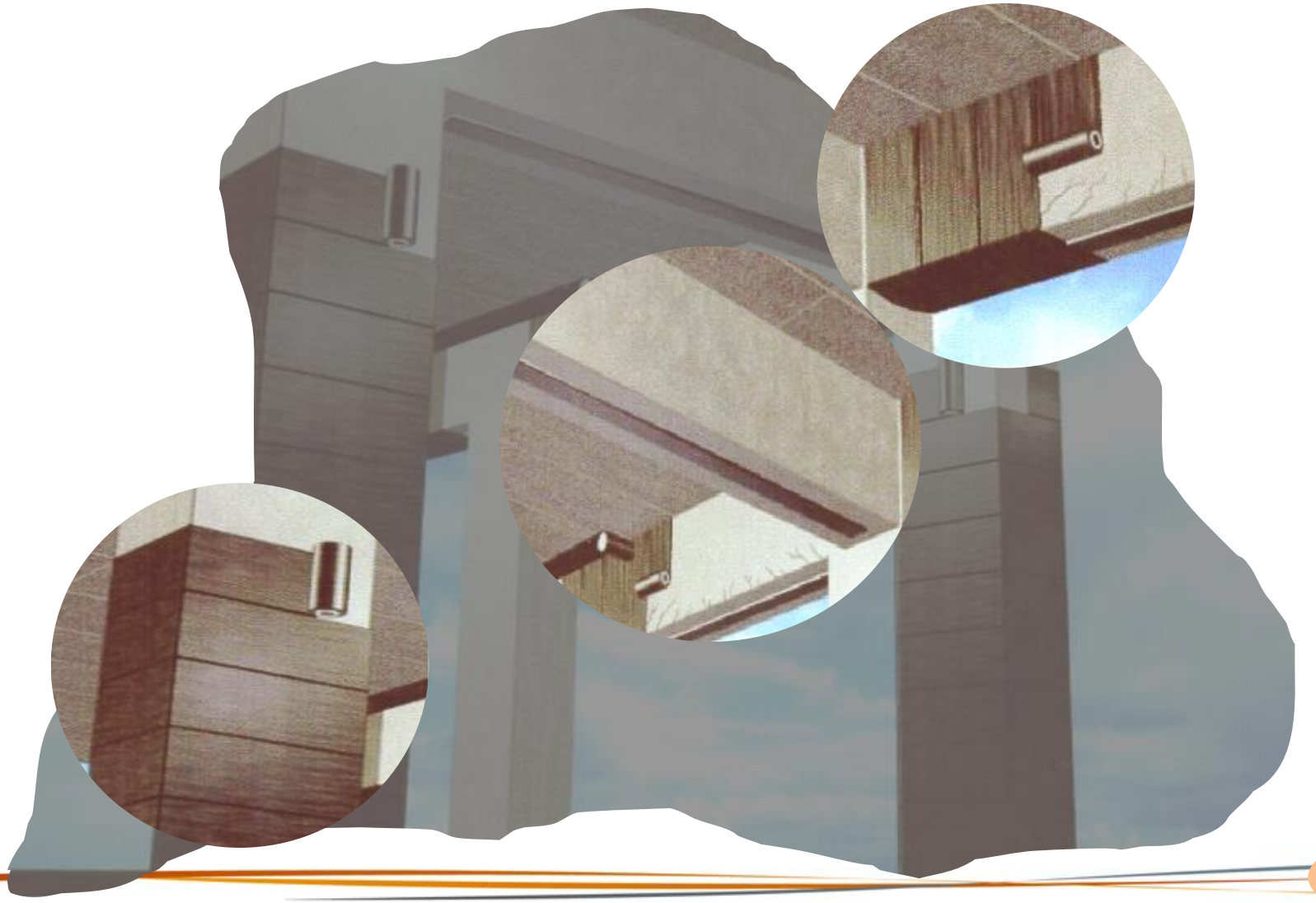
Justification expérimentale

- Interface composite/composite (tissus ou lamelles en recouvrement) : qualification expérimentale suivant recommandations AFGC de Février 2011 – *élément obligatoire, sauf si le recouvrement des composites n'est pas visé*
  - Tenue au délaminage en flexion
  - Tenue au délaminage par cisaillement
- Interface composite/support : qualification expérimentale suivant recommandations AFGC de Février 2011 – *élément obligatoire, sauf si l'Avis Technique vise uniquement le cerclage des éléments*
  - Longueur d'ancrage expérimentale $l_{anc,exp}$
  - Loi de comportement en cisaillement
  - Résistance ultime de cisaillement τad,u (AFGC : Essai à double recouvrement **ou** essai à simple recouvrement)
  - Résistance par adhérence en traction directe (Minimum : 1.5MPa) : adhérence sur support visé (béton sec, béton humide, *en fonction du domaine d'emploi visé*…).
- Interface composite/dispositifs d'ancrage (*le cas échéant*) : qualification expérimentale suivant recommandations AFGC de Février 2011
  - Tenue au délaminage en flexion
  - Tenue au délaminage par cisaillement
- Dispositifs d'ancrage spécifiques :
  - -Détermination des performances mécaniques par qualifications expérimentales.
- Résine de collage des lamelles ou plats et résine d'imprégnation des tissus :
  - Température de transition vitreuse Tg (Analyse calorimétrique suivant NF EN 12614)
  - DPU
  - Coefficient de dilatation thermique
  - Densité
  - Dureté Shore

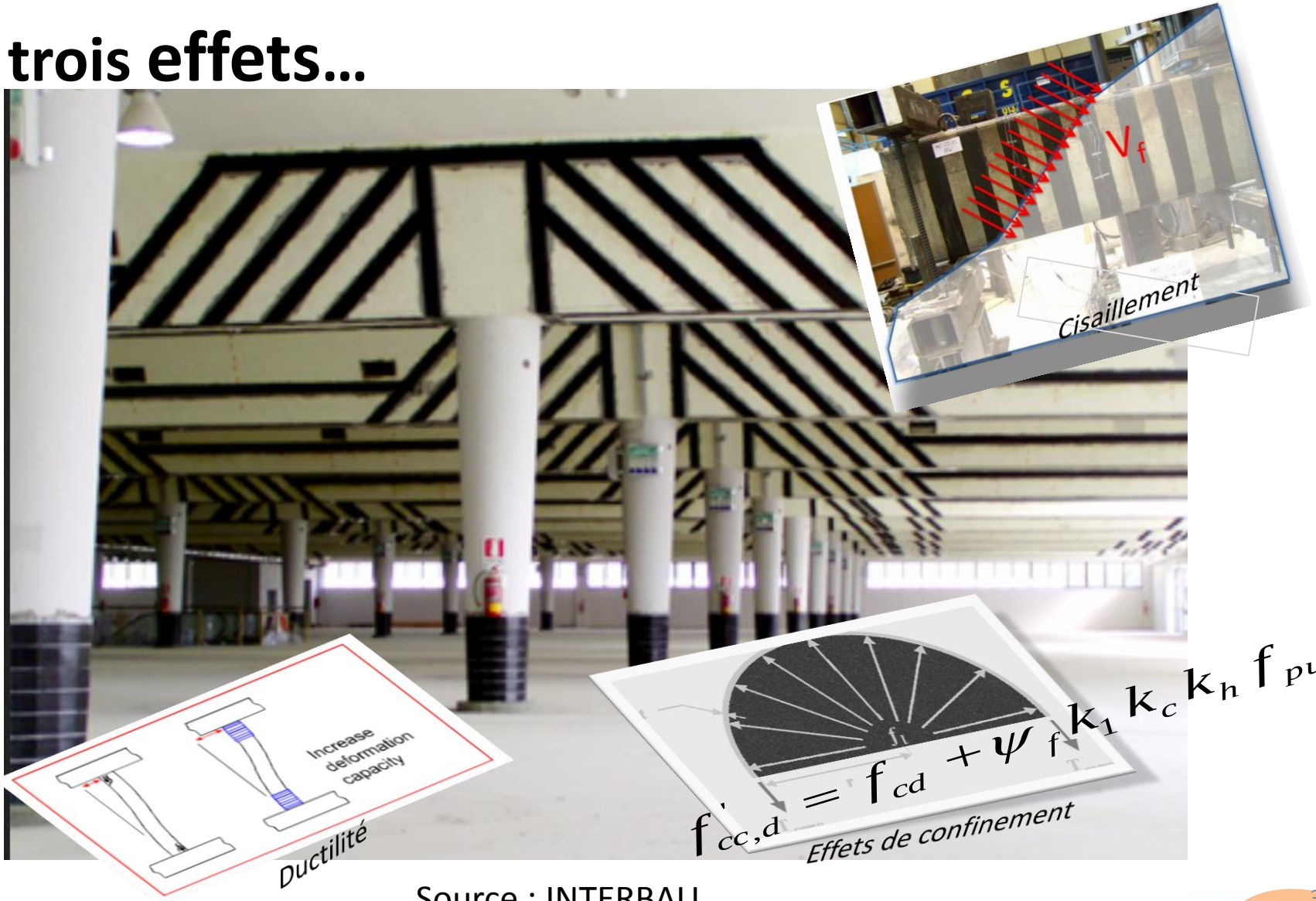
PLAN

- L'historique
- Les différents dispositifs (tissus, lamelles etc…)
- Les avis techniques
- **Les principes de fonctionnement**
- Comment peut-on s'assurer de la bonne efficacité du dispositif

FRP, trois effets…

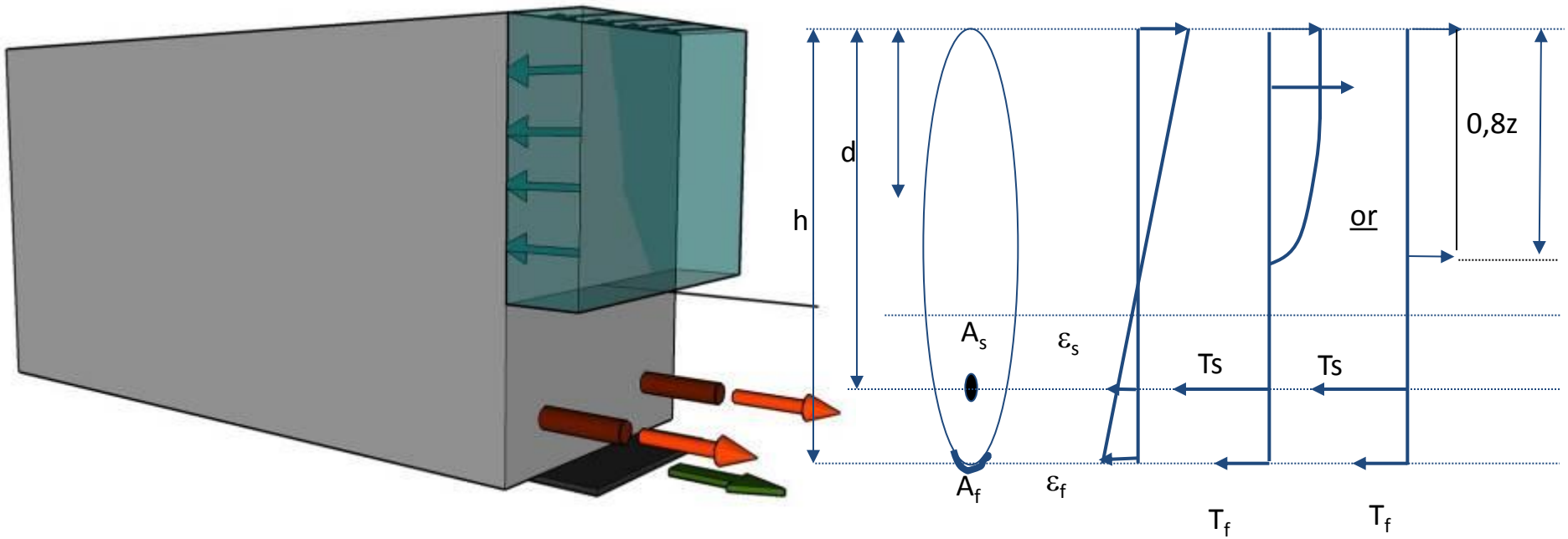


FRP, trois effets…



Source : INTERBAU

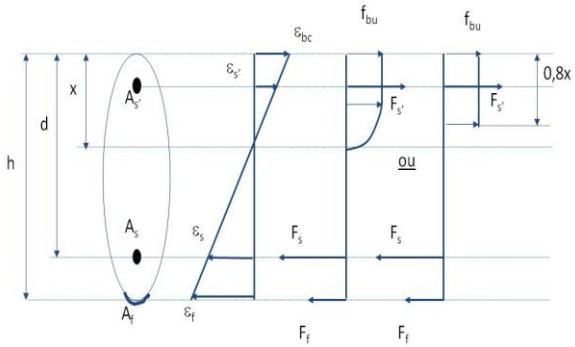
Effet 1 : augmentation de la résistance à la flexion

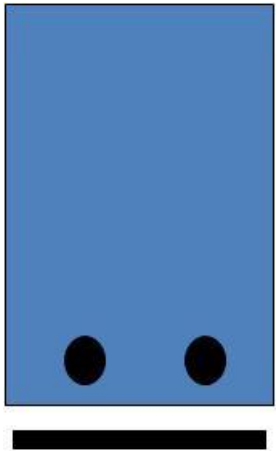


L'équilibre du moment fléchissant interne par rapport à un moment externe appliqué:

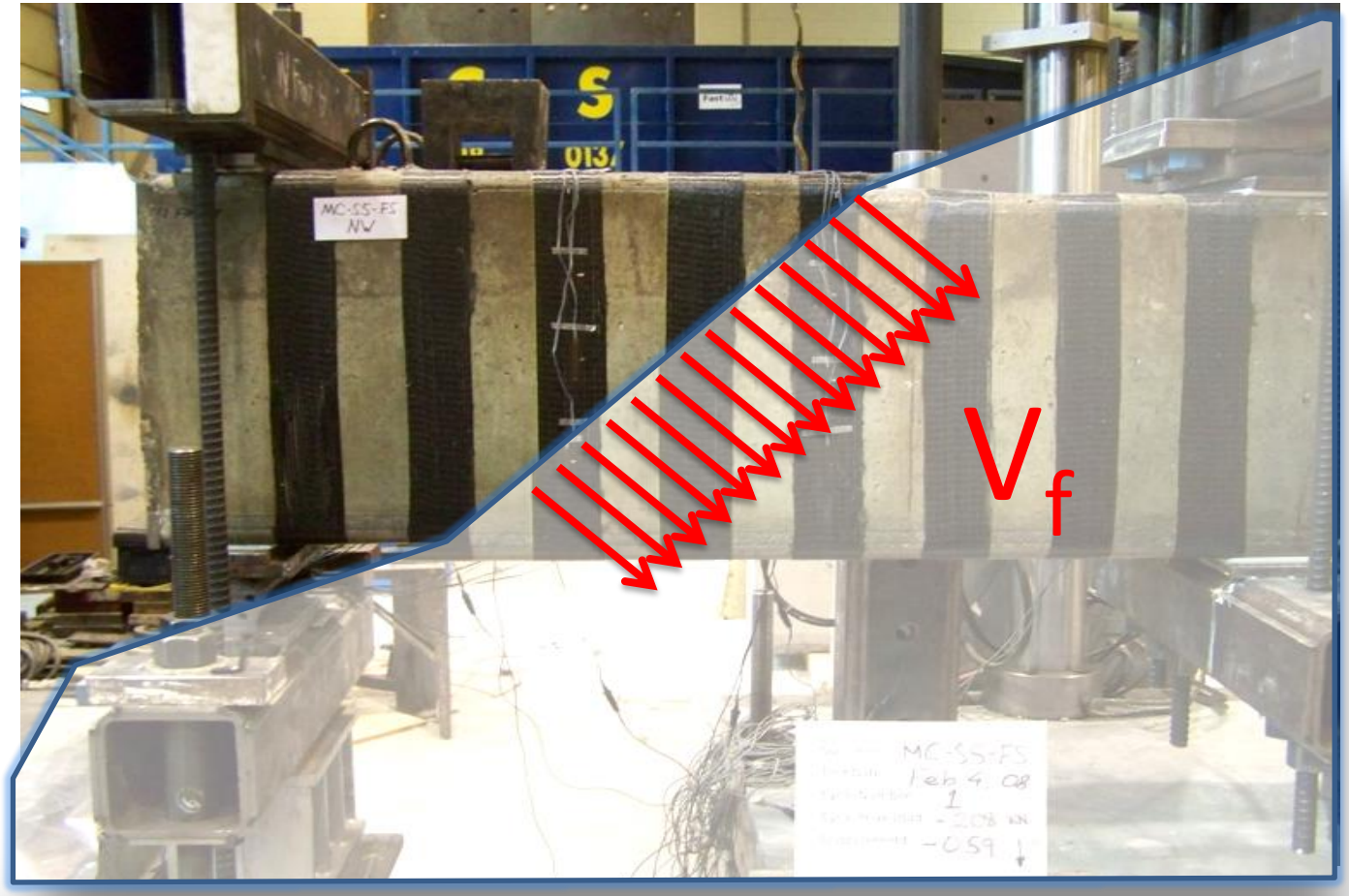
Moment interne supplémentaires grâce au PRF

Effet 1 : augmentation de la résistance à la flexion

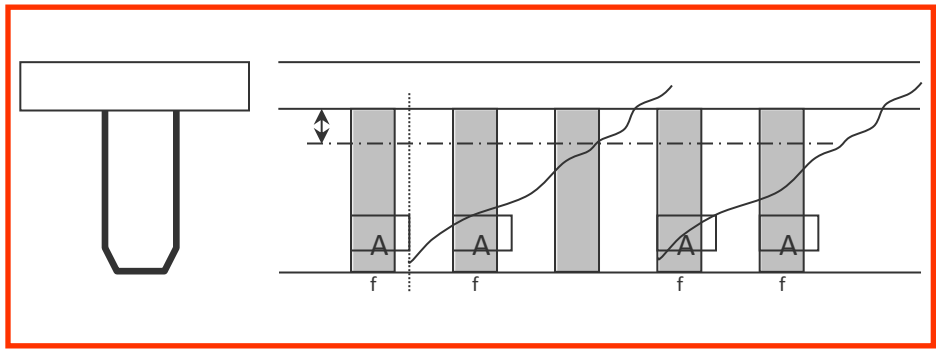


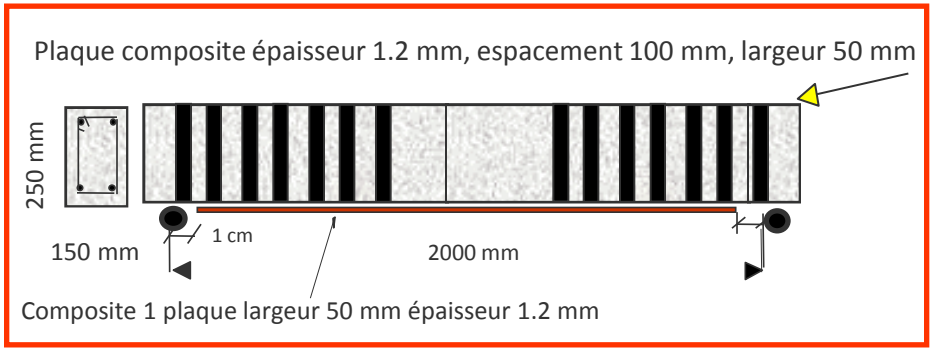


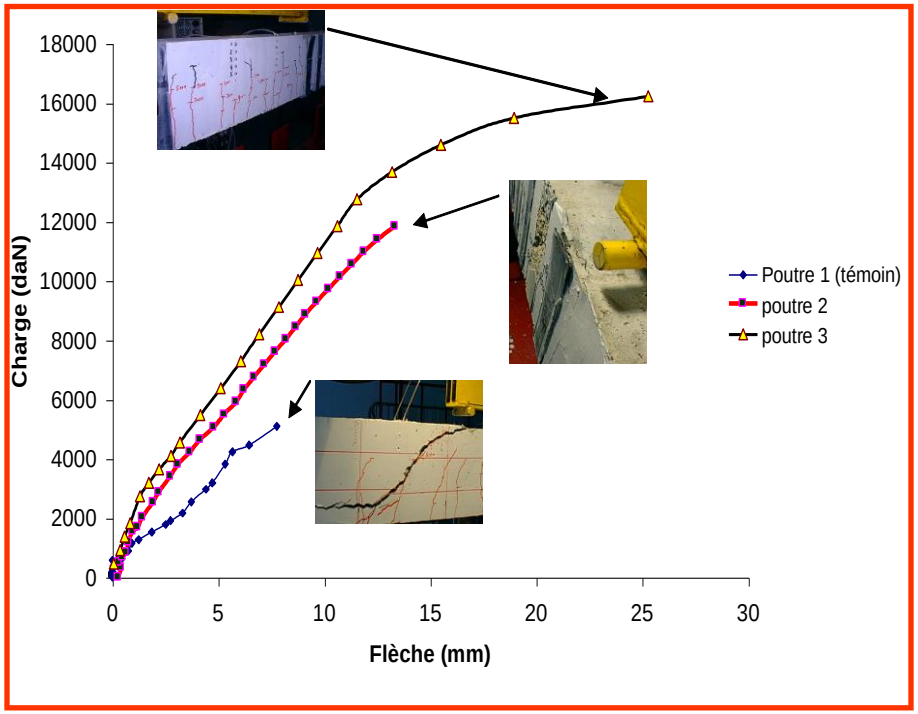
Effet 2 : augmentation de la résistance au cisaillement



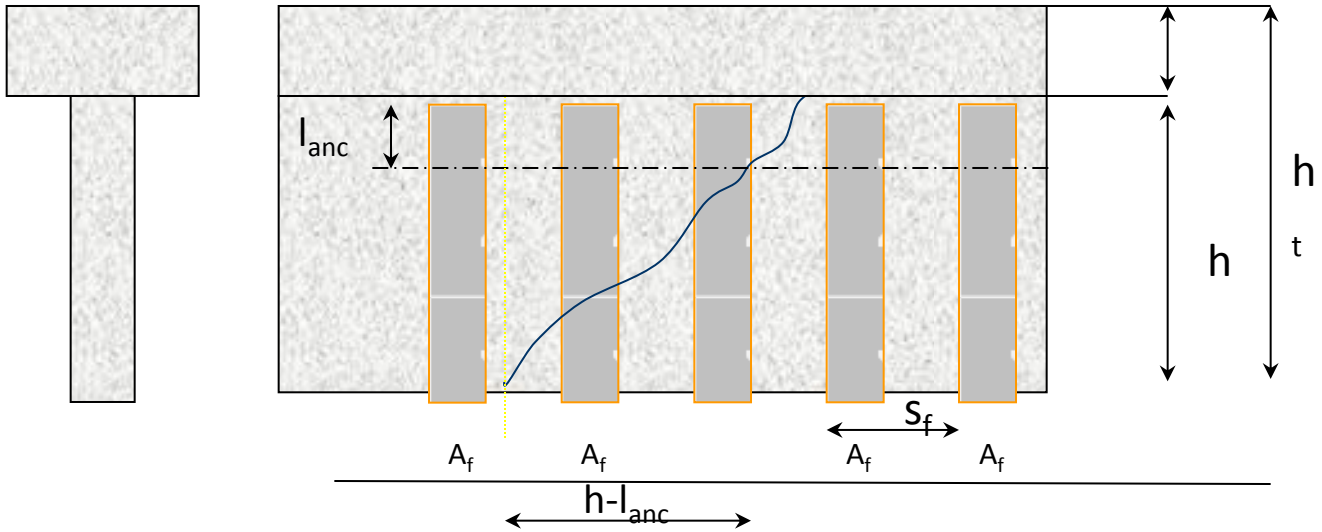
Efficacité des renforts composites dans le cas de l'effort tranchant







Efficacité des renforts composites dans le cas de l'effort tranchant



Equation Equilibre : $V_u = V_f + (Vs)$

La partie supérieur du renfort textile n'est pas prise en compte

$$V_s = \left[\frac{A_a^f}{s} \cdot \frac{f_e^f}{\gamma} \cdot 0{,}9d \right] \qquad V_f = \frac{A_f f_f}{s \cdot \gamma} \cdot (h - l_{anc})$$

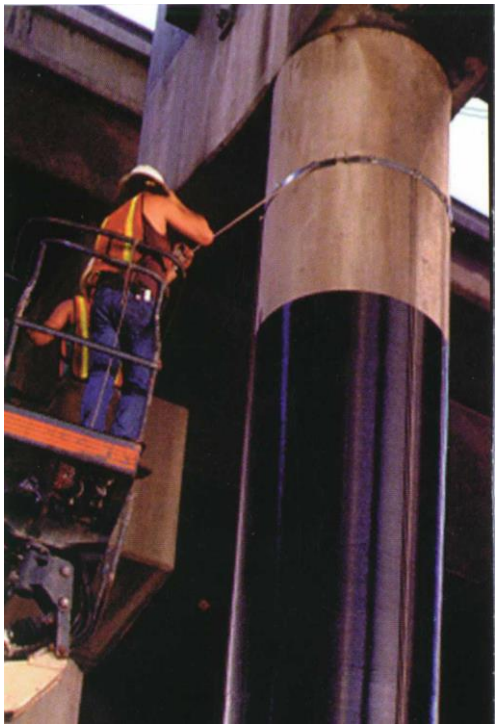
Conditions de fissuration, distance minimum entre deux renforts

$s_f < (h - l_{anc})$

CAS DE LA COMPRESSION

Renforcement vis-à-vis de sollicitations sismiques / Mise en conformité

Rupture d'une colonne lors d'un séisme
Taiwan, 21/9/1999



Renforcement par confinement
(compression & effort tranchant)

Renforcement par placage externe de PRF

Réparation de colonnes en B.A. par placage externe de composites [ISIS, 1997]

☞ **Aspect durabilité**

Pont d'étagement de Saint-Étienne-de-Bolton

Autoroute 10, été 1996

Renforcement par placage externe de PRF, méthode de calcul

BAEL

$$N_u \leq \alpha \left[\frac{A_b f'_{co}}{0.9\gamma_b} + A_s \frac{f_y}{\gamma_s} \right]$$

f'_{co} : Résistance ultime du béton
f_y : Limite élastique de l'acier
A_b : Section de béton
A_s : Section d'acier
γ_b : Coefficient de sécurité béton
γ_s : Coefficient de sécurité acier
α : Coef. de sécurité / flambement

Méthode proposée

$$N_u \leq \alpha \left[\frac{A_b f'_{cc}}{0.9\gamma_b} + A_s \frac{f_y}{\gamma_s} \right]$$

f'_{cc} *: Résistance ultime du béton confiné*

Prise en compte d'une résistance ultime corrigée pour le béton

☞ Vérification à l'ELU

$$E_l = \frac{t \cdot n_p}{r} \cdot E_f$$ **Module de confinement**

$$f_{lu} = E_l \cdot \varepsilon_{fu}$$ **Pression de confinement**

$$I_c = \frac{f_{lu}}{f'_{co}}$$ **Indice de confinement**

f'_{co} **Résistance du béton**

$20 \le f'_{co} \le 50$ → $k_1 = 3.54$

$50 \le f'_{co} \le 200$ → $k_1 = \dfrac{9.5}{f'^{\,1/4}_{co}}$

$$f'_{cc} = \alpha_b f'_{co}\left(1 + k_1 \cdot \alpha_c \cdot I_c\right)$$

$$\alpha_b = 0.9$$
$$\alpha_c = 0.8$$

$$N_u \le \alpha\left[\frac{A_b f'_{cc}}{0.9\gamma_b} + A_s \frac{f_y}{\gamma_s}\right]$$

α_b : Coef. de performance béton

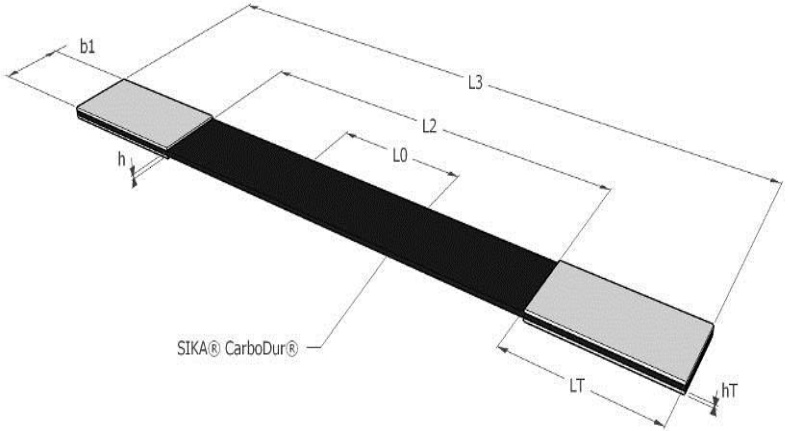
α_c : Coef. de performance composite

PLAN

- L'historique
- Les différents dispositifs (tissus, lamelles etc…)
- Les avis techniques
- Les principes de fonctionnement
- **Comment peut-on s'assurer de la bonne efficacité du dispositif**

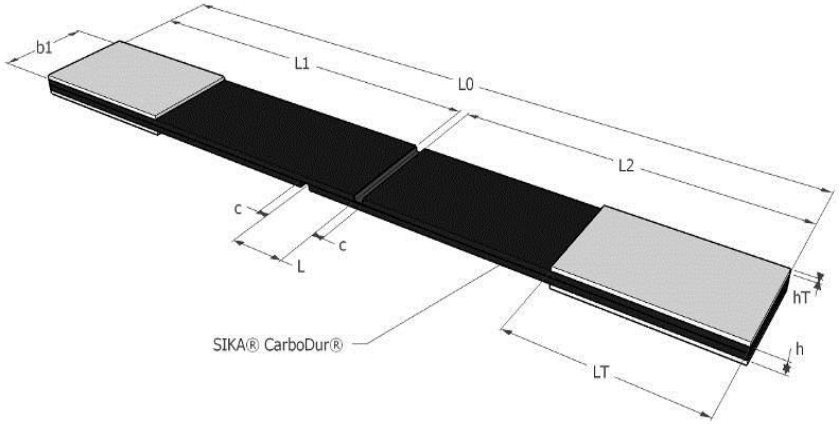
« …Sur du long terme, durabilité…? »

Les essais de traction ont été réalisées avec la norme européenne NF EN ISO 527-5 utilisé pour unidirectionnel polymère renforcé de fibres.



Designation	Size [mm]
L_3	250
L_2	150
b_1	15
L_0	50
h	1,2
L_T	50
h_T	1

La résistance au cisaillement interlaminaire est obtenue par la norme ASTM D3165 de. Le principe du test correspond à essai simple- cisaillement.



Designation	Size [mm]
L_0	190
L_1	101.3
L_2	86.2
L	12.7
h	2 x 1.2
b_1	25
c	2.5
h_T	1
L_T	40

Vieillissement accéléré normalisé

Les cycles d'une durée de 4h se composent de 4 phases définies comme suit :

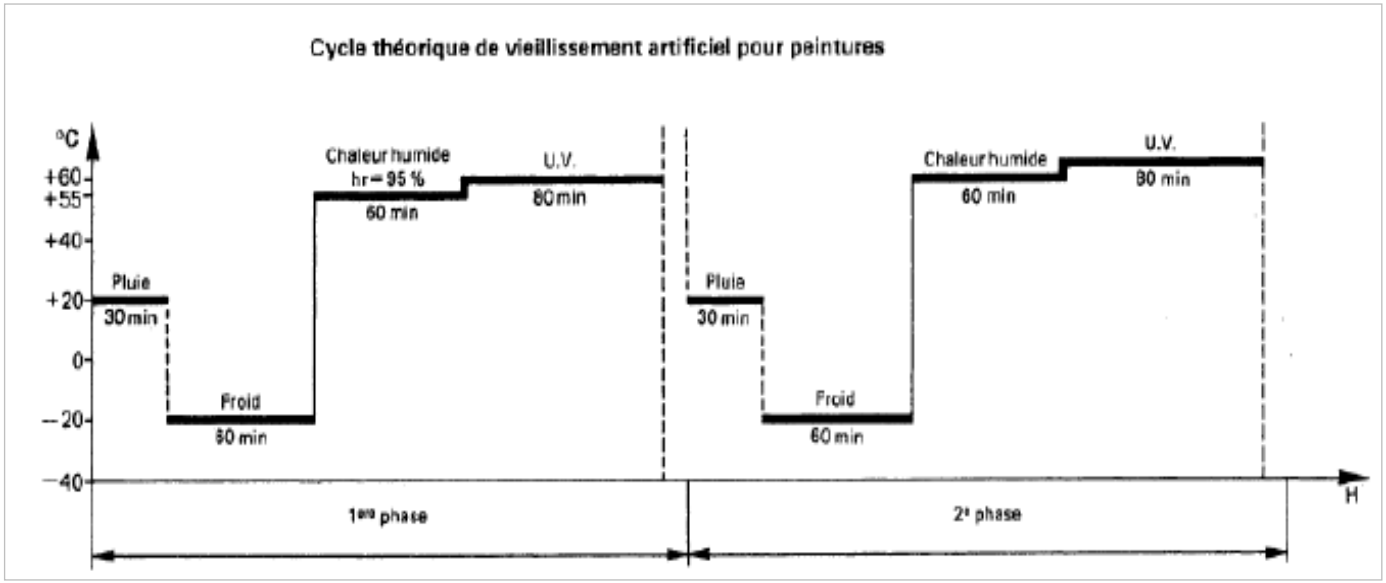
Exposition à l'eau en pluie artificielle (30 min) : L'eau utilisée est de l'eau déminéralisée à un pH de 7 ±0,2 et une température de 20°C ± 5°C.

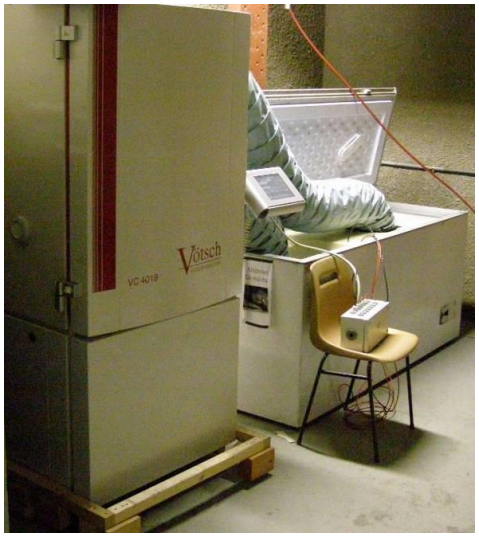
Exposition au froid (1h) : Les éprouvettes sont soumises à une température de -20°C ± 2°C.

Exposition à la chaleur et à l'humidité (1h) : Les éprouvettes sont soumises à une ambiance d'une température de 55°C ± 2°C et une humidité relative de 95% ± 5%.

Exposition à la chaleur sèche et au rayonnement actinique (1h20) : L'enceinte est maintenue à une température de 60°C ± 2°C et une humidité relative de 20% ± 5%.

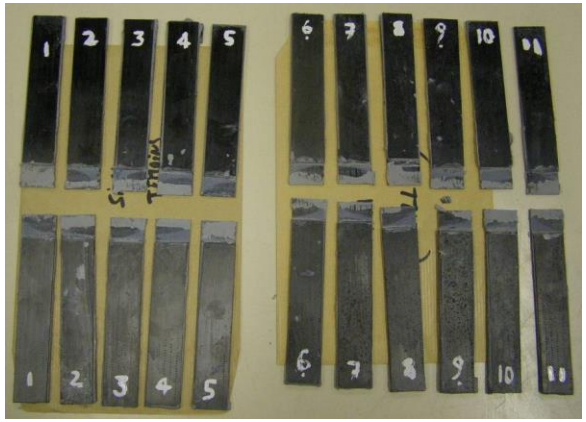
Une pause de 10 min permet à l'enceinte de revenir aux conditions initiales.





Vieillissement accéléré normalisé

	f_f [MPa]	E_f [MPa]
Sample before aging	3195	179781
Sample after aging	3158	172000
Comparison	**× 0,988**	**× 0,957**



	τ_{moy} [MPa]
Sample before aging	11.69
Sample after aging	14.15
Comparison	**× 1.21**

« …des retours d'expérience de 10 ans… »

Proceedings of the
International Workshop on
Aging of FRP Composites

National Transportation Safety Board Training Center
Ashburn, VA

September 25-26, 2013
Published March 25, 2014

Sponsored By

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration

Presented By

NSF
CFC Constructed Facilities Center
Center for Integration of Composites into Infrastructure
WestVirginiaUniversity

International Workshop on
Aging of FRP Composites

Final Report

Submitted to:
Exploratory Advanced Research Program
United States Department of Transportation - Federal Highway Administration
McLean, VA 22101

Submitted by:
Gangarao Hota, Ruifeng Liang and Mark Skidmore
West Virginia University
Constructed Facilities Center
Center for Integration of Composites into Infrastructure
Morgantown, WV 26506
Hota.Gangarao@mail.wvu.edu

Submitted on
February 17, 2014

International Workshop on Aging of FRP Composites
September 25-26, 2013 - Ashburn, VA

« …des retours d'expérience de 10 ans… »

International Workshop
Aging of Composites

Field Performance of FRP Repair Materials: The Need for More Data

Rebecca Atadero(ratadero@engr.colostate.edu)
Colorado State University, Fort Collins, CO, 80523

Group A - 12

Castlewood Canyon Bridge

- Built: 1946
- Major reconstruction: 2003
- Field evaluation of CFRP: 2011

Prior to repair the structure suffered from severe corrosion and spalling.

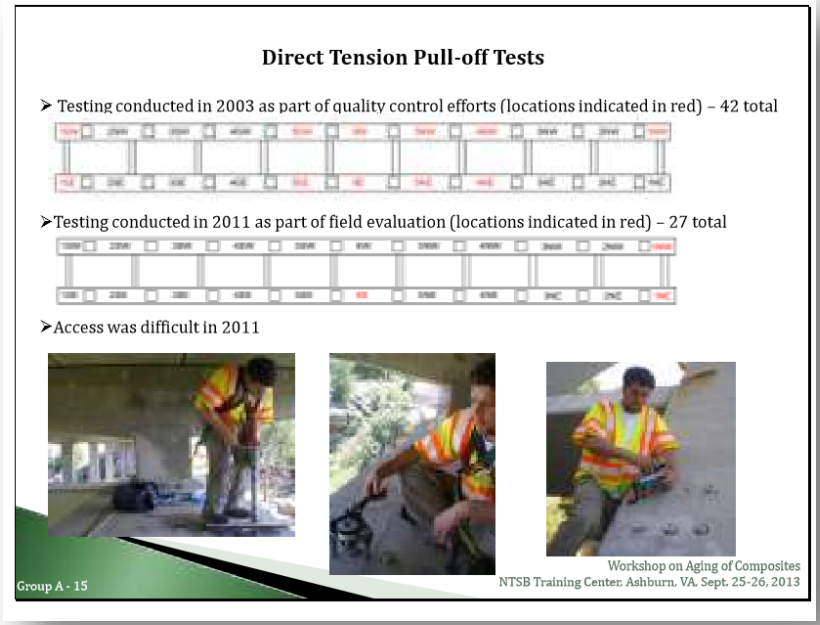
CFRP was applied longitudinally on the underside of the arch for flexure. The entire arch was then wrapped laterally, leaving some vents on the underside.

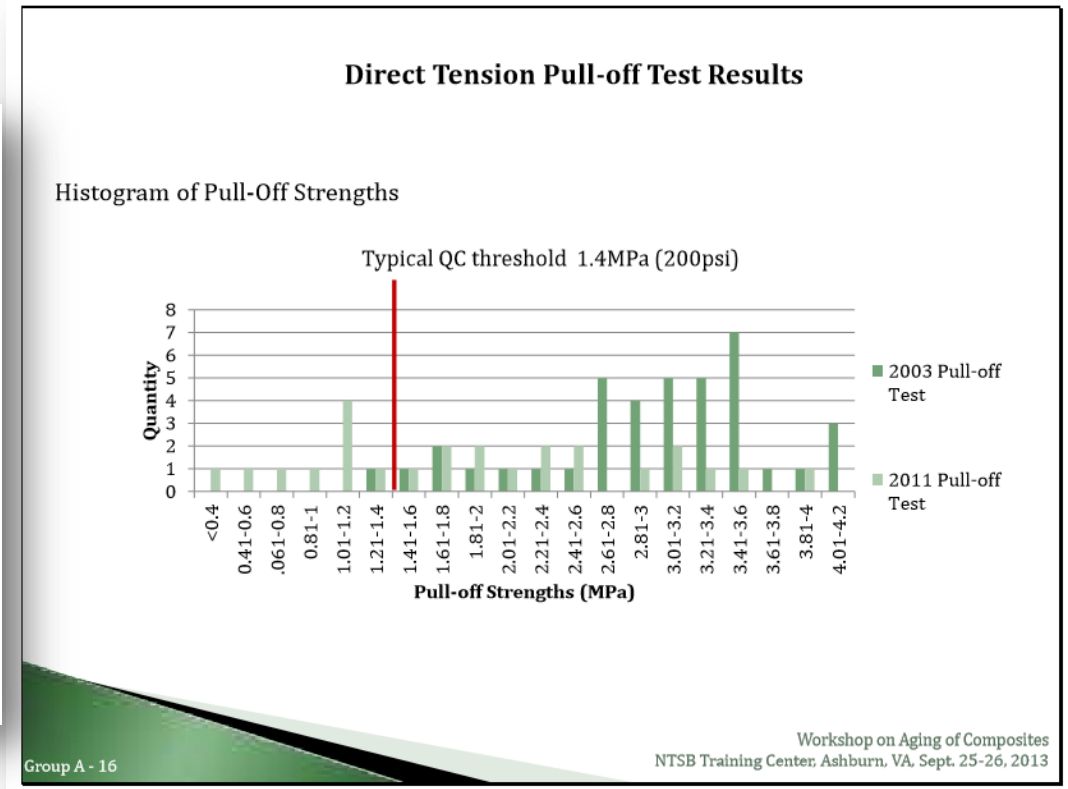
Photos by Mansour Mohseni, CDOT

Group A - 14

Workshop on Aging of Composites
NTSB Training Center, Ashburn, VA, Sept. 25-26, 2013

« …des retours d'expérience de 10 ans… »





« …Sur du court terme, contrôle de l'application…? »

Contrôle de l'état de surface du béton

Contrôle de l'application

Préparation de surface

Marouflage

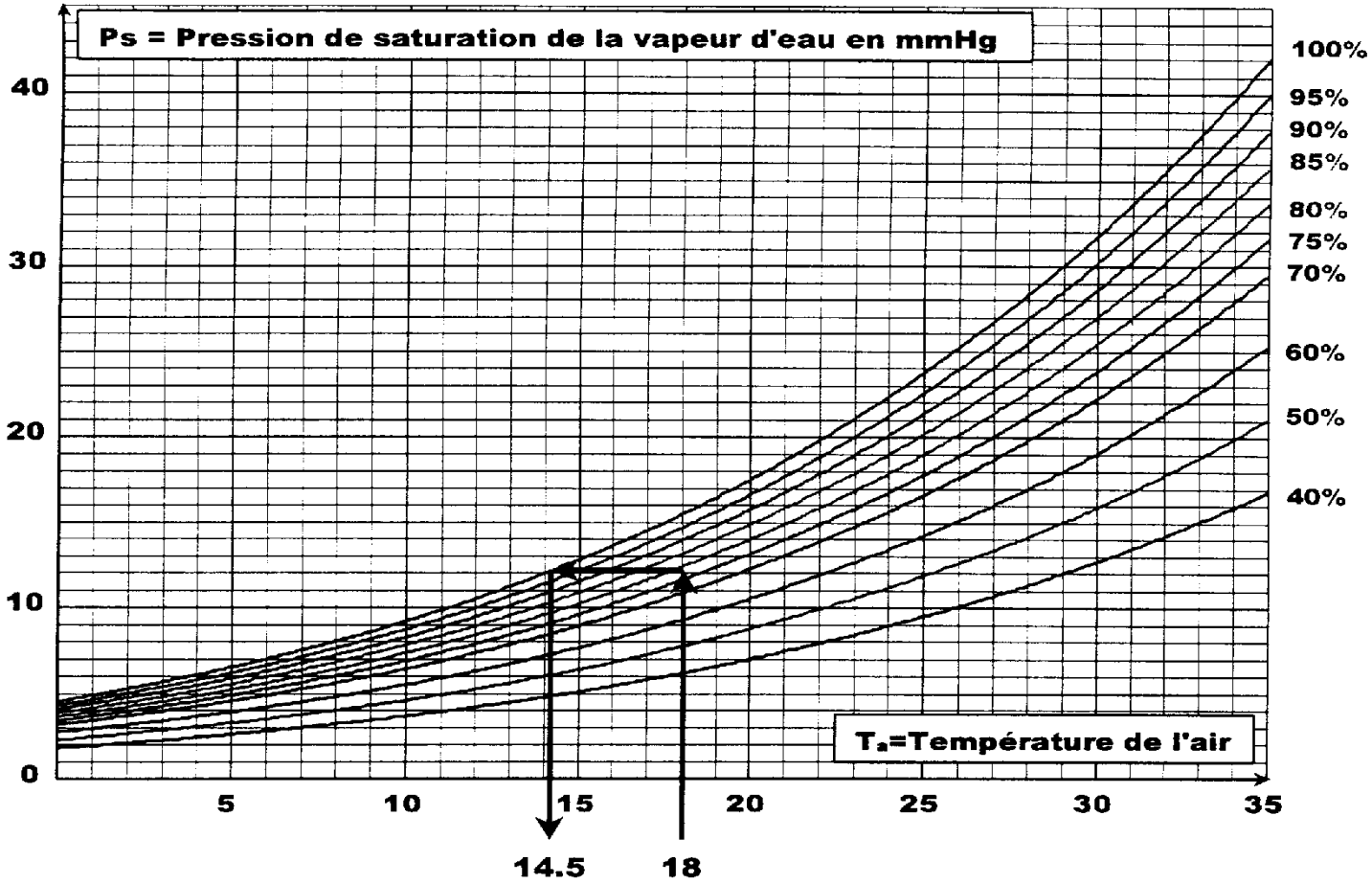
Contrôle de l'application

Ajout du durcisseur

Mélange de la résine

Contrôle de l'application

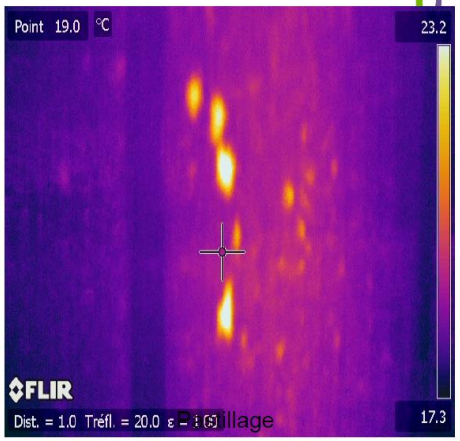
Contrôle de l'application



«…Contrôle in-situ… »

Contrôle du collage des composites collés par caméra IR

Chauffage du composite collé



Observation d'éventuels défauts de collage à la caméra IR

5 juin 2012 12

Equipe Ressource « Collage et Matériaux Composites » Equipe Recherche Associée « Collage Structural Matériaux Composites »

Christophe Aubagnac
Marjorie Rabasse

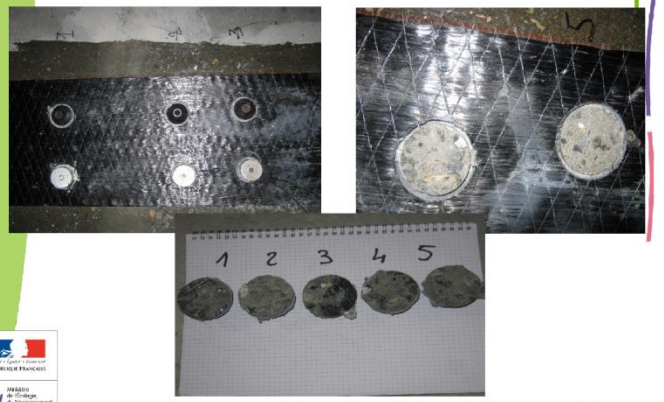
Unité Matériaux Structures
Collage Composites
CETE de Lyon - DL Autun

05 juin 2012

Présent pour l'avenir

Ministère de l'Ecologie, du Développement durable des Transports et du Logement

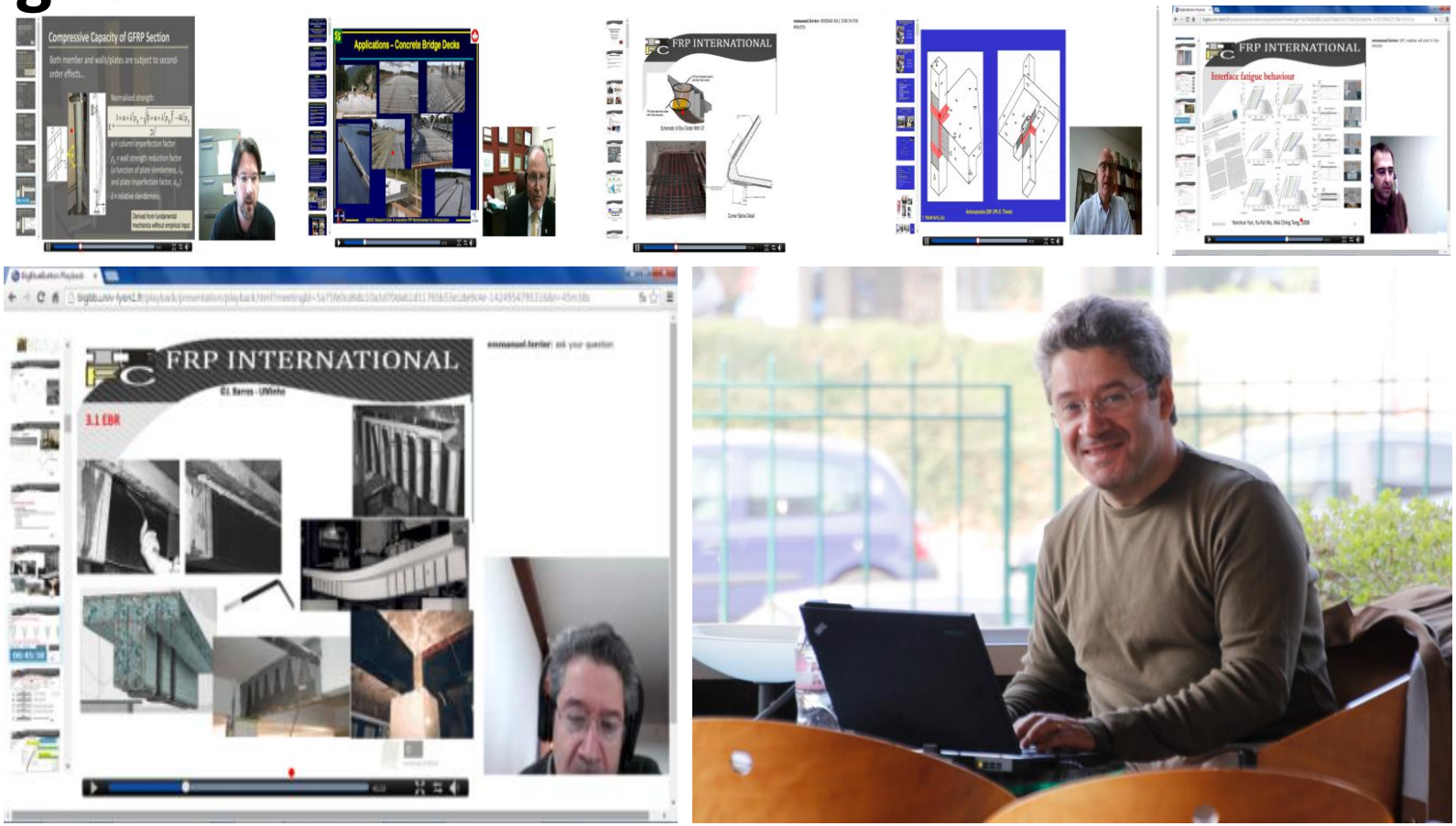
Essai de Pastillage (NF EN 1542)



5 juin 2012 13

« …Sur un moyen terme, formation des utilisateurs…? »

« …Former les ingénieurs de demain : séminaire en ligne… »



http://www.iifc-hq.org/iifc-free-webinars-on-the-use-of-frp-in-the-construction/

CONCLUSIONS

La lenteur du développement de la technologie est le résultat d'un certain nombre de raisons:

- absence de codes de conception;
- manque d'ingénieurs structures maitrisant l'utilisant des matériaux de PRF;
- manque de connaissances générales sur les propriétés des matériaux de PRF;
- un besoin d'innovation pas toujours en relation avec les préoccupations premières.

MERCI de votre attention…