

# INCIDENCE DE LA REGULATION DES COURS D'EAU

## SUR L'ASSISE DES OUVRAGES EN MACONNERIE



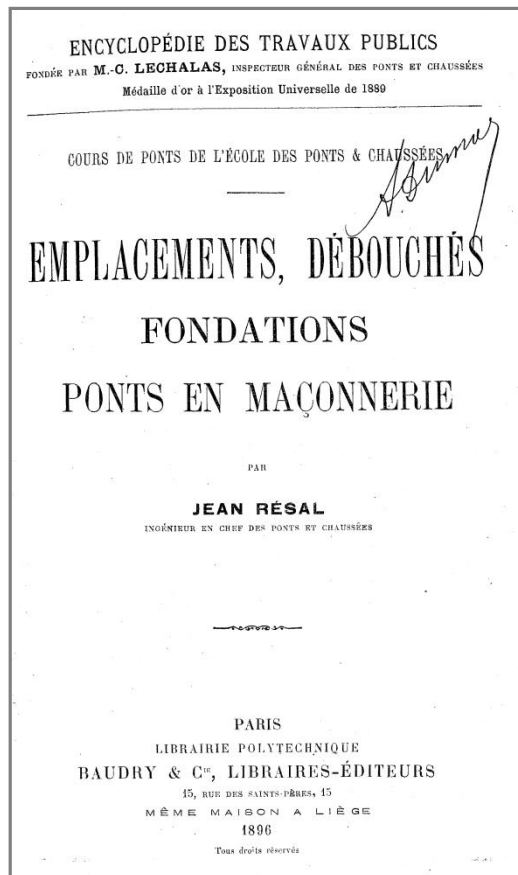
JEAN – PIERRE LEVILLAIN - INGENIEUR CONSEIL

## sommaire

- Fondations des ponts en maçonnerie,
- Rappels sur l'équilibre morphologique des rivières,
- L'agression par le prélèvement des sédiments,
- L'agression par le changement climatique,
- L'agression par les crues,
- L'agression par la suppression des seuils fixes,
- Les conséquences des agressions sur nos ouvrages,
- Les risques sur les fondations anciennes sur pieux bois,
- Quelles solutions pour nos ouvrages en maçonnerie ?

## Préambule :

*la pathologie affectant les fondations en bois en cas d'abaissement de la ligne d'eau est connue et caractéristique de ces fondations comme en témoigne l'extrait du cours de monsieur RÉSAL en 1896 :*



eût pu rester encore longtemps inconnue, et se terminer finalement par une catastrophe.

2<sup>o</sup> D'autre part, les bois de la plate-forme ne peuvent échapper à la pourriture et se conserver indéfiniment qu'à la condition d'être immergés en tout temps. Or, ils se trouvent placés à une faible profondeur au-dessous de l'étiage. Pour peu que ce niveau vienne à s'abaisser, par l'effet de causes naturelles, ou à la suite de travaux exécutés de main d'homme (page 8), la plate-forme pourra découvrir en été : sa charpente, alternativement sèche et mouillée, finira par pourrir et se désagréger ; un beau jour la pile s'effondrera dans le vide existant au-dessus des enrochements.

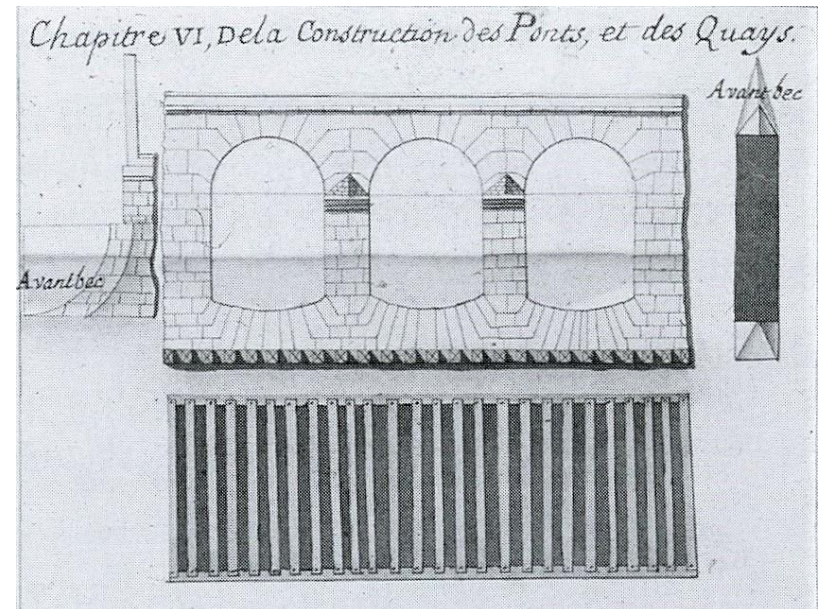
On conçoit que les ouvrages fondés dans ces conditions inspirent de légitimes inquiétudes à ceux qui ont la charge de

L'assise des fondations sur le rocher affleurant ou sur les alluvions compactes est recherchée au cours de tous les siècles. La mise à sec du site est obtenue par dérivation de la rivière, par des digues ou des batardeaux.



Des fondations sur enrochement sont exécutées au cours des XII<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> siècle et localement encore au XIX<sup>e</sup> siècle.

Les fondations sur radier général sont exécutées au cours des siècles du XI<sup>e</sup> jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle.

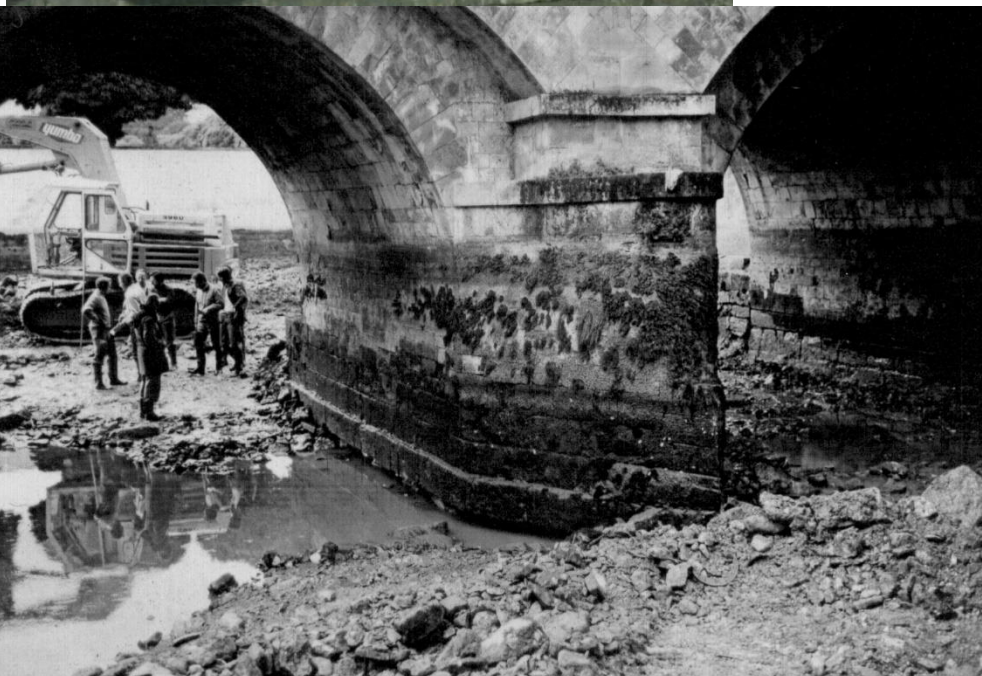
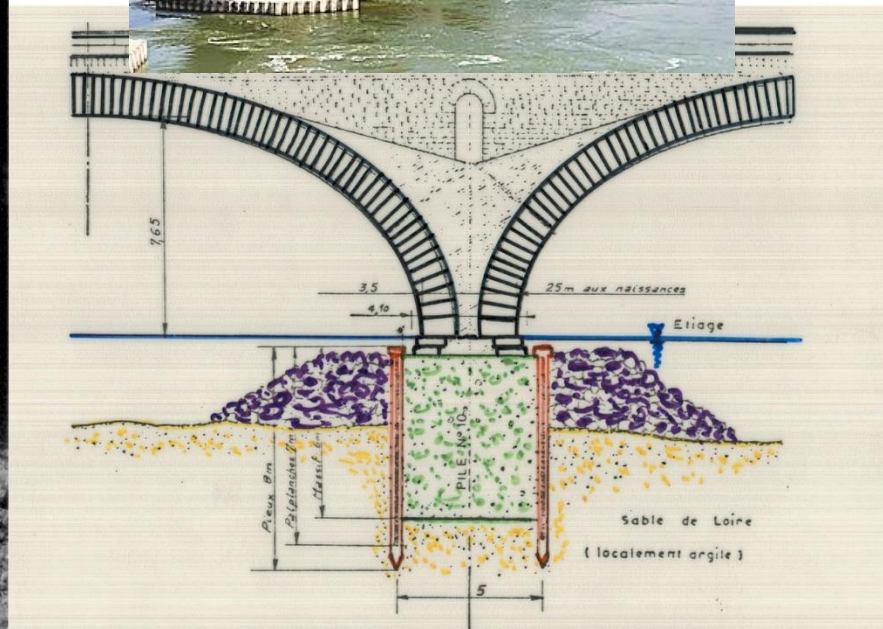


Fondation sur semelle de maçonnerie ou de béton de chaux hydraulique.  
Semelle de maçonnerie à toutes les périodes, semelle de béton de chaux hydraulique à partir de 1825 jusqu'au tout début du XX<sup>e</sup> siècle

Vieux pont de Niort sur la Sèvre Niortaise  
1645 -1747



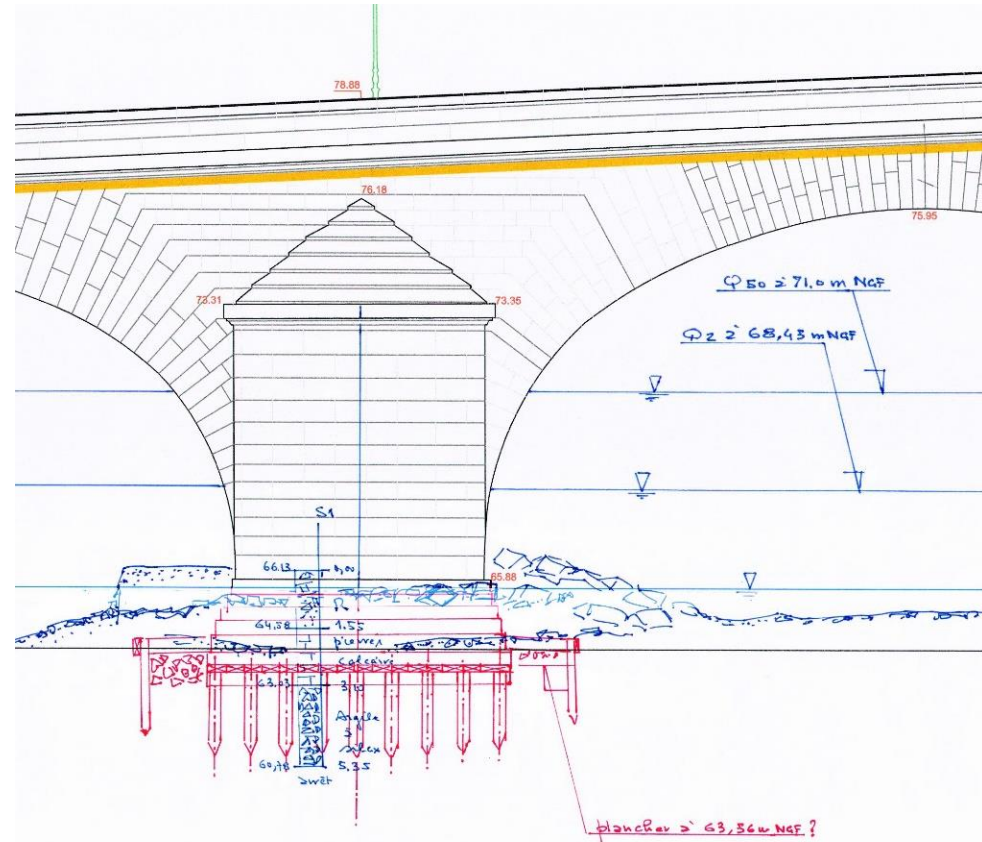
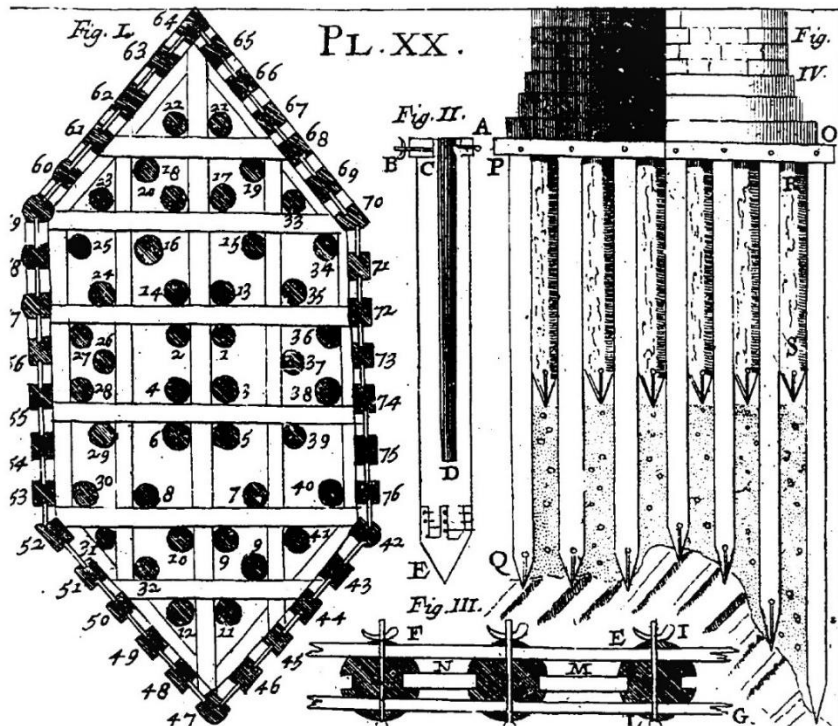
Fondation sur massif de béton de chaux immergé coulé à l'abri d'un rideau de palplanches bois.  
Pont Dumnacus sur la Loire aux Ponts - de - Cé  
1846 -1850

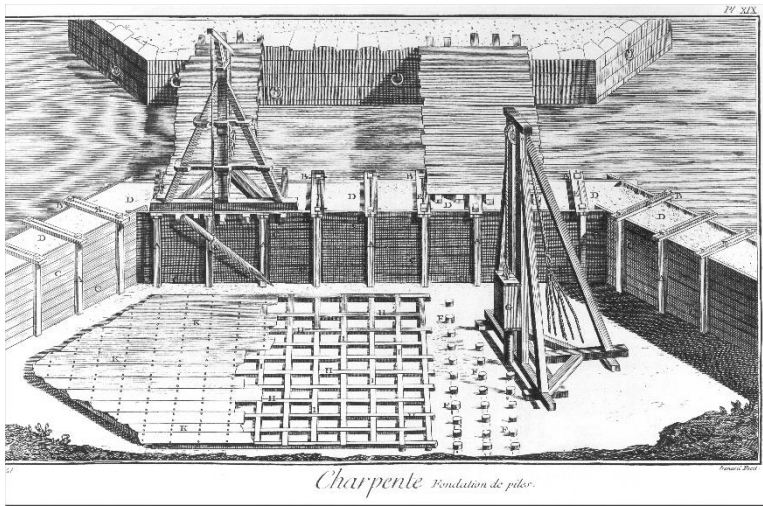


Fondations sur pilotis par le battage très dense de pilots courts. Sur le site mis à sec par des batardeaux le niveau de fondation est recherché sur le sol renforcé par le pilotis.

Période d'exécution : du XI<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> et encore au tout début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

Exemple : le pont de Blois datant de 1717 à 1724.





Fondations sur pilotis battus dans une enceinte étanche ou un site à sec naturellement.  
Période : du XVII° jusqu'au début du XIX° siècle.

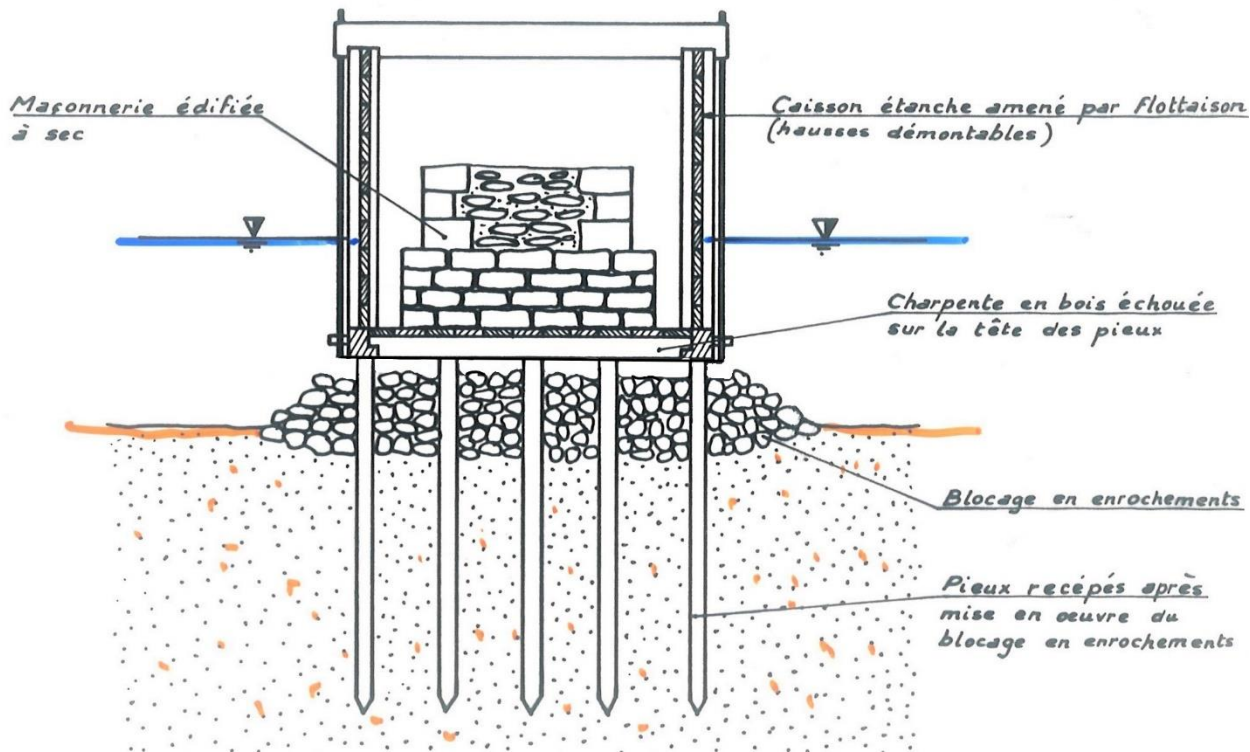
Exemple : le pont George V sur la Loire à Orléans,  
construction de 1751 à 1763.

Platelage reposant sur pieux bois, situé bas sous l'étiage voire encasté sous le toit des alluvions.



Fondation sur pilotis battus recépés à grande profondeur et maintenus latéralement par des enrochements ou un massif de contreventement en béton immergé puis construction des maçonneries dans un caisson étanche échoué avec ses hausses démontables.

Période de construction de 1755 à 1875



Exemple : le pont Cessart sur la Loire à Saumur (1755-1767) qui en est le prototype avec des pilotis recépés entre 2,50 m et 4,50 m sous l'étiage mais sans contreventement comme cela se fera au pont de Tours (1765-1778). Déversement des fondations de 4 arches de la rive droite en 1789 puis leur reconstruction en 1810.

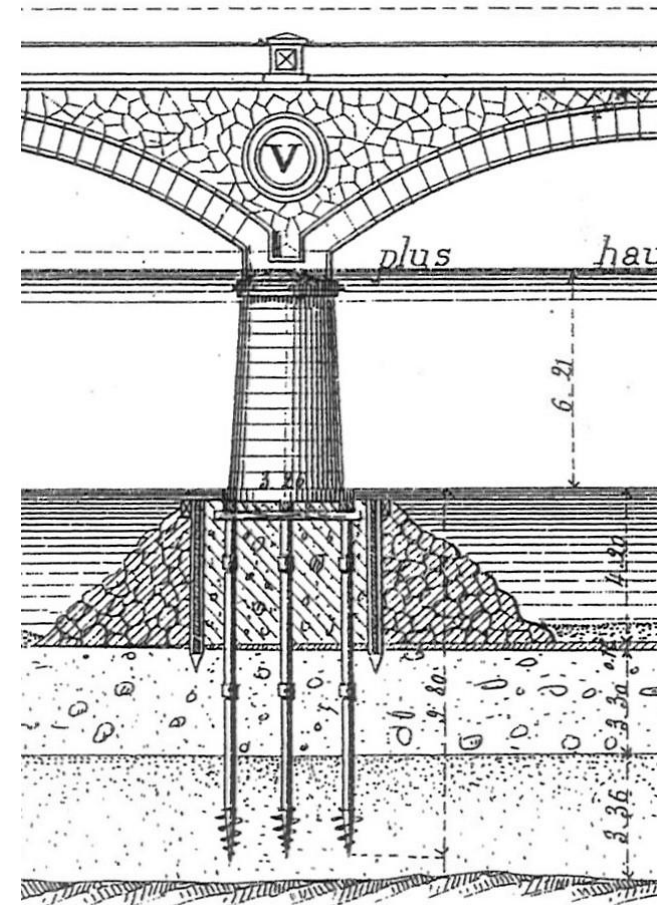
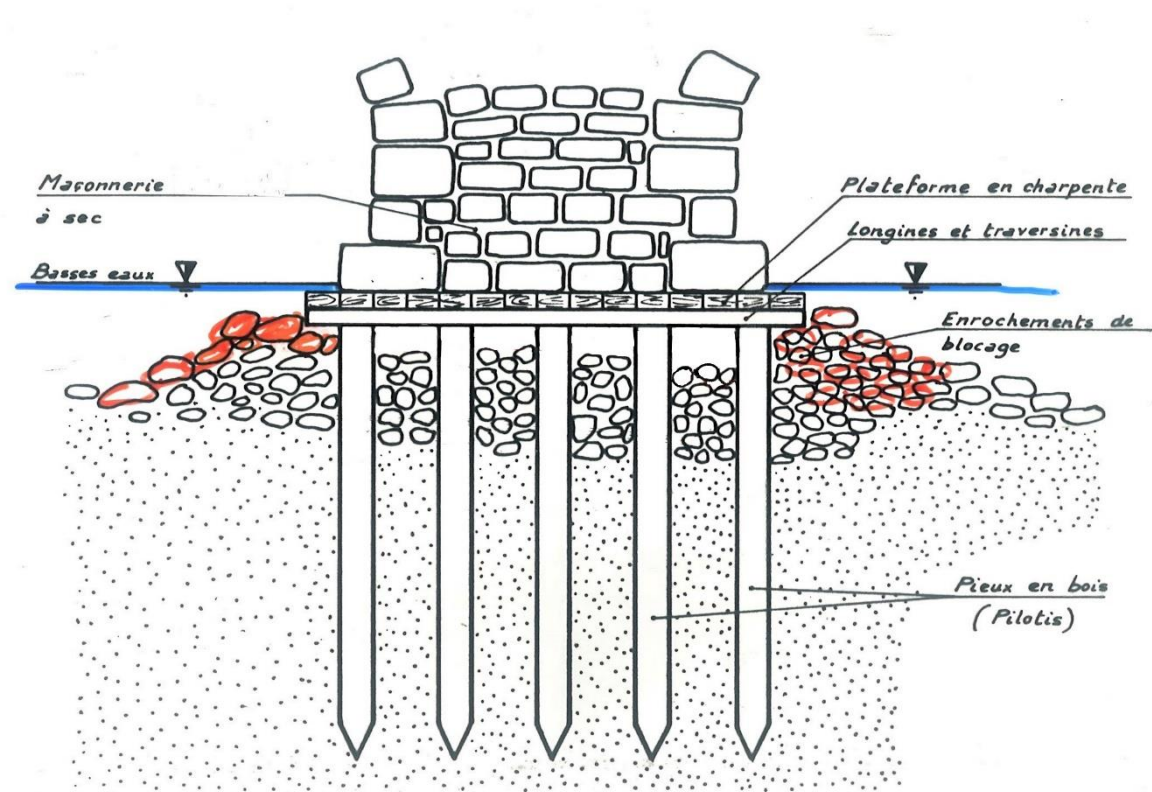
Dernier ouvrage de ce type, le pont Eiffel sur la Dordogne à Cubzac reconstruit en 1875.



Fondations sur pilotis enchâssés par des enrochements ou dans un massif de béton de chaux hydraulique et platelage de répartition situé quelques dizaines de centimètre sous le niveau d'étiage.

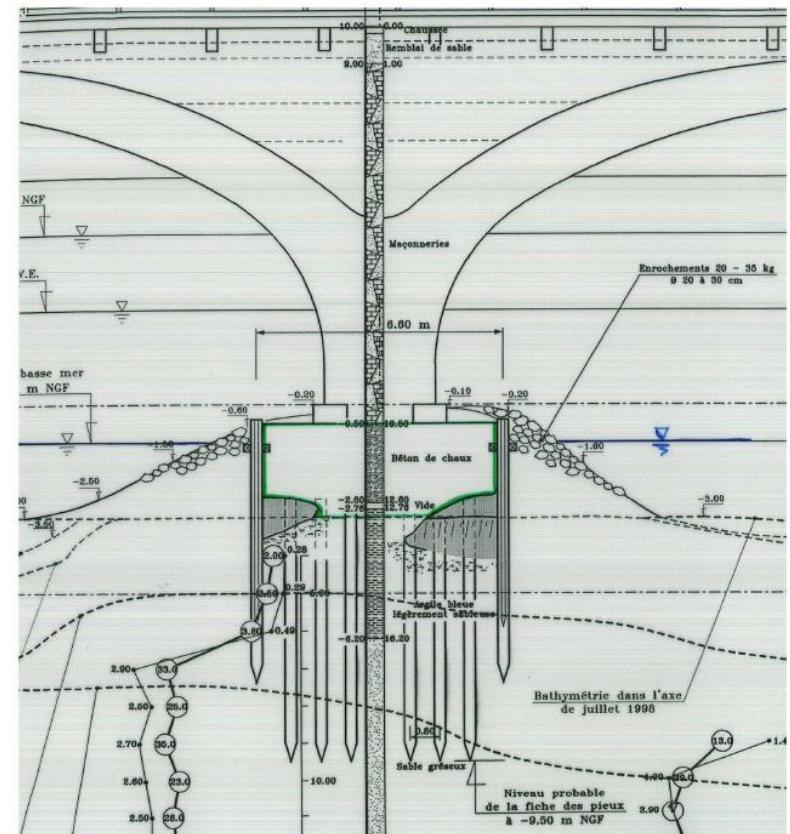
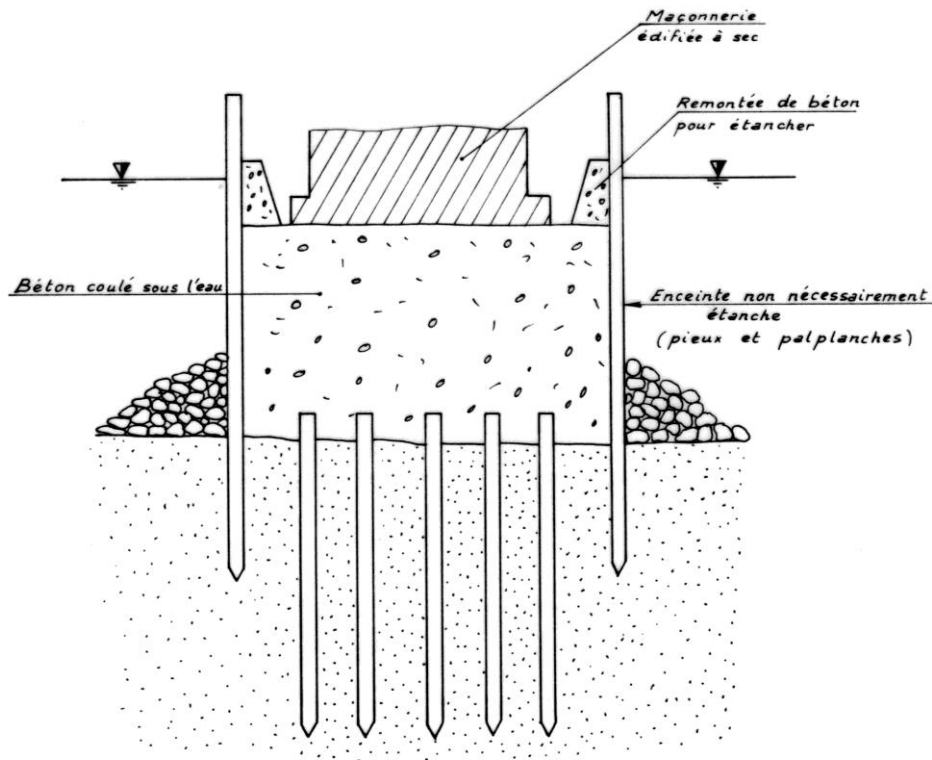
Période de construction : de la fin du XVIII<sup>e</sup> au début du XX<sup>e</sup> siècle. Type de fondation réalisé pour des ouvrages ayant des arches de faible portée (en général).

Exemple : le pont de Vouneuil sur la Vienne construit en 1878 où le platelage est proche du niveau d'étiage de la Vienne



# Fondations sur pieux bois recépés et noyés dans un massif de béton de chaux hydraulique

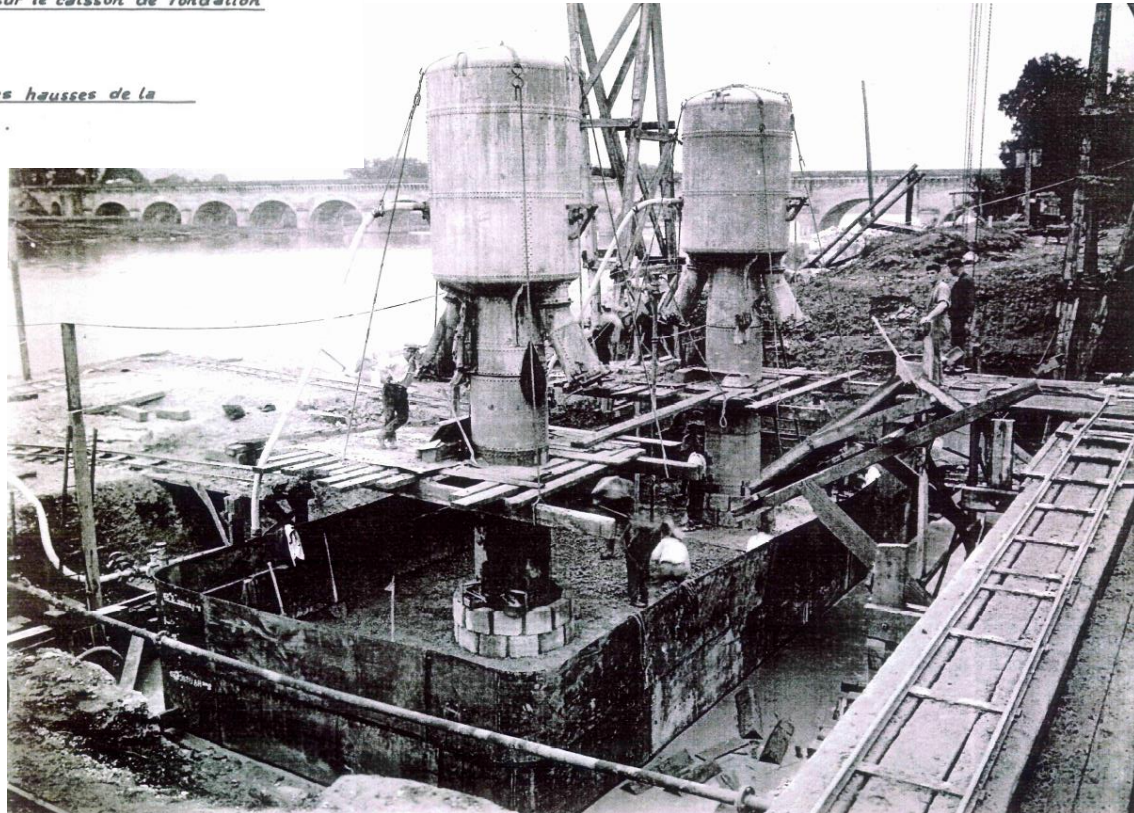
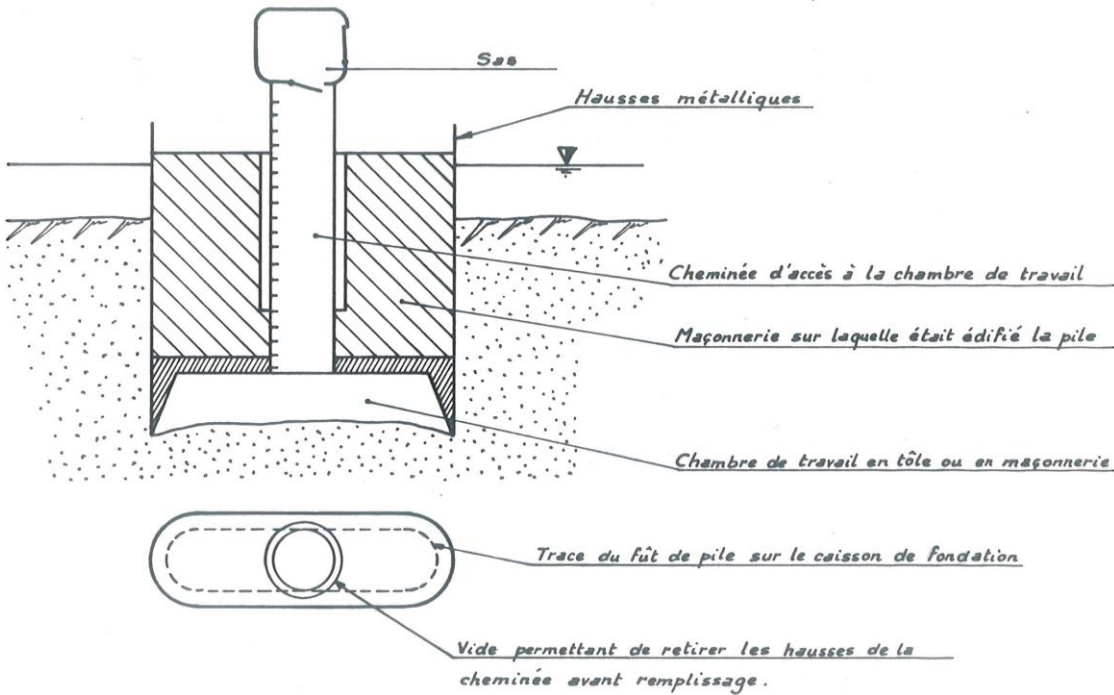
Exemple : Pont de Port de Lanne sur l'Adour construit en 1875



## Caisson havé, foncé sous air comprimé

en usage de 1850 à 1972 pour les grands ouvrages mais aussi des ouvrages modestes

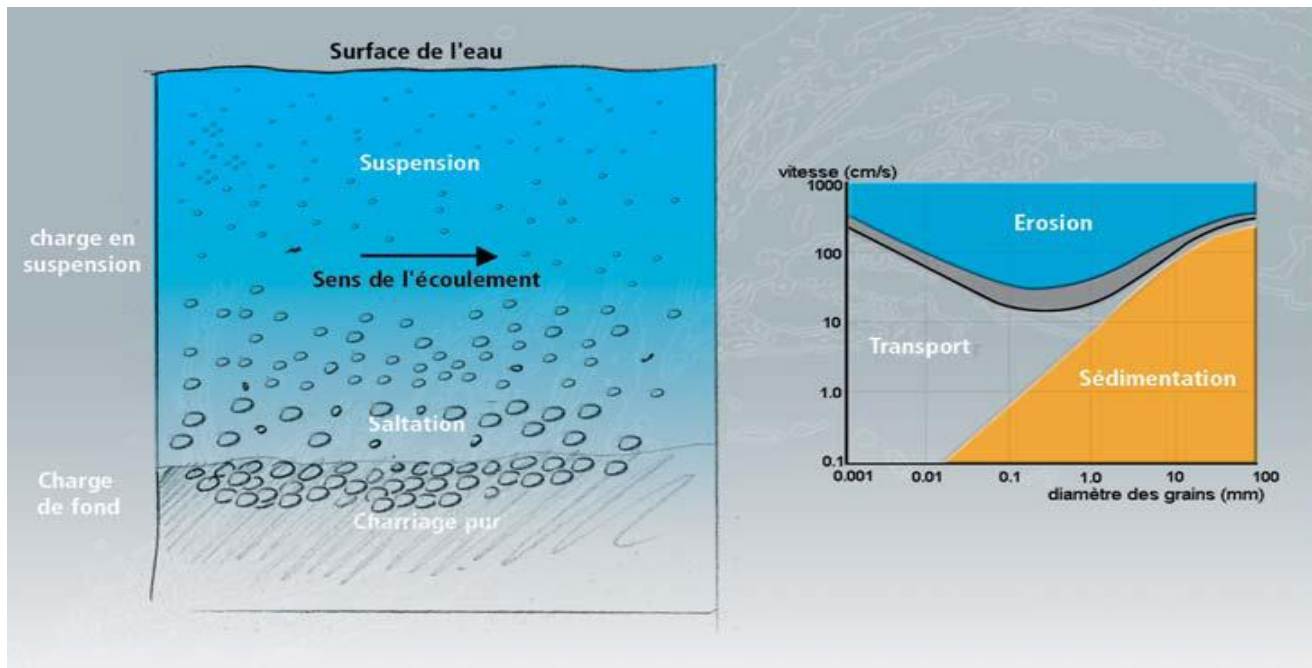
Fonçage du caisson havé  
d'une culée



# Une rivière tend toujours à saturer sa capacité de transport solide – elle assure le transport vers l'aval des matériaux solides provenant de l'amont

matériaux solides provenant de l'amont

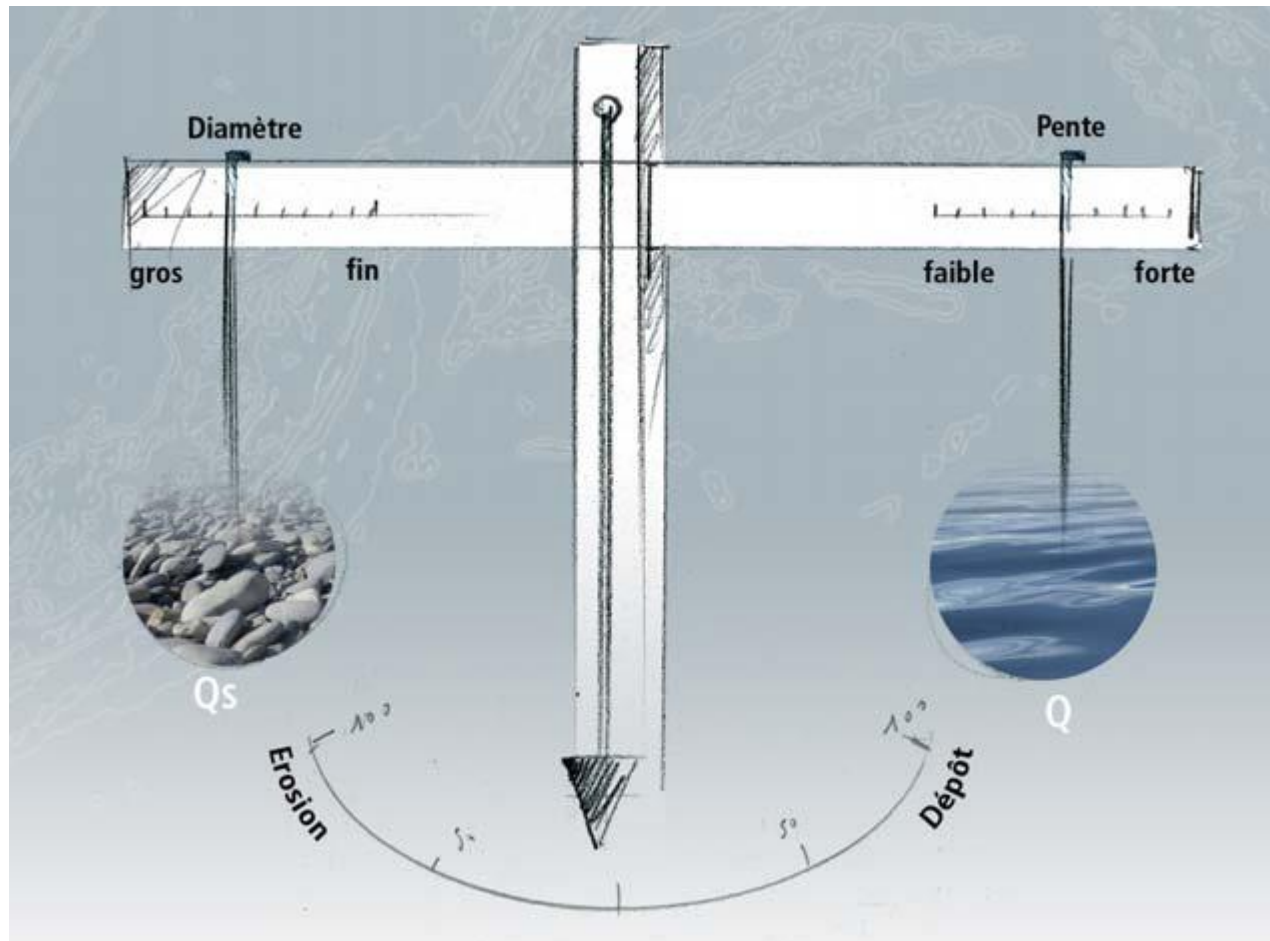
- Une augmentation de la capacité de transport entraîne le prélèvement sur les fonds et les berges – **phénomène d'érosion**
- Une diminution de la capacité de transport entraîne une élévation des fonds – **phénomène de dépôt**



# L'équilibre de la morphologie des rivières

$Q_s \cdot d$  en équilibre avec  $Q \cdot i$

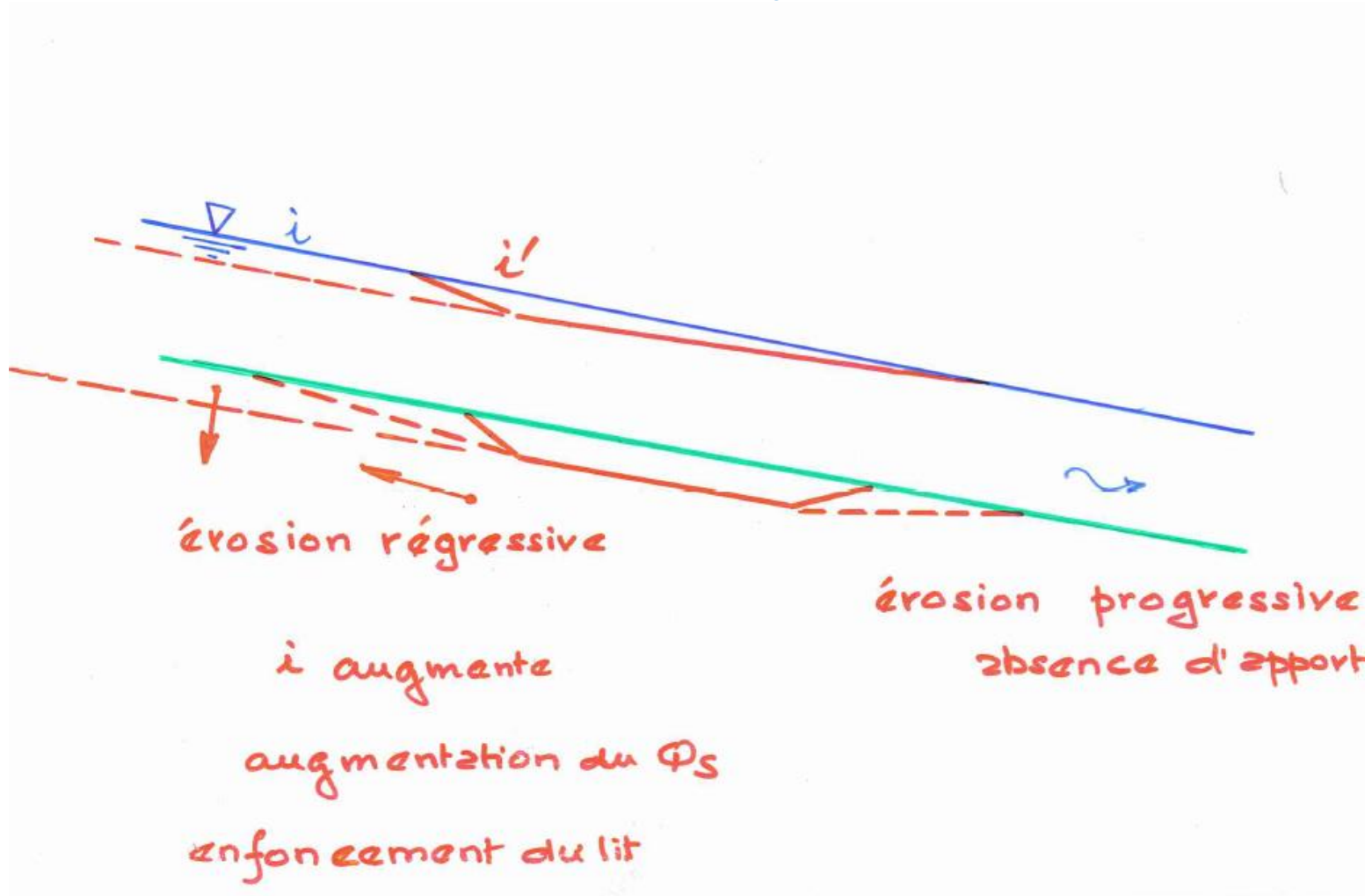
une augmentation de la pente  $i$  entraîne l'augmentation de la capacité de transport  $Q_s$  et le déplacement de la balance vers l'érosion. Une diminution du débit  $Q$  entraîne le déplacement de la balance vers le dépôt de sédiments. Une augmentation du débit  $Q$  entraîne le déplacement de la balance vers l'érosion



# conséquences des aménagements

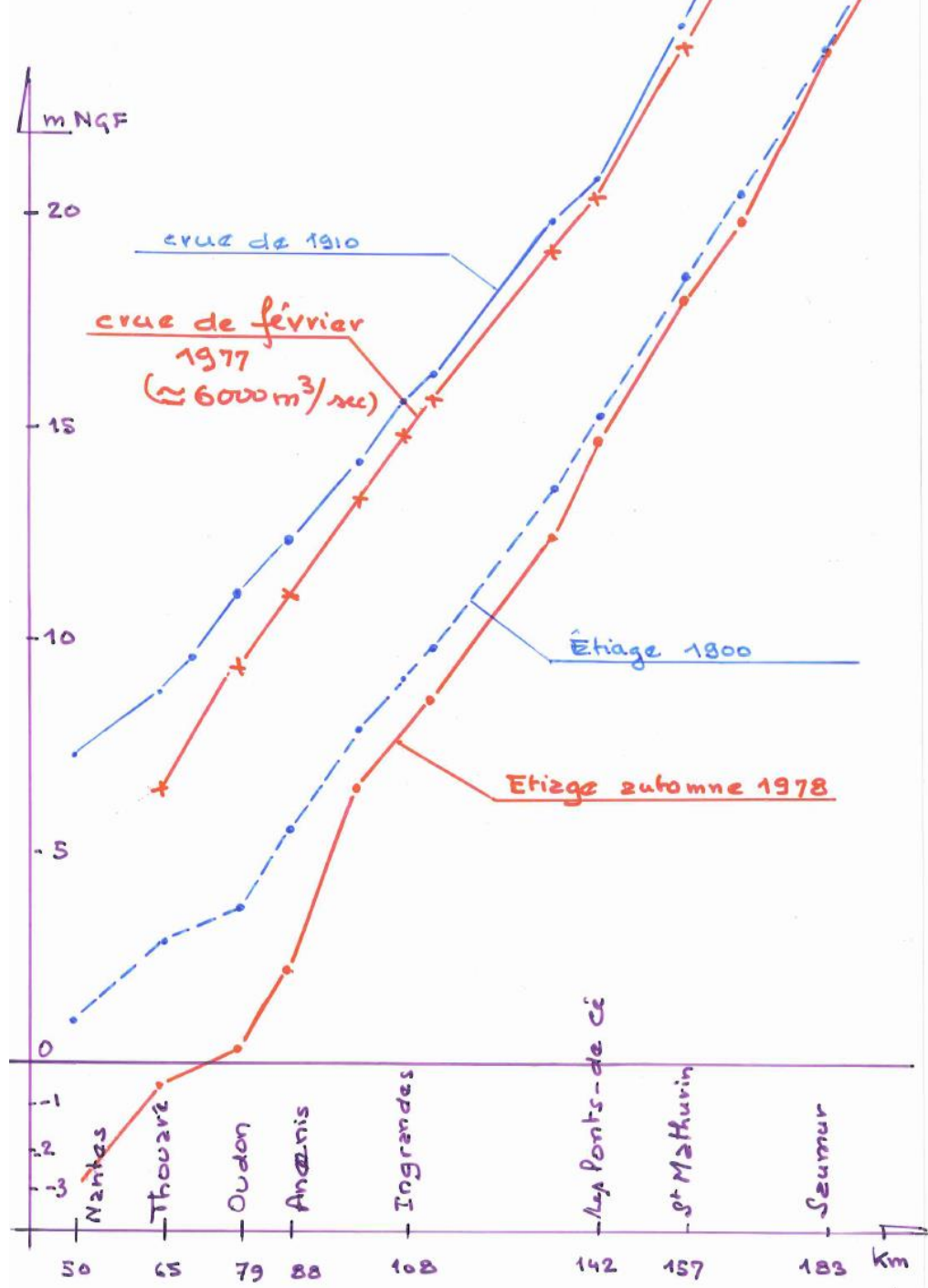
## sur l'hydraulique et le transport solide de la rivière

Le prélèvement de granulats modifie la pente de l'écoulement  $i$  en amont. Il amplifie l'érosion en amont pour retrouver la pente initiale et un abaissement de la ligne d'eau. En aval le manque d'apport de sédiments provoque une érosion progressive.

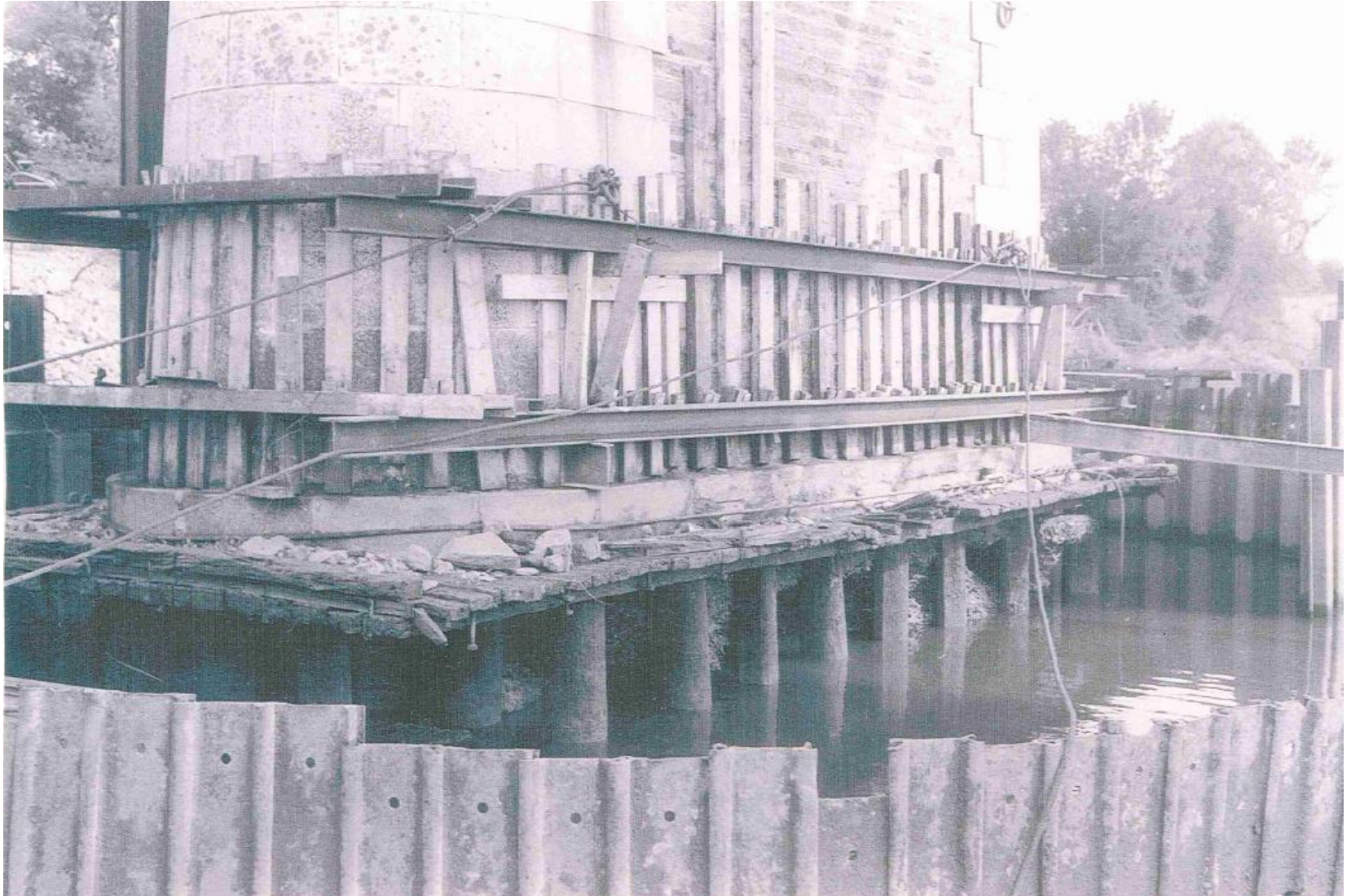


# Conséquences des aménagement de la Loire sur la ligne d'eau

Evolution de 1910 à 1978 suite  
aux dragages et aux  
prélèvements de sédiments.  
Abaissement de la ligne d'eau  
de 4 m à Nantes



Conséquences de l'abaissement de la ligne d'eau sur le pont de Thouaré à 30 km en amont de Nantes. Effondrement de berges et de quais à Nantes ainsi que sur les affluents. Construction du barrage de pont-Rousseau sur la Sèvre Nantaise et du barrage d'Angers sur la Maine dans les années 1987-1989.





Enfoncement du lit de l'Adour en amont  
d'une gravière implantée à 4 km



Conséquence des dragages entraînant un abaissement de la ligne d'eau de 2 à 3 m la chute du pont de Hères sur l'Adour quelques 20 ans après.

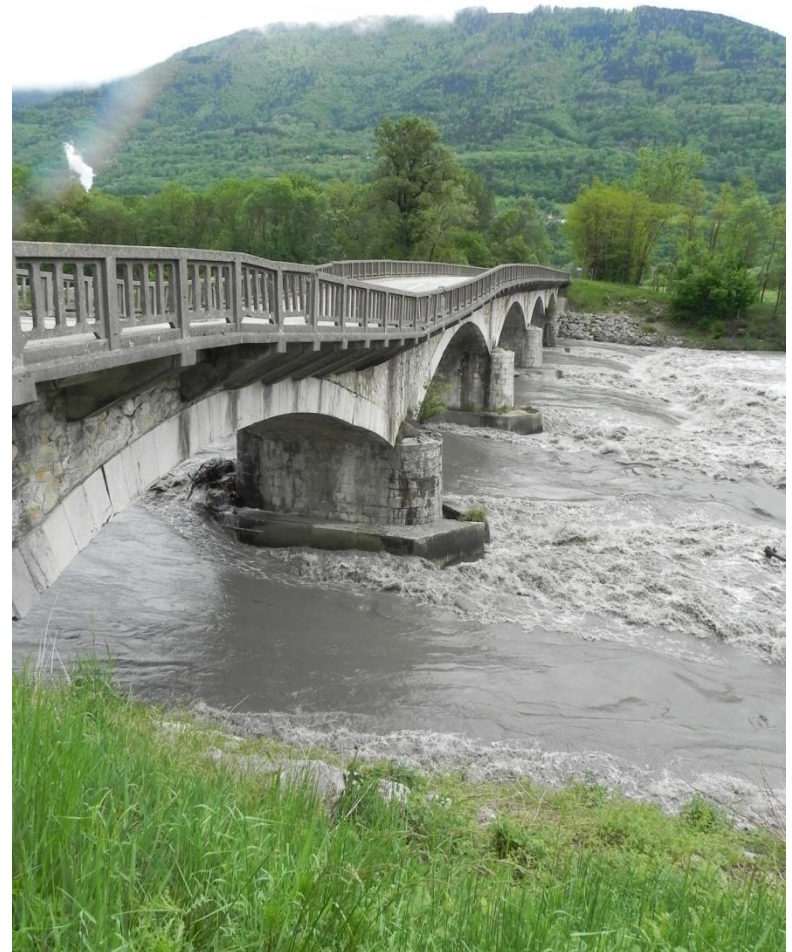
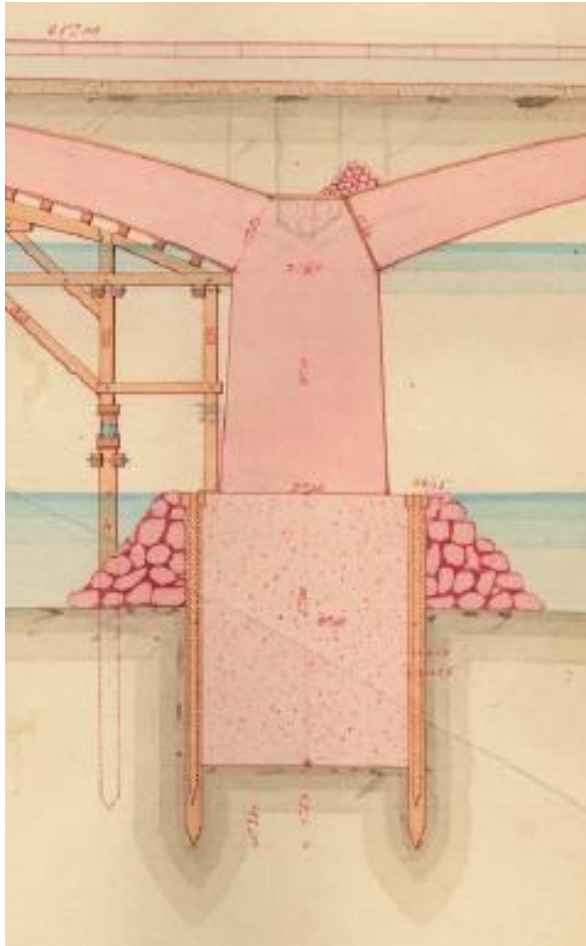


Seuil de 3 m de hauteur construit en aval du pont de Hères sur l'Adour  
pour remonter la ligne d'eau.

14 seuils sont ainsi construits sur l'Adour pour tenter de restaurer la ligne d'eau

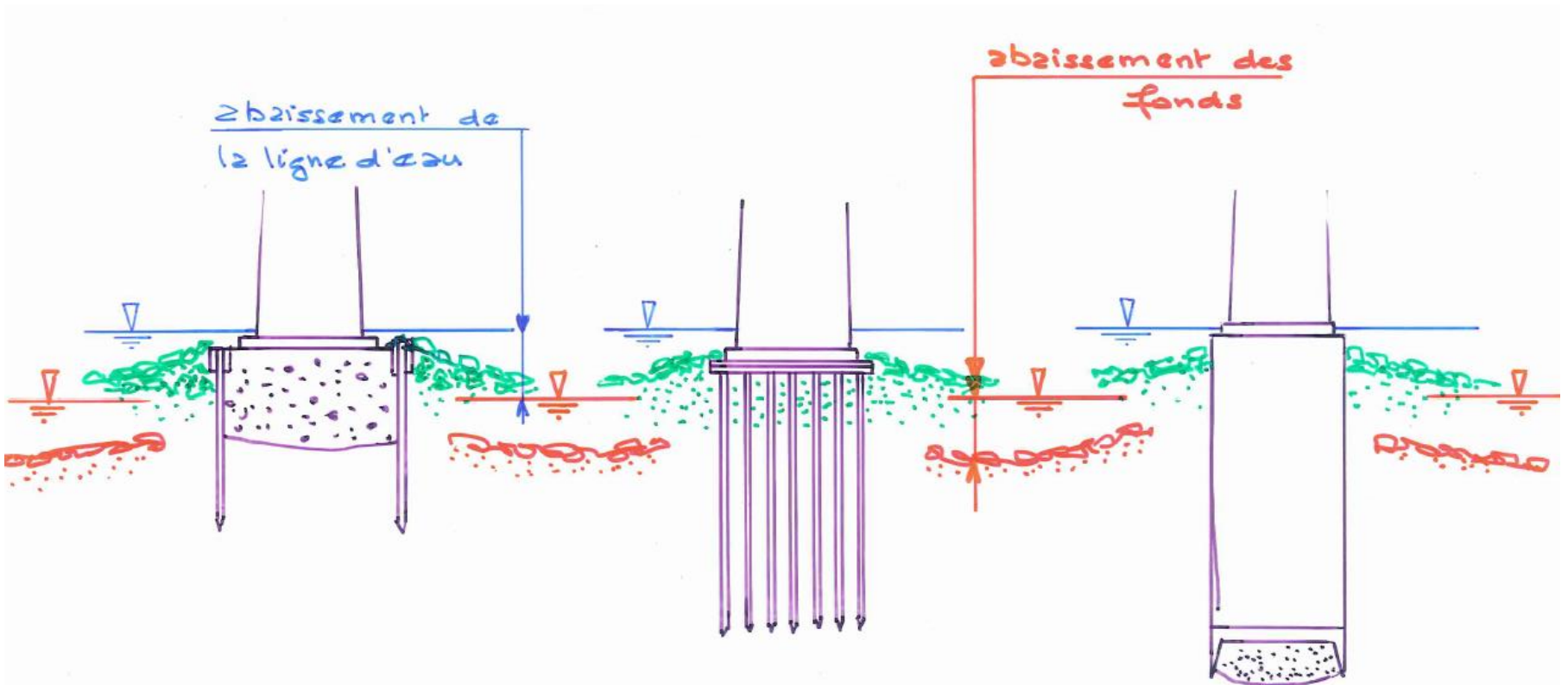


# Conséquences de l'abaissement du lit sur une fondation érosion interne des sols porteurs et cavités sous le massif



# Conséquences des abaissements du lit sur les fondations des ouvrages d'art anciens

diminution de l'encastrement et de la portance, érosion et formation de cavités, abrasion et altération des pièces de bois découvertes et des massifs de béton de chaux



# Impact de l'évolution climatique sur les rivières

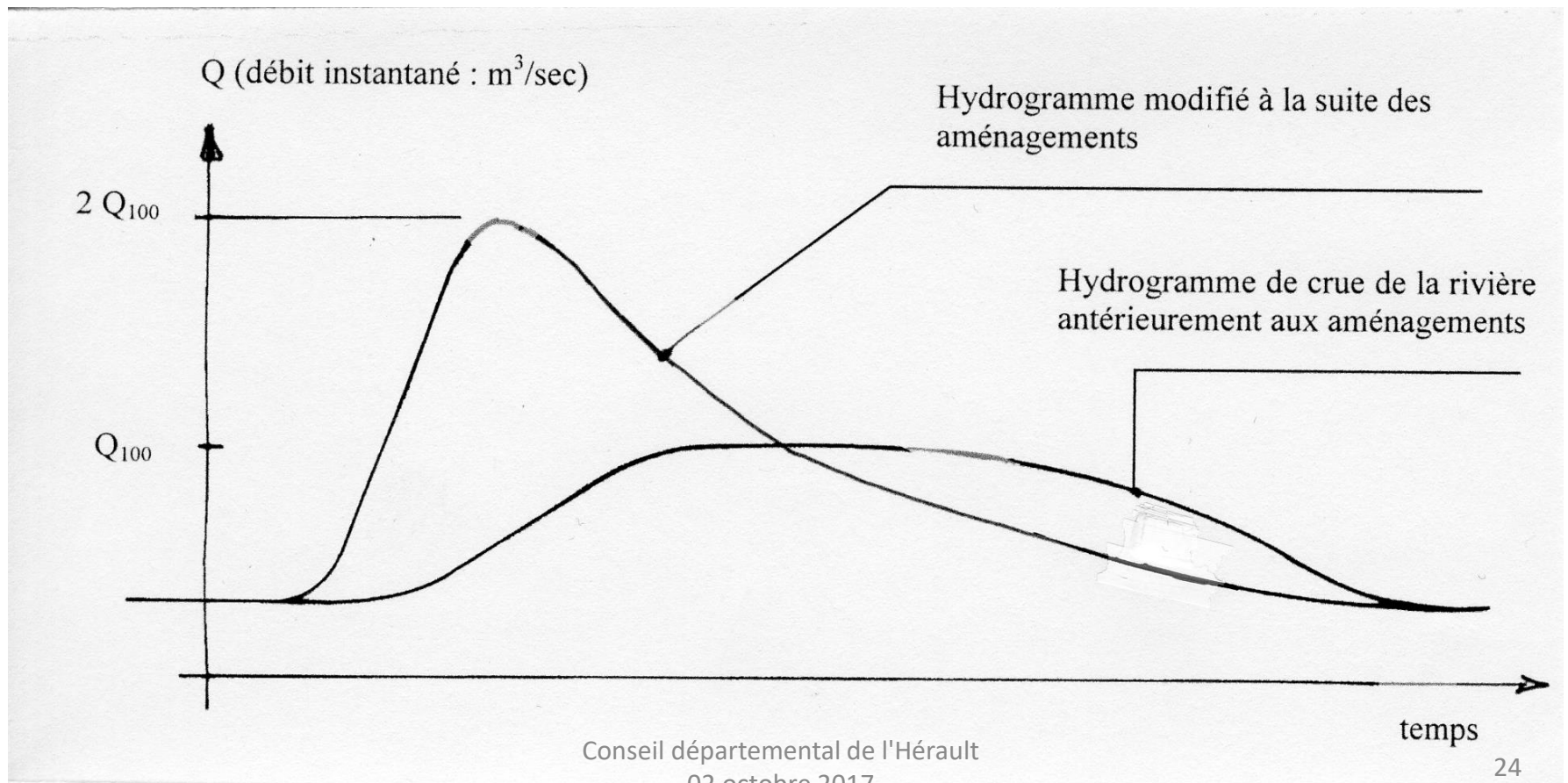
- Les simulations effectuées par le ministère du développement durable et de l'énergie en 2012 sur les quarante années à venir montrent un déficit du débit annuel des cours d'eau :
  - de 20 à 35 % zone centrale,
  - de 40 à 60 % zones Sud et Nord,une tendance à la diminution des débits des crues décennales de 10 à 30 % est relevée sur les cours d'eau de montagne
- Les observations actuelles sur la Loire montrent que les étiages sont plus sévères et d'une durée plus longue
- L'abaissement de la ligne d'eau d'étiage dure plus longtemps

## Pont des moulins de Meaux – découverte des fondations anciennes



# Conséquences des aménagements des villes et des campagnes sur les rivières

L'urbanisation (routes, aires de stationnement, constructions, commerces, industries) mais aussi l'agriculture, le remembrement, ... provoquent des **arrivées d'eau excessives et trop rapidement** par imperméabilisation des sols et collecte et évacuation des eaux.







## Pont de Vaison-la-Romaine

Vaucluse, France

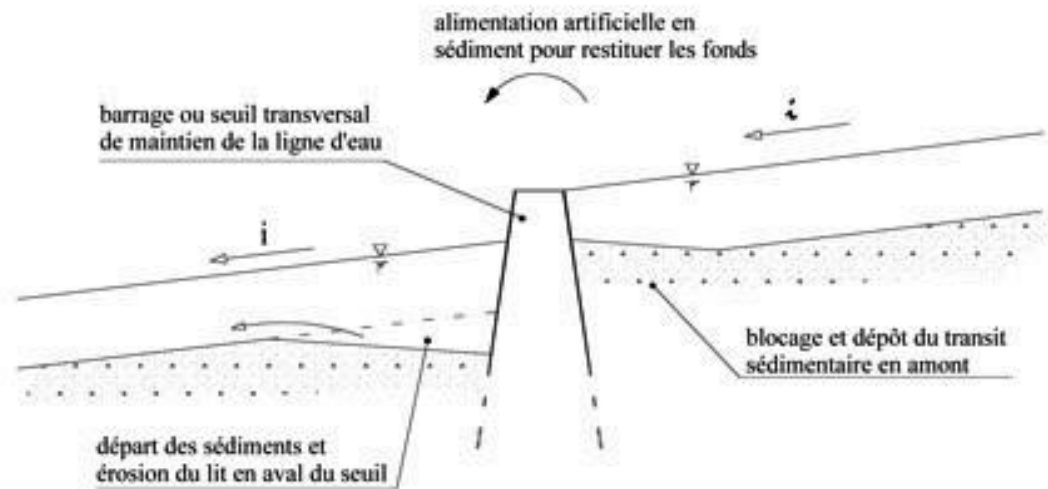
1<sup>er</sup> siècle – Ouverture : 17,20 m

Passage de la crue du 22 septembre 1992



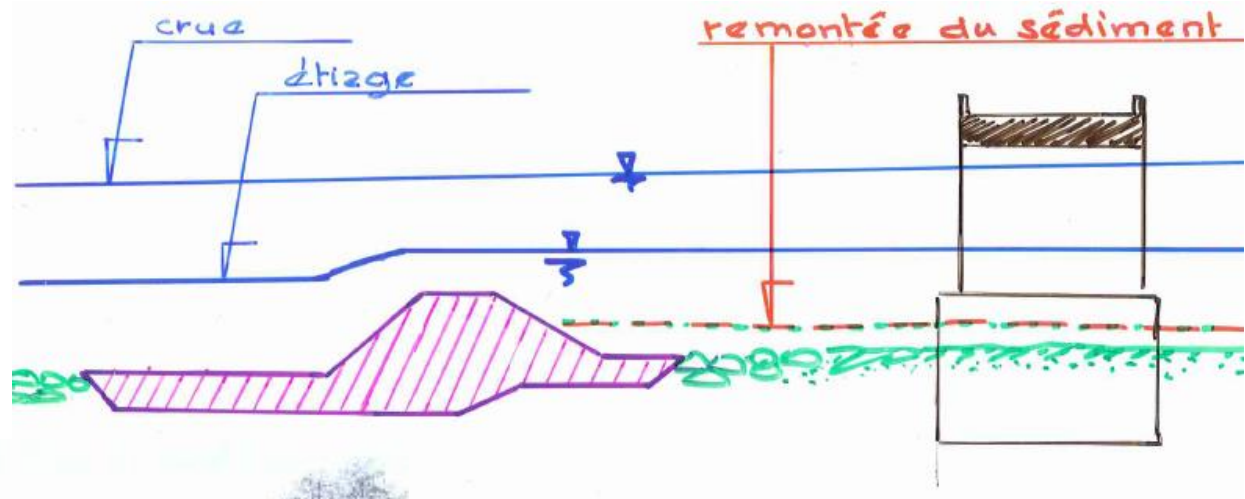
# La directive européenne relative à l'aménagement des cours d'eau

- La loi NOR du 25 janvier 2010 incite à la restauration de la continuité écologique des cours d'eau pour la reconquête de la biodiversité aquatique.
- La directive cadre du 23 octobre 2000 fixe un objectif de non dégradation et d'atteinte au bon état général des cours d'eau à l'échéance 2015. Le plan national de restauration des cours d'eau est annoncé le 13 novembre 2009. Il est engagé et est encore en cours.
- Il y a 60 000 seuils et barrages dont seulement 10 % auraient un usage économique. Les seuils créent une chute d'eau, modifient la pente naturelle de la rivière et empêchent le transport des sédiments.



## Incidence d'un seuil sur l'écoulement de la rivière

Ralentissement de l'écoulement, débit réduit en aval du seuil, modification de la température de l'eau, étiage plus sévère en aval et remontée du plan d'eau en amont. L'enfoncement du lit en aval (érosion progressive) faute d'apport des sédiments bloqués en amont conduit au déchaussement des fondations.



Le dispositif réglementaire pour la restauration de la continuité écologique est basé sur deux listes des cours d'eau (article L 214-17 du code de l'environnement)

La liste 1 vise la non-dégradation de la continuité écologique par l'interdiction de la création de nouveaux barrages,

La liste 2 oblige la restauration de la circulation des poissons migrateurs et le transport suffisant des sédiments.

L'arasement ou le dérasement des barrages conduit à un abaissement de la ligne d'eau directement en amont de l'ouvrage avec reprise du transport des sédiments.

Les fondations des ponts et des protections des berges peuvent être mises hors d'eau en étiage et dégarnies avec perte de leur encastrement.

## Exemple de recensement des ouvrages sur l'Essonne portant sur 170 ouvrages « transversaux » de Malesherbes à Corbeil, soit 150 ponts et passerelles et 20 moulins.

- L'abaissement de la ligne d'eau dans les trois communes de Maisse, La Ferté-Alais et Corbeil met à l'air sur 3 km de berges 720 ml de fondations supportant 50 % du bâti relevé. La moitié de ces fondations est en bois.
- Il est ainsi estimé que plus du tiers des 150 ponts et passerelles serait affecté par un abaissement de la ligne d'eau, soit entre 50 et 60 ouvrages.



# Altération et destruction à terme des fondations sur pieux bois dans le cas où les bois sont émergés sur de longs mois

- Pour détruire les bois il faut trois conditions :
  - un champignon dans le bois,
  - de l'air,
  - de l'humidité soit entre 20 et 24 %
- Le champignon est présent naturellement.
- Dans l'air, mais sans humidité, le bois se conserve très bien (charpentes).
- Saturé en eau le bois n'est pas au contact de l'air et se conserve très bien (fondation ci-contre de 1765).
- Sa destruction vient de l'air et de l'eau quand ils sont présents tous les deux.



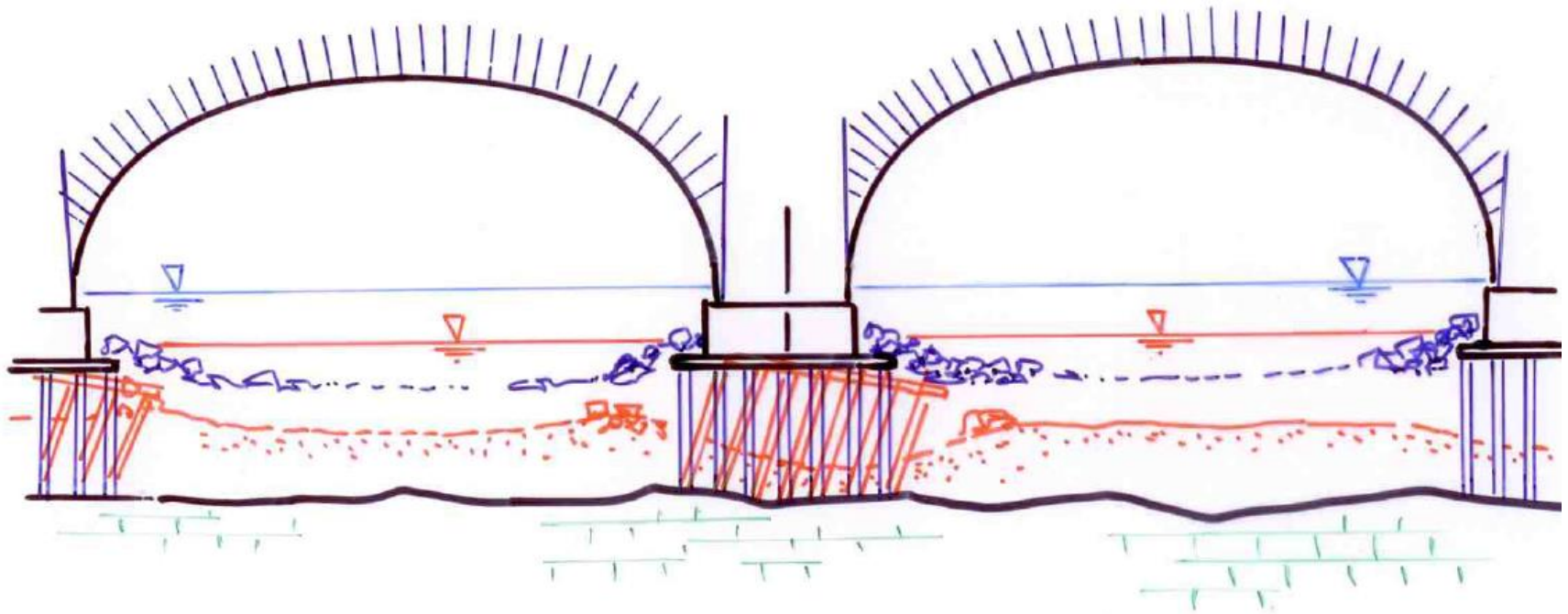
# Les impacts des diverses modifications en cours sur nos rivières sur les fondations des ponts

- L'abaissement de la ligne d'eau d'étiage des rivières conduit à une mise à sec partielle des fondations des ponts et des butées de pied des berges protégées.
- Les bois toujours immergés sont, ou vont être, émergés de nombreux mois voire d'années si le niveau d'eau s'abaisse pendant de longs mois.
- Les massifs de béton de chaux mis à sec vont se dégrader par une altération par l'air (perte de cohésion) et par l'eau en crue qui entraîne les granulats.

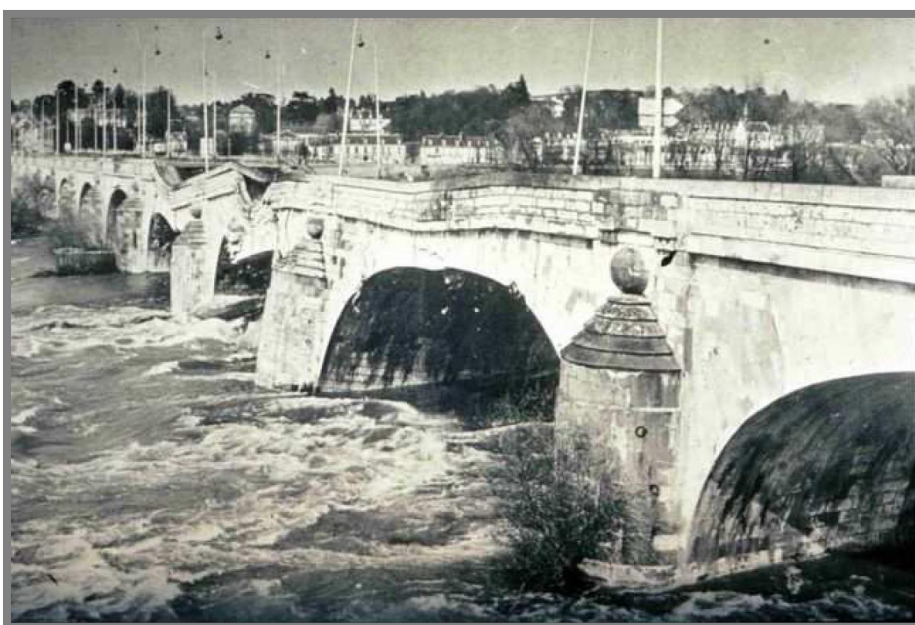


L'abaissement des fonds peut conduire à un mécanisme d'effondrement par déversement latéral des pieux non contreventés

cas du pont Wilson à TOURS







Effondrement du pont Wilson à Tours les 9 et 10 avril 1978

# Conservation des éléments de bois des fondations

- Pour conserver les bois il faut les maintenir dans un état saturé qui évite le contact avec l'air, ou les mettre à l'abri de l'air.
- Sans air le champignon qui est présent dans tout bois ne peut se développer et provoquer le pourrissement.
- Le dégagement de la fondation envasée d'une pile du pont de Mauves sur la Loire qui est à sec depuis 60 ans, sauf en crue, montre un bon état des bois en sapin rouge du Nord (rôle de la vase étanche à l'air).
- Pour conserver les bois il faut les maintenir saturés en eau et sans air (un encastrement minimum de quelques mètres dans les sols évite la présence d'air)
- Les maintenir sous eau est la meilleure solution.



# QUELQUES PRINCIPES ET RECOMMANDATIONS

- POUR EVITER DES DESEQUILIBRES MORPHOLOGIQUES

- POUR CONFORTER DES OUVRAGES MENACES

- En aménagement fluvial on limitera l'importance des facteurs de perturbation.
- Les volumes dragués seront inférieurs aux capacités d'apports naturels ou mieux seront prélevés hors du lit actif.
- Les endiguements devront respecter la morphologie naturelle de la rivière,
- Les apports de sédiments seront limités aux actions naturelles par des déboisements modérés ou des reboisements de zones dénudées.
- Nécessité d'études technico économiques préalables.

# Quelques réflexions sur des techniques de maintien des fondations en l'état

- L'édification de massifs de protection ou d'un radier général pour conserver l'encastrement de la fondation et protéger les sols au pourtour des appuis.
- La protection des matériaux dégradables comme le bois et les bétons de chaux hydraulique par un encagement.
- La construction de seuils transversaux venant bloquer le phénomène d'érosion régressive, ou un aménagement par des méandres qui allongent le linéaire de l'écoulement et maintiennent la ligne d'eau.
- La modification de la fondation pour s'adapter aux conditions du lit sans modifier les conditions nouvelles de l'écoulement.
- La construction de radiers longs, type déversoir, venant assurer une protection des fonds fortement agressés et érodés par un effet de seuil ou de barrage noyé.

**BONNES REFLEXIONS**

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**