

**FONDACTIONS**

# les fondations anciennes par pieux bois

Sensibilisation et recueil d'informations  
sur les risques pour nos ouvrages.

**Le présent guide a pour objet, en prenant en compte les trois facteurs contemporains d'aggravation des risques :**

- changement climatique,
- impact de l'activité humaine,
- loi sur l'eau n° 92-3 du 3 janvier 1992,

**de sensibiliser les différents acteurs concernés sur la nécessité et l'urgence d'actions pour la sauvegarde des ouvrages en maçonnerie fondés sur pieux bois.**



**Les différents intervenants d'un projet :**

*Maître d'ouvrage, maître d'œuvre, bureau d'études et diagnostics, entreprises d'investigations, laboratoires, entreprises de travaux*

**3 facteurs contemporains aggravants les risques :**

- > Changement climatique,
- > Impact de l'activité humaine,
- > Loi sur l'eau n° 92-3 du 3 janvier 1992.

Nécessité et urgence de suivi et d'actions face à cette problématique complexe et grandissante.



# TABLE DES MATIÈRES

Préambule .....	6
<b>1 Les fondations des ouvrages d'art en maçonnerie .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Généralités sur les fondations des ouvrages d'art en maçonnerie .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Les batardeaux pour la mise à sec et la construction des fondations .....</b>	<b>13</b>
Mise à sec des sols de fondation par des petits batardeaux .....	13
Batardeaux à deux lignes de palplanches .....	13
Batardeau sur terrain rocheux .....	14
Les fondations par épusement dans de grands batardeaux .....	14
Les fondations par épusement dans des batardeaux uniques .....	15
<b>1.3 Les fondations sur semelles .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Les fondations sur enrochements .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5 Les fondations par encaissement .....</b>	<b>21</b>
<b>1.6 Les fondations sur radier général .....</b>	<b>23</b>
<b>1.7 Les fondations sur massif de maçonnerie, de béton et de béton immergé .....</b>	<b>25</b>
Fondations à l'aide de caissons sans fond .....	25
Fondations sur massif de béton de chaux .....	25
<b>1.8 Les fondations sur pilotis .....</b>	<b>27</b>
Fondation sur sol renforcé par un pilotis de petits pieux .....	27
Les pieux bois .....	28
Fondation sur pilotis et grillage .....	28
Fondations sur pieux bois réalisée à sec sans batardeau .....	29
Fondations sur pilotis et caisson échoué .....	30
Fondations sur pilotis enchâssés dans un massif de béton .....	30
Fondations sur puits blindés ou massif isolé .....	31
Fondations tubulaires .....	32
Fondations sur caissons havés sous air comprimé .....	32
<b>1.9 Prise en compte historique des problématiques d'affouillement et de pourrissement des pieux bois .....</b>	<b>33</b>
Prise en compte dès la conception des ouvrages de la problématique de pourrissement du bois .....	33
Protections anciennes des fondations contre les affouillements .....	33
<b>1.10 Le matériau bois .....</b>	<b>35</b>
Structure élémentaire du bois .....	35
Caractérisation du bois .....	37
<b>2 Les pathologies constatées .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1 Altération et destruction à terme des fondations sur pieux bois dans le cas où les bois sont émergés sur de longs mois .....</b>	<b>42</b>
<b>2.2 Les affouillements des appuis .....</b>	<b>45</b>
Réduction de la portance d'appui .....	45
Effondrement par déversement latéral des pieux non contreventés .....	45
<b>2.3 Altération des massifs en béton de chaux .....</b>	<b>47</b>
<b>2.4 Les manifestations visibles des désordres .....</b>	<b>48</b>
Déformation du profil en long .....	48
Fissuration, voire fracturation de l'ouvrage .....	49
L'effondrement .....	49
<b>3 Les causes aggravantes et contemporaines (au-delà des évolutions naturelles des cours d'eau) .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Principes hydrauliques de base régissant le transport de sédiments .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Aménagements hydrauliques et exploitations fluviales (extraction de granulats ...) : leurs incidences sur les cours d'eau et leurs impacts sur les ouvrages .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.1</b> Conséquences de l'exploitation des cours d'eau et extraction dans les cours d'eau .....	55
<b>3.2.2</b> Conséquences des aménagements hydrauliques .....	58
<b>3.2.3</b> Interaction possible d'un seuil avec les fondations d'un ouvrage d'art .....	58

<b>3.3 La législation actuelle, son impact sur les aménagements hydrauliques existants et son incidence sur les cours d'eau et sur les ouvrages d'art .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.1</b> Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau.....	60
<b>3.3.2</b> Directive cadre du 23 octobre 2000 (DCE).....	61
<b>3.3.3</b> Loi sur l'eau et les milieux aquatiques : 30 décembre 2006 .....	62
<b>3.3.4</b> Plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Parce) du 13 novembre 2009.....	62
<b>3.3.5</b> Mise en application pratique actuelle de la loi sur l'eau dans le cadre de travaux sur ouvrages .....	63
<b>3.4 Impacts du changement climatique sur les cours d'eau et incidence sur les ouvrages.....</b>	<b>69</b>
<b>3.4.1</b> L'abaissement des niveaux d'étiage .....	69
<b>3.4.2</b> L'augmentation des crues et de leur intensité .....	70
<b>3.5 Impact de l'imperméabilisation des sols sur les cours d'eau et incidence sur les ouvrages .....</b>	<b>75</b>
<b>3.6 Synthèses des causes.....</b>	<b>77</b>
<b>4 Études de projet de réparation.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1 L'auscultation - Le diagnostic - Le pronostic.....</b>	<b>83</b>
<b>4.2 Les investigations nécessaires au diagnostic et auscultation des fondations .....</b>	<b>86</b>
<b>4.2.1</b> Les investigations d'auscultations externes .....	86
<b>4.2.2</b> Les investigations d'auscultations internes.....	89
<b>5 Quelles sont les solutions techniques envisageables ? .....</b>	<b>92</b>
<b>5.1 Généralités et principes à prendre en compte.....</b>	<b>93</b>
<b>5.2 Les solutions de travaux (Guide FABEM 6.3 V2).....</b>	<b>95</b>
<b>5.2.1</b> Travaux de protection ou de confortement agissant sur le cours d'eau .....	95
<b>5.2.2</b> Travaux de protection des appuis par des massifs ou des tapis d'enrochement.....	96
<b>5.2.3</b> Travaux de protection des fonds de cours d'eau par des gabions.....	96
<b>5.2.4</b> Travaux de protection des sols et comblement des cavités par des sacs de sable.....	97
<b>5.2.5</b> Travaux de comblement des cavités par bétonnage et injection.....	97
<b>5.2.6</b> Travaux de réfection de pieux bois endommagés.....	98
<b>5.2.7</b> Travaux de réalisation d'un radier général.....	98;
<b>5.2.8</b> Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques .....	98
<b>5.2.9</b> Travaux d'encagement des appuis.....	99
<b>5.2.10</b> Travaux de confortement des fondations et massifs par injection sans déplacement des terrains.....	99
<b>5.2.11</b> Travaux de confortement des fondations par injection avec déplacement des terrains .....	99
<b>5.2.12</b> Travaux d'amélioration de la portance des fondations des appuis.....	100
<b>5.3 Compléments aux guides FABEM 6.3 V2 et FAFO 1 V2 et retours d'expériences .....</b>	<b>101</b>
<b>5.3.1</b> Reprise en sous-œuvre par micropieux .....	101
<b>5.3.2</b> Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques servant d'encagement des appuis.....	103
<b>5.3.3</b> Travaux de confortement des fondations et massifs par injection sans déplacement des terrains par injection de résine polyuréthane.....	104
<b>5.3.4</b> Cerclages des piles.....	105
<b>5.3.5</b> Injection des maçonneries et massifs de fondation (travaux de confortement des fondations par injection sans déplacement des terrains).....	106
<b>6 Conclusion .....</b>	<b>110</b>
<b>Table des illustrations.....</b>	<b>114</b>
<b>Textes de référence .....</b>	<b>118</b>

# ≡ PRÉAMBULE

Les problématiques et solutions réparatoires des ouvrages anciens en maçonnerie, y compris leurs fondations, sont traitées de manière relativement détaillée dans des Guides du STRRES, notamment :

## **FABEM 6.1 V2**

Réparation et renforcement des maçonneries : Généralité et préparation des travaux :

## **FABEM 6.2 V2**

Réparation et renforcement des maçonneries : Réparation non-structurale

## **FABEM 6.3 V2**

Réparation et renforcement des maçonneries : Réparation et renforcement structuraux

## **FABEM 6.4**

Réparation et renforcement des maçonneries (Annexes)

## **FAFO 1 V2**

Réparation et renforcement des fondations

Cependant, d'une part, les guides précités ne ciblent pas spécifiquement les problématiques des fondations anciennes par pieux bois et d'autre part, n'abordent pas ou que très succinctement les importantes incidences de 3 facteurs contemporains aggravants :

- De la Loi 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau,
- Du changement climatique,
- De l'impact de l'activité humaine et de l'imperméabilisation des sols.

Les risques pour les fondations des ouvrages mis en évidence dans les guides précités imposent, au vu des importantes incidences de ces 3 facteurs aggravants, une impérieuse nécessité d'agir tant au niveau législatif qu'au niveau du suivi, de l'entretien, des réparations et des mesures préventives d'aménagements hydrauliques à mettre en œuvre.

Le présent document vient donc en complément des guides STRRES existants et abordera notamment :

- L'historique, les principes constructifs et les matériaux de fondation des ouvrages d'art en maçonnerie,
- Les pathologies constatées et les risques induits,
- Les causes aggravantes et contemporaines (au-delà des évolutions naturelles des cours d'eau), leurs incidences sur les cours d'eau et sur les ouvrages :
  - « Aménagements hydrauliques et exploitations fluviales.
  - La législation actuelle, son impact sur les aménagements hydrauliques existants
  - Les impacts du changement climatique et de l'imperméabilisation des sols»
- Études de projet de réparation,
- Quelles sont les solutions techniques envisageables ?



Pour une bonne compréhension de la problématique, il reprendra en partie les notions partiellement traitées dans les guides existants.

Globalement, ce document vient dans la continuité des réflexions menées quant à la surveillance, à l'entretien, à la restauration et au confortement des systèmes de fondations des ponts anciens. Ce sont les fondations en eau qui sont les plus vulnérables. Ces structures de fondation des ouvrages anciens ont présenté des difficultés de conception et d'exécution dans l'eau du fait des connaissances limitées et du fait des moyens d'exécution disponibles à chaque époque. Une forte opiniâtreté était nécessaire lors de la construction de ces ouvrages en maçonnerie compte tenu des faibles moyens de chantier et des aléas climatiques détruisant parfois l'ouvrage avant la fin de sa construction.

La France compte environ 60 à 80 000 ponts ou viaducs voûtés en maçonnerie ou ponts métalliques sur piles en maçonnerie. Il y a en moyenne un pont tous les 5 km.

Comme les ponts, les ouvrages de soutènement en bordure de rivières et les ouvrages fluviaux sont établis sur les mêmes types de fondation.

Les ouvrages en maçonnerie sont maintenant anciens. Ils ont comme particularité commune d'être construits au cours de deux millénaires depuis l'époque romaine mais surtout au cours des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle et pour certains encore au début du XX<sup>e</sup> siècle. Par leur grand nombre et par leur utilité, ils assurent une fonction essentielle de la vie sociale et de la vie économique du pays. Ils contribuent depuis plus de deux siècles au fonctionnement de l'économie nationale et ils constituent une part majeure du patrimoine social.

Les architectes puis les ingénieurs qui étaient responsables de leur construction ne se posaient pas la question de leur durée de vie au sens d'une durée de vie limitée. Ils les construisaient avec les meilleurs matériaux disponibles, pour un coût adapté aux conditions économiques locales et dans l'objectif d'une pérennité de ces ouvrages. Quand on observe leur longévité, on est forcé de considérer, qu'effectivement, ce sont des ouvrages intemporels. Ils sont de véritables témoins du développement durable tant leur longévité est réelle.

Les fondations de ces anciens ouvrages sont de tous les types et les principes d'exécution ont évolué au cours des siècles avec les améliorations des moyens techniques. La semelle en maçonnerie sera toujours recherchée, car plus aisée d'exécution que des fondations complexes imposées par des grandes profondeurs d'eau et des sols de faible portance. Le matériau bois est toujours employé que ce soit en batardeau provisoire, en protection des massifs de béton de chaux ou plus directement en éléments de renforcement des sols ou en structure porteuse de type pieux bois. Les bois dans les ouvrages en maçonnerie est présent pratiquement dans toutes leurs fondations, et ce à toutes les époques.

L'observation des fondations des anciens ponts et de tous les ouvrages construits en eau démontre que le bois constituant les pieux, platelages, ceinturage et pilotis ont une très bonne conservation lorsqu'ils ont été réalisés de façon à être immergés en permanence.

Pour se conserver, les parties d'ouvrages en bois (le plancher d'assise des fondations, les têtes des pieux et les hauts des coffrages) doivent donc être en permanence sous le niveau de l'eau, même à l'étiage.

L'alternance de périodes sèches puis humides peut, sous certaines conditions, provoquer le pourrissement des



parties bois des fondations.

**Bien que la nécessité de surveiller, d'entretenir, de restaurer voire de renforcer les systèmes de fondations soit connue de longue date, l'accélération, depuis quelques décennies, aussi bien des phénomènes d'érosion que des phénomènes d'abaissement des niveaux d'eau, particulièrement en période estivale, rend impératif et d'autant plus d'actualité cette nécessité.**

Les conséquences de l'abaissement des niveaux d'eau dans les fleuves et rivières fait, qu'à certaines époques de l'année, les têtes des pieux bois peuvent se retrouver hors de l'eau et sécher à l'air. Cette modification de leur environnement peut, comme évoqué précédemment, entraîner leur pourrissement, leur désagrégation et la déstabilisation de la construction.

Ce phénomène d'abaissement des niveaux d'eau de nos rivières semble devoir se renforcer à l'avenir. On prévoit jusqu'à 40% de débit en moins dans les cours d'eau dans les quarante prochaines années.

Dans les rivières, l'abaissement des niveaux d'eau provoqué par une réduction des débits ou par des prélèvements des matériaux pour la construction ou encore par des travaux de restauration écologique conduit à des phénomènes d'érosion générale et locale. Le niveau des sédiments baisse avec des conséquences importantes sur les niveaux d'encastrement des fondations induisant des réductions de capacité portante, voire des problèmes de stabilité, avec des conséquences sur les affouillements locaux par des érosions pouvant conduire à la création de cavités sous les appuis.

La qualité résiduelle des fondations, leur état et leur comportement sont très difficiles à diagnostiquer. Il va pourtant falloir, si l'on veut pouvoir intervenir efficacement avant l'effondrement du pont, être capable d'apprécier la qualité actuelle du matériau bois, de surveiller le comportement du lit du cours d'eau ainsi que le comportement de la ligne d'eau.

Il faudra ensuite imaginer des solutions de conservation-restauration du bon état des fondations et, si besoin, de confortement partiel ou total, compatible avec le fonctionnement mécanique de l'ouvrage et le régime du cours d'eau.

Ces fondations anciennes sont, depuis déjà de nombreuses années, affectées très sévèrement par le régime hydraulique du cours d'eau dans lequel elles sont implantées.

Ces agressions ont plusieurs origines :

- la mise à l'air d'une partie des pieux et des platelages bois en raison de l'abaissement du niveau des cours d'eau souvent induit par le changement climatique,
- des affouillements locaux et des phénomènes d'érosion régressive et progressive liés à la gestion de l'écoulement

du cours d'eau lui-même et généralement dus aux conséquences des travaux d'aménagement imposés par les directives européennes,

- les arrivées d'eau excessives et soudaines provoquées par l'urbanisation, l'imperméabilisation des sols et le changement climatique.

Tous ces phénomènes ont de lourdes conséquences sur le comportement et la qualité des systèmes de fondation et, par conséquent, sur la stabilité des ouvrages qu'elles supportent.

Ce document a pour objectif de fournir l'ensemble des éléments de compréhension de la problématique en compilant les études déjà réalisées sur le sujet dont les textes et documents sont donnés en références et en complétant par un état de l'art des techniques de protection, de restauration et de confortement pouvant être envisagées.

# 1

# Les fondations des ouvrages d'art en maçonnerie

## 1.1 Généralités sur les fondations des ouvrages d'art en maçonnerie

### 1.2 Les batardeaux pour la mise à sec et la construction des fondations

- Mise à sec des sols de fondation par des petits batardeaux
- Batardeaux à deux lignes de palplanches.
- Batardeau sur terrain rocheux.
- Les fondations par épusement dans de grands batardeaux
- Les fondations par épusement dans des batardeaux uniques

### 1.3 Les fondations sur semelles

### 1.4 Les fondations sur enrochements

### 1.5 Les fondations par encaissement

### 1.6 Les fondations sur radier général

### 1.7 Les fondations sur massif de maçonnerie, de béton et de béton immergé

- Fondations à l'aide de caissons sans fond.
- Fondations sur massif de béton de chaux.

### 1.8 Les fondations sur pilotis

- Fondation sur sol renforcé par un pilotis de petits pieux
- Les pieux bois
- Fondation sur pilotis et grillage
- Fondations sur pieux bois réalisée à sec sans batardeau
- Fondations sur pilotis et caisson échoué.
- Fondations sur pilotis enchâssés dans un massif de béton.
- Fondations sur puits blindés ou massif isolé.
- Fondations tubulaires.
- Fondations sur caissons havés sous air comprimé.

### 1.9 Prise en compte historique des problématiques d'affouillement et de pourrissement des pieux bois

- Prise en compte dès la conception des ouvrages de la problématique de pourrissement du bois
- Protections anciennes des fondations contre les affouillements

### 1.10 Le matériau bois

- Structure élémentaire du bois
- Caractérisation du bois

## 1.1 Généralités sur les fondations des ouvrages d'art en maçonnerie

La tenue des fondations et surtout des fondations en rivière a toujours été un élément prépondérant de la durée de vie des ouvrages d'art. Fonder une pile de pont, c'est établir au milieu d'une rivière un ouvrage en maçonnerie qui résiste à l'action des eaux qui est posé ou encastré dans les sols et qui reprend les actions des voûtes. Pour atteindre ces objectifs il fallait établir les piles sur un sol suffisamment résistant, se défendre contre les affouillements et trouver le moyen de bâtir dans une profondeur d'eau qui peut atteindre plusieurs mètres voire même plus de dix mètres.

**Il n'y a toujours eu que deux grandes méthodes pour asseoir la construction d'un ouvrage :**

- **Méthode 1** : trouver un appui sur un socle géologique dont la résistance est suffisante pour reprendre les contraintes que va lui transmettre la construction ;
- **Méthode 2** : créer une sorte de fondation flottante qui transmettra les charges d'une façon répartie sur le matériau existant en place.

**Pour fonder les ponts, il y avait généralement 3 cas de figure :**

- le sol portant, rocheux ou marneux, était suffisamment affleurant pour permettre à la construction d'y prendre appui directement ;
- le socle résistant était recouvert par une couche d'alluvions et de sédiments plus ou moins importante, qu'il a fallu traverser : d'où l'utilisation de pieux battus ou forés ;
- l'ouvrage prenait appui sur un radier général «flottant» sur des couches de résistance moyenne.

Depuis plus de deux mille ans, pour franchir des rivières où la hauteur d'eau est grande et les alluvions mobiles, l'usage des pilotis en bois a été pratiquement le seul procédé exploité jusqu'au troisième quart du XIX<sup>e</sup> siècle. Pour des ouvrages sur des rivières de largeur modeste et pour rechercher un niveau de fondation sous quelques mètres d'alluvions ce procédé est resté en usage jusqu'au premier quart du XX<sup>e</sup> siècle. Quand les alluvions étaient assez portantes ou

peu épaisses au-dessus d'un substratum résistant, il était retenu d'édifier les fondations sur massifs de maçonnerie ou, dès 1825, sur massifs de béton de chaux immergé en évitant les batardeaux. Pour les ouvrages situés sur des rivières ou des fleuves où la hauteur d'eau était grande, dès le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la technique du caisson havé sous air comprimé est venue concurrencer la technique des pilotis et ce d'autant plus que le bois devenait plus cher du fait de sa rareté. On était amené à importer des bois du Nord de l'Europe.

La technique des fondations sur pieux de bois très utilisée pendant de nombreux siècles présente de nombreuses variantes de conception. Comme décrit dans les pages suivantes, on peut distinguer le pilotis dense de renforcement des sols servant d'appui directement aux maçonneries avec ou sans platelage, le pilotis avec grillage exécuté à sec à l'abri d'un batardeau, le caisson étanche échoué sur les têtes des pilotis recepés à grande profondeur, le pilotis enchâssé dans un massif d'enrochement avec platelage proche du niveau d'eau d'étiage, ou encore le pilotis enchâssé dans un massif de béton de chaux. Les pieux bois sont également utilisés pour exécuter des rideaux de vannage servant de parafouille ou de coffrage aux massifs de béton de chaux.

Dans leurs fondations, les ouvrages implantés sur des cours d'eau ou des rivières utilisent pratiquement toujours des éléments de bois, que ce soient des pieux, des

platelages, des caissons ou des vannages.  
Du point de vue des fondations, les constructeurs «modélisaient» les sols en trois classes :

- les terrains incompressibles et inaffouillables, qui ne peuvent pas tasser sous la charge des appuis ni être creusés et ravinés par l'action des eaux,
- les terrains incompressibles et affouillables comprenant les sables et les graviers, les argiles fermes, les tufs, les marnes et les calcaires feuilletés ou des roches dures schisteuses,
- les terrains compressibles et affouillables comprenant les sables argileux, l'argile sableuse, les marnes tendres, les argiles molles, les vases et la tourbe.

Du point de vue des moyens d'exécution, les terrains sont divisés en étanches ou perméables.

Ces définitions un peu sommaires étaient à analyser avec précaution. Il importait pour le concepteur d'étudier d'avance et avec grand soin pour chaque cas les terrains sur lesquels il avait à fonder des ouvrages. Dans ce document nous n'abordons pas les moyens de reconnaissance des sols de fondation de l'époque et leur évolution au cours des siècles.



## 1.2 Les batardeaux pour la mise à sec et la construction des fondations

### Mise à sec des sols de fondation par des petits batardeaux

La réalisation des semelles de fondation nécessitait la mise à sec des emprises des piles et culées dans la rivière. Quand la hauteur d'eau était faible et inférieure à 1 m ou 1,5 m et quand les sols alluvionnaires ou le substratum subaffleurant étaient peu perméables, les enceintes étaient assurées par des petits batardeaux en terre constitués des digues à talus incliné (figure 1).

Lorsque la profondeur d'eau atteignait 2 m environ, les terres de la digue étaient maintenues par des piquets de 0,10 m à 0,15 m d'équarrissage et enfoncés dans le sol. Des planches étaient fixées pour soutenir les terres et des enrochements protégeaient ces enceintes (figure 2).

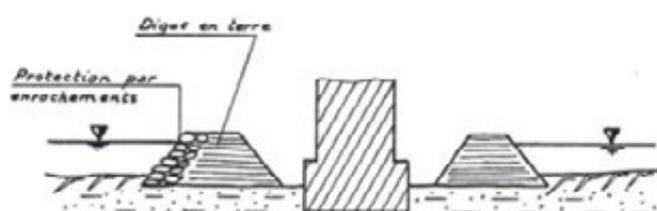


Figure 1 : Batardeau constitué d'une digue à talus incliné (crédit J-P Levillain)

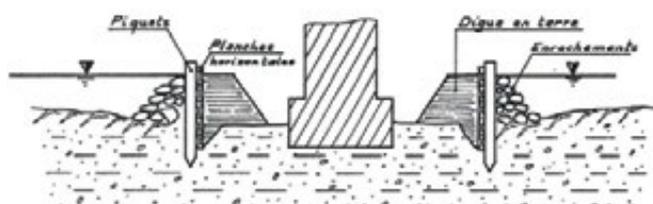


Figure 2 : Batardeau à une ligne de palplanches (crédit J-P Levillain)

### Batardeaux à deux lignes de palplanches.

Pour des profondeurs d'eau supérieures à 2,50 m les batardeaux devaient être constitués de deux lignes de pieux et de palplanches constituant un coffrage dans lequel on pilonnait la terre de manière à assurer l'étanchéité (figure 3). Les palplanches glissaient entre deux cours de moises horizontales qui servaient de guide lors du battage

des pieux. Cette disposition sera très utilisée jusqu'au deuxième tiers du XIX<sup>e</sup> siècle où les matériaux vont évoluer avec remplacement des bois par des éléments métalliques.

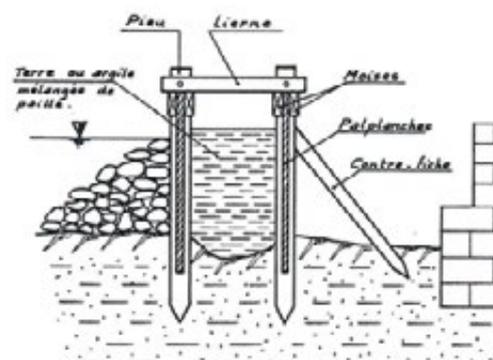


Figure 3 : Batardeau à deux lignes de palplanches fichées entre les lignes de pieux (crédit J-P Levillain)

Sur la figure 4, les palplanches sont placées contre les moises fixées elles-mêmes aux pieux dont elles maintiennent l'écartement. Cette disposition a été adoptée dans les grands batardeaux car elle dispense d'effectuer des raccords difficiles entre palplanches et pieux. Elle économise des moises et offre un écran continu de palplanches.

Ce type de batardeau à deux lignes de palplanches a été utilisé en particulier pour édifier les piles du pont de Gignac sur l'Hérault en 1800 avec de très grandes difficultés dues à la grande hauteur d'eau, de l'ordre de 7 à 8 m.

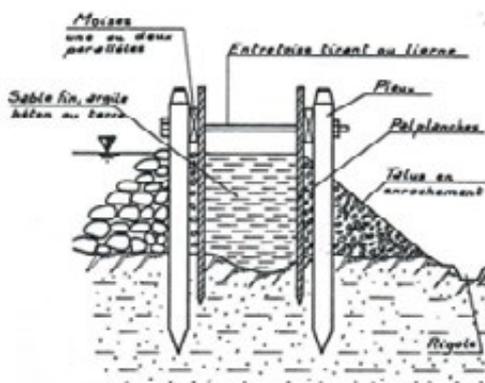


Figure 4 : Batardeau à deux lignes de palplanches disposées contre les moises et en avant des pieux pour assurer une continuité du rideau de vannage (crédit J-P Levillain)

## Batardeau sur terrain rocheux.

Quand le sol ne pouvait être pénétré par les pieux, on remplaçait ceux-ci par des fermes formées de montants verticaux reliés à la partie supérieure par des liernes doubles et par une entretoise avec croisillon (figure 5). Les infiltrations par le pied étaient prévenues par l'extérieur en plaçant un bourrelet d'argile protégé par des enrochements.

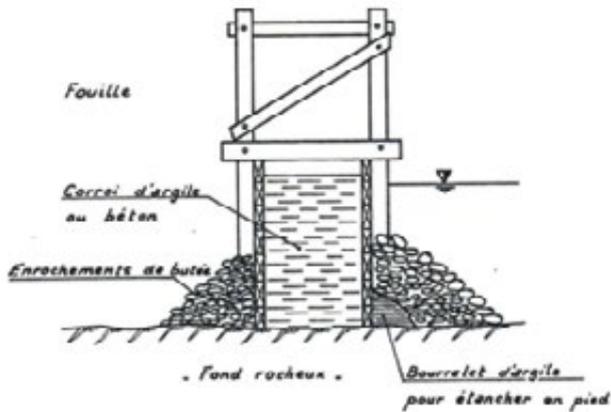


Figure 5 : Batardeau établi sur terrain rocheux (crédit J-P Levillain)

## Les fondations par épuisement dans de grands batardeaux

Depuis la période romaine et jusqu'au deuxième tiers du XVIII<sup>e</sup> siècle, dans les rivières où le niveau d'eau ne permettait pas un étiage suffisant pour que les sols soient à sec, ou dont les eaux ne pouvaient être détournées, les maçonneries des piles étaient édifiées dans le lit de la rivière en créant une enceinte que l'on mettait à sec par des épaissements.

Ce procédé d'un emploi difficile n'était applicable qu'aux rivières ayant peu de hauteur d'eau pendant l'été, les batardeaux ne pouvant maintenir qu'une faible différence de hauteur d'eau et les outillages rustiques de baquetage, de vis d'Archimède, de roues à godets ou de pompes à bras multiples ne permettant pas des épaissements à grande profondeur. L'enceinte créée dans la rivière était formée par des grands batardeaux constitués de deux rangs de pieux et palplanches maintenant entre eux un remblai de terre pilonnée. Le batardeau pouvait être unitaire et édifié pile par pile mais souvent l'enceinte permettait d'édifier deux ou trois piles, ou une pile et une culée (figures 6).

Le batardeau était déplacé successivement selon l'avancement du chantier. Dans ces enceintes, la fondation était située au plus bas possible pour être sous le niveau de l'étiage et était encastrée dans les sols pour résister aux

affouillements.

La technique de ces grands batardeaux sera abandonnée au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle. Cet abandon était motivé par la réduction des coûts induits par l'importante main d'œuvre qui devait assurer les travaux de pompage et d'évacuation des eaux de la fouille et surtout par les progrès dans les techniques de conception des fondations.

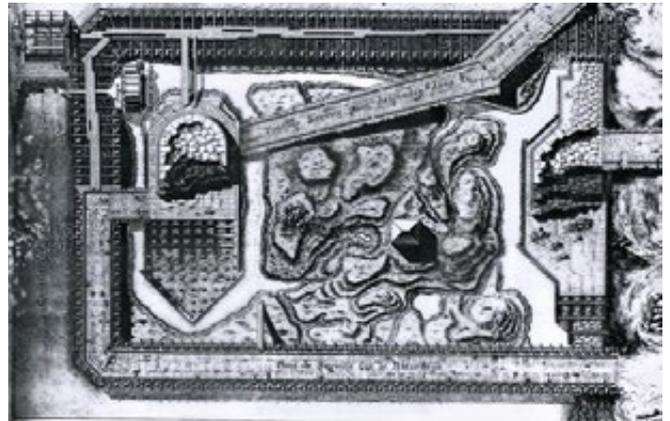


Figure 6 : Grand batardeau d'édification d'une pile et d'une culée du pont d'Orléans sur la Loire en 1751 (extrait de Construire des ponts au XVIII<sup>e</sup> siècle, presse ENPC 1986)



Figure 7 : Grand batardeau de construction du pont d'Orléans en 1751 (extrait de Construire des ponts au XVIII<sup>e</sup> siècle, presse ENPC 1986)

Le batardeau était également utilisé comme chemin de service. Sur la gravure en figure 7, on peut remarquer la disposition des très nombreux ouvriers manœuvrant les pompes, protégés du soleil et des intempéries par une toile de tente et la disposition d'une roue à aubes entraînant une chaîne à godets pour élever l'eau de la fouille. Sur la droite de la gravure en figure 7, on voit des ouvriers qui réalisent une excavation leur permettant de reconnaître la coupe des sols et des ouvriers qui procèdent à l'arrachage d'un pieu de bois. Ce dernier serait muni d'encoches permettant de donner une coupe du terrain d'assise. Au premier plan les ouvriers préparent le terrain pour venir édifier la culée.

## Les fondations par épaissement dans des batardeaux uniques

A partir du milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, des batardeaux uniques par pile seront mis en œuvre et il sera recommandé que les fondations sur pilotis soient arasées plus profondément sous le niveau du lit et sous le niveau d'étiage de la rivière. La technique du batardeau isolé à double rideaux de vannage et comblement par des argiles sableuses pour assurer l'étanchéité sera ainsi utilisée jusque vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle en général mais parfois jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle si le site s'y prête.

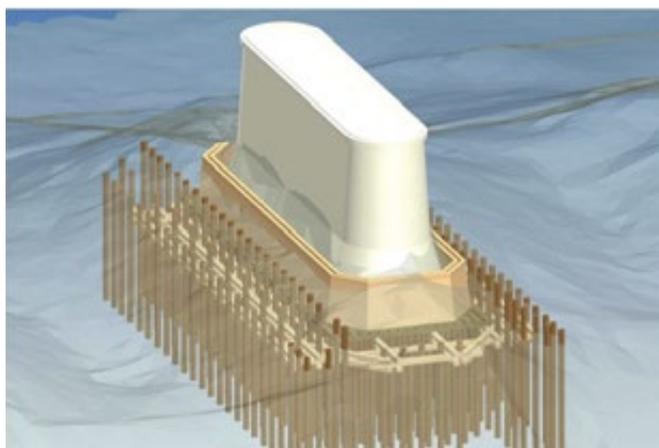


Figure 8 : Vue 3D du système de fondations du Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)

## 1.3 Les fondations sur semelles

Tous les constructeurs ont recherché sous les alluvions une couche géologique proche qui soit capable de reprendre les charges de la pile. Depuis l'époque romaine mais auparavant également et jusqu'à nos jours on a édifié des piles en rivière reposant sur des semelles posées directement sur le rocher subaffleurant ou sur les alluvions compactes avec un très faible encastrement. Cette technique de la semelle de la dimension du fût de pile (figure 10) pour les ouvrages antérieurs au XVIII<sup>e</sup> siècle ou légèrement débordante au cours des siècles suivants se retrouve à toutes les époques. Les ponts antérieurs au XVI<sup>e</sup> siècle qui subsistent actuellement sont généralement fondés sur le substratum rocheux subaffleurant.

Quand la semelle est peu encastrée et établie sur des alluvions grossières voire argileuses, elle peut reposer directement sur les alluvions ou sur un plancher de bois débordant ou non (figure 11) parfois protégé par un rideau parafouille de pieux de bois. Les travaux de fondation étaient effectués en basses eaux avec ou sans dérivation provisoire ou définitive du cours de la rivière ou à l'abri de petits batardeaux.



Figure 9 : Semelle de fondation de blocs taillés reposant sans encastrement sur le substratum rocheux. Pont Henri IV sur la Vienne à Châtellerault construit de 1556 à 1609 (crédit photo J-P Levillain)



Figure 10 : Vieux pont de Niort sur la Sèvre Niortaise de 1645, élargi en 1747. Fondation établie sur plancher bois reposant sur les alluvions sablo-graveleuses du lit (crédit photo J-P Levillain)

D'autres exemples de fondations sur semelles sont donnés sur les figures 12 et 13 ci-après. Le pont de Régereau sur le Vicoin en Mayenne date de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. La semelle de fondation débordante du fût de pile est constituée de moellons non équarris hourdés au mortier de ciment.

A Château-Garnier dans la Vienne, le pont communal sur le Clain est établi sur semelle peu encastrée dans le lit de la rivière constituée d'alluvions modernes sablo-argileuses.

La particularité de la semelle est d'être creuse en son centre et de ne comporter de la maçonnerie que sur son pourtour.

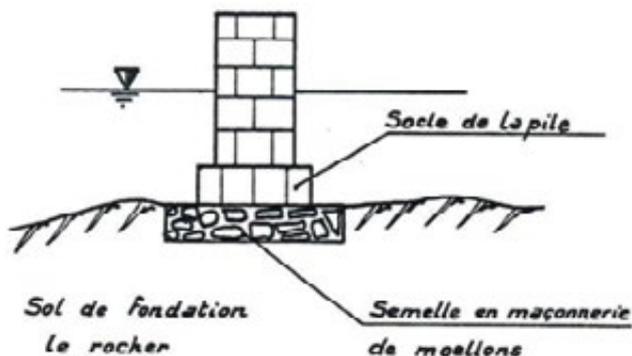


Figure 11 : Semelle de fondation en maçonnerie de moellons hourdés au mortier de ciment (crédit J-P Levillain)

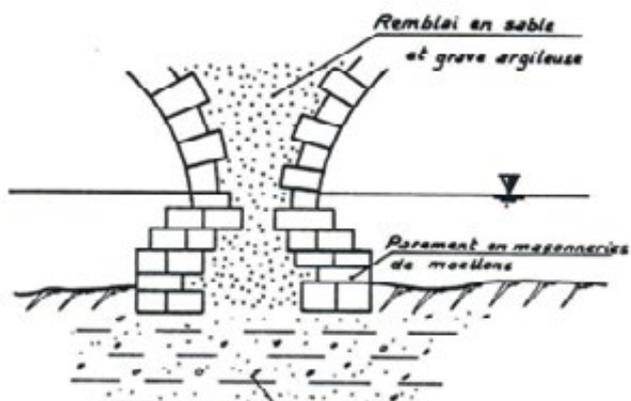


Figure 12 : Pont de Château-Garnier sur le Clain dont le parement de moellons taillés et maçonnés sert de coffrage à un remplissage de sable, de grave et d'argile. Semelle de fondation peu encastrée vulnérable aux affouillements et aux érosions du lit de la rivière ((crédit J-P Levillain)



Figure 13 : Pont de Régereau sur le Vicoin édifié latéralement à la rivière qui sera ensuite déviée sous l'ouvrage. Semelle de maçonnerie de moellons reposant sur le schiste et affouillée par le courant arrivant de biais (crédit photo J-P Levillain)

Le pont de Chasseneuil-du-Poitou sur le Clain est établi sur semelle de maçonnerie reposant sans encastrement sur les alluvions graveleuses de la rivière par l'intermédiaire de planches de bois disposées selon le schéma de la figure 14.

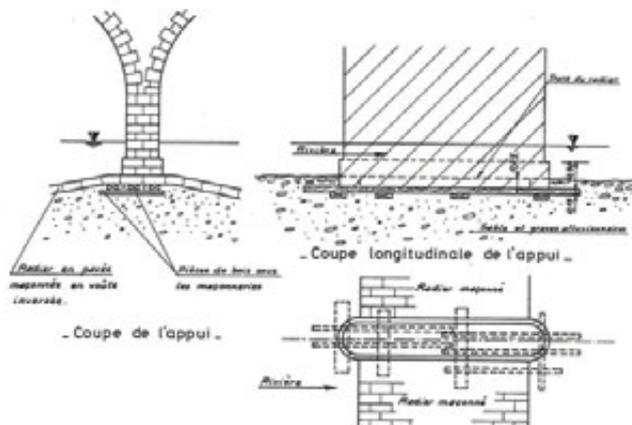


Figure 14 : Pile centrale du pont de Chasseneuil-du-Poitou sur le Clain. Relevé des bois de fondation de la semelle lors de l'érosion du lit par affouillement en aval par effet de seuil (crédit J-P Levillain)



Figure 14 bis : Pont de Chasseneuil-du-Poitou sur le Clain. Semelle de fondation avec planches de réglage établie sans encastrement dans les alluvions graveleuses. Protection du lit par un radier de pavage de moellons ici affouillé par l'aval avec création de cavité sous la semelle par érosion régressive (crédit photo J-P Levillain).



## 1.4 Les fondations sur enrochements

Le procédé le plus simple, et le premier employé, consistait à jeter des pierres dans la rivière pour y constituer des îlots sur lesquels en basses eaux on édifiait la maçonnerie des piles. Ce principe de construction était commun aux ponts à édifier sur les rivières et aux ouvrages de défense des ports maritimes.

La figure 15 extraite du livre sur l'architecture hydraulique tome II dressé par BELIDOR en 1737 représente la fondation de la digue de Cherbourg établie en 1780 sur un talus d'enrochements. Ce talus est représentatif des massifs d'enrochement établis dans certaines rivières pour y fonder des piles de pont. Ces fondations très massives conduisaient à des ouvertures variables des arches, à des avaries et des déplacements. Elles provoquaient des affouillements sur l'aval car leur réunion formait une digue transversale à la rivière. Ces fondations nécessitaient des travaux d'entretien et nombre des ouvrages ainsi fondés

comme sur la Saône et le Rhône sont actuellement détruits. Néanmoins quelques ouvrages sur des rivières modestes étaient édifiés selon ce procédé du XII<sup>e</sup> siècle jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle et encore localement au XIX<sup>e</sup> siècle.

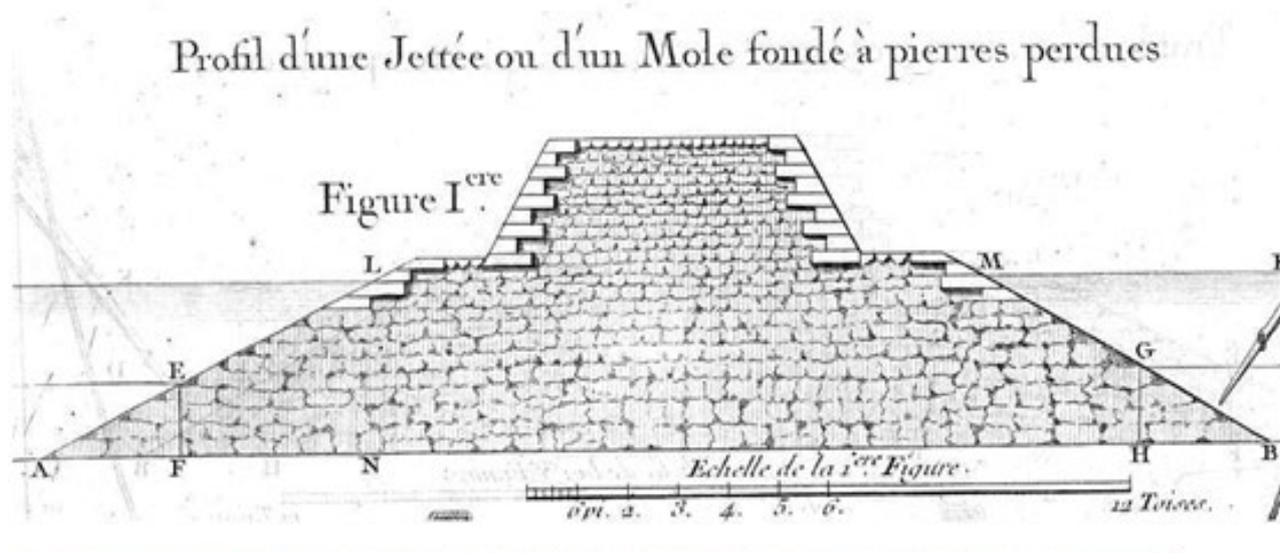


Figure 15 : Fondation sur enrochement (extrait d'Architecture hydraulique de Belidor de 1737)



## 1.5 Les fondations par encaissement

La méthode permettant de fonder par épaulement et par batardeaux présentant parfois des difficultés insurmontables et surtout des dépenses importantes et difficiles à apprécier à l'avance, les constructeurs ont cherché tous les moyens possibles de les éviter.

La méthode consistant à fonder par caisson dispense de mettre à sec l'emplacement de la fondation. Deux techniques sont alors utilisées.

Le batardeau édifié à la dimension de la fondation de la pile est constitué de deux files de pieux battus au pourtour. Ils sont réunis par des palplanches ou bordages ou encore par des fascines entrelacées. L'eau intérieure n'est pas épuisée, les batardeaux n'ont à résister qu'à l'action du courant de la rivière. Ces encaissements étant réalisés, on drague le fond pour atteindre le niveau solide sur lequel il est disposé du béton que l'on fait descendre au travers de l'eau en évitant de le délayer (figure 16). Le massif encaissé constitue un fond étanche permettant d'y édifier la maçonnerie à sec. Cette technique a été utilisée lors de la période romaine. Des blocs de maçonnerie taillés étaient immergés selon cette technique pour constituer le socle des appuis du pont.

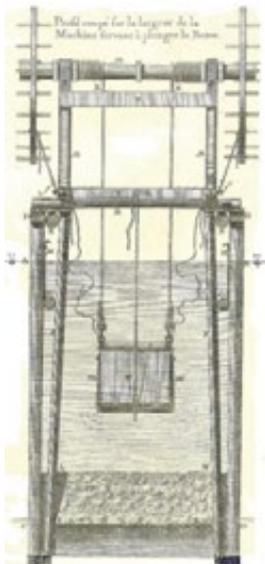


Figure 16 : Fondation par encaissement par un batardeau étroit (extrait d'Architecture Hydraulique, de Belidor, tome II de 1737)

La seconde technique a été mise au point par l'ingénieur franco-suisse Labeley qui en a fait usage pour construire le pont de Westminster sur la Tamise à Londres entre 1738 et 1750. Les caissons sont des bateaux ou des pontons à fond plat munis de bords verticaux montés à l'aide de planches et dont les joints sont calfatés<sup>1</sup> pour assurer leur étanchéité.

Ils sont mis à l'eau et conduits à l'aplomb du site de chaque fondation. Ils sont maintenus en place par des guides constitués de pieux battus entre lesquels ils peuvent coulisser (figure 17). Sur le plancher est édifiée la maçonnerie qui, en s'élevant régulièrement, charge le caisson. Elle l'entraîne sur les fonds de la rivière préalablement dragués où il s'échoue. La maçonnerie est édifée jusqu'au-dessus du plan d'eau puis les bords du caisson sont démontés, transportés et montés sur un nouveau plancher pour former un nouveau caisson.

<sup>1</sup>Rendre étanche, au moyen d'étoupe goudronnée, les points et les interstices des bordages

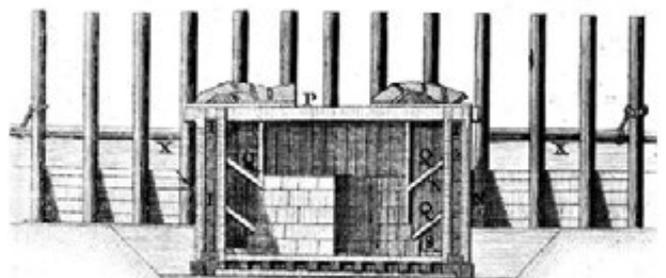


Figure 17 : Caisson étanche échoué sur les fonds préalablement dragués (extrait d'Architecture Hydraulique tome II par Belidor - 1756)



## 1.6 Les fondations sur radier général

Les fondations sur radier général sont exécutées au cours de tous les siècles du XI<sup>e</sup> jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle. Lorsqu'il n'était pas possible d'enfoncer des pieux dans des sols présentant des galets de trop forte dimension ou dans des sites pouvant être mis à sec par partie en détournant localement le cours d'eau restant l'été, l'établissement du radier général était envisagé.

On construisait sur toute la largeur du lit un fond artificiel en maçonnerie avec des blocs de forte section, assez solide et assez étendu à l'amont et à l'aval pour résister aux affouillements. Les piles étaient édifiées sur le radier. La figure 18 montre le radier de fondation d'un pont. Le radier est constitué d'un niveau de charpente sur lequel est édifiée une maçonnerie de fortes pierres.

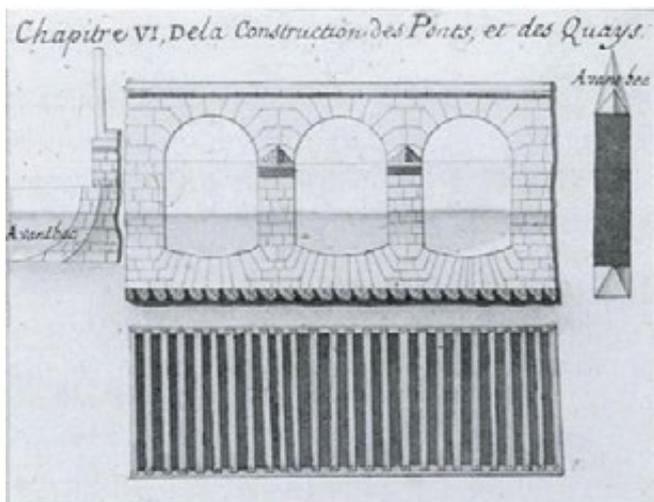


Figure 18 : Fondation sur radier général (extrait du traité d'architecture de Philippe de La Hire)

Ce procédé d'un emploi difficile n'était applicable qu'aux rivières ayant très peu d'eau en étiage. Il a été employé pour de grands ouvrages comme le pont de Régemortes sur l'Allier à Moulin construit en 1753-1763. Il a surtout été employé pour des ouvrages de longueur plus modeste. Ainsi le pont du XV<sup>e</sup> siècle sur le Clain (figure 19) est fondé sur un pavage de blocs assisés de forte dimension. Il assure une répartition des pressions et une protection contre les affouillements.

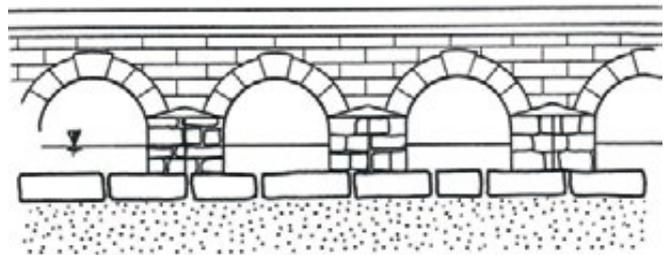


Figure 19 : Pont du XV<sup>e</sup> siècle sur le Clain à Chasseneuil-du-Poitou à arches de faible ouverture fondé sur un pavage de gros moellons (crédit J-P Levillain)

Pour des ouvrages modestes, souvent un seul niveau de plancher recouvert par un rang de forts moellons était construit directement sur les alluvions. En site terrestre, la maçonnerie de fondation pouvait être établie directement sur les sols argileux. La figure 20 montre dans une fouille de reconnaissance la fondation de deux piles du viaduc rive droite d'accès au pont de Cubzac sur la Dordogne, dont la construction date de 1836.

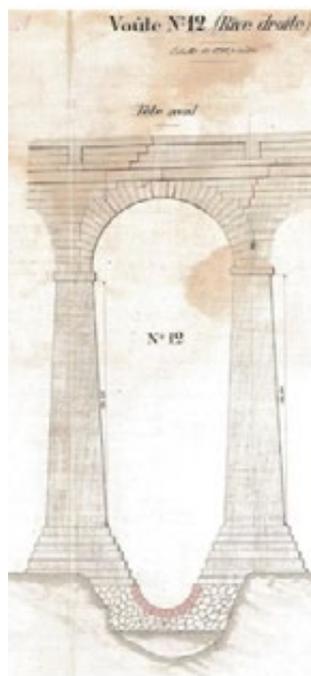


Figure 20 : Fondation établie en 1836 sur radier général des piles du viaduc d'accès rive droite au pont sur la Dordogne à Cubzac (extrait d'archives)



## 1.7 Les fondations sur massif de maçonnerie, de béton et de béton immergé

### Fondations à l'aide de caissons sans fond.

Pour limiter les travaux de batardeaux autour des piles de pont, en particulier quand la hauteur d'eau était grande, il a été mis au point des caissons sans fond à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Ils seront mis en œuvre pendant un siècle environ. Sur le fond préalablement dragué et dressé avec soin, on venait échouer une caisse prismatique étanche réalisée en charpente formant un tronc de pyramide. Ouverte en partie basse, cette caisse munie de bourrelets d'étanchéité et maintenue par des encochements à l'extérieur permettait de travailler à sec. Le terrassement pouvait y être poursuivi sous le fond du lit et y rechercher un niveau résistant non affouillable quand la nature des sols le permettait. L'épuisement étant assuré, la fondation était généralement construite en maçonnerie directement sur le fond du lit préalablement dragué. A partir des années 1822, le caisson sans fond n'était plus étanché en partie basse mais seulement en partie haute et on immergeait un béton de chaux hydraulique. Après prise du béton et épuisement au-dessus du massif, la base de la pile était construite à sec en maçonnerie.

A partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, des caissons en tôle seront utilisés, tant pour exécuter des fondations isolées que pour exécuter les enserrements des têtes des pieux avec du béton de chaux hydraulique.

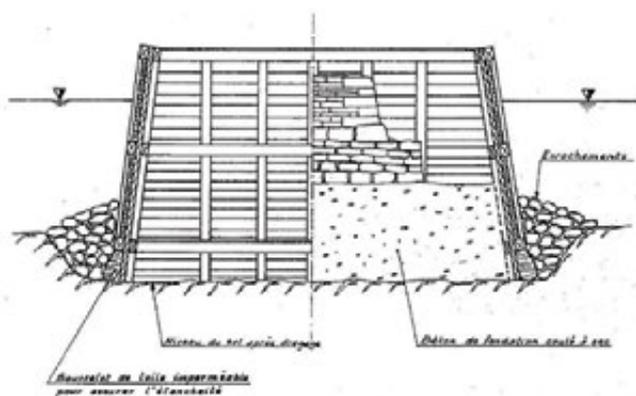


Figure 21 : Fondation par caisson étanche échoué sur les fonds (ministère des transports 1980)

### Fondations sur massif de béton de chaux.

En 1820, les travaux de Vicat mettaient au point l'utilisation des chaux hydrauliques faisant leur prise dans l'eau. La nécessité des épuisements pour construire les fondations est réduite voire supprimée. L'emploi des chaux hydrauliques changea ainsi l'art de construire des fondations.

A chaque emplacement d'un appui, au moyen de pieux et de palplanches formant un vannage, on construisait une enceinte ayant les dimensions de la pile. Dans cette enceinte préalablement draguée jusqu'au sol résistant et protégée à l'extérieur par des encochements, on coulait sous l'eau, au moyen de caisses spéciales, un massif de béton. Cette technique sera très utilisée tout au cours du XIX<sup>e</sup> siècle.



Figure 22 : Fondation sur massif de béton de chaux coulé derrière un rideau de vannage en bois qui, sur cet ouvrage sur le Cher, est détruit (crédit photo Hydro géotechnique)



Figure 23 : Fondation sur massif de béton de chaux immergé coulé à l'abri d'un rideau de palplanches bois (terrain inaccessible par épuisement). Pont Dumnacus sur la Loire aux Ponts - de - Cé 1846 -1850 (photo Wikipédia libre de droit et image d'archives)



## 1.8 Les fondations sur pilotis

Parmi les moyens employés pour supporter le poids des édifices sur des terrains qui n'ont pas la solidité nécessaire, les pilotis ont été le seul moyen employé depuis l'antiquité et pendant les deux millénaires actuels. Cette technique est basée sur l'expérience que les bois de chêne, de sapin et autres bois durs se conservent parfaitement quand ils sont toujours dans l'eau. Le pilotis est composé d'un grand nombre de pilots de bois enfoncés verticalement dans le sol sur lequel une fondation doit être établie.

**Ce principe du pilotis a été utilisé depuis l'époque romaine jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle pour établir des fondations sur des sols aux faibles propriétés.** Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle son usage s'est poursuivi pendant un demi-siècle, puis s'est réduit notablement en fonction des avancées de nouvelles techniques permettant d'atteindre des horizons portants.

Les techniques de construction sur pilotis vont évoluer lentement au cours des siècles en fonction des progrès réalisés sur les techniques d'épuisement et surtout après la création du corps des ingénieurs des Ponts et Chaussées au début du XVIII<sup>e</sup> siècle et du développement des sciences. Plusieurs techniques de conception de fondations sur pilotis vont apparaître au cours des siècles.

**Le fonctionnement des pilotis dépend de la nature et des propriétés des sols. L'expérience a guidé les constructeurs sans que les justifications de cette technique ne soient présentées. A partir du milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, les justifications des pieux de bois feront appel aux trois considérations suivantes :**

- les pilotis permettent de reporter les charges en profondeur sur une couche solide située sous un horizon non portant. Ils servent alors d'appuis aux charges appliquées par les constructions ;
- les charges appliquées que ne peuvent supporter les sols de surface sont transmises aux couches profondes par des pieux portant par leur pointe et par leur frottement sur les sols ;
- les pieux permettent de renforcer et de consolider les couches supérieures des sols. Un grand nombre de pieux de différentes sections est battu jusqu'à ce que les sols refusent le battage d'autres pieux et forment un massif cohérent. Cette technique où les pilotis sont de densité

et fiche variables selon les zones d'appui se retrouve au cours des siècles depuis l'antiquité et jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Selon les ouvrages et leur environnement on va trouver des modes de fonctionnement différent selon les sites et selon les conceptions des fondations.

### Fondation sur sol renforcé par un pilotis de petits pieux

Utilisé dès l'époque romaine, le renforcement des sols se faisait par un pilotis de petits pieux de faible section et de petite longueur. Dans des fouilles archéologiques on retrouve cette technique sous des remblais d'accès à des ponts. Ce principe est repris au Moyen-Âge pour assurer un renforcement des sols et établir les fondations en surface.



Figure 24 : Moulin pendu de Champtoceaux sur la Loire - Monument Historique du XIII<sup>e</sup> siècle (crédit photo JP Levillain)

Un exemple de fondation de ce type est rencontré sur la Loire à Champtoceaux au droit du Moulin pendu datant du XIII<sup>e</sup> siècle et classé Monument Historique (figure 24). Les picots de bois ont un diamètre variant de 7cm à 10 / 12 cm et des longueurs moyennes de l'ordre de 1 m. Le sol sableux était damé en surface avec ajout de pierres cassées pour recevoir la maçonnerie de l'ouvrage.

En Vendée, le pont du Bouil sur le Langon est établi sur des picots courts de faible section. La figure 25 montre le plan des archives de 1850 qui met en évidence la présence d'un vannage extérieur à la fondation constitué de petits pieux battus dans les alluvions argileuses et d'une semelle de propreté en béton de chaux ou de ciment sur laquelle est édifiée la maçonnerie des culées. L'élévation du pont a été établie suite aux travaux de reconnaissance des sols de fondation (figure 26).

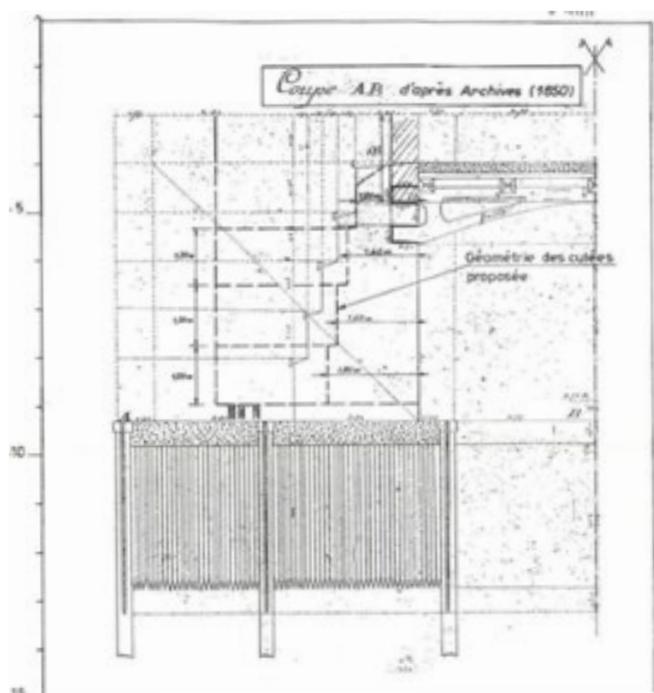


Figure 25 : Plan d'archives du pont du Bouil sur le Langon

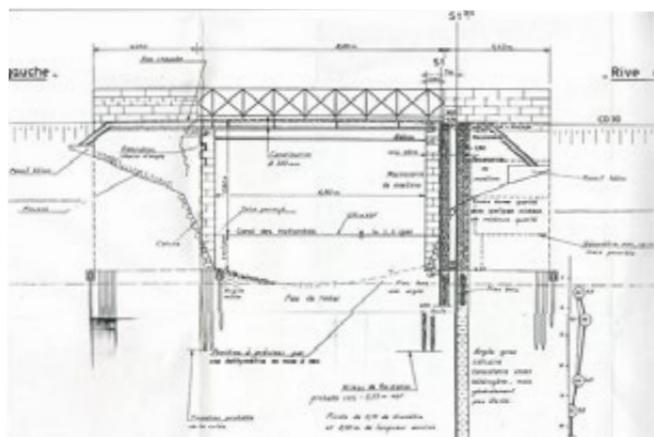


Figure 26 : Élévation-coupe du pont du Bouil sur le Langon (crédit J-P Levillain)

## Les pieux bois

Les pieux bois, de diamètres et longueurs variables, étaient apprêtés pour permettre le battage :

- taillés en pointe et équipés de sabots métalliques afin de faciliter leur pénétration dans le sol lors du battage,
- frettés en tête par un cerclage métallique afin de supporter les efforts et chocs lors du battage.

Pour les battages de pieux bois de « grandes » profondeurs, on procédait au manchonnage métallique de plusieurs pieux bois. Un premier pieux de longueur acceptable était enfoncé, puis l'on liaisonnait un deuxième pieux bois (non taillé en pointe) par goujon et manchonnage métallique avant de poursuivre le battage.

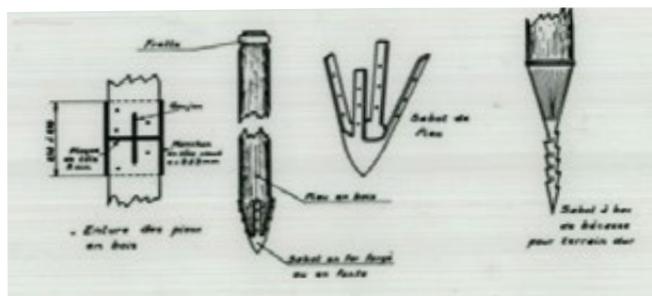


Figure 27 : Représentation de pieux bois



Figure 28 : Pieux bois

## Fondation sur pilotis et grillage

Après mise à sec de l'emplacement de plusieurs appuis derrière un grand batardeau, au droit de chaque pile était établi un massif de pilotis pénétrant dans le sol à une profondeur que l'on supposait à l'abri des affouillements et jusqu'à ce que la résistance à l'enfoncement indique qu'ils reposaient sur une base capable de porter l'ouvrage à construire. A partir d'une charpente en forme de grillage, les pilots étaient battus à l'intérieur des cases (figure 29). Le nombre de pilots était fixé par la recherche d'une densité aussi importante que le terrain pouvait recevoir. La densité des pieux demandée était très élevée (3 à 5 par mètre carré). Cette demande ne pouvait pas toujours être respectée, le battage des pieux intermédiaires pouvant provoquer la remontée des pieux adjacents. La densité des pieux n'était

donc bien souvent que de l'ordre d'un pieu par mètre carré. Le grillage avait une fonction de support et de plate-forme de travail pour les ouvriers et pour la sonnette de battage. Les pieux étaient recepés au-dessous de l'étiage.

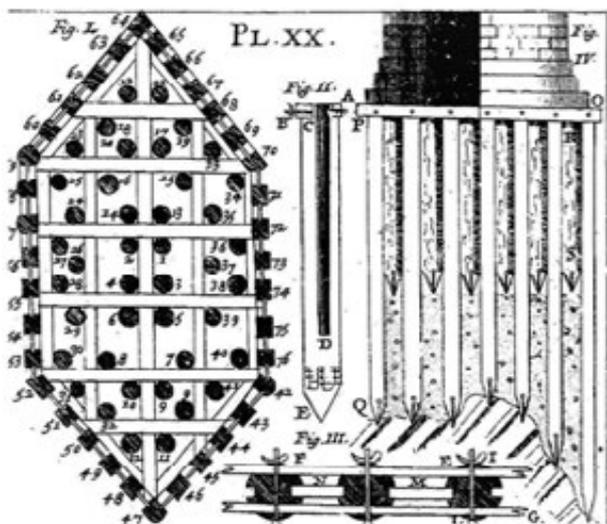


Figure 29 : Fondation sur sol renforcé par un pilotis de pieux battus (extrait *Traité des ponts* - Gauthey 1756)

Le sol entre les pieux était damé et renforcé par l'incorporation de pierres cassées. Recepés au-dessous de l'étiage, les pilotis étaient arasés au niveau du sol affleurant.

L'assise des premiers rangs de maçonnerie reposait sur le sol pilonné ainsi que sur les longrines et traversines utilisées pour les travaux d'exécution du battage des pilotis.

Notons que sur des ouvrages de la période du Moyen-âge (les fondations ont été reconnues lors de travaux de restauration), les fondations sont formées de quelques pieux bois de faible longueur, battus au travers des alluvions et d'un sol pilonné de pierres cassées. Les premières assises de maçonnerie reposent sur les sols et les quelques têtes des pieux battus.

Le grillage de longrines et de traversines pouvait être ou non recouvert d'un plancher de bois sur lequel on construisait la maçonnerie. Cette pratique se retrouve sur des ouvrages des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles et pendant la première moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, comme on le retrouve sur les fondations du pont de Blois sur la Loire (figure 30).

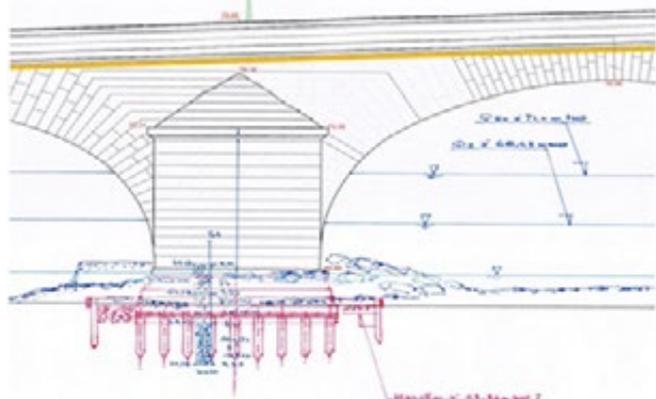


Figure 30 : Élévation-coupe d'une pile du pont de Blois sur la Loire 1717-1724 (crédit J-P Levillain)

Au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle, la disposition des pieux de bois dans la fondation a été améliorée en exécutant un battage des pilots respectant le quadrillage de la charpente. Les pilots recepés plus profonds étaient assemblés par tenons et mortaises sur des longrines et des traversines avant d'être recouvert d'un plancher recevant les maçonneries. Au cours de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, la technique a été améliorée en réalisant un dragage des sols et en utilisant des batardeaux adaptés aux dimensions des appuis (figure 31).

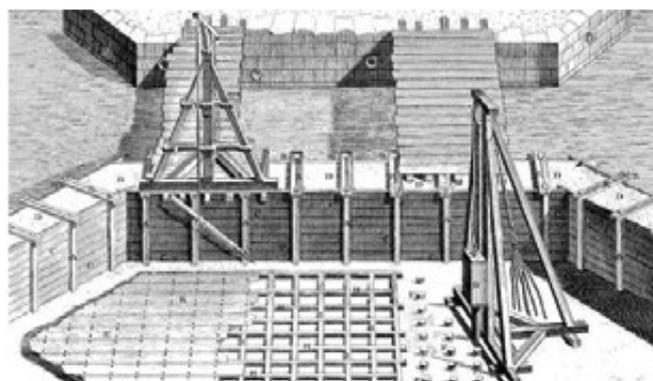


Figure 31 : Fondation par épaissement d'un grand batardeau et battage des pieux bois selon une maille prédéfinie. Extrait de *l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert* - 1765.

Après mise à sec de l'emplacement de plusieurs appuis derrière un grand batardeau, au droit de chaque pile était établi un massif de pilotis pénétrant dans le sol à une profondeur que l'on supposait à l'abri des affouillements et jusqu'à ce que la résistance à l'enfoncement indique qu'ils reposaient sur une base capable de porter l'ouvrage à construire. S'il y avait une hauteur hors sol, celle-ci était consolidée par des enrochements. Recepé au-dessous de l'étiage, le pilotis était ou non recouvert d'un plancher de bois sur lequel on construisait la maçonnerie.

Pour assurer un serrage des sols, les pilots étaient battus en commençant par le centre de la pile et en tournant pour aller jusqu'à la périphérie.

## Fondations sur pieux bois réalisée à sec sans batardeau

Quand le niveau d'étiage de la rivière le permettait, ou en exécutant une dérivation provisoire, la fondation sur pieux bois pouvait être exécutée à sec sans batardeau. Après battage des pieux il était posé des longrines et traversines assemblées à mi-bois sur les têtes des pieux. Si la hauteur hors sol était grande, les pieux étaient enchâssés d'enrochements qui assuraient le contreventement (figure 32).

Ce dernier était imposé à partir du début du XIX<sup>e</sup> siècle par le conseil général des Ponts et Chaussées. L'arase des pieux et du platelage était imposée vers 0,35 m en dessous du niveau d'étiage.

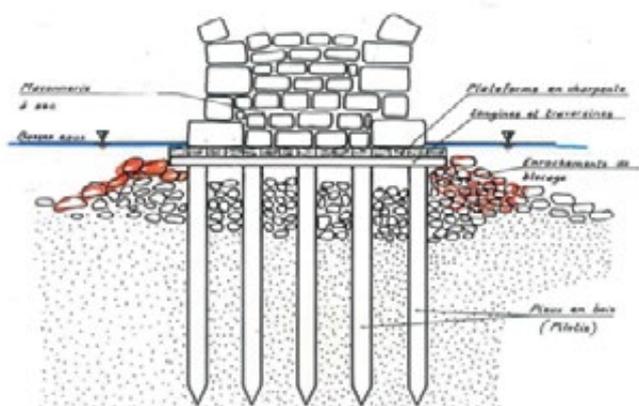


Figure 32 : Fondation sur plancher bois et pieux battus contreventés par des enrochements (crédit J-P Levillain)

Mise en œuvre sur de grands ouvrages, comme les appuis rive gauche du pont de Tours sur la Loire en 1775 ou sur la pile rive gauche du pont d'Iéna sur la Seine à Paris en 1810, cette technique est surtout mise en œuvre sur des ouvrages modestes.

### Fondations sur pilotis et caisson échoué.

Mis au point lors de la construction du pont Cessart sur La Loire à Saumur en 1756, le batardeau était remplacé par une caisse parfaitement étanche amenée par flottaison au-dessus du pilotis. Dans chaque caisson, la construction de la maçonnerie de la pile se chargeait progressivement et produisait un enfoncement jusqu'au moment où il venait reposer sur la tête des pieux. Des caissons analogues avaient été utilisés par un Français au pont de Westminster sur la Tamise en 1746. Les caissons étaient échoués sur le fond de la Tamise préalablement draguée. Avec la mise au point d'une scie à recéper les pilots dans l'eau sous une grande profondeur d'eau (2 à 6 m), l'utilisation des caissons échoués a été pendant un siècle la seule méthode employée pour édifier les grands ponts dans de grandes hauteurs d'eau.

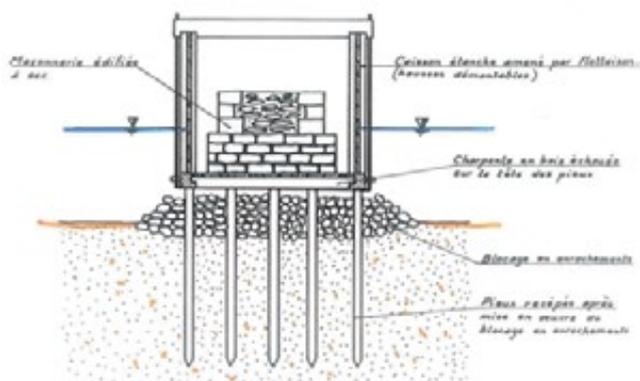


Figure 33 : Fondation sur pieux et caisson échoué (crédit J-P Levillain)

Cette technique a été utilisée durant la période de 1755 à 1875. Le dernier ouvrage de ce type est le pont Eiffel sur la Dordogne à Cubzac reconstruit en 1875 selon cette technique.



Figure 34 : Pont Cessart sur la Loire à Saumur (1755-1767) pile 3 sur 116 pilots recépés entre 2,50 m et 4,50 m sous l'étiage (crédit photo J-P Levillain)

### Fondations sur pilotis enchâssés dans un massif de béton.

Exploitant les travaux de Vicat et la mise au point des bétons de chaux hydraulique faisant leur prise dans l'eau, la technique des fondations sur pilotis a été complétée par l'exécution d'un massif de béton enserrant les têtes des pieux. Cette disposition avait pour but d'éviter le déversement latéral des pieux émergeant du fond du lit et de supprimer les risques d'abrasion des pieux. Mise en œuvre en 1814 au pont d'Iéna sur la Seine à Paris en enserrant les hauts des pieux émergeant du lit, le massif était constitué de sols traités à la chaux vive.

La technique du massif de béton de chaux enserrant les têtes des pieux sur des hauteurs de l'ordre de 1 à 2 ou 3 m sera poursuivie pendant un demi-siècle jusque vers 1885.

Le rideau de vannage servant de coffrage au béton de chaux hydraulique avait également une fonction de batardeau pour édifier les maçonneries de la pile.

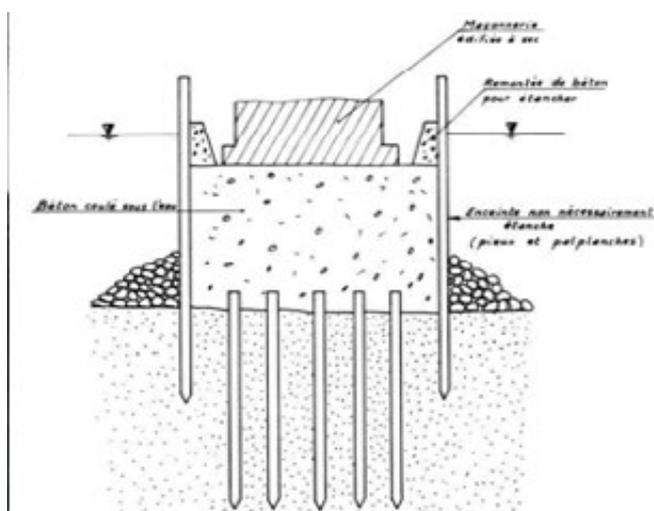


Figure 35 : Fondation sur pieux enchâssés dans un massif de béton de chaux (crédit J-P Levillain)

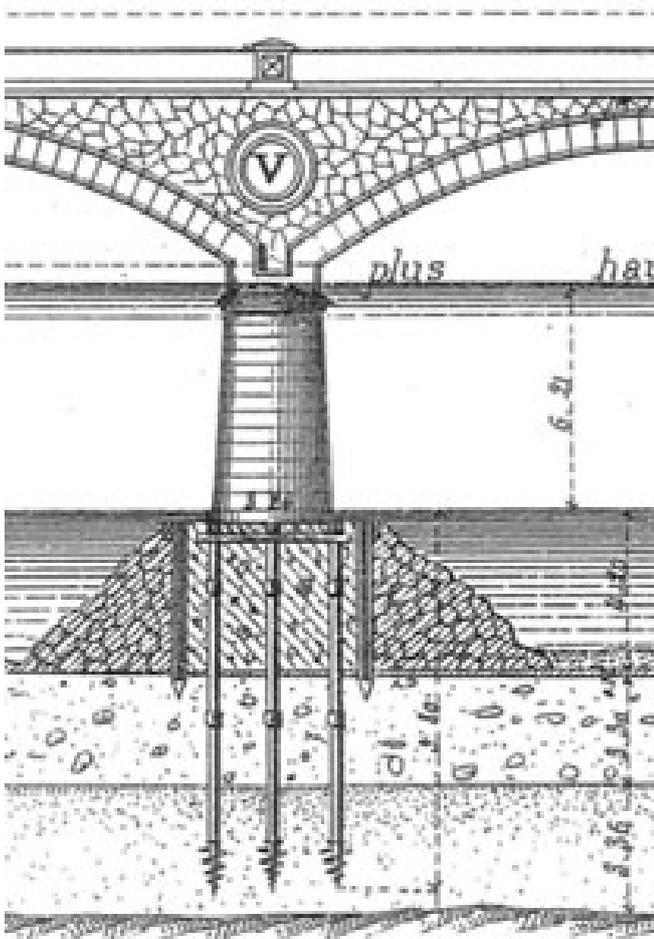


Figure 36 : Le pont de Vouneuil sur la Vienne construit en 1878 où le platelage est proche du niveau d'étiage de la Vienne (extrait LinkedIn publication STRRES du 07/03/2020)

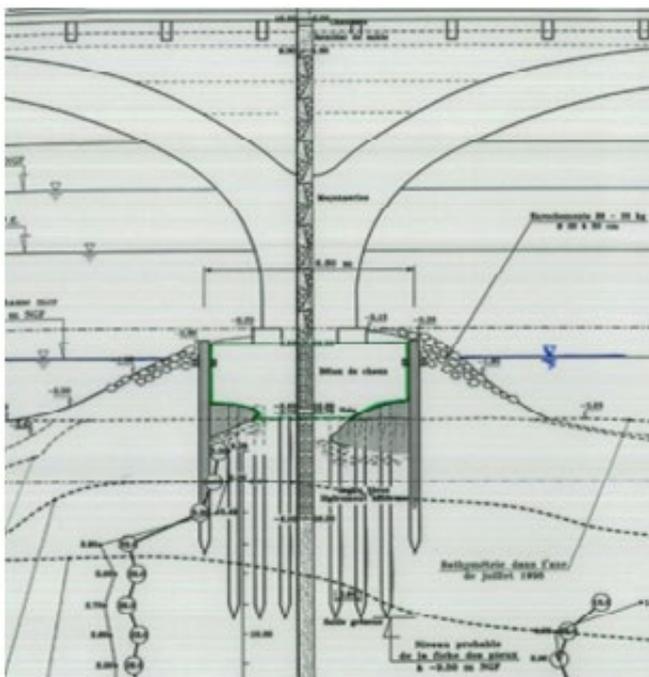


Figure 37 : Pont de Port de Lanne sur l'Adour construit en 1875 (image d'archives)

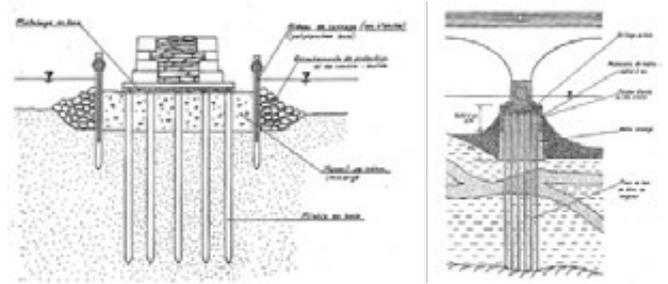


Figure 38 : Illustrations de massif de béton de chaux enserrant les têtes des pieux

## Fondations sur puits blindés ou massif isolé.

Ce type de fondation fait appel aux techniques employées depuis toujours par les puisatiers ou les mineurs. La technique utilisée à partir de 1860 nécessitait la présence de terrain tendre et peu perméable ce qui en limitait son utilisation.

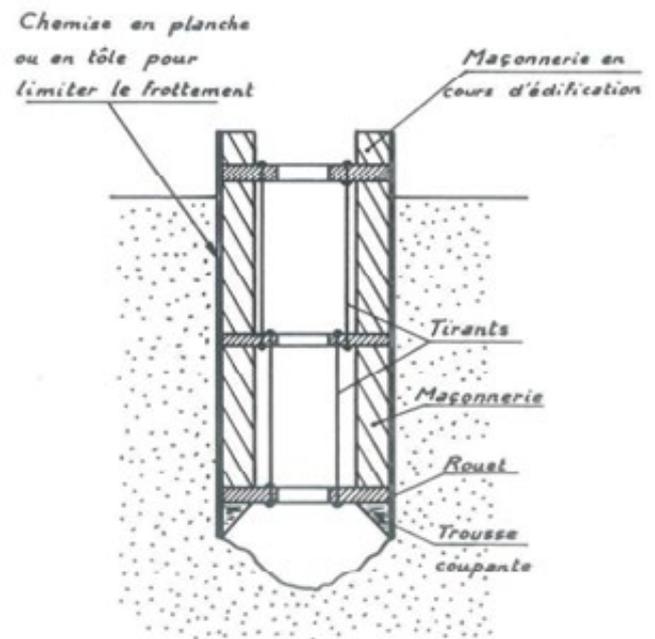


Figure 39 : Illustration de mise en œuvre de puits havé

Après terrassement des sols de surface et battage de pieux guides, il était mis en place des cadres en bois étrépillonnés et des madriers formant blindage. Le puits était terrassé à l'air libre puis rempli de béton en partie basse et de maçonnerie pour former l'assise de l'ouvrage. A partir des années 1875, le procédé a fait appel à des puits en maçonnerie préfabriqués en surface du sol. Un rouet en bois ou métallique muni d'un couteau en fonte était placé sur le sol. Sur ce rouet était construite la maçonnerie sur une hauteur de 1,50 m environ puis un second rouet était placé au-dessus et relié au premier par des tiges de fer. Le terrassement s'effectuait à l'intérieur, à l'air libre, de façon à enfoncer l'ensemble. Le puits était édifié au fur et à mesure de l'enfoncement. Cette technique est toujours employée aujourd'hui mais avec des fûts de béton armé.

## Fondations tubulaires.

L'application pratique de l'air comprimé pour creuser dans les terrains aquifères est due à J. Triger exploitant une mine de houille au sud d'Angers en 1839. Ce procédé sera repris pour fonder des ouvrages d'art sur caissons havés et sur des tubes.

Les fondations tubulaires se composent de tubes de fonte élémentaires qui sont assemblés les uns aux autres. Ces tubes ouverts dans leur extrémité basse étaient munis pour leur descente d'un sas à air comprimé. D'un diamètre de 2 à 4 m, les ouvriers enlevaient les déblais à la base du tube. Après descente à grande profondeur dans le sol pour que les affouillements ne soient plus à craindre, ils étaient remplis de béton.

Ce type de fondation a été utilisé à partir de 1851 après sur plusieurs ouvrages sur des rivières pendant une dizaine d'années, puis abandonné.

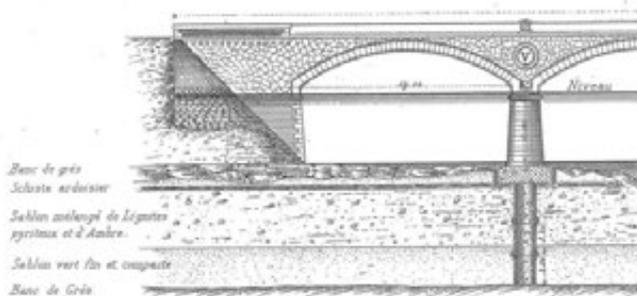


Figure 40 : Fondation tubulaire (image d'archive)

## Fondations sur caissons havés sous air comprimé.

Les fondations tubulaires furent abandonnées rapidement, car les caissons perdus havés sous air comprimé apparus dès 1849 présentaient des avantages. Plus économiques et résistants beaucoup mieux aux efforts horizontaux, les caissons perdus différaient des fondations tubulaires par la section havée. Après quelques réalisations en maçonnerie, le caisson était construit en métal. Il comportait une chambre de travail surmontée de hausses également métalliques. La chambre de travail présentait un couteau à la base et un plafond raidi par une crinoline. Selon les dimensions en plan du caisson havé, la chambre de travail était reliée par une ou deux ou trois cheminées assurant le passage des ouvriers, l'extraction des déblais puis l'apport des maçonneries ou des bétons de comblement. Les cheminées étaient munies d'un sas mettant la chambre en pression pour équilibrer la pression hydrostatique due à la nappe. Le terrassement était effectué à sec. Le caisson s'enfonçait par havage sous le poids des maçonneries édifiées à sec sur le toit de la chambre de travail, entre les hausses (Figure 41).

Après comblement de la chambre de travail et parfois injection, le ou les sas étaient retirés, les cheminées étaient démontées et leurs emplacements comblés.

Des variantes de conception ont été exécutées soit en supprimant les hausses métalliques et en édifiant par niveaux successifs la maçonnerie de l'ouvrage avec des ancrages dans le toit de la chambre de travail, soit en créant des hausses récupérables par flottaison ou par des vérins

en fin de construction.

En créant des chambres de travail de grande hauteur, l'ouvrage pouvait être édifié sur les sols résistants situés sous le plan d'eau des rivières ou de la mer, directement dans cette chambre de travail. Le caisson comportant une charge amovible était relevé par flottaison et déplacé latéralement sur la partie latérale voisine à construire. Cette technique a été très utilisée pour la construction des barrages fluviaux, pour édifier la base des quais portuaires ou encore pour effectuer des déroctages des avant-ports.

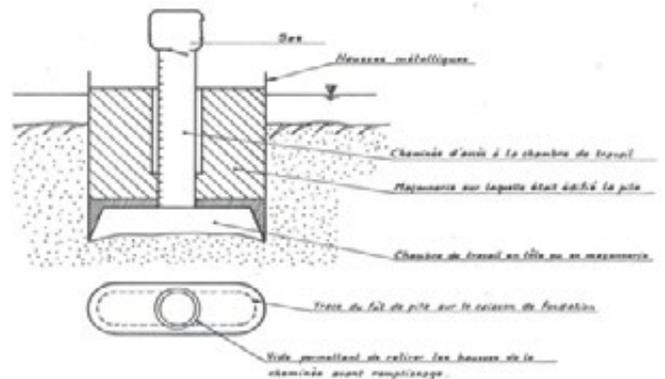


Figure 41 : Schéma de principe d'un caisson havé sous air comprimé

## 1.9 Prise en compte historique des problématiques d'affouillement et de pourrissement des pieux bois

### Prise en compte dès la conception des ouvrages de la problématique de pourrissement du bois

Comme indiqué ci-avant, les modes constructifs d'époque imposent des recépages des têtes de pilotis bois sous le niveau d'étiage (0,35m).

La problématique de pourrissement des pieux et platelages bois en cas d'abaissement de la ligne d'eau est donc connue de longue date et caractéristique de ces fondations comme en témoigne l'extrait du cours de Monsieur Résal de 1896.



2° D'autre part, les bois de la plate-forme ne peuvent échapper à 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 existante au-dessus des enrochements.

Figure 42 : Extrait de l'encyclopédie de Travaux Publics de 1896

### Protections anciennes des fondations contre les affouillements

Tout comme la problématique de pourrissement des éléments bois en cas de mise à l'air, les problématiques d'affouillement des piles et systèmes de fondations sont aussi connues de longue date et ont toujours fait l'objet d'attentions et de systèmes de protection adaptés.

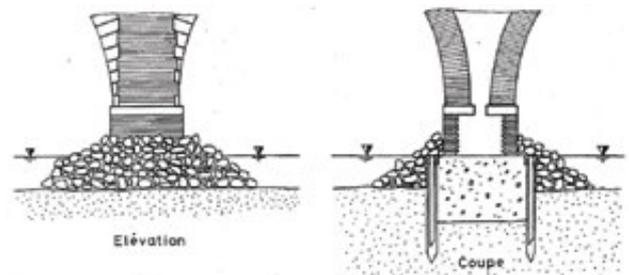


Figure 43 : Protection d'un appui par des enrochements

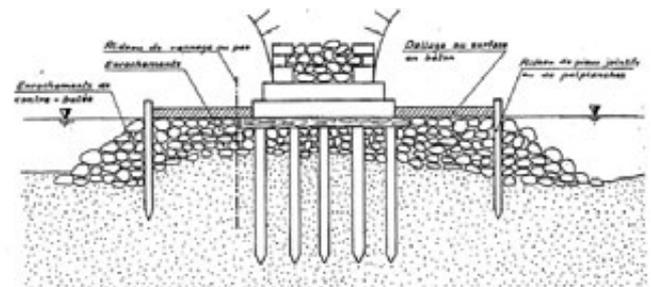


Figure 44 : Protection d'un appui par une crèche.

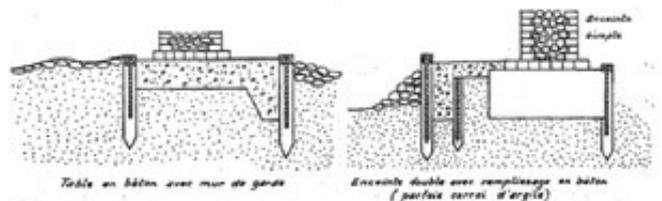


Figure 45 : Protection d'un appui par des rideaux parafoilles

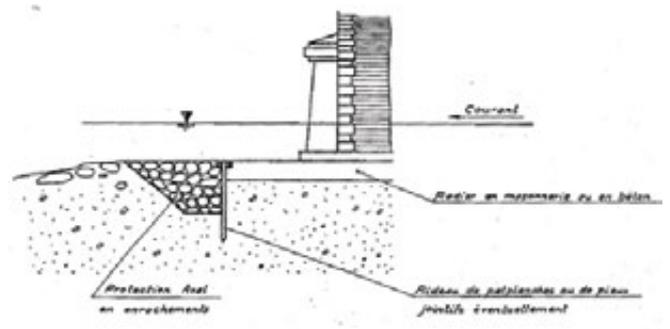


Figure 46 : Protection par un radier général



## 1.10 Le matériau bois

On pourra se référer à la thèse de doctorat présentée pour l'obtention du diplôme de docteur de l'université Paris-est par Jérôme Christin *Système de fondation sur pieux bois : une technique millénaire pour demain*. Cette thèse fournit des données détaillées sur le matériau bois. Nous fournirons dans le présent document les principales données sur le matériau bois permettant de comprendre notre problématique.

### Le bois est un matériau issu de l'activité biologique de l'arbre.

La coupe transversale d'un tronc d'arbre (résineux ou feuillu) fait apparaître cinq parties différentes (Figure 47) :

- l'écorce, composée de cellules mortes ;
- le liber, dont la majorité des cellules qui le compose est également morte ;
- le cambium, qui constitue la partie du tronc dans laquelle se produit la croissance radiale ;
- l'aubier, composé de cellules vivantes en voie de «duraminisation» : les cellules de l'aubier transportent la sève brute des racines aux feuilles ;
- le duramen (ou bois parfait), composé de cellules mortes qui ont terminé leur évolution.

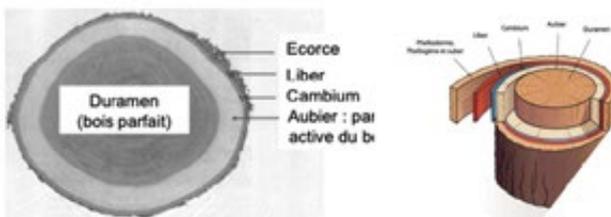


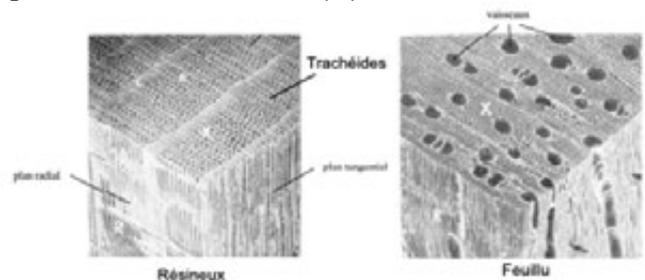
Figure 47 : Coupe de principe et constitution d'un tronc d'arbre (Barbe et Keller, 1996)

Les 3000 espèces de végétaux ligneux identifiées dans le monde sont réparties en deux classes de bois différentes, les résineux et les feuillus, dont les propriétés structurelles diffèrent (Figure 48) :

### Structure élémentaire du bois

Le bois des feuillus est constitué en majeure partie de duramen avec une partie aubier peu importante ; A l'inverse des feuillus, les résineux sont majoritairement constitués d'aubier et une plus faible partie duramen.

Figure 48 : Observation microscopique d'un résineux et d'un



feuilu (Barbe et Keller, 1996)

Pendant des siècles, voire des millénaires, les bâtiments et les ponts ont été érigés sur des pieux en bois battus dans des terrains possédant de faibles propriétés mécaniques. Avant le XVIII<sup>e</sup> siècle, la sélection d'une essence de bois par rapport à une autre était liée à la nature des forêts situées à proximité des chantiers. Par exemple, l'abondance des forêts de chêne dans l'est de la France ou du pin maritime dans le sud-ouest en faisait des essences très utilisées dans ces régions pour la construction des fondations.

La révolution industrielle au XVIII<sup>e</sup> siècle et l'essor des réseaux ferré et routier au XIX<sup>e</sup> siècle ont été à l'origine du développement du commerce et du charbon en Europe. Les progrès technologiques ont contribué à diversifier les essences jusque-là utilisées sur les chantiers. Ainsi, le pin



sylvestre (produit essentiellement dans le nord de l'Europe), qui était moins coûteux que les autres essences, a été largement utilisé dans la construction des fondations des bâtiments et des ponts à cette époque.

La proximité des ressources naturelles et le coût étaient alors les deux critères retenus dans le choix des essences destinées à être utilisées dans les fondations. Seuls les ouvrages d'intérêt civil et militaire de premier plan bénéficiaient de bois plus lointains, comme les bois tropicaux et africains.

De manière courante, on trouve, dans les cas de fondations sur pieux bois, des pieux en chênes et des pieux en pin.

## Caractérisation du bois

### Composition physique du bois :

Elle est définie principalement par la densité (ou masse volumique) et le taux d'humidité. La masse volumique varie de 0,05 à 1,4 kg/dm<sup>3</sup> en fonction de l'essence mais également en fonction du sol, du climat et de l'exposition. Les résineux ont une croissance plus rapide que les feuillus. Ils ont donc des cernes d'accroissement plus larges et forment un bois plus léger.

Cernant le taux d'humidité (rapport entre la masse d'eau et la masse de bois sec), celui du bois sur pied est de 50 % à 100 %. Après la coupe, l'eau s'évapore peu à peu. Le bois débité est dit «vert» tant que sa teneur en eau est supérieure à 30 %. En deçà, le bois est dit «sec». Les variations d'humidité influent sur les variations de volume (gonflement, retrait), les propriétés mécaniques (le bois est plus résistant quand il est sec), les propriétés calorifiques et la conservation du bois (plus sensible à la pourriture quand le bois est humide) [Bigot, 2014]. En charpente, une valeur typiquement inférieure à 22% est recherchée, que ce soit en intérieur (classe d'emploi ou de risque 2) ou extérieur (classes 3 - 4) et maximum 30 % pour les jetées, pontons sur mer (classe 5).

### Propriétés mécaniques du bois :

La variabilité des essences et des qualités des bois, présentant différentes propriétés mécaniques, complique le dimensionnement des structures en bois. Afin de limiter cette variabilité, des classes de résistance des bois, en fonction de leur nature (résineuse ou feuillue) et de leur résistance caractéristique en flexion (fractile à 5 %, exprimée en MPa) ont été établies dans la norme européenne NF EN 338 (AFNOR, 2009). Le tableau ci-dessous présente ces classes de résistance, ainsi que les propriétés de résistance (flexion, traction et compression axiales, cisaillement), de rigidité (modules moyens d'élasticité axial et transversal) et la masse volumique du bois. Les valeurs ont été établies pour l'humidité du bois égale à 12 %.

Les plus hautes classes de résistance correspondent à des bois de charpentes et structures ayant suivi des traitements et étuvages particuliers et soignés.

Ceci étant, les bois de fondations en pin métropolitain, de plus grosse section et présentant de fait des difficultés d'étuvage et de traitement, sont usuellement de classe C18 à C22.

Le chêne, comme l'acacia, est de classe D30 ou 35.

**Du fait des conditions spécifiques liées à l'emploi des pieux en bois dans le sol (battage des pieux, variation de l'humidité et de la température dans le sol), les valeurs présentées à la figure 49 qui sont utilisées pour des bois de structure «à l'air» ne sont pas adaptées pour une utilisation du bois enterré. Néanmoins, en l'absence de données propres aux pieux en bois, on utilisera comme première approximation cet ensemble de paramètres.**

	Résineux												Feuillus							
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<b>Propriétés de résistance (MPa) (valeurs caractéristiques)</b>																				
Flexion	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Traction axiale	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Compression axiale	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Cisaillement	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
<b>Propriétés de rigidité (GPa) (valeurs moyennes)</b>																				
Module moyen d'élasticité axiale $E_{moy,Long}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Module moyen d'élasticité transversale	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Module moyen de cisaillement $G_{moy}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,85	1,06	1,25
<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) (valeurs moyennes)</b>																				
Masse volumique moyenne	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080

Figure 49 : Classe de résistance et valeurs des propriétés de résistance, de rigidité et des masses volumiques (modifiée d'après la norme NF EN 338, AFNOR (2009))

# 2

## Les pathologies constatées

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

**2.2 Les affouillements des appuis**

Réduction de la portance d'appui

Effondrement par déversement latéral des pieux non contreventés

**2.3 Altération des massifs en béton de chaux**

**2.4 Les manifestations visibles des désordres**

Déformation du profil en long

Fissuration, voire fracturation de l'ouvrage

L'effondrement



**Le lecteur pourra se reporter au guide STRRES FABEM 6.1 V2 Réparation et renforcement des maçonneries : Chapitre 4.3.11: Altérations et désordres des fondations, qui traite des pathologies observées et, de manière générique, des causes associées.**

**Comme indiqué précédemment (chapitre 1.9), les fondations des ouvrages maçonnés ont été conçues en tenant compte :**

- des niveaux d'étiage constatés à leur époque de construction,
- de l'abrasion mécanique, de l'érosion et de l'affouillement au niveau des appuis.

**Les ouvrages ont alors été construits en prévoyant :**

- des éléments bois en permanence immergés et recépés à une altimétrie en conséquence,
- des protections mécaniques (enrochements notamment) des appuis.

**Néanmoins, les cours d'eau peuvent subir une évolution naturelle (transport de sédiments ...). Les protections mécaniques mises en œuvre à l'origine peuvent se dégrader dans le temps et des affouillements des appuis peuvent apparaître. Ces parties d'ouvrages doivent donc, au même titre que tout le reste des ouvrages et en dehors de facteurs extérieurs aggravants, faire l'objet d'un suivi et d'un entretien régulier.**

**Nous constatons malheureusement un déficit de suivi et d'entretien de ces parties d'ouvrages et une négligence ou une méconnaissance de l'évolution naturelle des cours d'eau.**

**Pour différentes raisons que nous développerons plus tard et au-delà des évolutions naturelles de nos cours d'eau, ceux-ci sont sujets à diverses modifications, induites tant par l'activité humaine que par l'évolution climatique, et pouvant engendrer :**

- un abaissement des lignes d'eau pérenne ou en période d'étiage,
- un abaissement des lits.

**Ces facteurs aggravants accentuent notablement les phénomènes d'érosion et d'affouillements des appuis, mais remettent surtout en question le système constructif lui-même puisque les éléments bois peuvent se retrouver hors d'eau alors qu'ils ne sont pas conçus comme tels.**



**Les impacts sur les fondations des ponts de ces diverses modifications de nos rivières**, naturelles et induites par l'activité humaine et le changement climatique, sont donc :

- mise à sec partielle des fondations des ponts, des butées de pied et des berges protégées, consécutive à l'abaissement de la ligne d'eau (de manière pérenne ou en période d'étiage) :
  - les bois prévus pour être toujours immergés peuvent être, ou pourront être, émergés de nombreux mois, voire années, et pourrir en perdant ainsi leurs caractéristiques mécaniques,
  - 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 par effet d'abrasion ;
- ou affouillements et perte de portance et / ou de butée latérale consécutive à l'abaissement du lit, ou aux affouillements.

**Les désordres, au niveau des fondations, se manifestent généralement comme suit :**

- affouillements généralisés des sols alluvionnaires conduisant à des réductions des propriétés mécaniques des sols et à des érosions au pourtour des appuis, ainsi qu'à des cavités formées par érosion sous les massifs ;
- modifications des écoulements et abaissements du lit et/ ou de la ligne d'eau suite aux extractions de granulats et à l'augmentation des profondeurs des chenaux, ou encore à la suppression ou l'arasement du seuil existant à l'aval de l'ouvrage (ou au contraire à la création de seuil en amont de l'ouvrage), ou encore induit par le changement climatique ;
- érosion du lit par réduction de la section d'écoulement suite à des remblaiements ou des culées implantées en avancée dans le lit ;
- augmentation des débits instantanés de crue occasionnés par des aménagements urbains et effet d'obstacle à l'écoulement provoqué par l'ouvrage, ou encore induit par le changement climatique ;
- érosion, abrasion des matériaux des éléments constituant les fondations (bois ou béton de chaux) et dissolution des mortiers ;
- création de fosses d'érosion du lit en aval à cause de l'effet de seuil noyé des fondations enchâssées dans des massifs d'enrochements trop généreux ou dans de larges massifs en béton.



Figure 50 : Illustration de l'érosion, abrasion des matériaux des éléments constituant les fondations



Figure 51 : Illustration de l'érosion, abrasion des matériaux des éléments constituant les fondations, et de la création d'une fosse d'érosion du lit en aval (photo archive SNCF, extrait présentation technique « Gestion d'un patrimoine d'ouvrage sur Pieux bois - Diagnostic, pathologies et renforcement du 25/01/2021 »)

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

Pour dégrader les bois, il faut que trois conditions soient réunies :

- un champignon dans le bois,
- de l'air,
- une humidité comprise 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. En règle générale, les pieux en bois toujours immergés ont un excellent comportement et améliorent leurs caractéristiques mécaniques par un phénomène de fossilisation avec cristallisation dans ses pores des nombreux sels dissous dans l'eau.

Sa destruction vient de l'air et de l'eau quand ils sont présents tous les deux.

Ceci étant, ce processus est très long et complexe. On pourra se reporter pour plus de précision à l'additif à la norme NF P94-262 édité par l'IFSTTAR et au rapport du laboratoire SRO de l'Institut Gustave Eiffel de janvier 2021.

**La vitesse de diminution d'épaisseur dépend de l'essence de bois et diffère beaucoup suivant le contexte hydrogéologique (soit 10 fois plus si le bois est exposé à l'air par rapport au bois toujours sous l'eau).**

Il convient dans un premier temps de procéder à une inspection détaillée selon le guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages établi à cet effet. Ceci permet de déterminer à l'instant T la section résiduelle des pieux bois. C'est seulement à partir de cette donnée et selon l'âge de l'ouvrage que pourront être établies des prédictions.

**La norme EN 252 peut être utilisée pour apprécier la vitesse de diminution d'épaisseur dans le temps.**

**Attention, celle-ci s'avère pessimiste eu égard aux profondeurs de dégradation du pin et du chêne réellement observées sur des fondations pieux bois d'ouvrages réels. En effet en appliquant cette norme à 10 ans, les pieux inspectés et observés auraient disparu.**

**L'additif à cette norme semble fournir des prévisions à 100 ans plus correctes qui pourront être extrapolés pour des temps intermédiaires.**

**Dans tous les cas, compte tenu du manque d'études sur le sujet et des prédictions pessimistes de la norme EN 252, ces études doivent être confiées à des experts.**

La détermination des sections résiduelles de pieux bois et les prédictions associées sont essentielles à la détermination de leur résistance et donc de leur contrainte admissible.



Figure 52 : Fondation sur plateforme en charpente et pieux en bois recépés juste sous l'étiage (pont Cessart Saumur)

En effet, la résistance du bois diminue avec le temps, mais la cause de cette diminution n'est pas claire, de nombreux facteurs jouant un rôle, par exemple l'augmentation de la descente de charge ou la dégradation de matériaux. On observe une chute de résistance de 20% pour le bois de cœur en 100 ans et 50% en 400 ans.

Van de Kuilen (2006) a indiqué que si l'aubier des pieux bois est dégradé, le bois de cœur pourrait encore avoir une capacité suffisante. De fait, le rapport entre la surface dégradée et non dégradée est un paramètre important, il peut être utilisé pour déterminer la durée de vie résiduelle pour les ouvrages. Par ailleurs, en fonction du type de dégradation, la résistance de la partie dégradée n'est pas forcément nulle, elle peut encore être prise en compte en appliquant un coefficient de sécurité.

**Dans tous les cas, compte tenu du manque d'études sur le sujet, ces études doivent être confiées à des experts.**



## 2.2 Les affouillements des appuis

### Réduction de la portance d'appui

Tout abaissement du niveau du lit au pourtour de l'appui conduit à une réduction de portance de l'appui (réduction de l'encastrement).

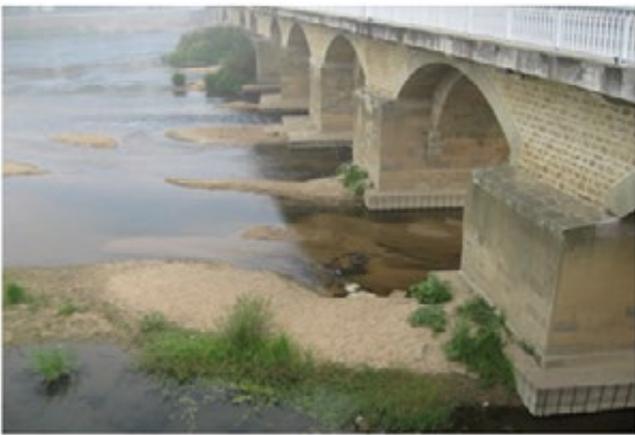


Figure 53 : Illustration d'un abaissement du lit aux pourtours d'appuis ayant fait l'objet de travaux d'encastrement

### Effondrement par déversement latéral des pieux non contreventés

Lorsque l'abaissement des fonds est important, le sol n'assure plus la butée latérale des systèmes de fondations et cela peut conduire à un mécanisme d'effondrement par déversement latéral des pieux.

#### Cas du Pont Wilson à Tours

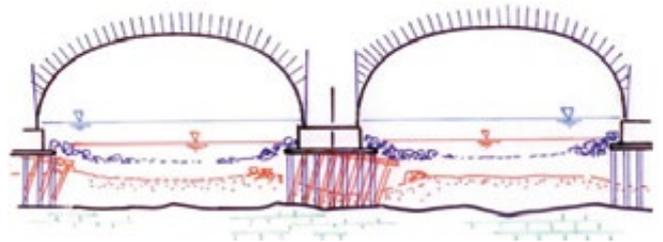


Figure 54 : Schéma de principe d'abaissement important du lit engendrant un déversement latéral

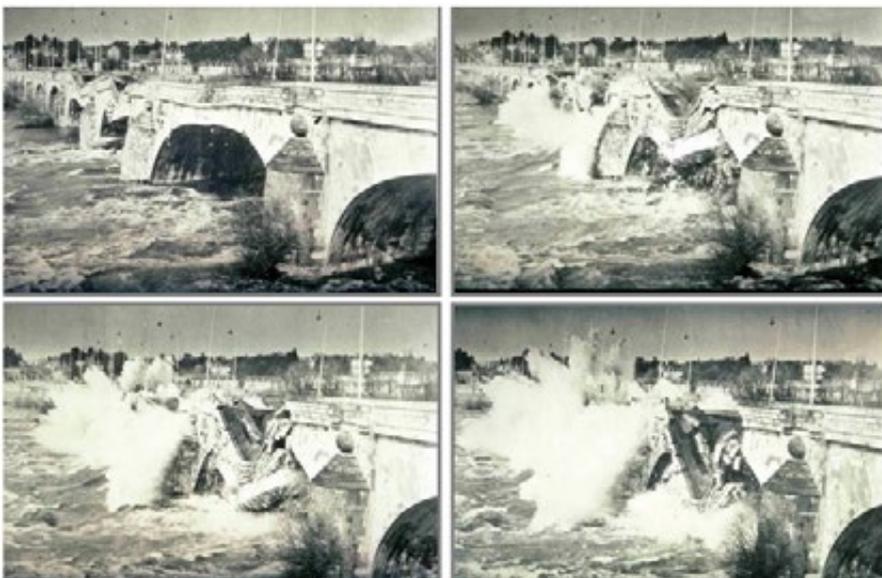


Figure 55 : Effondrement du pont Wilson à Tours les 9 et 10 avril 1978 (photo archives CG37)



## 2.3 Altération des massifs en béton de chaux

**L'abaissement des lignes d'eau en période d'étiage induit, au-delà des têtes de pieux bois, une mise à l'air des massifs en béton de chaux qui vont se dégrader par une altération par l'air (perte de cohésion). L'alternance entre mise à sec et mise à l'eau accentue la dégradation des massifs en béton de chaux qui perdent de leur cohésion lorsqu'ils sont mis à l'air et qui sont attaqués par abrasion lors des crues.**

Le phénomène de dégradation des massifs en béton de chaux connaît ainsi une évolution exponentielle.

Ces massifs assurent l'interface entre la structure de l'ouvrage (pile maçonnée) et le système de fondations par pieux bois. En cas de dégradation avancée, le transfert de charges n'est plus assuré correctement engendrant ainsi, soit un tassement, soit un basculement.



Figure 56 : Illustrations de massifs en béton de chaux dégradés (photos SNCF)

## 2.4 Les manifestations visibles des désordres

On parlera des désordres apparaissant sur la structure de l'ouvrage suite à des tassements d'amplitude admissible par celle-ci.

En effet, que ce soit par pourrissement des têtes de pieux bois, par dégradation des massifs de béton de chaux, ou par perte de portance induite par des affouillements, les piles ou culées concernées subissent à terme des tassements, voire des déplacements horizontaux.

Les pathologies évoluant différemment au niveau de chaque appui, ces tassements présentent toujours un différentiel d'un appui à l'autre, se traduisant par différentes pathologies altérant le monolithisme de la structure, qui ne peut pas encaisser ces déformations.

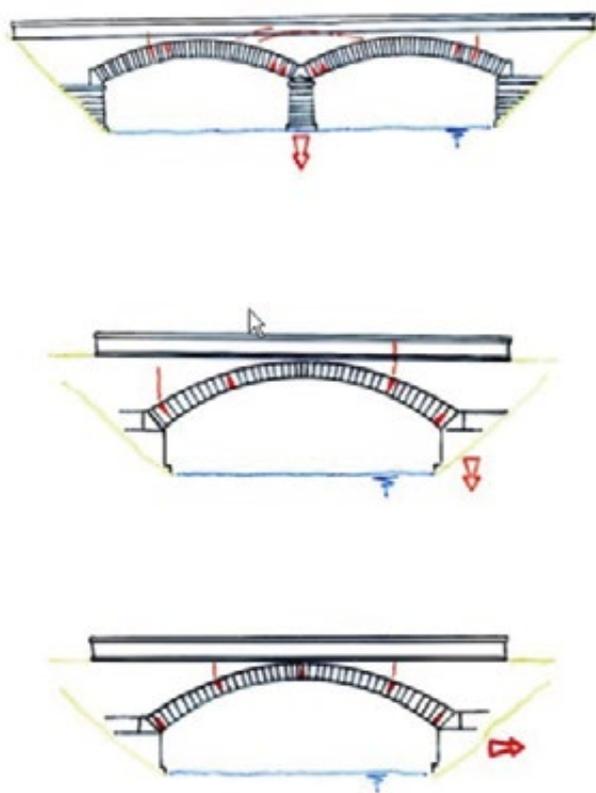


Figure 57 : Croquis des différentes manifestations de fractures selon les tassements des appuis.

### Déformation du profil en long



Figure 58 : Illustrations des déformations du profil en long d'ouvrages (photos 1 et 5 extraites présentation JP Levillain Journée technique «Les ponts en maçonnerie du diagnostic à la réparation» du 12/10/2015, photo 2 CETE de l'Ouest, photos 3 et 4 CETE de Lyon)

## Fissuration, voire fracturation de l'ouvrage



Figure 59 : Illustrations de fractures de structures d'ouvrages induites par des tassements d'appuis (photo 2 viaduc d'Orzilhac avant sa démolition extraite de «Inventaire 43041,02Y» Ponts et Viaducs détruits et/ou disparus, photo 3 DRIEA Ile de France)

## L'effondrement



Figure 60 : Effondrement du pont de Chamborigaud en Cévennes dans le Gars en mars 2024 consécutif aux crues ayant affouillé une culée (crédit SDIS 30)

# 3

## Les causes aggravantes et contemporaines (au-delà des évolutions naturelles des cours d'eau)

### 3.1 Principes hydrauliques de base régissant le transport de sédiments

### 3.2 Aménagements hydrauliques et exploitations fluviales (extraction de granulats ...) : leurs incidences sur les cours d'eau et leurs impacts sur les ouvrages

3.2.1 Conséquences de l'exploitation des cours d'eau et extraction dans les cours d'eau

3.2.2 Conséquences des aménagements hydrauliques

3.2.3 Interaction possible d'un seuil avec les fondations d'un ouvrage d'art

### 3.3 La législation actuelle, son impact sur les aménagements hydrauliques existants et son incidence sur les cours d'eau et sur les ouvrages d'art

3.3.1 Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

3.3.2 Directive cadre du 23 octobre 2000 (DCE)

3.3.3 Loi sur l'eau et les milieux aquatiques : 30 décembre 2006

3.3.4 Plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Parce) du 13 novembre 2009

3.3.5 Mise en application pratique actuelle de la loi sur l'eau dans le cadre de travaux sur ouvrages

### 3.4 Impacts du changement climatique sur les cours d'eau et incidence sur les ouvrages

3.4.1 L'abaissement des niveaux d'étiage

3.4.2 L'augmentation des crues et de leur intensité

### 3.5 Impact de l'imperméabilisation des sols sur les cours d'eau et incidence sur les ouvrages

### 3.6 Synthèses des causes

## 3.1 Principes hydrauliques de base régissant le transport de sédiments

Le lecteur pourra se reporter au guide STRRES FABEM 6.1 V2 Réparation et renforcement des maçonneries :

- Chapitre 4.3.11 : Altérations et désordres des fondations, qui traite des pathologies observées et, de manière générique, des causes associées sans pointer les causes contemporaines aggravantes.
- Afin de comprendre l'impact des causes contemporaines jugées aggravantes sur les problématiques et pathologies des systèmes de fondations anciennes, il convient de rappeler les principes hydrauliques de base.

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 :

- une augmentation de la capacité de transport (débit) entraîne le prélèvement sur les fonds et les berges - phénomène d'érosion,
- une diminution de la capacité de transport (débit) entraîne une élévation des fonds - phénomène de dépôt.

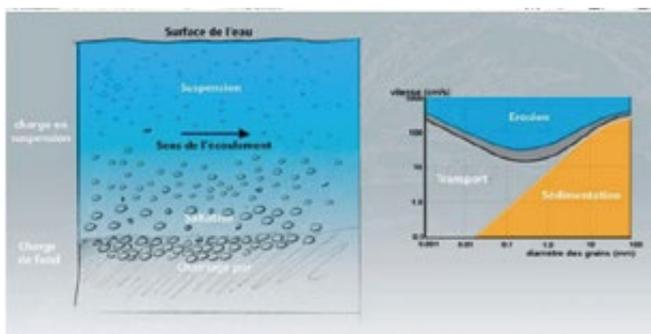


Figure 62 : Schéma de principe du transport de sédiments dans un cours d'eau (source Malavoi et Bravard, 2010)

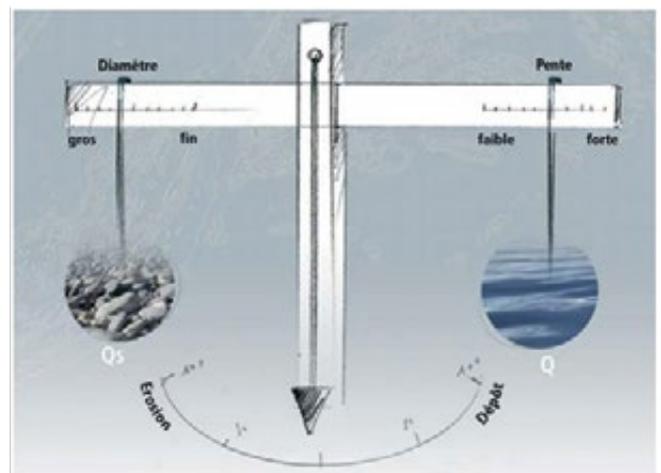


Figure 63 : Illustration des équilibres morphologiques (balance de Lane, 1955)

L'équilibre de la morphologie des rivières suit la règle suivante :  $Q_s \cdot d$  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.

Selon ces principes d'équilibres hydrauliques et morphologiques, les cours d'eau transportent naturellement des sédiments. Les cycles naturels de variation des niveaux d'eau au cours des saisons alimentent naturellement et de tout temps le transport des sédiments en suivant les principes d'équilibres précités.

### Rappel : La construction même d'un ouvrage d'art modifie son environnement proche

La construction d'un ouvrage d'art a souvent entraîné la réduction de l'emprise du lit majeur et/ou mineur d'un cours d'eau liée à la construction des piles ou des culées de l'ouvrage. Ces travaux peuvent entre autres provoquer localement un exhaussement de la ligne d'eau en amont et une accélération des vitesses en aval.

L'obstacle à l'écoulement et la réduction fréquente du débouché que constitue la présence d'ouvrages anciens implantés dans le lit du cours d'eau (lit mineur ou majeur) sont à l'origine de l'apparition de fosses d'affouillement à l'amont et à l'aval des ouvrages, de vides sous les appuis, pour les cours d'eau à fond mobile (sédimentaires). Il peut aussi y avoir des phénomènes de contournement de culées sur les cours d'eau à fond non mobile.



Figure 65 : Illustration de fosses d'affouillement dues à la présence des piles (photo JP Levillain)

Ce phénomène peut être accentué lors de crues et engendrer des affouillements plus importants.

L'observation, après la crue, ne permet pas, en général, de connaître la profondeur maximale du surcreusement temporaire qui se produit pendant la crue et qui se trouve partiellement ou totalement comblé, pendant la décrue, de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques différentes et souvent faibles.

- Affouillements dus à l'effet de seuil :

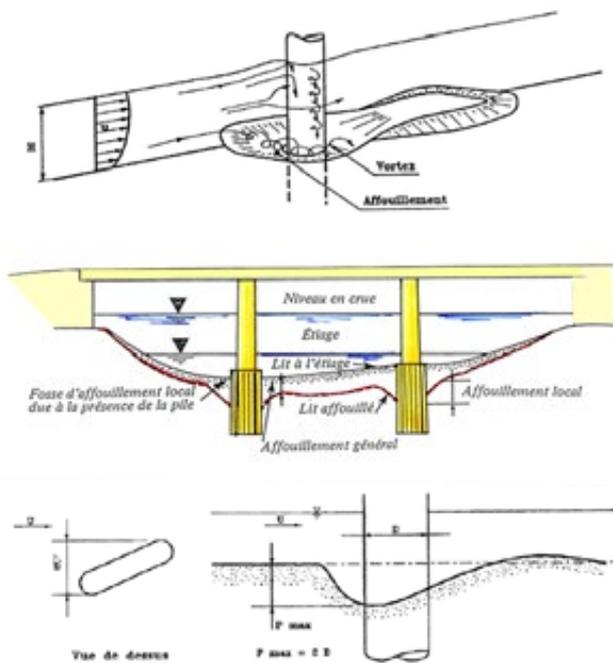


Figure 64 : Illustrations de principe et ordre de grandeur de l'affouillement localisé (sol frottant)

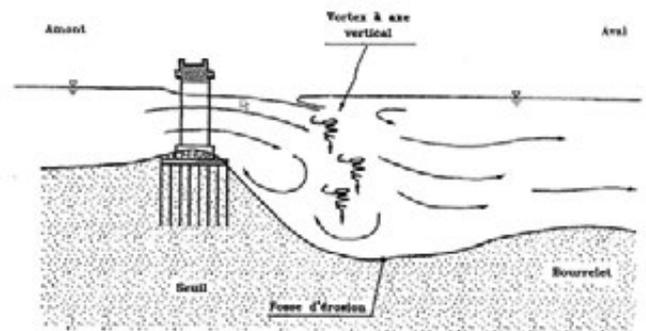


Figure 66 : Coupe de principe de création d'une fosse aval en période de crue

Nous constatons donc que de tout temps, les règles d'équilibres hydrauliques et morphologiques des cours d'eau engendrent naturellement une évolution de ceux-ci. Les ouvrages d'art anciens ont été construits en tenant compte des variations de cet environnement tel que vu au chapitre 1.9.

Néanmoins et comme indiqué au chapitre 2, les protections mécaniques mises en œuvre à l'origine peuvent se dégrader dans le temps et des affouillements des appuis peuvent apparaître naturellement. Ces parties d'ouvrages doivent donc, de tout temps, au même titre que tout le reste des ouvrages et en dehors de facteurs extérieurs aggravants, faire l'objet d'un suivi et d'un entretien régulier.



Ceci étant, la prise en compte des variations de cet environnement doit s'entendre toutes proportions gardées. En effet, nous constatons aujourd'hui que l'environnement de nos ouvrages a évolué au-delà des considérations datant de l'époque constructive, et ce pour 2 raisons :

- l'ancienneté de ces ouvrages implique à la fois un vieillissement des matériaux de constitution et globalement des structures, mais aussi une évolution de leur environnement (variation de profondeur du lit par transport de sédiments) ayant parfois dépassé les prévisions d'époque, ou encore une augmentation des charges d'exploitation. Ceci justifie, sans même considérer de facteurs aggravants cette problématique, de se préoccuper des systèmes de fondations de nos ouvrages, veiller à leur bon état et procéder aux travaux d'entretien et/ou réparation nécessaires ;
- de nouveaux facteurs contemporains (aménagement hydrauliques, exploitation fluviale, extraction de granulats, application de la loi sur l'eau N°92-3 du 3 janvier 1992, changement climatique) ont engendré, et engendreront, des évolutions importantes de l'environnement initial des systèmes de fondations de nos ouvrages.

Ces évolutions, si aucune action corrective n'est apportée, peuvent rendre incompatibles les systèmes de fondations à leur nouvel environnement et ainsi engendrer la ruine de nos ouvrages. Nous développerons ces nouveaux facteurs contemporains ci-après.



## 3.2 Aménagements hydrauliques et exploitations fluviales (extraction de granulats ...) : leurs incidences sur les cours d'eau et leurs impacts sur les ouvrages

Les cours d'eau obéissent à des lois morphologiques qui caractérisent la géométrie du lit, la pente d'écoulement, le débit liquide et les apports solides de sédiments. Ce sont ces éléments qui ont permis le creusement du lit et qui assurent son équilibre ou les évolutions naturelles avec érosion, creusement et atterrissements

Ces évolutions peuvent être naturelles dans le cas de cours d'eau n'ayant pas atteint leur profil d'équilibre ou être le résultat d'interventions humaines telles que : anciennes extractions de matériaux dans le lit, construction de barrages, dragage et creusement de chenaux maritimes et de navigation, remblaiement dans les champs d'inondation, déplacement de l'embouchure, pompages, aménagements, etc.

Elle se traduit généralement dans la modification du profil en long (creusement ou exhaussement), avec modification du tracé en plan de la morphologie du lit (apparition, disparition ou déplacement de la position des bancs et îles).

### 3.2.1 Conséquences de l'exploitation des cours d'eau et extraction dans les cours d'eau

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.

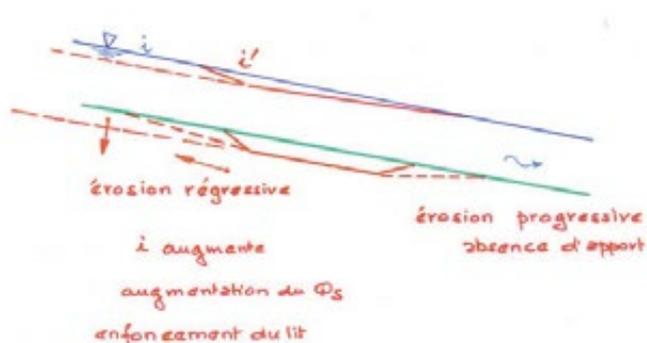


Figure 67 : Schéma du phénomène d'abaissement du lit induit par l'extraction de matériaux

Les conséquences des abaissements du lit sur les fondations des ouvrages d'art anciens sont la diminution de l'encastrement et de la portance, l'érosion et la formation de cavités, l'abrasion et l'altération des pièces de bois et des massifs de béton de chaux découverts.

#### Exemple : Extraction de sable et dragage de la Loire

Nous illustrerons les conséquences des extractions en rivières (sables ou graves) en nous appuyant sur le cas précis de la Loire, mais ceci est valable pour tous les cours d'eau exploités et faisant l'objet d'extraction de matériaux.

Les données ci-après sont issues du document Conséquence de la surexploitation des sables de Loire

sur la stabilité des berges et les fondations des ponts en Maine et Loire et Loire Atlantique par Jean-Pierre Levillain (mai 1980). Le lecteur pourra se reporter à ce document pour obtenir des données détaillées.

L'extraction de sable entre Nantes et Angers a été de l'ordre de  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  en 1964 et a augmenté pour atteindre  $4,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  en 1978. Il convient d'ajouter à ceci le dragage ainsi que la suppression des seuils rocheux destinés à améliorer la navigabilité de la Loire.

**Les conséquences directes sur le régime hydraulique de la Loire ont été :**

- l'abaissement de la ligne d'eau (figure 68) et le surcreusement du lit (figure 69),
- l'augmentation de la vitesse du courant,
- l'augmentation du marnage.

**Les conséquences indirectes ont été :**

- la perte de stabilité des ouvrages en rive (berges, épis ...),
- la perte de stabilité des fondations des ouvrages d'art.

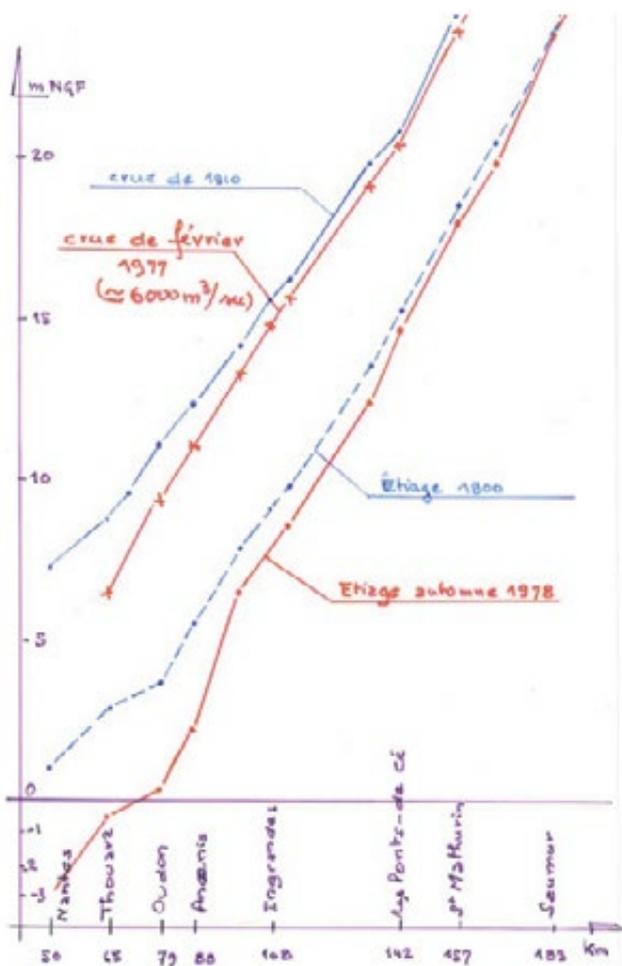


Figure 68 : Évolution de 1910 à 1978 suite aux dragages et aux prélèvements de sédiments. Abaissement de la ligne d'eau de 4m à Nantes

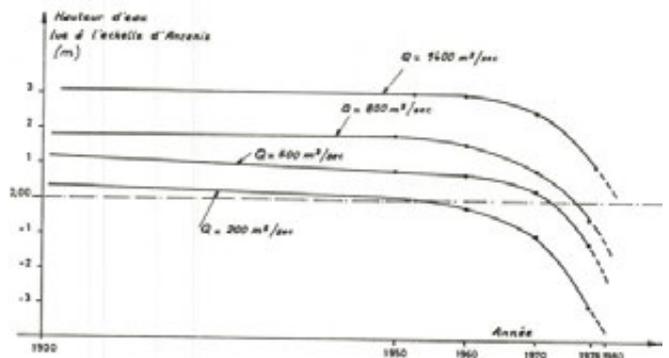


Figure 69 : Évolution des lignes d'eau à Ancenis pour différents débits.

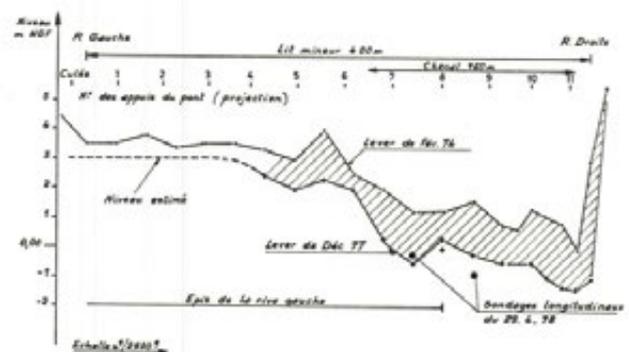


Figure 70 : Exemple d'abaissement du niveau du lit de la Loire mesuré à 125 m à l'aval du pont de Champtonceaux-Oudon en février 1974 et décembre 1977.

Nous n'évoquons pas dans le présent document les impacts sur la stabilité des berges et nous concentrerons sur les conséquences sur les fondations des ponts.

**L'abaissement de la ligne d'eau a engendré une mise à l'air des éléments bois et un risque de pourrissement de ceux-ci.**

**L'abaissement du lit a engendré :**

- un déchaussement des fondations et une perte d'encastrement des fondations, induisant une diminution de leur stabilité,
- une augmentation notable des profondeurs d'affouillement.

L'augmentation de la vitesse du courant a engendré une mise en suspension des sédiments et une érosion intense des parties immergées des fondations.

Ces conséquences sur les ouvrages d'art ont nécessité d'importants travaux de confortement pour éviter la ruine de ces ouvrages :

- travaux visant à redonner un encastrement suffisant aux fondations (reprise en sous-œuvre ...),
- travaux visant à protéger les massifs de fondation (rideaux de protection par palplanches ...),
- travaux d'injection de sol sous les massifs,
- ...

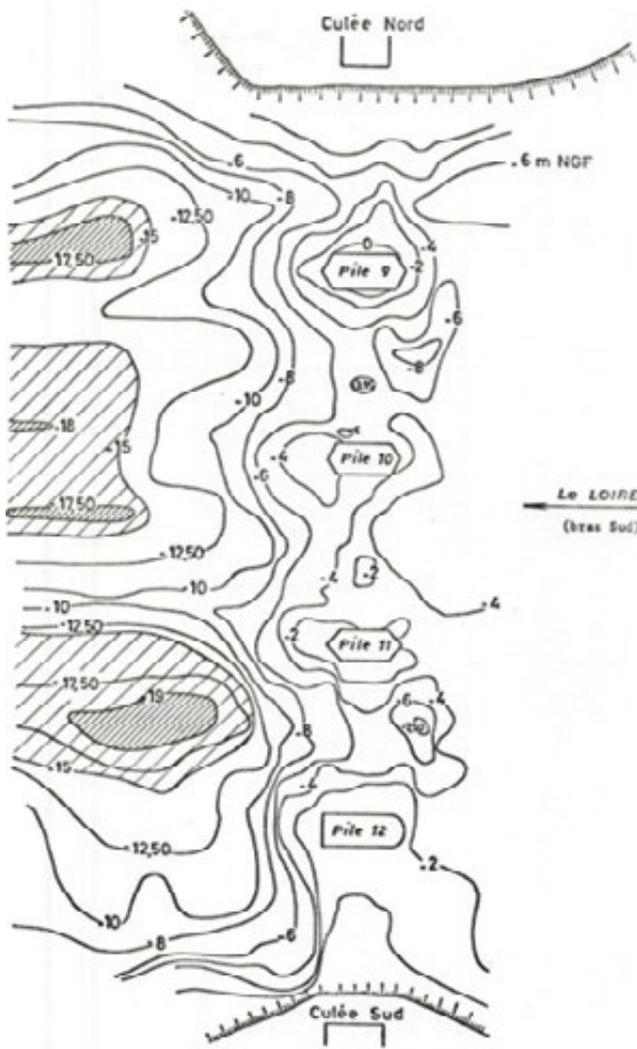


Figure 71 : Fosse d'érosion à l'aval du pont de Thouare (octobre 1979).

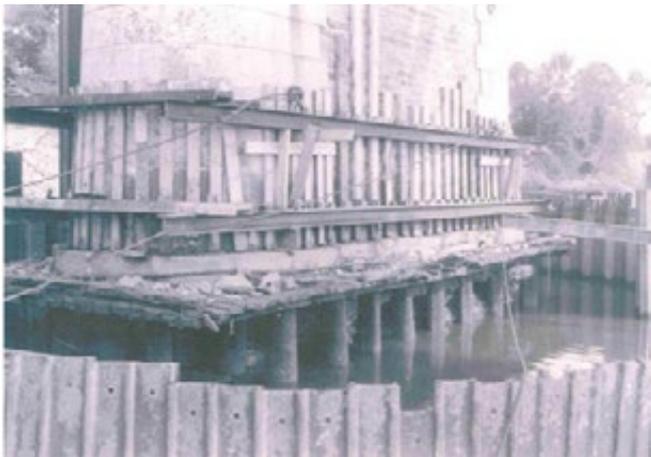


Figure 72 : Conséquences de l'abaissement de la ligne d'eau sur le pont de Thouaré à 30 km en amont de Nantes.

Autre exemple : extraction des années 1955 à 1985, dans l'Adour, dont le profil a été considérablement modifié

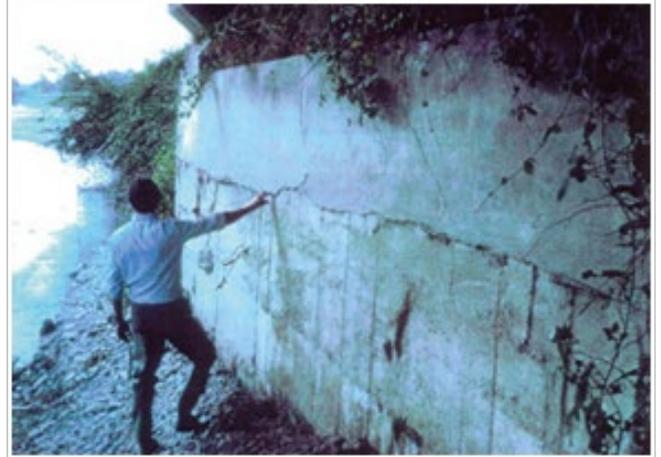


Figure 73 : Enfoncement du lit de l'Adour en amont d'une gravière implantée à 4 km



Figure 74 : Conséquence des dragages entraînant un abaissement de la ligne d'eau de 2 à 3 m et la chute du pont de Hères sur l'Adour quelques 20 ans après (photo extraite Journée technique «Les ponts en maçonnerie du diagnostic à la réparation» JP Levillain 12/10/2015)

A titre d'exemple, au-delà des travaux réalisés sur les ouvrages menacés, un seuil de 3 m de hauteur a été construit en aval du pont de Hères sur l'Adour pour remonter la ligne d'eau. Quatorze autres seuils ont ainsi été construits sur l'Adour pour tenter de restaurer la ligne d'eau. Nous verrons

ci-après les impacts des aménagements hydrauliques.

**Autre exemple : 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.



Figure 75 : Illustration de mise à l'air d'éléments bois suite à l'abaissement de la ligne d'eau (crédit photo Romeouf)

### 3.2.2 Conséquences des aménagements hydrauliques

Les aménagements hydrauliques impactent autant l'hydraulique du cours d'eau que le transport solide.

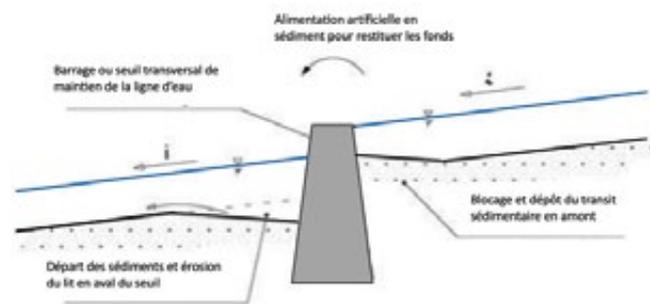


Figure 76 : Schéma de principe de l'influence d'un seuil

#### L'aménagement d'un seuil induit :

- 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.
- enfoncement du lit en aval (érosion progressive) faute d'apport des sédiments bloqués en amont conduisant au déchaussement des fondations (du seuil lui-même ou des éventuels ouvrages en aval).



Figure 77 : Illustration d'un seuil (photo JP Levillain)

### 3.2.3 Interaction possible d'un seuil avec les fondations d'un ouvrage d'art

Comme vu ci-avant, l'aménagement d'un seuil impacte à la fois l'hydraulique du cours d'eau et le transport solide. Si un ouvrage se situe en amont ou aval de ce seuil, son système de fondations se retrouve en interactions et subit les évolutions hydrauliques et de transport solide induits.

Les interactions d'un seuil sur les fondations d'un ouvrage d'art situé en amont, selon les incidences hydromorphologies vues ci-avant, sont les suivantes :

- remontée de sédiments en opposition à l'affouillement des fondations,
- remontée de la ligne d'eau évitant ou limitant le risque de mise à l'air libre des têtes de pieux bois le cas échéant.

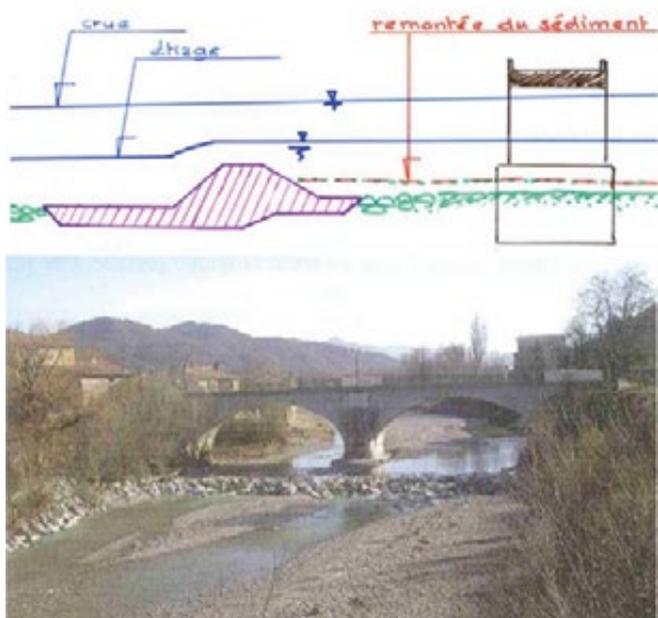


Figure 78 : Coupe de principe et illustration de l'interaction d'un seuil avec les fondations d'un ouvrage d'art situé en amont (Crédit JP Levillain)

Au contraire, 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.

Il est important de garder à l'esprit ces incidences pour bien comprendre l'incidence de la Loi n°92.3 du 3 janvier 1992 que nous développerons au chapitre 3.3.

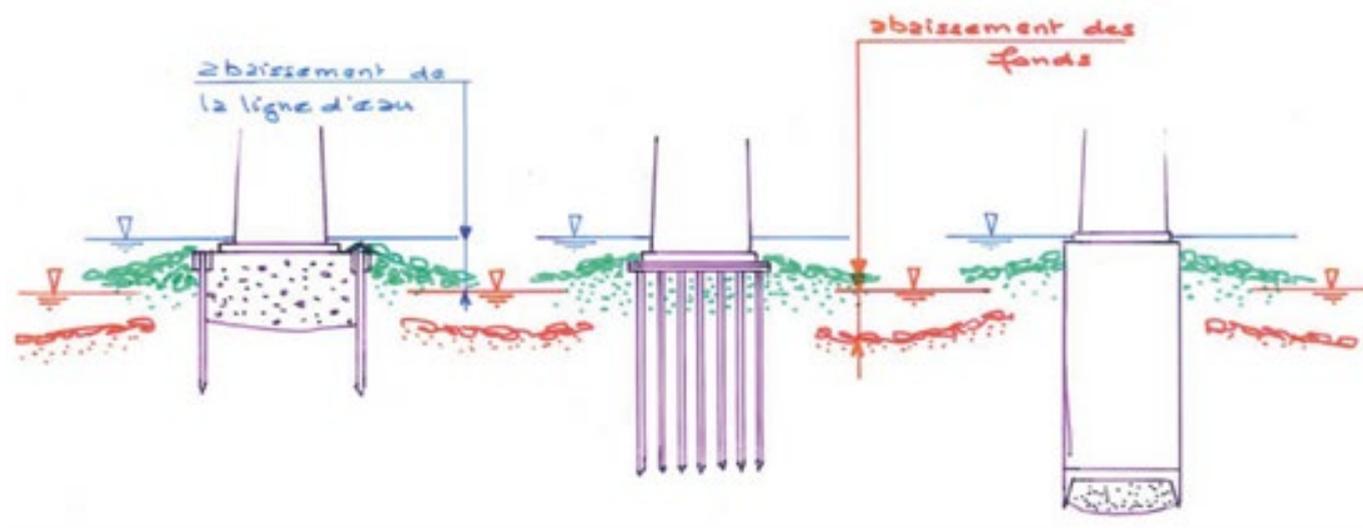


Figure 79 : Coupe schématique illustrant l'abaissement de la ligne d'eau et l'abaissement du lit par rapport aux systèmes de fondations

## 3.3 La législation actuelle, son impact sur les aménagements hydrauliques existants et son incidence sur les cours d'eau et sur les ouvrages d'art

### 3.3.1 Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

La loi sur l'eau trouve son origine en 1964 et à l'époque se résume par de grands principes :

- gestion par grands bassins versants (rattachés aux grands fleuves),
- création de l'agence de l'eau (redevance et financement) et des comités de bassin,
- conciliation des usages,
- régimes administratifs sur les rejets susceptibles d'altérer l'eau.

On notera en 1976 le début des études d'impacts.

Le 3 janvier 1992, la loi sur l'eau se précise :

- L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation (L.210-1 du code de l'environnement) ;
- mise en place d'un objectif de gestion équilibrée de la ressource : préserver les écosystèmes aquatiques et les zones humides, protéger et restaurer la qualité des eaux, mettre en valeur et développer la ressource ;
- planification centralisée : création des SDAGE et SAGE ;
- évolution de la police de l'eau : obligation de déclaration ou de demande d'autorisation pour les projets susceptibles d'avoir un impact sur la ressource en eau ; dossiers instruits, sous l'autorité des préfets, par les services de police de l'eau ; possibilité pour l'administration de s'opposer aux projets ou d'édicter les prescriptions nécessaires pour garantir compatibilité avec gestion équilibrée de la ressource.

De manière générale, depuis 1992, la Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau visant noblement à **une gestion équilibrée de la ressource en eau** a introduit plusieurs notions parfois contradictoires quant aux conséquences sur les ouvrages d'art :

- des notions d'une meilleure gestion des exploitations et extractions dans les cours d'eau limitant ainsi les conséquences négatives vues au chapitre 3.1.4 sur les ouvrages d'art et leurs fondations (abaissement du lit des cours d'eau et affouillement des fondations d'ouvrages,

au-delà des problèmes de stabilité des berges) ;

- des notions de reconstitution de la continuité écologique passant parfois par la suppression de seuils et accentuant, tel que vu au chapitre 3.2.2, les problématiques et conséquences sur les fondations anciennes des ouvrages d'art (affouillements des fondations, abaissement des niveaux d'étiage et mise à l'air libre des têtes de pieux bois) et pouvant ainsi nuire à la pérennité des ouvrages d'art.

Dans les notions induites par cette loi n°92-3 sur l'eau et parfois contradictoires avec la pérennité des fondations d'ouvrages d'art, on peut par exemple relever dans cette loi :

- *Article 2 : satisfaire ou à concilier, lors des différents usages, activités ou travaux, les exigences : [...]de la conservation et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations ;*

- *Article 10 : Les installations et ouvrages existants doivent être mis en conformité avec les dispositions prises en application du II ci-dessus dans un délai de trois ans à compter de la date de publication de la présente loi ;*

- *Article 15 : Lorsque des travaux d'aménagement hydraulique, autres que ceux concédés ou autorisés en application de la loi du 16 octobre 1919 précitée, ont pour objet ou pour conséquence la régulation du débit d'un cours d'eau non domanial ou l'augmentation de son débit en période d'étiage, tout ou partie du débit artificiel peut être affecté, par déclaration d'utilité publique, sur une section de ce cours d'eau et pour une durée déterminée, à certains usages, sans préjudice de l'application de l'article 45 de la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs.*

*[...]les prescriptions jugées nécessaires pour assurer le passage de tout ou partie du débit affecté dans la section considérée, dans les conditions les plus rationnelles et les moins dommageables pour les autres usagers dudit cours d'eau et dans le respect des écosystèmes aquatiques. [...] Les dispositions du présent article sont applicables aux travaux d'aménagement hydraulique autorisés antérieurement à la publication de la présente loi.*

Bien que cette loi autorise :

- Article 31 Sous réserve du respect des dispositions des articles 5 et 25 du code du domaine public fluvial et de la navigation intérieure, les collectivités territoriales et leurs groupements ainsi que les syndicats mixtes créés en application de l'article L. 166-1 du code des communes et la communauté locale de l'eau sont habilités à utiliser les articles L.151-36 à L.151-40 du code rural pour entreprendre l'étude, l'exécution et l'exploitation de tous travaux, ouvrages ou installations présentant un caractère d'intérêt général ou d'urgence, dans le cadre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux s'il existe et visant :  
[...]les aménagements hydrauliques concourant à la sécurité civile.

Encore faudrait-il que la pérennité des ouvrages d'art soit reconnue comme concourant à la sécurité civile.

**La Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau introduit tellement de notions et de facteurs environnementaux imposés sous peines financières et pénales aux responsables, qu'en l'absence d'information, de considération et d'alerte sur la pérennité des ouvrages d'art, les contraintes environnementales de respect des écosystèmes aquatiques et de libre écoulement des eaux et des sédiments ont pris le dessus.**

**Il faut garder à l'esprit, qu'en l'absence d'aménagements, un cours d'eau connaît une évolution naturelle notamment par le transport de sédiments. Les organismes vivants et la biodiversité se sont toujours adaptés et s'adaptent encore continuellement à cette évolution naturelle et ceci dans une symbiose naturelle.**

**Cependant, les ouvrages d'art nécessaires à l'activité humaine ont été construits selon une configuration et un environnement donnés et ne peuvent accepter qu'une «légère» variation de cet environnement mais en aucun cas les changements importants induits par l'évolution naturelle sur le long terme et encore moins les changements importants et «rapides» induits par le changement climatique, l'activité humaine et la mise en application parfois insuffisamment approfondie de cette loi sur l'eau n°92-3.**

### 3.3.2 Directive cadre du 23 octobre 2000 (DCE)

La Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau a été renforcée en ce sens et de manière plus concrète par la directive cadre du 23 octobre 2000 qui fixe un objectif de non dégradation et d'atteinte au bon état général des cours d'eau à l'échéance 2015.

Elle définit la notion de continuité écologique d'un cours d'eau par la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables à leur cycle de vie, le bon déroulement du transport naturel des sédiments ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs de biodiversité. Les ouvrages hydrauliques sont regroupés en plusieurs familles : les seuils et barrages, les canaux, les digues, les systèmes de protection contre les inondations ou contre les submersions et les aménagements hydrauliques.

Selon l'article R.214-109 du Code de l'Environnement, un ouvrage constitue un obstacle à la continuité écologique, s'il possède l'une des caractéristiques suivantes :

- il ne permet pas la libre circulation des espèces biologiques ;
- il empêche le bon déroulement du transport naturel des sédiments ;
- il interrompt les connexions latérales avec les réservoirs biologiques ;
- il affecte substantiellement l'hydrologie des réservoirs biologiques.

**On notera une nouvelle fois que les ouvrages d'art ou du moins l'interaction entre les ouvrages hydrauliques et les ouvrages d'art ne rentre pas en considération et que seule la continuité écologique et le transport naturel des sédiments sont considérés.**

C'est l'Office Français de la Biodiversité (OFB) qui inventorie ces obstacles à l'échelle nationale et évalue les risques d'impacts sur les écosystèmes aquatiques.

Au 3 janvier 2019, 100 108 obstacles à l'écoulement (tous types d'ouvrages confondus : seuils, barrages, canaux, digues ...) ont été recensés en France dont 99 003 en métropole. Sur les 430 000 km de cours d'eau parcourant notre pays, on dénombre en moyenne un obstacle tous les 6 km (source : Observatoire national de la biodiversité). Pour réduire l'impact écologique des obstacles à l'écoulement, l'OFB préconise :

*En fonction de l'évaluation des risques, du type d'obstacle et de ses services rendus, plusieurs solutions sont envisageables. Des aménagements sur les installations peuvent être envisagés comme la réduction de la taille de l'obstacle ou l'installation de passes à poissons pour faciliter la migration des espèces.*

**Lorsque cela est possible, la suppression de l'obstacle reste la solution la plus efficace pour retrouver une continuité écologique fonctionnelle. Cet effacement doit parfois s'accompagner de mesures pour ne pas perturber la biodiversité et pour garantir le maintien des usages.**

*Dans certains cas très spécifiques, l'ouvrage peut être «accompagné à l'abandon» en laissant le temps faire son office tout en suivant le processus de dégradation. Cette solution a l'avantage d'induire un bouleversement moins rapide qu'une suppression pour les milieux et usages.*

Des solutions peuvent également être envisagées au niveau du plan de gestion de l'obstacle. Par exemple, l'ouverture temporaire des vannes permet aux sédiments de se déplacer à nouveau.

**Il est ici intéressant de constater que les préconisations de l'OFB ne systématisent pas la suppression des obstacles et laisse la possibilité de conservation de ces obstacles moyennant des aménagements (passes à poissons ...).**

**Il est donc de la responsabilité des professionnels et spécialistes des ouvrages d'art de porter à la connaissance des pouvoirs publics l'existence d'une incidence importante et pouvant avoir de lourdes conséquences sur les fondations des ouvrages d'art amont et aval et ainsi éviter la suppression d'ouvrages hydrauliques et orienter vers l'aménagement de ceux-ci.**

### 3.3.3 Loi sur l'eau et les milieux aquatiques : 30 décembre 2006

On note une accélération de la mise en application de la loi sur l'eau en 2006 :

- mise en œuvre des objectifs de la DCE de 2000 et notamment atteinte du bon état d'ici 2015.
- rénovation de l'ensemble de la politique de l'eau et de ses outils.
- amélioration des conditions d'accès à l'eau pour tous, rénovation de l'organisation institutionnelle

La loi sur l'eau est complétée par les lois Grenelle de l'environnement de 2009 et 2010, et la loi de reconquête de la biodiversité.

### 3.3.4 Plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Parce) du 13 novembre 2009

Afin d'atteindre l'objectif de bon état des cours d'eau fixé par la Directive cadre du 23 octobre 2000, un plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Parce) a été lancé le 13 novembre 2009 et formalisé dans une circulaire en date du 25 janvier 2010. Il est engagé et est encore en cours.

L'arrêté du 25 janvier 2010 incite encore à la restauration de la continuité écologique des cours d'eau pour la reconquête de la biodiversité aquatique, en passant notamment par la suppression des seuils et autres ouvrages hydrauliques. Cet arrêté fournit plusieurs critères d'évaluation de l'état écologique d'un cours d'eau :

- la qualité biologique,
- la qualité hydromorphologique,
- la qualité physico-chimique.

Vis-à-vis de l'incidence et de l'interaction avec notre problématique de fondations des ouvrages d'art, nous retiendrons les critères de qualité hydromorphologique. Le tableau ci-dessous illustre clairement que la notation de l'état écologique d'un cours d'eau intègre, sur les critères de qualité hydromorphologique, entre autres, le régime hydrologique et la continuité de la rivière\* .

*\*On notera dans ce tableau qu'il n'y a aucune différence de critères entre le classement «Bon état» et le classement «Etat Moyen», ce qui induit une part aléatoire et subjective dans le classement des cours d'eau.*

ÉLÉMENT	TRÈS BON ÉTAT	BON ÉTAT	ÉTAT MOYEN
REGIME HYDROLOGIQUE	La quantité et la dynamique du débit, et la connexion résultante aux eaux souterraines, correspondent totalement ou presque totalement aux conditions non perturbées.	Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique.	Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique.
CONTINUITÉ DE LA RIVIÈRE	La continuité de la rivière n'est pas perturbée par des activités anthropogéniques et permet une migration non perturbée des organismes aquatiques et le transport de sédiments.	Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique.	Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique.
CONDITIONS MORPHOLOGIQUES	Les types de chenaux, les variations de largeur et de profondeur, la vitesse d'écoulement, l'état du substrat et tant la structure que l'état des rives correspondent totalement ou presque totalement aux conditions non perturbées.	Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique.	Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique.

Figure 80 : Tableau extrait de l'Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique des cours d'eau pour les éléments de qualité hydromorphologique.

A ce jour, 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.

Ce plan (Parce) qui prévoyait l'aménagement ou l'effacement de 1 200 ouvrages transversaux prioritaires en 2012, s'est heurté à une opposition des propriétaires des aménagements et notamment des propriétaires de moulins hydrauliques.

Un nouveau Plan d'actions pour une politique apaisée de restauration de la continuité écologique a vu le jour en 2019 avec pour objectif de mieux prendre en compte l'ensemble des parties prenantes et des politiques publiques :

- la protection des espèces et la restauration des milieux aquatiques
- **le développement des énergies renouvelables, en particulier l'hydroélectricité**
- **la conservation du patrimoine culturel et paysager**
- **la pratique et le développement des sports et loisirs nautiques**
- **le développement de la production aquacole**

On constate donc, qu'au-delà de la protection des espèces et la restauration des milieux aquatiques, sous la «pression» des propriétaires des aménagements et notamment des propriétaires de moulins hydrauliques, quatre nouveaux critères ont été intégrés, permettant ainsi une vision et une approche un peu plus globale dans les différents projets.

Nous ne rentrerons pas dans le détail de ce nouveau plan d'actions qui, au-delà de la continuité écologique, est venu intégrer les incidences ou problématiques concernant les ouvrages hydroélectriques et notamment les moulins. Ce nouveau plan d'actions vise donc à trouver des solutions alternatives combinant la restauration écologique et le maintien de ces ouvrages.

**En revanche, ce nouveau plan d'actions n'intègre toujours pas la considération des interactions entre les ouvrages et obstacles hydrauliques et les ouvrages d'art et les incidences de la suppression de certains d'entre eux (seuils, barrages ...) sur les fondations des ouvrages d'art en amont et aval.**

**Il semble être de la responsabilité des professionnels et spécialistes des ouvrages de porter à la connaissance des pouvoirs publics l'existence d'une incidence éventuelle sur les fondations des ouvrages d'art amont et aval lors de la suppression**

**d'ouvrages hydrauliques et donc d'intégrer ce facteur aux analyses et études techniques de projets à mener dans le cadre du PARCE. Ceci permettrait une approche plus pragmatique et globale afin de concilier la nécessité de préservation de la ressource en eau et de la biodiversité à la conservation de notre patrimoine d'ouvrages d'art indispensable à l'activité humaine.**

Pour prendre la mesure de tout ceci, on peut citer quelques chiffres :

- il y a environ 60 000 seuils et barrages (sur 100 108 obstacles à l'écoulement recensés en France) 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,
- lors de la parution du Plan d'action pour une politique apaisée de restauration de la continuité écologique le 20 juin 2018, il en était recensé plus de 10 000 restants «à traiter» en 2018 (18 000 obstacles référencés en liste 2 moins ceux déjà aménagés, supprimés ou ceux ruinés ou sans effet à réduire).

**La législation actuelle, loi sur l'eau et plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Parce), bien que mise en place dans un objectif tout à fait noble et défendable de préservation de la ressource en eau, de l'environnement et des écosystèmes, n'a pas du tout intégré les problématiques induites sur les ouvrages d'art et notamment leurs systèmes de fondations.**

**La suppression des obstacles de type seuils ou barrages est analysée, étudiée et réalisée sans considération des incidences éventuelles sur les ouvrages d'art en amont et aval des ouvrages hydrauliques concernés.**

**Il semble impératif de fournir ces informations et sensibiliser les pouvoirs publics afin que les PARCE puisse être rapidement modifié comme il l'a été en 2018 suite à l'opposition des propriétaires de moulins hydrauliques notamment.**

### **3.3.5 Mise en application pratique actuelle de la loi sur l'eau dans le cadre de travaux sur ouvrages**

La police de l'eau dépend de l'État, vise l'application des lois concernant la ressource en eau et les milieux aquatiques et s'attache à la fois aux activités d'instruction que de contrôles.

→ **Grand principe : définition d'un IOTA\* et analyse de ses impacts sur l'eau et les milieux aquatiques [L 214-1 du code de l'environnement] :**

*\*Installations, Ouvrages, Travaux, Activités*

*Sont soumis aux dispositions des articles L.214-2 à L.214-6 les installations, les ouvrages, travaux et activités réalisés à des fins non domestiques par toute personne physique ou morale, publique ou privée, et entraînant des prélèvements sur les eaux superficielles ou souterraines, restitués ou non, une modification du niveau ou du mode d'écoulement des eaux, la destruction de frayères, de zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole ou des déversements, écoulements, rejets ou dépôts directs ou indirects, chroniques ou épisodiques, même non polluants.*

*Les installations, ouvrages, travaux et activités visés à l'article L. 214-1 sont définis dans une nomenclature, établie par décret en Conseil d'Etat après avis du Comité national de l'eau, et soumis à autorisation ou à déclaration suivant les dangers qu'ils présentent et la gravité de leurs effets sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques compte tenu notamment de l'existence des zones et périmètres institués pour la protection de l'eau et des milieux aquatiques.*

→ **Une nomenclature «loi sur l'eau» : liste des IOTA par type d'impact potentiel sur le milieu aquatique, répartis dans 5 rubriques :**

- I : prélèvements (forage, puits, ...)
- II : rejets (eaux pluviales, assainissement, ...)
- III : impacts sur le milieu aquatique ou sur la sécurité publique (modification profil en long, protections de berges, plans d'eau, zones humides, drainage, ...)
- IV : impacts sur le milieu marin
- V : dispositions particulières (géothermie, ...).

→ **Deux régimes: déclaration ou autorisation [L 214-2 du code de l'environnement] selon des seuils (avec des exceptions) :**

- en deçà : pas de dossier loi sur l'eau (exemple : entretien de cours d'eau relevant de la responsabilité du propriétaire) ;
- au dessus d'un premier seuil : déclaration «loi sur l'eau» ;
- au dessus d'un second seuil : autorisation environnementale.

→ **Un principe d'opposition et de prescriptions particulières imposées par l'autorité administrative [L 214-3 du code de l'environnement] :**

*L'autorité administrative peut s'opposer à l'opération projetée s'il apparaît qu'elle est incompatible avec les dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux ou du schéma d'aménagement et de gestion des eaux, ou porte aux intérêts mentionnés à l'article L. 211-1 une atteinte d'une gravité telle qu'aucune prescription ne permettrait d'y remédier.*

→ **Utilisation de la nomenclature :**

- un projet peut être soumis à plusieurs rubriques,
- une rubrique n'est jamais exclusive d'une autre rubrique, sauf mention contraire,
- le régime le plus élevé l'emporte (ex : deux rubriques en déclaration et une en autorisation → autorisation).

→ **Certaines rubriques disposent d'arrêtés ministériels de prescriptions générales qui constituent les règles minimales que doit respecter chaque IOTA.**

**Détail des rubriques IOTA pour les projets de travaux sur ponts :**

Rubriques les plus souvent visées en cas de travaux sur des ponts (liste non exhaustive - se référer au R. 214-1 du code de l'environnement) :

- **3120 : modification du profil en long ou en travers du cours d'eau : modification des berges (ajout d'un tuyau, débouché d'un fossé, remodelage, ...)**  
Seuils : déclaration < 100 m < autorisation ;
- **3130 : impact sur la luminosité : cas des busages, des ponts, ...**  
Seuils : 10 m < déclaration < 100 m < autorisation ;
- **3140 : protection de berges par des méthodes autres que végétales vivantes**  
Seuils : 20 m < déclaration < 200 m < autorisation ;
- **3150 : impacts sur les frayères, zones de production, d'alimentation, ... → toujours visée en cas de travaux en cours d'eau**  
Seuils : déclaration < 200 m<sup>2</sup> < autorisation ;
- **3210 : entretien de cours d'eau ou canal avec extraction de sédiments**  
Seuils : déclaration < 2000 m<sup>3</sup> ou seuils analyse < autorisation ;
- **3310 : impacts sur les zones humides**  
Seuils : 1000 m<sup>2</sup> < déclaration < 10000 m<sup>2</sup> < autorisation.

**Le rôle de la DDT :**

→ **Instruction des dossiers «loi sur l'eau» :**

- différents cas : nouveau IOTA, modification de IOTA existant, reconnaissance d'antériorité (seuils),
- de la phase amont → à l'acte d'autorisation au titre de la loi sur l'eau (arrêté d'autorisation, récépissé de déclaration, arrêté d'opposition, ...),
- interrogation de différents services «experts» selon le type de dossier (OFB, cellule animation du SAGE, DREAL, ...),
- échanges avec le pétitionnaire ;
- rédaction de l'acte administratif, signature et publication.

→ **Réalisation de contrôles :**

- bureau et terrain,
- administratifs et techniques (respect des prescriptions de l'arrêté, des périodes de travaux prévues dans le dossier de déclaration, ...),
- principalement des contrôles administratifs, mais

judiciaires également possibles

- en lien étroit avec l'OFB (police judiciaire principalement).

### Instruction des dossiers Loi sur l'Eau et autres thématiques prises en compte :

- Biodiversité : zones protégées, secteur inventorié comme présentant des sensibilités particulières, corridor écologique (notamment les haies), boisement, espèces protégées (dérogation «espèces protégées» ou DEP nécessaire) ...
- sites inscrits, sites classés (autorisation spéciale de travaux en site classé - SC),
- évaluation environnementale,
- procédures DEP et SC : instructions distinctes pour un dossier de déclaration, conjointes en cas d'autorisation environnementale («autorisation embarquée»).

### Le cas des dossiers de déclaration (3 phases distinctes) :

#### 1) Complétude :

- vérification de la présence des pièces attendues (cf. contenu d'un dossier «loi sur l'eau»),
- demande de complément éventuelle

#### 2) Recevabilité :

- analyse de fond du dossier Interrogation des services,
- demande de complément éventuelle.

#### 3) Décision

Le contenu du dossier Loi sur l'Eau : phase de complétude :



Figure 81-1 Extrait de la présentation «La police de l'eau et mise en œuvre de la DDT du Gers» du 30-03/2023

## PIÈCES CONSTITUTIVES D'UN DOSSIER DE DÉCLARATION « LOI SUR L'EAU »

Réf : article R.214-32 du code de l'environnement

OBJET DE LA PIÈCE DEMANDÉE	LISTE DES PIÈCES DEMANDÉES
Le demandeur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nom</li> <li>Adresse</li> <li>Numéro de SIRET</li> <li>ou à défaut, date de naissance</li> </ul>
L'ouvrage, l'installation, les travaux ou l'activité (IOTA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emplacement sur lequel le projet de IOTA doit être réalisé</li> <li>Nature du projet IOTA</li> <li>Consistance du projet IOTA</li> <li>Volume du projet IOTA</li> <li>Objet du projet IOTA</li> </ul>
La nomenclature IOTA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rubrique(s) de la nomenclature concernée(s) par le projet IOTA</li> </ul>
Les incidences du projet de IOTA sur l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>Document indiquant les incidences du projet sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux (y compris de ruissellement), en fonction des procédés mis en œuvre, des modalités d'exécution des travaux ou de l'activité, du fonctionnement des ouvrages ou installations, de la nature, de l'origine et du volume des eaux utilisées ou affectées et compte tenu des variations saisonnières et climatiques.</li> <li>Mesures d'évitement, de réduction ou de compensation envisagées</li> <li>Raisons pour lesquelles le projet a été retenu parmi les alternatives</li> <li>Résumé non technique</li> <li>Description des moyens de surveillance ou d'évaluation des prélèvements et des déversements prévus</li> <li>Éléments graphiques, plans ou cartes utiles à la compréhension des pièces du dossier IOTA</li> </ul>
La compatibilité du projet IOTA avec les politiques de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>Document justifiant de la compatibilité du projet avec le SDAGE (schéma directeur ou le schéma d'aménagement et de gestion des eaux)</li> <li>Document justifiant de la compatibilité du projet avec les dispositions du PGRI (plan de gestion des risques d'inondation mentionné à l'article L.566-7 du code de l'environnement)</li> <li>Document justifiant de la contribution du projet à la réalisation des objectifs visés à l'article L.211-1 du code de l'environnement (gestion équilibrée et durable de la ressource en eau - adaptations nécessaires au changement climatique)</li> <li>Document justifiant des objectifs de qualité des eaux prévus par l'article D.211-10 du code de l'environnement</li> </ul>
Évaluation des incidences Natura 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>Évaluation des incidences du projet sur un ou plusieurs sites Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de ces sites (Le contenu de l'évaluation d'incidence Natura 2000 est défini à l'article R.414-23 du code de l'environnement, et peut se limiter à la présentation et à l'exposé définis au 1 de l'article R.414-23, dès lors que cette première analyse conduit à l'absence d'incidence significative sur tout site Natura 2000)</li> </ul>
Autres procédures	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si concerné, mention des demandes d'autorisation ou des déclarations déjà déposées pour le projet IOTA au titre d'une autre législation, avec la date de dépôt et la mention de l'autorité compétente.</li> </ul>
Étude d'impact	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si concerné, étude d'impact jointe ou document d'incidences « loi sur l'eau » ou le remplaçant, si elle contient les informations demandées</li> </ul>

Figure 81-2 Extrait de la présentation «La police de l'eau et mise en œuvre de la DDT du Gers» du 30-03/2023

Le document d'incidences, un éléments obligatoire et essentiel :

- il permet, à partir de la présentation d'un état initial, d'apprécier les effets du projet sur l'environnement, de proposer des mesures visant à compenser ces effets ou à les corriger ;
- le propriétaire ou le pétitionnaire du projet porte la responsabilité de la bonne réalisation et du contenu du document d'incidences (ou de l'étude d'impact, en étant le plus exhaustif possible en fonction des impacts prévisibles) ;
- son objectif est d'analyser les incidences du IOTA sur la ressource en eau et le milieu aquatique dans toutes leurs composantes (écoulement, qualité, quantité...), ainsi que sur le fonctionnement des éléments mentionnés à l'article L.211-1 du code de l'environnement (dont les écosystèmes aquatiques).

Le contenu du dossier "Loi sur l'Eau" en phase de recevabilité :

Figure 81-3 Extrait de la présentation «La police de l'eau et mise en œuvre de la DDT du Gers» du 30-03/2023

## AMENAGEMENT DE COURS D'EAU Guide de Déclaration Loi sur l'eau

Ce formulaire est régulièrement mis à jour en fonction des questions fréquentes des utilisateurs et de l'évolution de la réglementation. Il est vivement conseillé d'utiliser la dernière version disponible afin que votre dossier soit le plus complet possible : voir lien § 19

A qui demander des renseignements ?	
Sur la loi sur l'eau et l'envoi des dossiers :	DDT32 / Service Eau et Risques (SER) / Unité Ressource en eau (REMA) 19 Place de l'Ancien Foirail - B.P. 342 - 32007 AUCH Cedex téléphone : 05.62.61.53.37 - <a href="mailto:ddt-travauxcoursdeau@gers.gouv.fr">ddt-travauxcoursdeau@gers.gouv.fr</a>
Sur Natura 2000 :	DDT32 / Service Territoire et Patrimoines (STP) / Unité Environnement téléphone : 05.62.61.47.40 choix 3 - <a href="mailto:ddt-stp-environnement@gers.gouv.fr">ddt-stp-environnement@gers.gouv.fr</a>
Sur les zones inondables (digue, pont, busage...) :	DDT32 / Service Eau et Risques (SER) / Unité Risques (RNT) téléphone : 05.62.61.53.37 - <a href="mailto:ddt-ser-nt@gers.gouv.fr">ddt-ser-nt@gers.gouv.fr</a>

**Avertissements :**

Les Installations, Ouvrages, Travaux ou Activités (IOTA) susceptibles d'avoir une incidence sur un milieu aquatique relèvent du champ d'application du code de l'environnement (CE) et peuvent nécessiter une autorisation préfectorale ou un récépissé de déclaration (articles L.214-1 à L.214-6). Les procédures applicables sont définies aux [articles R214-8 à R214-56 CE](#).

Ce document a pour objet de vous aider dans l'élaboration des dossiers les plus courants de « Déclaration » pour une (ou des) intervention(s) dans un cours d'eau. Le dossier de Déclaration est à envoyer **renseigné dans son intégralité (annexes et plans compris) en 3 exemplaires papier minimum et une version électronique** au Service de la police de l'eau (Service Eau et Risques ; adresse ci-dessus) qui est le service instructeur. La liste des informations demandées n'est pas exhaustive. Dans le cas où l'impact du projet sur le régime hydrologique du cours d'eau ou sur le milieu naturel serait important voire irréversible, le SER se réserve le droit de demander la fourniture d'informations complémentaires ou de s'opposer au projet. **Tout dossier incomplet devra être complété.**

Le présent formulaire ne concerne que certaines rubriques de la "nomenclature eau". Si votre projet impacte d'autres rubriques, un dossier loi sur l'eau doit être constitué hors du présent cadre. De même, si les dimensions de votre projet sont supérieures aux seuils indiqués, il relève d'une d'autorisation environnementale. Dans ce cas, vous pouvez contacter le SER. Pour tout dossier, l'évaluation des incidences Natura 2000 est à compléter en référence au 4° de l'article R414-19 CE.

Une fois le projet jugé recevable, un "récépissé de déclaration" vous sera adressé. Il est de votre responsabilité de le lire et de le respecter. Il peut comporter des prescriptions de réalisations ou être assorti d'arrêté(s) de prescriptions générales, qu'il vous faudra respecter lors de la réalisation de votre projet. **Vous ne devez pas commencer les travaux avant d'avoir reçu le récépissé de déclaration et, le cas échéant, l'accord donnant l'autorisation formelle de réalisation.**

**Tout défaut de déclaration ou d'autorisation et l'inobservation des dispositions figurant dans le dossier déposé sont passibles de sanctions administratives et/ou judiciaires. Des contrôles peuvent être effectués avant, pendant et après la réalisation du projet.**

La procédure au titre de la loi sur l'eau ne dispense en aucun cas le demandeur de faire les déclarations ou d'obtenir les autorisations requises par d'autres réglementations (code civil, code de l'urbanisme, code rural...).

Pour en savoir +, consultez le site internet des Services de l'Etat dans le Gers : [www.gers.gouv.fr](http://www.gers.gouv.fr) rubrique "Politiques publiques > Environnement > Gestion de l'eau > Comment constituer un dossier loi sur l'eau"

Les mesures usuelles en phase chantier :

- préparation chantier,
- géotextile pour éviter de polluer,
- lieux de passage,
- filtres,
- chantier en assec,
- inventaire préalable chiroptères (convention CEN/CD32),
- période de réalisation du chantier (les plus favorables : août à novembre).

## Le cas d'évaluation environnementale :

L'évaluation environnementale est un processus visant à intégrer l'environnement dans l'élaboration d'un projet, ou d'un document de planification et ce, dès les phases amont de réflexions.

Elle est constituée de :

- l'élaboration d'un rapport d'évaluation des incidences sur l'environnement (étude d'impact pour les projets, rapport sur les incidences environnementales pour les plans et programmes) par le maître d'ouvrage du projet ou la personne publique responsable du plan ou programme;
- la réalisation des consultations prévues, notamment la consultation de l'autorité environnementale, qui rend un avis sur le projet, plan, programme et sur le rapport d'évaluation des incidences sur l'environnement, et la consultation du public ;
- l'examen par l'autorité autorisant le projet (ou approuvant le plan ou programme) des informations contenues dans le rapport d'évaluation et reçues dans le cadre des consultations.

La question de l'évaluation environnementale doit être détachée de la nature du dossier loi sur l'eau qui est déposé.

Il n'est donc pas pertinent d'essayer de rester sous les seuils de l'autorisation pour ne pas y être soumis.

Nomenclature *Evaluation environnementale* : liste des catégories de projets, plans et programmes, devant faire l'objet d'une évaluation environnementale (projet : tableau annexé à l'article R. 122-2 du code de l'environnement ; plans et programmes : tableau annexé à l'article R. 122-17 du code de l'environnement).

Plusieurs cas de figure :

- étude d'impact systématique,
- atteinte ou non d'un seuil : soumission à cas par cas en deçà, à étude d'impacts au-delà. Pour les cas par cas, la décision de soumission ou non à étude d'impact est prise par l'autorité environnementale.

**ATTENTION : C'est au porteur de projet de déterminer si son projet est soumis ou non à évaluation environnementale.**

Le contenu de l'étude d'impact est proportionné à la sensibilité environnementale de la zone affectée par le projet, à l'importance et à la nature des travaux et à ses incidences prévisibles sur l'environnement et la santé humaine.

Elle contient a minima :

- un résumé non technique,
- une description du projet (localisation, conception, dimension, caractéristiques),
- une description des aspects pertinents de l'état actuel de l'environnement et de leur évolution en cas de mise en œuvre du projet ainsi qu'un aperçu de l'évolution probable de l'environnement en l'absence de mise en œuvre du projet,
- une description des incidences notables du projet sur l'environnement, ainsi que de celles résultant de la vulnérabilité du projet à des risques d'accidents ou de catastrophes majeurs,
- les mesures envisagées pour éviter, réduire et, lorsque c'est possible, compenser les incidences négatives notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine,
- une présentation des modalités de suivi de ces mesures et de leurs effets,
- une description des solutions de substitution examinées et les principales raisons de son choix au regard des incidences sur l'environnement.

## Qu'est-ce qu'un cours d'eau ?

La définition réglementaire d'un cours d'eau est inscrite dans le Code de l'environnement : [article L.215-7-1 du code de l'environnement] : *Constitue un cours d'eau un écoulement d'eaux courantes dans un lit naturel à l'origine, alimenté par une source et présentant un débit suffisant la majeure partie de l'année. L'écoulement peut ne pas être permanent compte tenu des conditions hydrologiques et géologiques locales.*

Cette définition implique que soient vérifiés simultanément les trois critères :

- lit naturel à l'origine ;
- source ;
- débit suffisant.

... et elle s'applique aux missions d'instruction et aux contrôles de la police de l'eau.



## 3.4 Impacts du changement climatique sur les cours d'eau et incidence sur les ouvrages

### 3.4.1 L'abaissement des niveaux d'étiage

Bien que les études réalisées datent de plus de 10 ans et mériteraient une mise à jour, on peut citer les chiffres suivants.

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.



Figure 82 : Pont des moulins de Meaux - découverte des fondations anciennes d'un ouvrage en période d'étiage démontrant la baisse de ce niveau par rapport à l'époque de construction (photo 2004 d'un particulier amateur)



Figure 83 : Ancien pont en pierre sur le lit desséché d'une rivière (image FREEPIK - abonnement J Nicoli)



Figure 84 : Vieux pont Romain en Provence (image FREEPIK, Abonnement J NICOLI)

Sur le site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, on pourra aussi se référer au livre édité en 2023 par DATA LAB « Chiffres clés des risques naturels ». Ce document fournit de manière détaillée l'ensemble des données concernant les différents risques naturels et leurs évolutions induites par le changement climatique.

Événements	Nombre de morts et disparus	Domages assurés (en M€ courants)	Domage total (en M€ courants)	Échelle de gravité
Éruption du 8 mai 1902 de la montagne Pelée en Martinique	28 000	-	460	5
Écoulements pyroclastiques - éruption du 8 mai 1902 de la montagne Pelée en Martinique	1 000	-	-	5
Séisme de Lambesc le 11 juin 1909	46	-	2 000	4
Ouragan en Guadeloupe le 12 septembre 1928	1 200	-	-	5
Cyclone à La Réunion le 4 février 1932	100	-	-	4
Sécheresse (événement climatique d'ampleur exceptionnelle survenu de juin à août 1947)	-	-	-	-
Cyclone à La Réunion le 26 janvier 1948	165	-	-	4
Feux de forêt à Cestas (Gironde) le 20 août 1949	82	-	-	4
Cyclone Hyacinthe à La Réunion le 18 janvier 1980	25	-	-	4
Sécheresse géotechnique en 1976	-	-	880	4
Deux tempêtes dans le Centre du 6 au 11 novembre 1982	13	300	-	4
Sécheresse géotechnique en 1989	-	710	-	4
Ouragan Hugo en Guadeloupe en septembre 1989	5	762	-	4
Sécheresse géotechnique en 1990	-	1 120	-	4
Tempête Daria dans le Nord et l'Ouest de janvier à février 1990	81	-	-	4
Sécheresse géotechnique en 1996	-	880	-	4
Sécheresse géotechnique en 1997	-	610	-	4
Sécheresse géotechnique en 1998	-	740	-	4
Tempêtes Lothar et Martin en décembre 1999	92	-	15 000	5
Sécheresse géotechnique en 2003	-	1 940	-	4
Tempête Klaus de janvier 2009	11	1 300	5 000	5
Tempête Xynthia en février 2010	-	735	2 500	5
Sécheresse géotechnique en 2011	-	910	-	4
Tempête de grêle Ela du 6 au 10 juin 2014	-	400	-	4
Sécheresse géotechnique en 2016	-	850	-	4
Sécheresse géotechnique en 2017	-	1 000	-	4
Sécheresse géotechnique en 2018	-	1 650	-	4
Sécheresse géotechnique en 2019	0	850	-	4
Sécheresse géotechnique en 2020	0	1 100	-	4

Figure 86 : Tableau récapitulatif des événements naturels dommageables survenus en France entre 1900 et 2021 (autres que les inondations) (extrait rapport DATA LAB « Chiffres clés des risques naturels »).

On constate nettement sur le tableau en figure 86 une augmentation de la fréquence des phénomènes de sécheresse depuis les dernières décennies.

**La conséquence directe de l'abaissement des niveaux d'étiage de nos cours d'eau est une mise à nu des têtes de pieux bois engendrant leur pourrissement tel que vu au chapitre 2.1.**

**Au-delà des pieux bois, la mise à l'air des massifs de béton de chaux et entablements d'époque engendre aussi une**

**perte de cohésion des bétons de chaux par contact avec l'air tel que vu au chapitre 2.3. Ces éléments deviennent ainsi plus fragiles / friables et connaissent une altération par abrasion d'autant plus rapide et exponentielle lors des crues caractérisées par un important transport de sédiments.**

### 3.4.2 L'augmentation des crues et de leur intensité

Au contraire, le réchauffement climatique engendre une fonte des neiges et/ou glaciers ainsi que des précipitations d'intensité plus importante induisant des phénomènes de crues « violentes ».

Ce phénomène se cumule avec l'impact de l'imperméabilisation des sols (voir chapitre suivant 3.5).

L'intensité et la fréquence des crues ne semblent plus devoir être démontrées. Nous citerons quelques références globales permettant tout de même un rappel.

Sur le site du Ministère de la transition écologique, de la biodiversité, de la forêt de la mer et de la pêche, on relève que :

- *La hausse des températures augmente le risque de précipitations : plus l'air est chaud, plus il contient de vapeur d'eau... qui se transformera potentiellement en averse intenses. On observe déjà en France une intensification des pluies à certaines périodes (notamment à l'automne). Ce phénomène accentue un risque de crues.*

- *Selon le sixième rapport du GIEC, les scénarios prévoient d'ici 2030/2050 une hausse des pluies plus intenses, apportant des volumes d'eaux importants sur des durées courtes. Dans un scénario de réchauffement à +1,5°C, les précipitations décennales (c'est-à-dire qui se produisent actuellement une fois tous les dix ans) se produiront 1,5 fois plus souvent. Dans un scénario à +4°C, la probabilité de telles précipitations est 2,7 fois plus importante. Le GIEC estime que l'intensité de tels épisodes de précipitations extrêmes augmenterait de 7 % pour chaque degré d'augmentation de température.*

*Ce résultat est considéré avec un degré de confiance élevé en France continentale, sauf en Méditerranée où il est considéré avec un degré de confiance moyen à partir d'une augmentation de la*

*température du globe de 2°C vers le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle.*

Sur le site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, on pourra aussi se référer au livre édité en 2023 par DATA LAB Chiffres clés des risques naturels . Ce document fournit de manière détaillée l'ensemble des données concernant les différents risques naturels et leurs évolutions induites par le changement climatique.

On constate sur la figure 87 ci-dessus que les inondations, dont les crues et débordement des cours d'eau, sont le premier risque naturel en nombre. Elles représentent 67% des événements naturels dommageables.

## NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS NATURELS DOMMAGEABLES DE 1900 À 2021

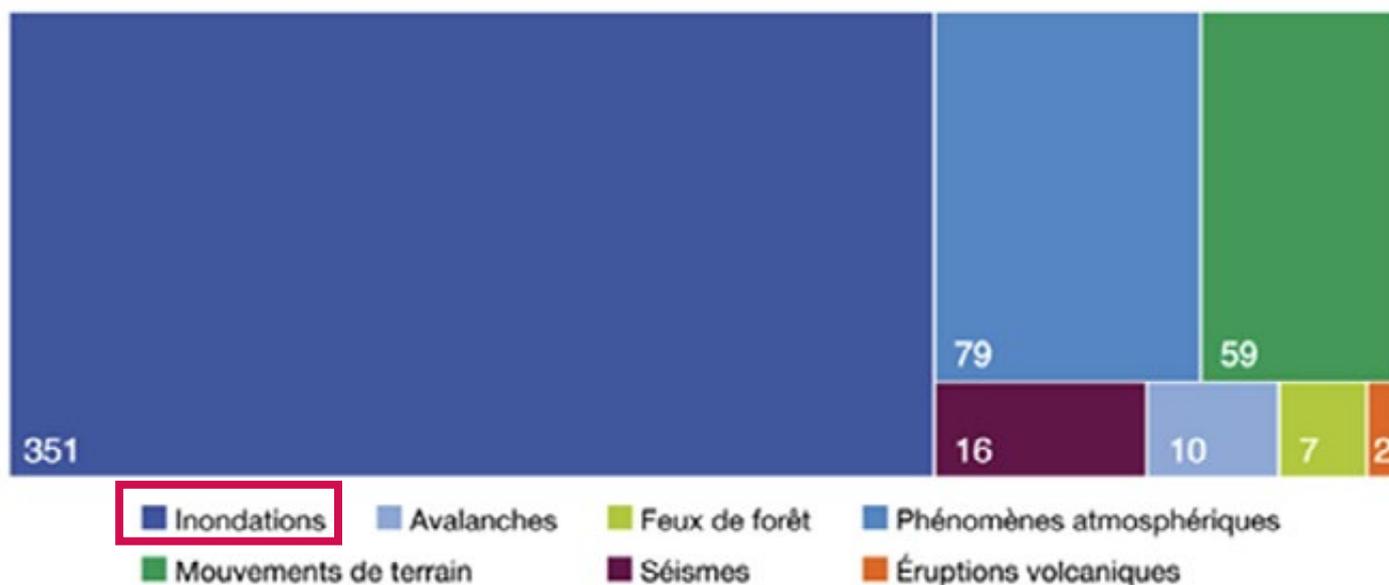


Figure 87 : Répartition des événements naturels, extrait rapport DATA LAB « Chiffres clés des risques naturels »).



Figure 88 : Crue remarquable du 09 mars 2024 : Pont du Gard (photo météo Languedoc)



Figure 89 : Pont en arches en pleine crue (photo FREEPIK, abonnement J NICOLI)



Figure 90 : OA de Laudun (crédit CEREMA)



Figure 91 : 2021 : « La dernière crue de la Midouze a particulièrement abîmé l'ouvrage sans le mettre en péril ». (Crédit photo : Guy Bop)



Figure 92 : Crue d'avril 2024 dans le loir et Cher, intervention d'ATS pour débayer les embâcles accumulés (crédit photo ATS)



Figure 93 : Le pont de Drouilhères a été submergé de nombreuses fois par les crues (Archives DR)

Ces crues violentes impliquent de multiples incidences sur les systèmes de fondations des ouvrages d'art :

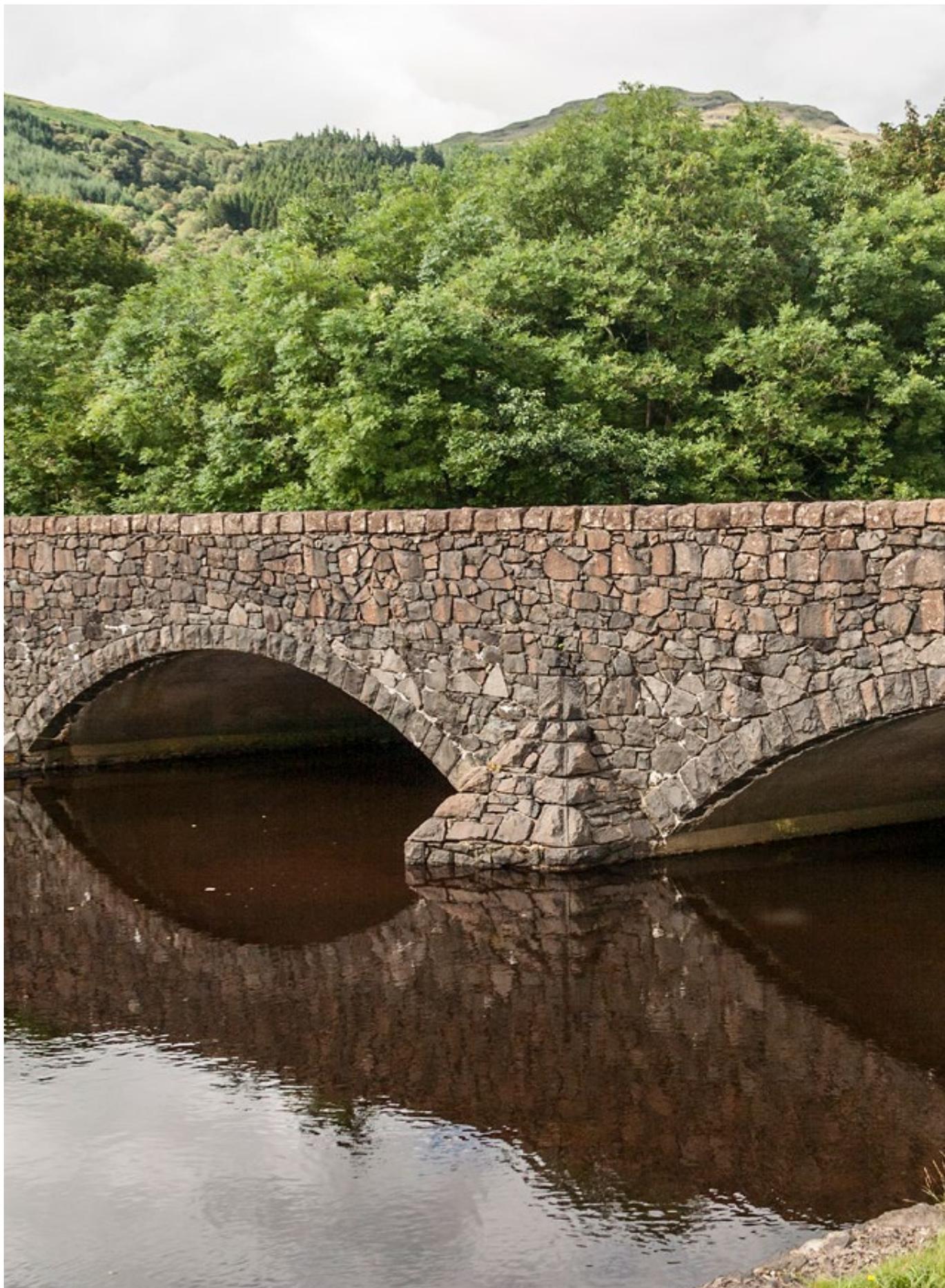
- l'augmentation de débit induit une augmentation des transports de sédiments, des affouillements et des effets de fosse au niveau des piles,
- les niveaux de débit atteints engendrent le déplacement, au-delà des sédiments, de blocs rocheux et d'embâcles de tailles importantes, que ce soit au niveau des enrochements de protection des piles comme en amont, avec le transport de blocs et d'embâcles venant percuter l'ouvrage,
- les phénomènes d'abrasion par transport solide et d'efforts mécaniques sur les têtes de fondations sont décuplés.

Au-delà des incidences sur les systèmes de fondations des ouvrages, ces crues peuvent avoir des incidences directes sur les structures :

- les efforts mécaniques induits par l'eau sur les piles sont décuplés et peuvent dépasser les limites mécaniques

et structurelles des ouvrages,

- les ouvertures de passage des ouvrages peuvent être insuffisantes et saturées induisant une montée des niveaux d'eau en amont de l'ouvrage et des efforts de poussée de l'eau directement sur le tympan amont de l'ouvrage.



## 3.5 Impact de l'imperméabilisation des sols sur les cours d'eau et incidence sur les ouvrages

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

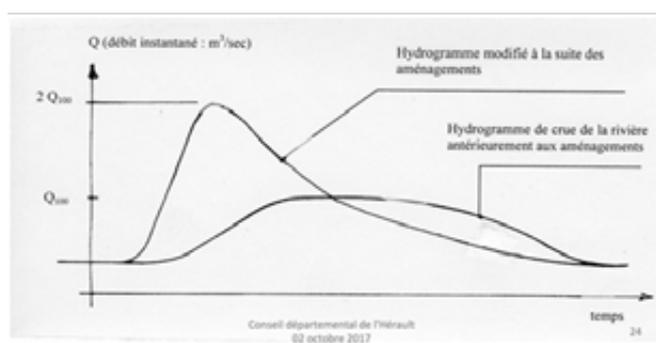


Figure 94 : Courbe illustrant l'augmentation du débit de crue suite aux aménagements dans l'Hérault

On peut constater sur la courbe ci-dessus, issue d'une étude menée par le département de l'Hérault, que l'incidence des aménagements sur le débit des cours d'eau en période de crue est la suivante :

- le débit maximum est doublé, et donc l'intensité des courants est doublée,
- l'augmentation du débit est beaucoup plus rapide,
- la diminution du débit est aussi plus rapide.

Ce phénomène est aujourd'hui largement reconnu au-delà de ces impacts en dehors des cours d'eau. Sur le site «Eaufrance» on peut lire :

- *L'artificialisation des milieux et des sols conduit à une altération de leur fonctionnement naturel, et à une modification du parcours de l'eau dans le bassin versant. Ces modifications ne sont pas sans impact sur la biodiversité et les usages de l'eau, notamment en raison d'une accentuation des risques d'inondation, de sécheresse et d'érosion. La qualité de l'eau est aussi*

affectée.

- Une augmentation potentielle du phénomène d'érosion.
- L'accélération du parcours de l'eau qui résulte des altérations hydromorphologiques augmente la capacité des écoulements à emporter les sédiments (sables, graviers, galets), ce qui favorise le phénomène d'érosion. Par exemple, les berges d'un cours d'eau peuvent devenir instables.

**Dans certains cas, la création d'obstacles à l'écoulement (ponts, digues ou autres) déstabilise le fonctionnement du cours d'eau et conduit à un phénomène de creusement du lit.**



Figure 95 : Pont de Vaison-la-Romaine, France 1<sup>er</sup> siècle - Ouverture : 17,20 m. Passage de la crue du 22 septembre 1992 (crédit photo IRSTEA de Lyon)

Les grandes crues ont été la cause première de destruction des ouvrages anciens fondés insuffisamment bas et mal protégés.

Au cours des crues, il se produit un approfondissement général du lit et un remaniement des alluvions, sur une épaisseur parfois importante (plusieurs mètres), avec modification défavorable de leurs caractéristiques mécaniques. Ces phénomènes peuvent être très rapides.

**Formule de Ramette** : Profondeur maximale des fonds perturbés (ou susceptibles d'être affouillés), en section rectiligne, sans causes de perturbations supplémentaires :

$$Y = 0,73 \cdot q^{2/3} / d^{1/6}$$

avec :  $q = Q/L$  débit liquide par unité de largeur  $L$  du lit mineur du cours d'eau ( $m^3/s$ )  
 $d$  = diamètre moyen des sédiments (m)

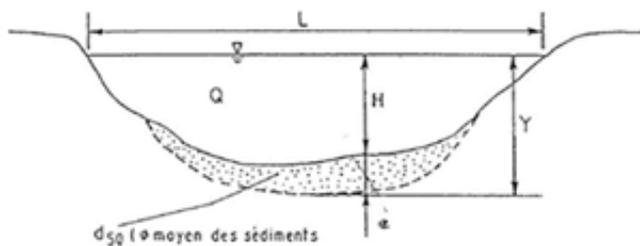


Figure 96 : Schéma de principe d'application de la formule de Ramette permettant d'estimer les affouillements potentiels.

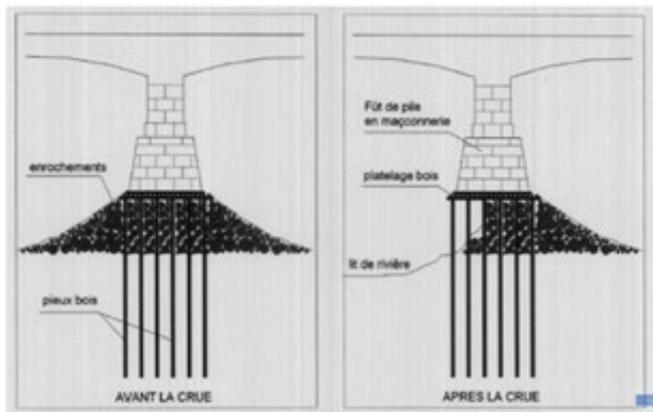


Figure 97 : Coupe d'illustration du Pont Mayou à Bayonne avant et après une crue.

### Les crues 2023 du Nord Pas de Calais :

Suite aux crues 2023-2024 dans le département du Pas de Calais, 600 inspections aquatiques ont dû être lancées en urgence pour faire un état des lieux du sujet.



Figure 98 : Pont situé sur la commune d'Arques qui a subi de plein fouet les problèmes d'affouillement suite aux inondations (Image STRRES post LinkedIn)

Telles que vues au chapitre 3.4, les crues violentes impliquent de multiples incidences sur les systèmes de fondations des ouvrages d'art :

- l'augmentation de débit induit une augmentation des transports de sédiments, des affouillements et des effets de fosse au niveau des piles,
- les niveaux de débit atteints engendrent le déplacement, au-delà des sédiments, de blocs rocheux et d'embâcles de tailles importantes que ce soit au niveau des enrochements de protection des piles comme en amont avec le transport de blocs et d'embâcles venant percuter l'ouvrage,
- les phénomènes d'abrasion par transport solide et d'efforts mécaniques sur les têtes de fondations sont décuplés,

Au-delà des incidences sur les systèmes de fondations des ouvrages, ces crues peuvent avoir des incidences directes sur les structures :

- les efforts mécaniques induits par l'eau sur les piles sont décuplés et peuvent dépasser les limites mécaniques et structurales des ouvrages,
- les ouvertures de passage des ouvrages peuvent être insuffisantes et saturées induisant une montée des niveaux d'eau en amont de l'ouvrage et des efforts de poussée de l'eau directement sur le tympan amont de l'ouvrage.

**Nos cours d'eau ont de tout temps fait l'objet de crues pour lesquelles nos ouvrages étaient conçus et construits pour les supporter.**

**Cependant, les deux phénomènes cumulés que sont le changement climatique et l'imperméabilisation des sols engendrent une aggravation de ces crues tant sur leur fréquence que sur leur intensité.**

**L'aggravation de ces crues engendre des modifications de l'environnement de nos ouvrages et des sollicitations de ceux-ci beaucoup plus importantes dépassant leurs capacités.**

## 3.6 Synthèses des causes

Les pathologies affectant les fondations anciennes des ouvrages d'art et, par voie de conséquence, les structures des ouvrages, sont donc globalement induites :

- **par des problématiques d'affouillements,**
  - **par des problématiques de mise à l'air des éléments bois ou des massifs en béton de chaux,**
  - **par des phénomènes d'abrasion et de chocs mécaniques par transport solide.**
- Ces 3 grandes familles de causes, se cumulant parfois, peuvent avoir différentes origines :
- les problématiques intégrées et prise en compte lors de la construction des ouvrages :
    - l'évolution naturelle des cours d'eau pouvant induire des abaissements du lit, voire de la ligne d'eau, et ainsi engendrer des affouillements. Cette évolution naturelle s'entend sur le long terme et les ouvrages ont globalement été construits en intégrant cette évolution qualifiée de naturelle,
    - l'incidence des ouvrages sur leur environnement proche pouvant engendrer des affouillements de leurs appuis. Les ouvrages ont là aussi été globalement construits en intégrant cette incidence (enrochements d'origine etc.) ;

- **les problématiques non intégrées et non prises en compte lors de la construction des ouvrages, causes qualifiées de contemporaines :**

- **l'incidence des aménagements hydrauliques existants, et à venir, ou encore la suppression de ceux-ci, engendrant une évolution des cours d'eau pouvant induire des abaissements du lit, voire de la ligne d'eau\*, et ainsi engendrer des affouillements. Les évolutions induites par les aménagements hydrauliques peuvent être plus ou moins rapides selon le type d'aménagement, sa position et sa distance par rapport aux ouvrages concernés,**
- **l'évolution climatique engendrant comme vu précédemment :**
  - ◇ **abaissement des niveaux d'étiage et durée d'étiage plus longue induisant une mise à l'air des pieux bois et un pourrissement de ceux-ci,**
  - ◇ **épisodes pluvieux plus violent et/ou fonte neigeuse plus intense et rapide et l'imperméabilisation des sols, engendrant des crues violentes induisant elles-mêmes des**

**efforts mécaniques sur les ouvrages et des affouillements rapides et importants,**

- **l'imperméabilisation des sols engendrant :**
  - ◇ **des crues violentes induisant elles-mêmes des efforts mécaniques sur les ouvrages et des affouillements rapides et importants, phénomène cumulé avec l'impact du changement climatique,**
- **l'exploitation des cours d'eau (extraction de matériaux) engendrant :**
  - ◇ **une évolution des cours d'eau pouvant induire des abaissements du lit, voire de la ligne d'eau\*\*, et ainsi engendrer des affouillements.**

---

*\*Les éventuels abaissements de la ligne d'eau peuvent induire une mise à l'air des pieux bois et un pourrissement de ceux-ci.*

*\*\* La Loi n°92.3 du 3 janvier 1992 n'intègre absolument pas ces notions et impacts en préconisant, de manière caricaturale, la suppression ou le dérasement des seuils et ouvrages hydrauliques existants avec pour seul objectif de retrouver la libre circulation des sédiments et la continuité écologique.*

---

Que ce soit les évolutions naturelles, l'activité humaine dans et en dehors des cours d'eau (aménagements fluviaux, exploitation/extraction et imperméabilisation des sols), ou l'évolution climatique tant en termes d'épisodes de sécheresse que de crues violentes, l'ensemble de ces phénomènes est intimement lié et engendre deux conséquences sur les fondations de nos ouvrages :

- l'affouillement localisé ou généralisé des appuis pouvant induisant :
  - une réduction de portance des appuis par diminution d'encastrement,
  - une abrasion des pieux bois,
  - une disparition des enrochements de protection,
  - une érosion derrière la crèche de protection,
  - un risque de déversement latéral,
  - ....
- un abaissement permanent ou périodique (étiage) des niveaux d'eau induisant une mise à l'air des pieux bois et un pourrissement de ceux-ci.

# 4

## Études de projet de réparation.

**4.1 L'auscultation - Le diagnostic - Le pronostic**

**4.2 Les investigations nécessaires au diagnostic et auscultation des fondations**

**4.2.1** Les investigations d'auscultations externes

**4.2.2** Les investigations d'auscultations internes

## Le lecteur est invité à se reporter au **Référentiel de l'ingénierie de la maintenance de l'IMGC (GT4 - 2ème édition, 2023)** et aux guides **STRRES** suivants :

### • **FABEM 6.1 V2** Réparation et renforcement des maçonneries : Généralité et préparation des travaux :

- Chapitre 3.3 Études et investigations
- Chapitre 4.3.11 Altérations et désordres des fondations,

### • **FABEM 6.3 V2** : Réparation et renforcement des maçonneries Réparation et Renforcement structuraux

- Chapitre 2 : Travaux de réparation et/ou renforcement des fondations

### • **FAFO 1 V2** Réparation et renforcement des fondations

- Chapitre 1.2.1 : Conception et réalisation de l'ouvrage à réparer ou renforcer
- Chapitre 1.2.3 : Le constat des désordres
- Chapitre 1.3.1 : Recherche des désordres
- Chapitre 1.3.2 : Choix de la méthode et des moyens à mettre en œuvre
- Chapitre 1.3.3 : Exécution des travaux de réparation ou de renforcement



De manière générale, toute réparation et/ou renforcement des fondations d'un ouvrage en maçonnerie doit débuter par une étude de l'état de la construction et de ses fondations avant d'aborder la recherche et la mise au point de la ou des solutions de confortement.

Ce processus passe par des étapes incontournables.

#### Les principales étapes sont rappelées ci-dessous :

1. la détection des dégradations ;
2. l'auscultation - le diagnostic - le pronostic ;
3. l'établissement du projet de réparation et/ou de renforcement ;
4. la mise en sécurité éventuelle de l'ouvrage ;
5. la mise en œuvre de la réparation et/ou du renforcement, et des éventuelles travaux ou mesures à mettre en œuvre au niveau du cours d'eau ;
6. les contrôles et vérifications des résultats ;
7. la surveillance de la structure réparée et/ou renforcée.

Les étapes 1 à 3 sont de la responsabilité du maître d'ouvrage et de son maître d'œuvre. Nous les détaillerons dans le chapitre 4.1.

La seconde 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 la réussite ou l'échec de la réparation, notamment sa durabilité.

Les étapes 4 à 6 correspondent à l'intervention d'entreprises spécialisées sous le contrôle du maître d'œuvre.

L'étape 7 est de la responsabilité du maître d'ouvrage et du gestionnaire de l'ouvrage.

**Compte tenu de la complexité et de l'aspect multifactoriel des problématiques de fondations anciennes d'ouvrages maçonnés, le recours à des maîtres d'œuvre et bureaux d'études spécialisés est impératif tant en termes d'auscultation / diagnostic / définition du projet de réparation, que de suivi des travaux.**

**Pour les mêmes raisons, ces travaux complexes doivent être confiés à des entreprises spécialisées.**

Le projet de restauration, de réparation ou de confortement d'une fondation ancienne nécessite de disposer des analyses préalables suivantes :

- le diagnostic d'état et de comportement des fondations et des structures sur la base d'observations, d'auscultations et d'analyses avec recherche des actions des éléments agressifs et connaissance des caractéristiques de l'environnement hydraulique\* et géotechnique\*\* ;
- le pronostic de comportement et recherche des risques encourus provoqués par les agressions subies et à venir et sous les charges appliquées\*\*\* ;
- la recherche et l'identification précise des origines des dégradations sur les matériaux et des réductions des sécurités de l'ouvrage. Les origines des désordres dans les fondations sont à rechercher dans les actions des écoulements résultant du comportement morphologique de la rivière et dans la constitution des obstacles créés par la présence des appuis dans le lit du cours d'eau.

*\*L'environnement hydraulique s'entend, au vu des causes et facteurs aggravants énoncés au chapitre 3, au sens global du terme, c'est à dire :*

- prise en compte des données hydrauliques et morphologiques du cours d'eau à l'époque de la construction ;
- prise en compte des données hydrauliques et morphologiques réactualisées, et éventuellement projetées, en tenant compte :
  - des niveaux d'étiage et de crues actualisés (intégrant l'incidence du changement climatique et de l'imperméabilisation des sols) et de l'évolution du lit,
  - des éventuels ouvrages hydrauliques ou aménagements du cours d'eau en amont et aval de l'ouvrage,
  - d'éventuelles exploitations dans le cours d'eau (extraction, dragage ...),
  - de l'évolution de l'activité fluviale éventuelle tant en termes de chocs potentiels que d'effets hydrauliques induits.

*\*\*au même titre que l'environnement hydraulique, il conviendra de prendre en compte l'environnement géotechnique à l'époque de la construction et de vérifier si celui-ci n'a pas subi d'évolution significative.*

*\*\*\*Compte tenu de l'âge de ces ouvrages et des évolutions de l'activité humaine depuis leur conception, il conviendra de définir les conditions d'exploitation actuelles et de vérifier la capacité des fondations à supporter les charges contemporaines, voire à venir.*

Pour retrouver les sécurités des fondations et au-delà de la reconstitution des éléments éventuellement dégradés et des réparations structurelles, le cas échéant, le projet doit répondre tel qu'énoncé dans le guide STRRES FABEM 6.3 aux grandes orientations suivantes :

- respecter l'environnement hydraulique, au sens de ne pas modifier les conditions de l'écoulement et, en principe, en cherchant à les améliorer au droit du franchissement ;
- protéger les éléments de fondation et les sols contre les actions des eaux, de manière à conserver les structures existantes sans réduire pour autant les sections hydrauliques ;
- conserver immergés en permanence les éléments bois constitutifs de fondation ;
- rétablir les encastresments des massifs d'appui et les contacts avec les sols par des comblements appropriés ;
- restaurer et améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs des fondations et des sols d'appui pour supprimer les tassements ;
- répartir les pressions sur le sol dues aux charges de l'ouvrage par l'ajout d'une structure additionnelle respectant les conditions des écoulements ;
- exceptionnellement, reprendre en sous-œuvre, partiellement ou totalement, la fondation existante pour substituer, à cette ancienne fondation traversant un horizon compressible, une nouvelle correctement fondée ;
- reprendre en sous-œuvre la fondation existante par une nouvelle fondation disposée latéralement à l'existante et constituant l'assise d'une nouvelle structure venant se substituer à l'ouvrage d'origine.

Ces grandes orientations des travaux doivent tenir compte du fonctionnement et du comportement global de l'ouvrage. Le transfert des charges dans un ouvrage en maçonnerie se fait essentiellement, voire exclusivement, par des actions de compression qu'il importe de conserver sans les modifier. Il faut privilégier les techniques de restauration des fondations qui conservent le fonctionnement de ces ouvrages en maçonnerie.

Dans tous les cas, il y a lieu de tenir compte de l'environnement hydraulique de l'ouvrage et d'améliorer, autant que faire se peut, les conditions de l'écoulement des eaux au droit du pont en conservant un niveau d'étiage immergeant les éléments bois.



Avant d'intervenir sur un ouvrage, il faut s'interroger sur les actions et les évolutions de la rivière. Un objectif des travaux permettant d'assurer le bon comportement des fondations et d'améliorer leur sécurité peut être de limiter ou de supprimer la ou les causes des désordres dus aux actions de l'écoulement du cours d'eau sur les sols au pourtour proche ou lointain des appuis et de conserver les éléments bois immergés en permanence. Des aménagements sur le cours de la rivière peuvent contribuer largement à limiter ces actions de l'eau ou supprimer ces agressions futures.

**Le projet de réparation des fondations anciennes d'un ouvrage maçonné doit donc être abordé de manière globale en considérant :**

- l'ouvrage lui-même, tant au niveau de ses fondations que de sa structure,
- son environnement proche tant géotechnique qu'hydraulique,
- son environnement hydraulique global, c'est-à-dire l'ensemble du cours d'eau et de son bassin versant d'alimentation.

Nous listerons au chapitre 5 les travaux d'aménagement de type hydraulique qui peuvent venir en complément des travaux portant directement sur l'ouvrage et ses fondations.

# L'OUVRAGE & SON ENVIRONNEMENT

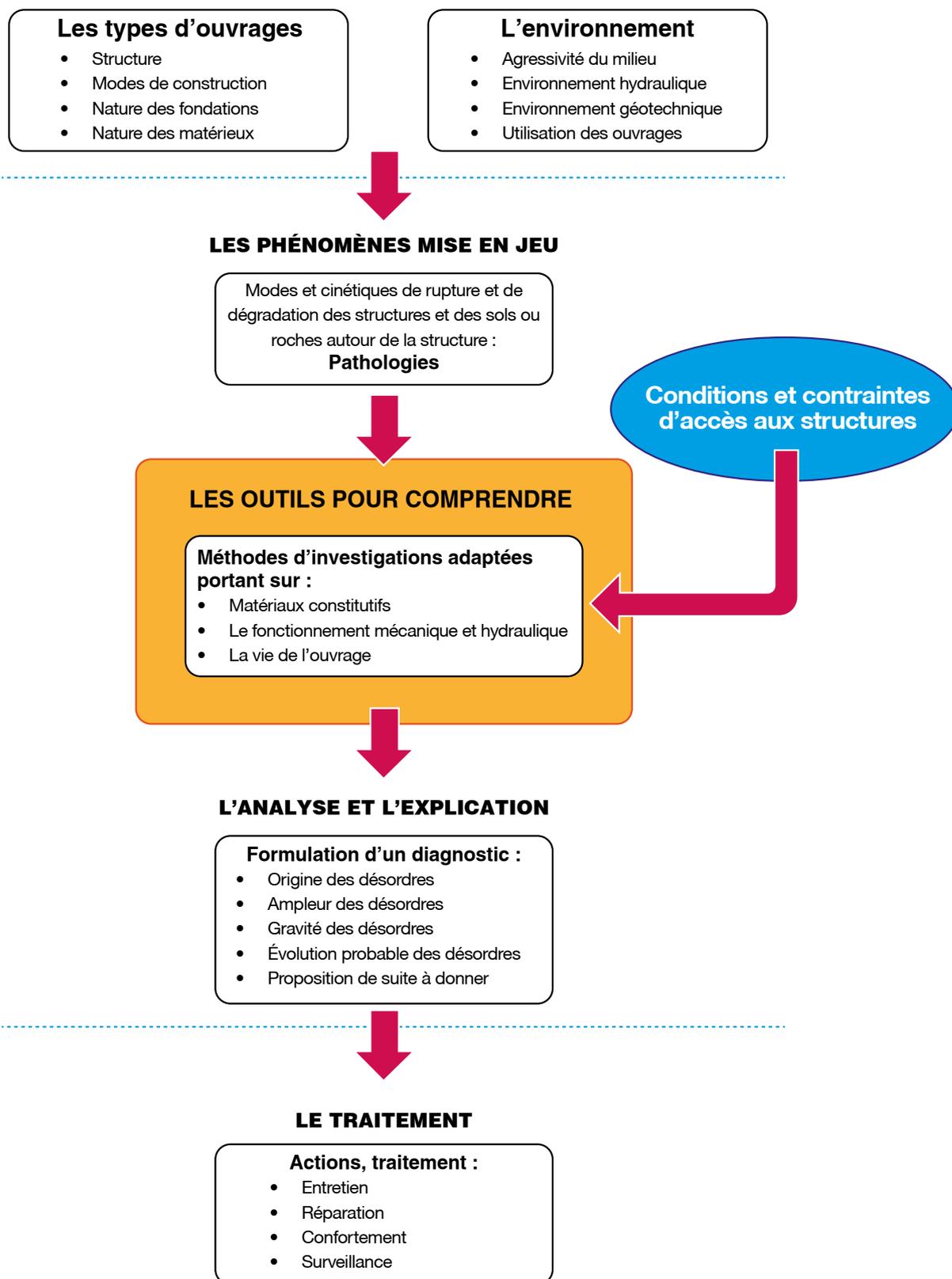


Figure 99.1 : Schéma synoptique d'une étude type

## 4.1 L'auscultation - Le diagnostic - Le pronostic

Cette étape clef dans l'élaboration d'un projet de réparation doit respecter et intégrer les points suivants qui permettront d'estimer précisément l'étendue de la pathologie et d'en identifier les causes pour ainsi pouvoir définir les travaux à réaliser et garantir une réparation pérenne.

Plusieurs grands intervenants lors de cette étape :

- laboratoires et entreprises pour investigations,
- ingénierie (étude et diagnostic) (assure le lien entre les acteurs).

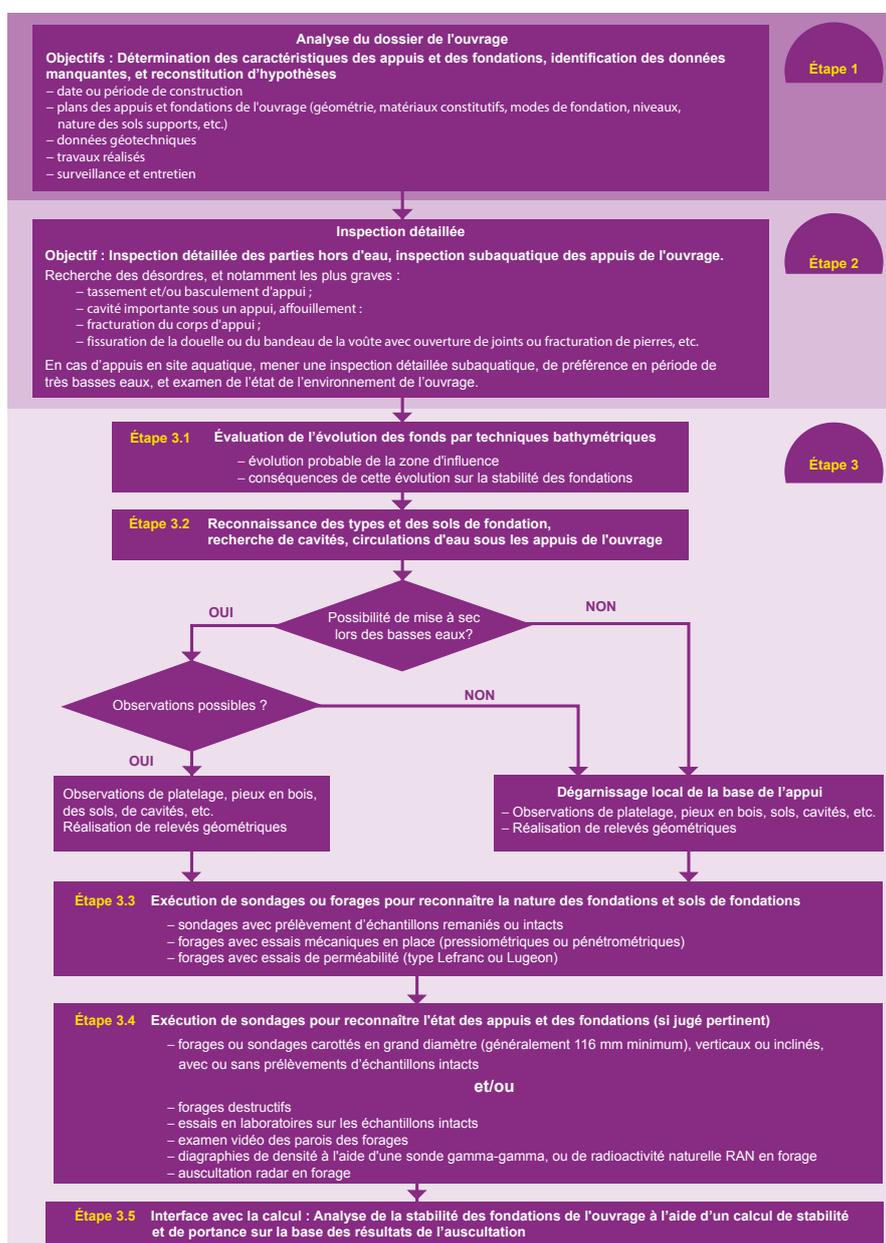
L'université Gustave Eiffel et le CEREMA ont établi une procédure plus spécifique à la reconnaissance des appuis en maçonnerie et leurs fondations E4-2 à laquelle on pourra se référer et dont le logigramme est le suivant :

Figure 99.2 : Schéma synoptique d'une étude type de reconnaissance des appuis en maçonnerie et leurs fondations

### Dossier d'ouvrage (archives ...) :

Afin de mener une étude sérieuse d'un projet de réparation concernant des pathologies affectant les fondations d'ouvrages, il conviendra premièrement de collecter le maximum d'informations et documents permettant ainsi de constituer le dossier d'ouvrage :

- plans des fondations et de l'ouvrage porté ...
- notes de calculs « d'origine » (attention aux évolutions réglementaires ...),
- sondages géotechniques « d'origine »,
- rapports d'inspections détaillées et d'inspections subaquatiques éventuellement existants,
- relevés topographiques éventuellement existants,



- relevés bathymétriques éventuellement existants,
- articles ou monographies sur l'ouvrage et sa construction.

Cette première analyse concerne uniquement la construction de l'ouvrage et les études correspondantes. Elle peut demander beaucoup de temps pour rassembler les documents originaux et les analyser. Des études complémentaires peuvent s'avérer nécessaires. Il convient, en premier lieu, de consulter le « dossier de l'ouvrage » qui doit comprendre : les dessins conformes à l'exécution, les hypothèses et les notes de calcul, les conditions effectives de réalisation et les éventuels incidents de chantier, les résultats des essais, mesures et observations éventuellement réalisés pendant les travaux.

Si le dossier de l'ouvrage ne peut être entièrement reconstitué, des relevés sont effectués « in situ » et le cas échéant complétés par les calculs nécessaires. Ces relevés permettent de reconstituer la géométrie et les caractéristiques des fondations existantes en réalisant des puits de reconnaissance destinés à s'assurer de la largeur et de la profondeur des massifs, du nombre et du diamètre des pieux bois.

Des procédés plus élaborés permettent de définir la profondeur des pieux et leur qualité. Ces relevés amènent également à redéfinir :

1. les terrains de fondation et leurs caractéristiques au moyen de reconnaissances poursuivies jusqu'aux couches susceptibles de porter, dans des conditions satisfaisantes de résistance et de tassement, les charges des superstructures,
2. les conditions hydrogéologiques.

Il peut aussi être nécessaire de connaître, par des sondages, des prélèvements et des essais, la nature, la géométrie et les caractéristiques des éléments bois et des différentes maçonneries associées qui constituent l'ouvrage. Toutes ces investigations sont, normalement, à réaliser pendant la phase des études préalables qui aboutissent au projet de réparation ou de renforcement.

NB : Les investigations éventuellement nécessaires pour compléter le dossier d'ouvrage peuvent permettre en partie de caractériser les désordres et la pathologie. Nous reviendrons donc sur ces investigations.

## Caractérisation des désordres et de la pathologie :

- relevé des désordres structuraux ;
- caractérisation / quantification des éventuels tassements ou déversements de l'ouvrage ;
- relevé des désordres au niveau des fondations :
  - affouillements, cavités,
  - détérioration des éléments constitutifs en bois,
  - détérioration des éléments constitutifs des

- massifs et entablements,
- état des enrochements de protection,
- ...

## Investigations complémentaires :

Au-delà des documents collectés et analysés, et selon la qualité du dossier d'ouvrage et des données disponibles, il conviendra comme indiqué ci-avant de définir et procéder à des investigations complémentaires (voir chapitres 4.2.1 et 4.2.3).

Au-delà des techniques d'investigations utilisées classiquement dans de nombreux cas de diagnostics :

- relevés simples des désordres structuraux,
- sondages géotechniques (pressiomètre / pénétromètre / carottages)
- levés topographiques,
- ...

## Les techniques d'investigations directement liées aux fondations et à leur environnement sont listées ci-dessous :

- techniques d'investigations externes à l'ouvrage :
  - relevés bathymétriques,
  - inspections subaquatiques,
  - mise à sec des fondations,
  - dégarnissage localisé ;
- techniques d'investigations internes au système de fondations de l'ouvrage :
  - auscultation des massifs :
    - essais sur mortier :
      - ◇ analyse au Microscope Électronique à Balayage (MEB).
      - ◇ caractéristique de la microstructure,
      - ◇ présence de produits d'altération (ettringite, brucite, gypse),
      - ◇ analyse chimique élémentaire - Dosage des éléments constitutifs du mortier,
      - ◇ évaluation de la pénétration des chlorures, des sulfates et du magnésium,
      - ◇ information sur la nature du liant utilisé,
      - ◇ caractérisation minéralogique - composition chimique élémentaire du liant,
  - auscultation spécifique des éléments bois :
    - essai de poinçonnement à l'aiguille,
    - prélèvement d'échantillons bois et tests en laboratoire,
    - estimation de la résistance à la compression du bois,
    - estimation de la vitesse de dégradation des pieux bois en conditions d'immersion partielle.

## Conditions d'exploitation et environnement de l'ouvrage :

Il est nécessaire également de connaître les conditions réelles d'exploitation de l'ouvrage, son comportement et les modifications intervenues dans son environnement, c'est-à-dire :

- l'évolution dans le temps des conditions d'exploitation et la comparaison avec les hypothèses retenues lors de l'étude d'exécution,
- les variations des niveaux d'eau (haute et basse) actualisées,
- la recherche et l'analyse des mesures ayant pu être faites sur tout ou partie de l'ouvrage,
- l'information complète sur toutes les réparations, même partielles, portant sur les fondations ou le sol de fondation, effectuées au cours de la vie de l'ouvrage (dates, investigations préalables, moyens, méthodes, mesures...),
- la recherche des travaux effectués à proximité depuis la construction de l'ouvrage,
- la recherche de tout élément ayant pu influencer sur le cours d'eau (exploitation, aménagements, ouvrages, modification au niveau du bassin versant d'alimentation).

A partir de ces données, **les premières étapes de l'étude** seront :

- établir la géométrie des fondations,
- déterminer les caractéristiques des sols en place,
- déterminer les charges permanentes appliquées,
- déterminer les surcharges d'exploitation supportées,
- définir les combinaisons à prendre en compte, y compris les valeurs des coefficients appliqués aux actions de base ou d'accompagnement.

Une fois le dossier d'ouvrage constitué, il convient de définir les règlements retenus et applicables.

## Règlements et documents guides retenus selon le fonctionnement des fondations existantes :

Il convient de rappeler que les pieux bois ne sont pas à considérer comme des fondations profondes mais plutôt comme des inclusions dans le sol. Il convient donc de définir les règlements et documents de référence qui permettront de réaliser les calculs.

- Fondations profondes / superficielles ?
- Pieux bois = « pieux » / « inclusions » ?

## Études hydrauliques :

- simulation des crues Q10, Q100,
- simulation de l'impact du changement climatique pour déterminer les niveaux d'étiage à venir et anticiper les niveaux de crues à venir
- études hydrauliques spécifiques comportant l'examen de l'alimentation du bassin versant du secteur aménagé ou modifié, de nombreux levés bathymétriques et une analyse détaillée des lois de l'écoulement dynamique du cours d'eau dans différentes sections.

**Ce n'est qu'à partir de l'ensemble de ces éléments que pourront être déterminés les travaux à réaliser (cf. chapitre 5) :**

- **sur l'ouvrage :**
  - **travaux sur le système de fondations,**
  - **travaux sur la structure ;**
- **au niveau du cours d'eau.**

**Ces travaux devront intégrer les contraintes réglementaires et législatives (loi 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau et textes en découlant) et pourront par conséquent induire des aménagements visant à assurer la continuité écologique au-delà de la pérennité de l'ouvrage.**

*ATTENTION : L'appréciation de l'état d'un ouvrage reste un problème difficile et ceci, d'autant que les informations tirées des observations et des reconnaissances sont limitées. La prudence doit alors guider le projeteur quant aux choix des moyens à mettre en œuvre et à l'établissement des procédures et des séquences des opérations. A cet égard, il est recommandé, selon les cas :*

- *de reconstituer d'abord la continuité entre l'appui et le sol support en comblant les cavités existantes et celles qui seraient masquées à l'observateur ;*
- *de procéder à un renforcement, provisoire, des caractéristiques mécaniques des sols selon une procédure adaptée pour réduire ou supprimer les tassements en cours et résister aux augmentations des charges, avant de mettre en œuvre les opérations lourdes de confortement ;*
- *d'étayer les parties instables, voire de mettre les voûtes sur cintres provisoires et, si besoin, de ceinturer les appuis fracturés.*

*Les travaux de confortement d'une fondation peuvent affaiblir momentanément les sols de fondation, par exemple à la suite de dégarnissage des massifs d'appui, de forages dans les sols, d'incorporation de coulis de ciment, de terrassements locaux (cette modeste liste n'étant pas limitative). En conséquence, les cadences d'exécution de ces travaux doivent être examinées avec précision et selon une procédure détaillée analysant les conséquences de chacune des opérations. Le non-respect de ces principes peut conduire à de graves désordres.*

## 4.2 Les investigations nécessaires au diagnostic et auscultation des fondations

Une inspection détaillée peut permettre de déceler d'éventuels désordres. Quand un désordre est constaté, des investigations permettent de recueillir des informations de nature à l'expliquer.

L'interprétation de ces informations constitue le diagnostic.

La formulation d'un diagnostic nécessite donc la mise en place d'un programme d'investigations permettant d'accéder à des informations latentes.

Le choix des investigations est fondamental et dépend :

- des besoins du gestionnaire de l'ouvrage,
- du niveau de fiabilité du dossier d'ouvrage,
- du type d'ouvrage,
- de l'environnement de l'ouvrage,
- de la nature et de l'ampleur des désordres constatés.

L'étape préalable à toute investigation dans le cadre d'un diagnostic est la constitution et l'examen du dossier d'ouvrage telle que vu au chapitre précédent.

**Nous rappelons que ces missions doivent être confiées à des bureaux d'études spécialisés. (notamment affiliés à l'IMGC)**

### 4.2.1 Les investigations d'auscultations externes

Les investigations en milieu aquatique doivent être confiées à des entreprises spécialisées (notamment affiliées au SNETI).

#### Les levés topographiques

Lorsque ces levés ont pour objet d'établir l'état de référence de l'ouvrage, il est nécessaire de repérer certains points caractéristiques de l'ouvrage au millimètre près. Ceci nécessite la plupart du temps le recours à un

spécialiste. Le travail du spécialiste est aussi de mettre en place les repères nécessaires pour le suivi de l'ouvrage, repères qui doivent répondre à plusieurs impératifs :

- ils doivent être placés en des points dont les mouvements sont représentatifs des mouvements de l'ouvrage ;
- ils doivent être matérialisés par une cible adaptée à la mesure à effectuer et leur pérennité doit être assurée (choix d'un matériau inoxydable, fixation robuste sur l'ouvrage par scellement profond).

#### La bathymétrie

Il existe actuellement des moyens sophistiqués pour lever les fonds et effectuer l'étude bathymétrique des sites.

Cependant il convient de ne pas négliger les moyens rustiques classiques, tels que perche et sonde à plomb, bien utiles aux abords immédiats des ouvrages, notamment dans l'embaras des enrochements de protection.

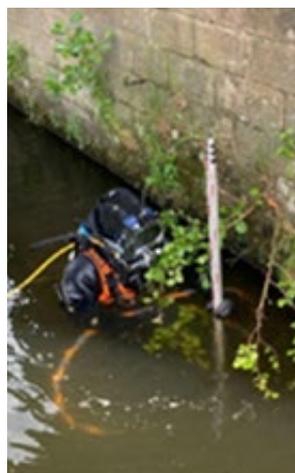


Figure 100 : relevé bathymétrique manuel (crédit photo Romoeuf)

Généralement, pour les échosondeurs (sondeurs monofaisceaux ou sondeurs multifaisceaux), on utilisera des matériels dont la précision sera d'au moins 1 % dans la gamme de mesure 0/15 mètres ce qui correspond à une erreur de +/- 15 cm.

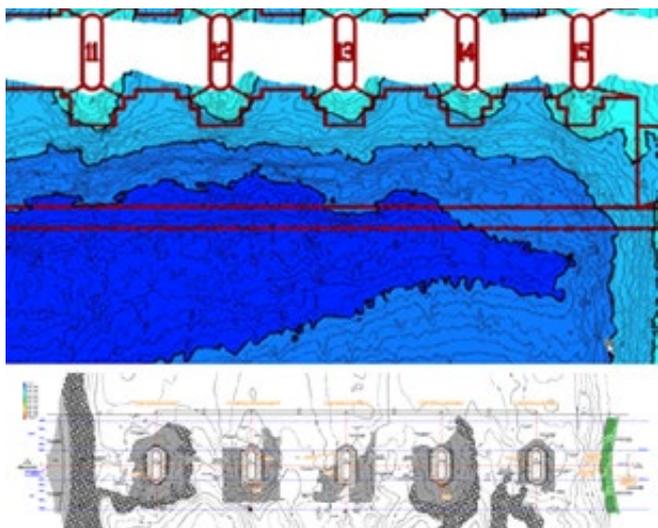


Figure 101 : Exemple d'imageries obtenues par échosondeurs

Le mode de levé bathymétrique en sondeur multifaisceaux permet de créer des cartes comparatives géoréférencées donnant l'occasion de mettre en évidence l'évolution du relief à proximité des ouvrages et ainsi quantifier précisément le mouvement des sédiments et alluvions sur des temporalités plus ou moins rapprochées.

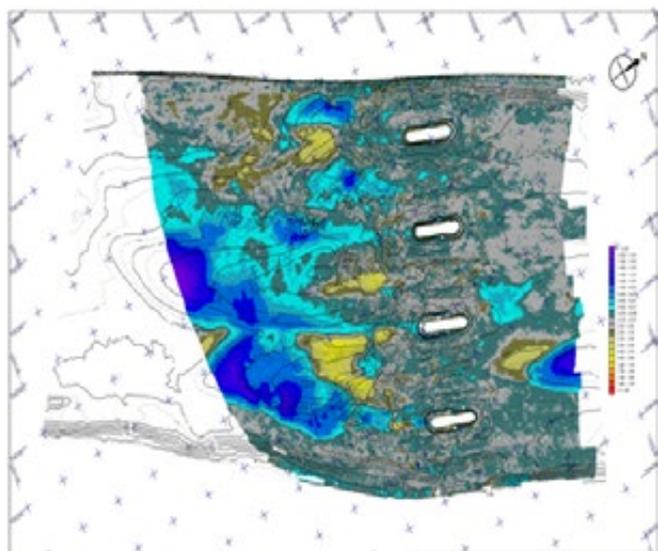


Figure 102 : Exemple d'image obtenue par sondeur multifaisceaux

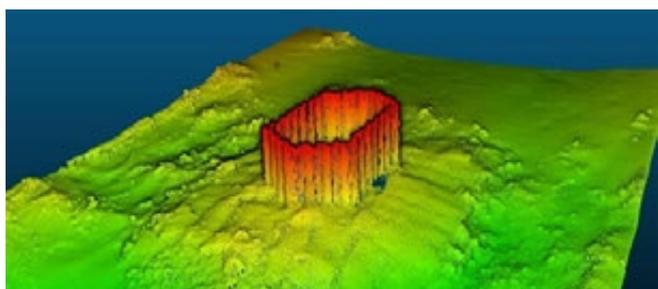


Figure 103 : Exemple d'image 3D obtenue par sondeur multifaisceaux après traitement informatique (crédit photo SATIF)



Figure 104 : Exemple d'image obtenue par échosondeur superposée à l'image aérienne de la structure (crédit photo SATIF)

Le recours au sonar latéral peut également être utile pour obtenir un relevé latéral des parties immergées des ouvrages. Toutefois l'interprétation de ces images peut être assez délicate et il est prudent de les compléter par des reconnaissances par plongeurs.

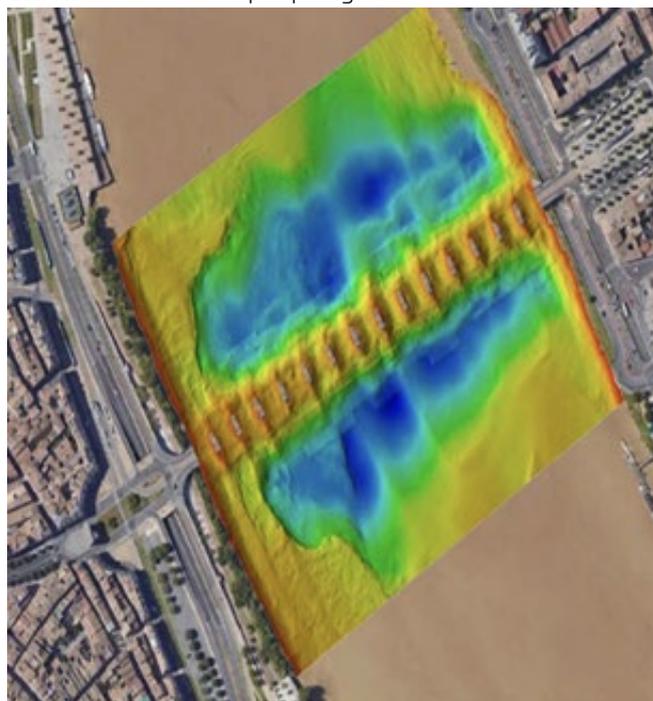


Figure 105 : Levé bathymétrique réalisé dans le cadre du projet de confortement du Pont de Pierre à Bordeaux par sondeur multifaisceaux (document d'appel d'offre public)

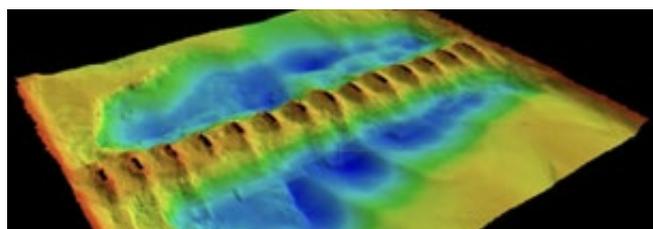


Figure 106 : Vue 3D du relevé bathymétrique réalisé par sondeur multifaisceaux dans le cadre du projet de confortement du Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)

## Inspections subaquatiques

L'intervention des plongeurs (plongeurs autonomes ou scaphandres lourds) est nécessaire, en particulier lors des inspections détaillées, pour la visite des parties constamment immergées des ouvrages.

L'intervention de plongeurs professionnels qualifiés en inspection de structure de génie civil doit permettre de présenter un diagnostic fiable sur les parties immergées d'un ouvrage.

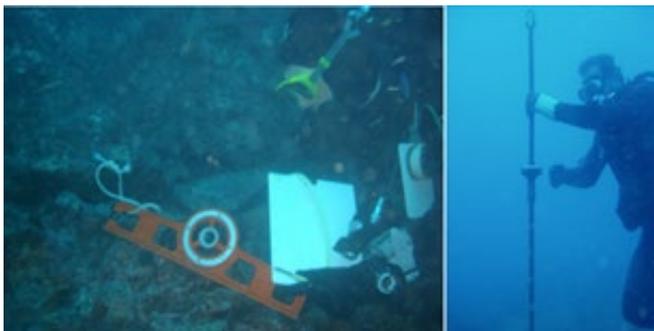


Figure 107 : Illustration d'inspection subaquatique par plongeur (photos CETE Méditerranée)

**ATTENTION :** L'intervention de plongeurs pour réaliser les inspections détaillées subaquatiques rentre dans le cadre des chantiers soumis aux dispositions du code du travail pour lesquels des travailleurs sont appelés à intervenir à une pression supérieure à la pression atmosphérique locale. Ces dispositions sont régies en particulier par l'arrêté du 14 mai 2019 qui précise les différentes méthodes et procédures utilisées par les travailleurs indépendants et les employeurs exécutant des travaux en milieu hyperbare (mention A). Il remplace l'arrêté du 30 octobre 2012, et est applicable depuis le 1er juillet 2019 :

- l'arrêté prend notamment en compte les conditions d'environnement dans lesquelles évolue le scaphandrier, quelle que soit la nature de l'activité : présence de courant, de turbidité, de confinement ;
- à ce titre, les auscultations subaquatiques d'ouvrages d'art rentrent fréquemment dans ce cadre réglementaire.
- L'arrêté de certification des entreprises de travaux hyperbares, paru le 29 septembre 2019, est applicable depuis le 1er janvier 2020.

Les travaux en milieu hyperbare ne peuvent être effectués que par des travailleurs titulaires d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie approprié à la nature des opérations et détenteurs d'un livret individuel. Ce certificat d'aptitude indique l'une des classes ou sous classes de travaux hyperbares auxquelles le travailleur a accès et mentionne l'activité qu'il est habilité à pratiquer.

Dans le cas d'emploi de matériels de mesures (épaisseur de peintures, épaisseur d'acier, etc.), les scaphandriers devront être formés et qualifiés pour leur utilisation.

Cette mission, à caractère qualitatif, est à réaliser par des scaphandriers compétents ayant suivi une formation professionnelle en inspection de structure de génie civil, dans le cadre d'une démarche qualité mise en œuvre au sein de l'entreprise.

La compétence en inspection de structures du génie civil pourra être démontrée de plusieurs manières mais il existe un CQP Scaphandrier Inspecteur (n° 020 2001 04 04 du CPNE Bâtiment et Travaux Publics).

Les inspections de fondations en site aquatique pourront être menées selon les documents de références de type Fascicule 10 de l'instruction technique « fondation en site aquatique » de 2013.

L'inspection de la surface de l'ouvrage se fait par bande dont la largeur, qui sera fonction de la visibilité, ne devra en aucun cas dépasser un mètre.

Tous les profils relevés et les observations seront repérés en plan et en niveau par rapport à des repères connus.

L'intervention fera l'objet d'un rapport indiquant :

- la nature des terrains et des matériaux observés,
- l'état de conservation des ouvrages et des éléments constitutifs,
- la position, l'importance et la cause possible des désordres décelés.

## Mise à sec des fondations

Si la mise à sec de l'appui est possible, on effectue cette opération en période de basses eaux. Il est alors possible de réaliser des relevés géométriques, d'observer un éventuel platelage en bois ou d'éventuels pieux en bois (état, diamètres et espacements à relever), d'observer les sols sous-jacents et la présence de vides ou de cavités, etc.

Ceci peut être complété par des fouilles localisées si l'observation de la nature et de l'état des fondations n'est pas possible malgré la mise au sec.

Figure 108 : Illustration d'une mise à sec de fondation d'ouvrage maçonné

## Dégarnissage localisé



La reconnaissance des appuis et fondations engage des investigations lourdes, délicates à mener et souvent destructives. L'opportunité de ces investigations et le

programme correspondant doivent être évalués avec soin. Le dégarnissage, même partiel, du système de fondation pouvant avoir des incidences sur la stabilité de celle-ci, il conviendra que cette reconnaissance soit exécutée avec le plus grand soin. Il existe une procédure de reconnaissance des appuis en maçonnerie et leurs fondations, établie par l'Université Gustave Eiffel et le CEREMA, à laquelle on pourra se référer, et aussi à la fiche C6-1 : *Ouverture de fouilles*.

Les zones dégarnies, de largeurs limitées, doivent être rapidement et très soigneusement rebouchées (procédure à établir avant le dégarnissage). Ces investigations doivent être réalisées sous surveillance de l'ouvrage et ne sont à confier qu'à des entreprises expérimentées.

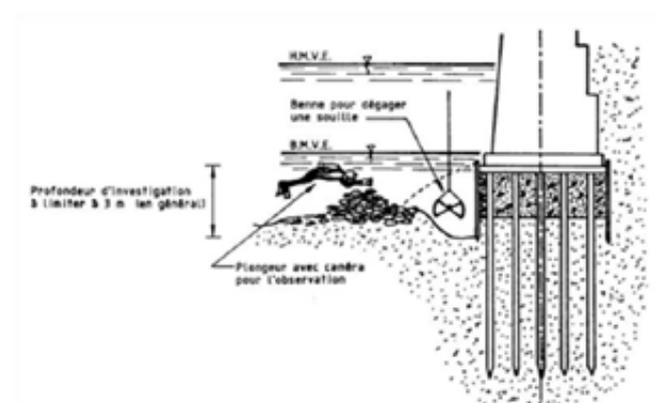


Figure 109 : Coupe schématique de principe d'un dégarnissage localisé



Figure 110 : Illustration d'un dégarnissage localisé réalisé à la pelle mécanique depuis un ponton flottant (crédit photo Romaeuf)

## 4.2.2 Les investigations d'auscultations internes

Les auscultations internes visent à obtenir les informations suivantes :

- connaissance de la constitution de la fondation et de sa géométrie,
- état et comportement des matériaux de la fondation,
- détection de cavités ou de vides dans les massifs et sous

les appuis,

- reconnaissance des sols de fondation,
- caractéristiques mécaniques des sols.

Il convient d'implanter judicieusement les sondages :

- sondages carottés ;
- essais sur échantillons de mortier,
  - analyse au microscope électronique à balayage (MEB) - Caractéristique de la microstructure - Présence de produits d'altération (ettringite, brucite, gypse),
  - analyse chimique élémentaire - Dosage des éléments constitutifs du mortier,
  - évaluation de la pénétration des chlorures, des sulfates et du magnésium - Information sur la nature du liant utilisé,
  - caractérisation minéralogique - Composition chimique élémentaire du liant ;

- essai de type Lugeon : il consiste à injecter de l'eau sous pression dans une cavité constituée d'une portion de forage de dimensions connues, et à mesurer le débit d'injection pour différents paliers de pression, pendant un temps donné ;

- suivis inclinométriques ;
- autres essais en forages :
  - caméra,
  - essai au micro moulinet (ou colorant),
  - diagraphie de forage : sonde de diagraphie nucléaire (RAN), sonde neutron-neutron (teneur en eau), sonde  $\gamma\gamma$  (poids spécifique), sonde sonique.

- essais au pressiomètre : l'essai pressiométrique est un essai de chargement statique pratiqué dans le sol en place au cours duquel on mesure l'expansion de la paroi d'un forage à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable en fonction de la pression appliquée au sol par cette sonde. Dans une certaine plage de pression, le sol a un comportement élastique : l'essai permet de mesurer deux paramètres du sol en place :  $p_l$  (pression limite),  $E_m$  (module pressiométrique) ;

- autres essais de sols :
  - essais au pénétromètre,
  - essais en laboratoire sur prélèvements de sols : Identification, cisaillement, œdométriques.

### Auscultations spécifiques des éléments bois

Le guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages, établi en septembre 2013 dans le cadre du projet Pieux Bois avec le soutien du ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, propose un protocole d'inspection.

La thèse de doctorat établie par Jérôme Christin dans le cadre de l'obtention de son diplôme de docteur de l'Université Paris-Est Système de Fondations sur Pieux

**Bois fournit aussi une approche détaillée de l'auscultation des éléments bois.**

**Enfin, on pourra aussi faire appel au laboratoire SRO de l'Université Gustave Eiffel qui étudie actuellement la dégradation des fondations sur pieux en bois en milieu aquatique.**

**Le protocole d'inspection établi dans le cadre du projet Pieux Bois indique en premier lieu une caractérisation de l'ouvrage, une reconnaissance visuelle et géométrique du système de fondation et une caractérisation géotechnique des sols, mais propose aussi une approche de caractérisation de l'état des éléments bois à proprement dits, ainsi qu'une approche d'estimation de la résistance à la compression du bois.**

**Nous ne rentrerons pas ici dans un détail très complexe et encore peu maîtrisé mais fournirons les quelques grands principes d'approche de l'auscultation des éléments bois.**

### Tests de poinçonnement à l'aiguille

Des tests de poinçonnement à l'aiguille sont réalisés avec un appareil de mesure étalonné. Cet appareil est assimilable à une aiguille Proctor, de 50 mm de longueur et 5 mm de diamètre (fabricant Profound). Le ressort situé dans l'appareil est comprimé puis relâché.

L'aiguille pénètre dans le bois lors de son relâchement et la valeur de la mesure est conservée sur l'indicateur. L'étalonnage de l'appareil de mesure doit être conforme aux exigences établies dans le rapport édité par le groupe de travail hollandais *Normalisation des tests de recherches sur les fondations*.

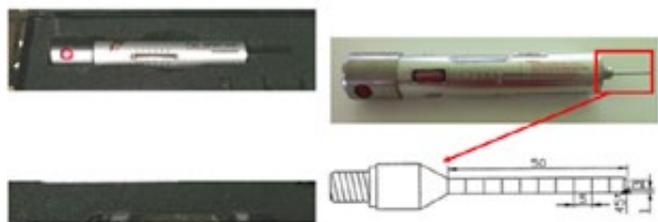


Figure 111 : Appareil de mesure assimilable à une aiguille Proctor (extrait guide d'inspection des fondations bois des ouvrages de l'IFFSTAR)

Trois mesures situées à 15 cm sous la connexion en béton sont effectuées. En cas d'incertitude sur le niveau d'eau de la nappe ou la qualité de l'eau, il est recommandé d'effectuer un test de poinçonnement à environ 15 cm sous le niveau d'eau de la nappe. Si l'opérateur réalisant l'inspection juge que la dégradation du bois est trop importante, il peut décider de réaliser des tests de poinçonnement supplémentaires. Les traverses et les longrines font l'objet d'une mesure de poinçonnement.

Si l'aiguille de l'appareil de mesure s'enfonce intégralement dans le bois, la démarche à adopter est la suivante :

- relever la profondeur de pénétration de l'aiguille X1 ;
- enlever, au droit de la mesure, le bois au ciseau sur une profondeur égale à X1 et effectuer une autre mesure. Le

résultat de la mesure est noté X2 ;

- prendre comme résultat de la mesure la somme X1+X2. La longueur de pénétration de l'aiguille dans le bois est relevée sur l'indicateur, puis reportée sur l'abaque présenté.

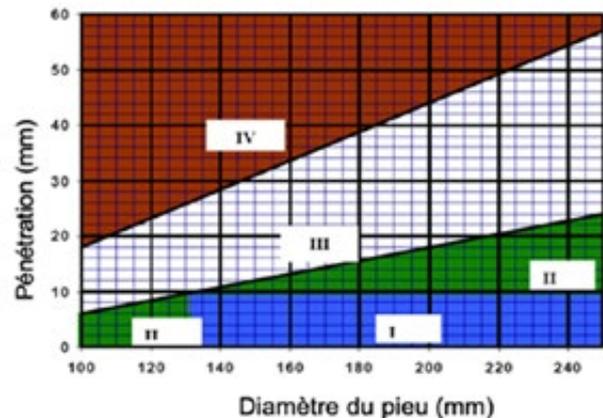


Figure 112 : Diagramme longueur de pénétration de l'aiguille en fonction du diamètre du pieu (extrait guide d'inspection des fondations bois des ouvrages de l'IFFSTAR)

**Quatre zones sont définies sur cet abaque :**

- **zone I** : le bois n'a subi aucune dégradation. Il n'est donc pas nécessaire de prélever d'échantillon dans le bois ;
- **zone II** : cette zone correspond aux pieux endommagés. La faible dégradation du bois n'a aucune influence sur la résistance du pieu (au niveau de fût). Si l'on teste simplement la résistance du bois, le prélèvement d'échantillon n'est pas nécessaire. Une interprétation peut néanmoins être effectuée sur l'origine des dommages et de la dégradation du bois ;
- **zone III** : l'enfoncement de l'aiguille dans le pieu montre que le prélèvement est nécessaire. Un carottage doit donc être effectué ;
- **zone IV** : cette zone correspond à un pieu dégradé. Sa résistance mécanique est considérée comme faible, voire insuffisante. Le prélèvement de carottes est nécessaire.

Il existe aussi un protocole d'essai Hollandais fournissant un abaque de classification de l'état du bois selon les résultats du test de poinçonnement.

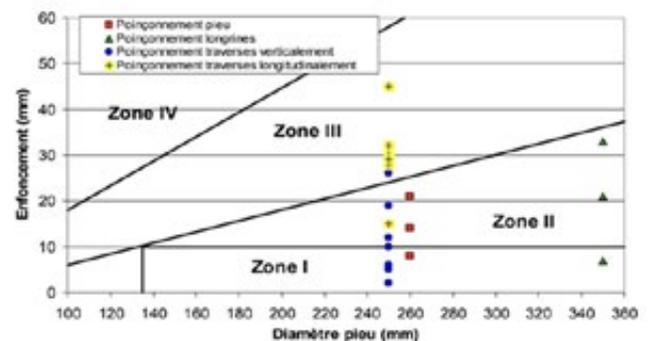


Figure 113 : Tests de poinçonnement réalisés sur un chantier test (Viaduc des cents arches à Arveyre) et placés sur l'abaque du protocole d'inspection Hollandais (extrait guide d'inspection des fondations bois des ouvrages de l'IFFSTAR)

## Prélèvement d'échantillons bois et tests en laboratoire

Le nombre d'échantillons de bois à prélever est défini par l'opérateur réalisant l'inspection et doit être représentatif de l'ensemble de la fondation.

Le prélèvement est effectué avec un carottier de diamètre intérieur 7 mm et de longueur 30 cm.

La carotte doit être prélevée à proximité du test de poinçonnement, à environ 15 cm sous la longrine et la connexion en béton. L'échantillon est immédiatement plongé dans l'eau prélevée sur le site, stocké et refroidi le plus rapidement possible (température entre 1 et 8°C).

### Tests en laboratoire :

Le laboratoire dans lequel sont envoyés les échantillons détermine les tests à réaliser en fonction des observations faites lors de l'inspection et des résultats des mesures de poinçonnement. Ces tests permettent de déterminer l'état de dégradation du pieu et la résistance à la compression du fût.

### Analyse microscopique

La section transversale de l'échantillon est découpée en fines lamelles de 20 µm d'épaisseur. La structure du bois est analysée au microscope.

### Dégradation du bois

L'état de dégradation du bois est déterminé en laboratoire à partir de tests réalisés sur les carottes prélevées.

### Estimation de la résistance à la compression du bois

La densité et la teneur en humidité du bois sont déterminées avec des échantillons de 20 mm de longueur.

La résistance à la compression du bois  $\sigma_c$  est calculée à partir de la formule suivante :

Avec H le taux d'humidité du bois et  $\rho$  la masse volumique du bois sec (kg/m<sup>3</sup>)

Le guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages,

$$\sigma_c = e^{4,43 - 0,3 \frac{H}{100} - 354,3 \frac{1}{\rho} - 0,0009 \frac{H\rho}{100}}$$

établi en septembre 2013 dans le cadre du projet *Pieux Bois* avec le soutien du ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, illustre cette approche par une application lors de l'inspection des

fondations ferroviaire du viaduc des Cent Arches.

Lorsque les pièces bois se retrouvent dans une situation pouvant engendrer le pourrissement (mise à l'air ...), mais que celles-ci ne sont pas encore affectées en termes de résistance, il peut être intéressant d'estimer la cinétique de pourrissement et donc de baisse de résistance à venir.

Ceci permet de projeter dans le temps la tenue de l'ouvrage et les travaux nécessaires.

### Estimation de la vitesse de dégradation des pieux bois en conditions d'immersion partielle

Il n'existe pas actuellement de modélisation et règles de calcul fiables et permettant d'estimer cette baisse de résistance des éléments bois dans le temps et la cinétique de dégradation des différentes essences en conditions d'immersion partielle.

Ceci fait l'objet de travaux en cours réalisés par le laboratoire SRO de l'Université Gustave Eiffel qui mène des essais de vieillissement et différentes études visant à modéliser ce vieillissement et cette perte de résistance. Les travaux étant en cours, le rapport est confidentiel et non diffusé.

En effet, dans le cadre de la classe d'emploi 4 au sens de la norme EN 335, à l'extérieur en contact avec le sol et/ou l'eau douce (ce qui ne veut absolument pas dire foncé dans le sol saturé), on dispose des visions pessimistes du fascicule FD P 20-651 et de la norme EN 252 qui aboutissent à des vitesses de diminution des diamètres des pieux suivant l'essence de bois de l'ordre de 10 mm/an et la vision plus réaliste des vitesses de diminution des diamètres des pieux suivant l'essence déterminées à partir de retour d'expérience entre 50 et 2000 ans, allant du pont romain au pont SNCF ou du réseau routier national.

# 5

## Quelles sont les solutions techniques envisageables ?

### 5.1 Généralités et principes à prendre en compte

### 5.2 Les solutions de travaux (Guide FABEM 6.3 V2)

- 5.2.1 Travaux de protection ou de confortement agissant sur le cours d'eau
- 5.2.2 Travaux de protection des appuis par des massifs ou des tapis d'enrochement
- 5.2.3 Travaux de protection des fonds de cours d'eau par des gabions
- 5.2.4 Travaux de protection des sols et comblement des cavités par des sacs de sable
- 5.2.5 Travaux de comblement des cavités par bétonnage et injection
- 5.2.6 Travaux de réfection de pieux bois endommagés
- 5.2.7 Travaux de réalisation d'un radier général
- 5.2.8 Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques
- 5.2.9 Travaux d'encagement des appuis
- 5.2.10 Travaux de confortement des fondations et massifs par injection sans déplacement des terrains
- 5.2.11 Travaux de confortement des fondations par injection avec déplacement des terrains
- 5.2.12 Travaux d'amélioration de la portance des fondations des appuis

### 5.3 Compléments aux guides FABEM 6.3 V2 et FAFO 1 V2 et retours d'expériences

- 5.3.1 Reprise en sous-œuvre par micropieux
- 5.3.2 Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques servant d'encagement des appuis
- 5.3.3 Travaux de confortement des fondations et massifs par injection sans déplacement des terrains par injection de résine polyuréthane
- 5.3.4 Cerclages des piles
- 5.3.5 Injection des maçonneries et massifs de fondation (travaux de confortement des fondations par injection sans déplacement des terrains)

## 5.1 Généralités et principes à prendre en compte

Pour rappel, l'étude du projet de confortement ne doit être engagée qu'une fois le diagnostic établi sur l'ensemble de l'ouvrage, ses fondations et sa structure dans son état actuel, mais en anticipant également l'évolution probable du cours d'eau tant en termes de profondeur du lit que de niveaux d'eau. Cette étude se fait en intégrant les charges d'exploitations actuelles et éventuellement à venir de l'ouvrage (cf. chapitre 4).

Le projet de réparation doit être élaboré selon les principes généraux suivants :

- les travaux doivent être un réel traitement de la cause des problèmes observés et non une dissimulation des désordres reconnus ou non identifiés ;
- les travaux ne doivent pas uniquement porter remède aux dégradations constatées, mais aussi se prémunir de l'évolution prévisible à long terme du cours d'eau : évolution naturelle, travaux et aménagements pouvant modifier les conditions d'écoulement, incidence du changement climatique, etc. ;
- la possibilité de l'amélioration de la situation hydraulique du moment (débouché notamment) ou à venir (prise en compte de la politique d'aménagement du cours d'eau) doit être examinée à cette occasion ;
- le projet doit tenir compte de l'ensemble des contraintes environnementales prises au sens large.

**Au-delà des travaux de réparation à réaliser le cas échéant sur la structure même de l'ouvrage, il convient d'envisager les solutions permettant d'éviter ou pallier les deux problèmes suivants\* :**

- **affouillement localisé ou généralisé des appuis induisant :**
  - une réduction de portance des appuis par diminution d'encastrement,
  - une abrasion des pieux bois,
  - une disparition des enrochements de protection le cas échéant,
  - une érosion derrière la crèche de protection le cas

**échéant,**

- un risque de déversement latéral ;
- abaissement permanent ou périodique (étiage) des niveaux d'eau induisant une mise à l'air des pieux bois et un pourrissement de ceux-ci.

---

\* Les autres causes que celles évoquées ci-dessus, susceptibles d'être à l'origine de tassements de l'ouvrage et de divers désordres, peuvent être dues à l'insuffisance d'origine. En effet, on a pu constater sur certains ouvrages :

- un sous-dimensionnement des fondations,
- une erreur de conception,
- des difficultés de mise en œuvre, battage assez profond induisant des malfaçons d'origine.

Un diagnostic sérieusement réalisé doit permettre de mettre ceci en évidence.

---

Concernant la conservation des éléments de bois des fondations, il convient de prendre en compte les principes généraux suivants :

- 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,

- 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.

*Exemple : 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).*

Quelques principes et recommandations pour éviter des déséquilibres morphologiques et conforter des ouvrages menacés :

- 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.

Inventaires 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.

**Les solutions à envisager devront être définies au cas par cas et dépendront de l'ouvrage, de son environnement, de son histoire, des aménagements existants et à venir, de l'état d'avancement de la pathologie observée. Il sera donc impératif de recourir à des bureaux d'études et entreprises spécialisées qui assureront le cheminement : investigations, diagnostic, conseil et travaux.**

*Attention : Une réparation inadaptée peut engendrer d'autres pathologies ultérieures :*

- apport de charge induisant une modification du comportement de l'ouvrage et des tassements,
- affouillements induits par les ouvrages de confortement,
- ....



**L'ensemble des familles de travaux ci-après ne sont que des pistes potentielles qui doivent être adaptées à chaque cas de figure par des bureaux d'études et entreprises spécialisées.**

Les différentes « solutions » ci-après peuvent se cumuler.

## 5.2 Les solutions de travaux (Guide FABEM 6.3 V2)

Le lecteur est invité à se référer au guide “STRRES FABEM 6.3 V2” et notamment au chapitre 2 : Réparation et/ou renforcement des fondations, qui traite en détail l’ensemble des techniques applicables. Au-delà des fonctions, avantages et inconvénients de chaque technique, le guide FABEM 6.3 V2 indique certaines modalités de calculs et de dimensionnement, les cas échéants.

Nous ne détaillerons pas les différentes techniques listées ci-après et apporterons uniquement quelques compléments dans le chapitre 5.3.

Les différents travaux envisageables dans le cadre d’un projet de réparation de fondations anciennes sont :

### 5.2.1 Travaux de protection ou de confortement agissant sur le cours d’eau

Ils visent à :

- réalimenter la rivière artificiellement ;
- amener des apports solides équivalents ;
- installer un seuil en aval de l’ouvrage bloquant à son tour le transit sédimentaire ;
- provoquer des chasses de barrages.

Ces objectifs peuvent être atteints par les travaux suivants :

- le seuil en rivière ;
- les murs guideaux disposés en amont des appuis ;
- les panneaux de fond permettant de fixer un chenal d’écoulement privilégié ;
- les digues longitudinales canalisant la rivière et empêchant sa divagation ;
- les épis de maintien d’un chenal d’écoulement ;
- la modification du tracé de la rivière par des digues et des épis pour supprimer la cause des désordres sur l’ouvrage et assurer la pérennité d’un traitement.

Ces travaux d’aménagements de type hydraulique nécessitent en tout état de cause des études hydrauliques spécifiques comportant l’examen de l’alimentation du bassin versant du secteur aménagé ou modifié, des levés bathymétriques nombreux et une analyse détaillée des lois de l’écoulement dynamique du cours d’eau dans différentes sections.

**Attention, l’ensemble de ces travaux d’aménagement hydraulique, bien qu’étant les seuls à agir sur les causes originelles des pathologies, c’est à dire l’hydraulique et les transports solides d’un cours d’eau, entre en contradiction avec la loi n°92-3 de janvier 1992 sur l’eau. Il sera donc nécessaire d’envisager de manière globale des solutions assurant à la fois la pérennité de l’ouvrage et la continuité écologique. Ce type de projet doit être mené en relation étroite avec les représentants du législateur.**

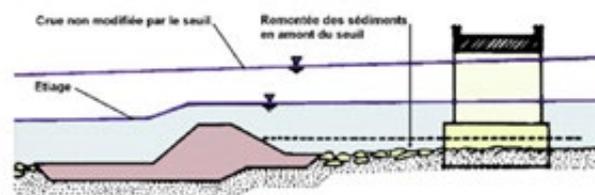


Figure 114 : Coupe schématique illustrant les conséquences et l’interaction entre un seuil transversal et un ouvrage (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2).

## 5.2.2 Travaux de protection des appuis par des massifs ou des tapis d'enrochement

Ils visent à :

- éviter les affouillements généralisés et les pertes de portance des sols mobilisés en assurant la présence d'une charge sur ceux-ci ;
- empêcher les affouillements locaux creusant des souilles par entrainement des grains, par arrachement ou érosion des matériaux des fonds en amont des appuis par les courants perturbés par l'obstacle ;
- empêcher les phénomènes d'érosion interne pénétrant sous la carapace d'entraîner les grains du sol, de former des cavités ou l'enfouissement des blocs en bordure par les vortex qui se développent à cause des écoulements perturbés sur la surface rugueuse ;
- limiter ou éviter les circulations des eaux au contact des éléments de la fondation ;
- contribuer à la tenue et à la stabilité des fondations en assurant un encastrement des massifs ou le contreventement latéral aux pieux.

Répondant à ces objectifs, les fonctions des enrochements disposés en tapis ou en talus peuvent être les suivantes :

- assurer une protection du lit au pourtour des appuis pour lutter contre les affouillements sous forme de radier ou de talus de faible hauteur ;
- réaliser un comblement des fosses et des cavités ;
- constituer une protection contre les chocs de bateaux ou les corps flottants ;
- jouer le rôle d'un écran vis-à-vis des écoulements le long des massifs ;
- constituer un massif de butée latérale aux fondations sur pieux ;
- former des seuils en travers, en aval de l'ouvrage ;
- constituer des perrés et des berges pour assurer la protection des abords.

Les protections par enrochements permettent d'éviter les affouillements des appuis mais n'empêcheront pas la mise à l'air des pièces bois.

Les enrochements peuvent être généralisés et constitués un « radier perméable » ou isolés au droit des piles de l'ouvrage.



Figure 115 : Illustrations de massifs d'enrochement de protection (Crédit photo BTPS Atlantique)



Figure 116 : Ouvrage de Luzou sur la ligne ferroviaire Luluque Tartas dans les Landes : affouillement important sous une culée fondée sur pieux bois, comblé par enrochement permettant de retenir les sédiments sableux et recombler naturellement l'affouillement (Crédit photo BTPS Atlantique)

### Avantages :

- matériau naturel d'impact environnemental très réduit,
- création d'habitats naturels pour la faune aquatique,
- retenue des sédiments.

### Inconvénients :

- les enrochements, de par leur perméabilité, n'évitent pas la mise à l'air des têtes de pieux bois en cas de niveaux d'étiage très bas,
- pour des piles dans le cours d'eau, les massifs d'enrochement engendrent des perturbations hydrauliques à prendre en compte vis-à-vis d'effets d'affouillement éventuels induits.

## 5.2.3 Travaux de protection des fonds de cours d'eau par des gabions

Les travaux de protection par des gabions sont du même ordre que ceux réalisés par enrochement. Les gabions présentent l'avantage par rapport aux enrochements de pouvoir être mieux agencés, présenter moins de vides et de pouvoir être liaisonnés entre eux.

Ceci rend les protections par gabions moins mobiles en cas de crues par exemple.

Il s'agit d'un produit industriel, préfabriqué sur le site ou à proximité et présentant des garanties d'exécution que l'on sait maîtriser. C'est une structure lourde résistant par sa masse et restant perméable, dont la blocométrie des blocs est adaptée à l'épaisseur des gabions, ce qui permet de mettre en œuvre des cailloux présentant peu de vides entre eux.

L'intérêt est de pouvoir réaliser des liaisons entre les éléments, de monter des murs de soutènement ou de protection, de concevoir des tapis minces et continus recouvrant le sol au pourtour et adaptés à la topographie des fonds du lit du fait de leur possibilité de suivre les déformations du support.



Figure 117 : Illustration d'un tapis de gabions (photo CETE Nord Picardie)

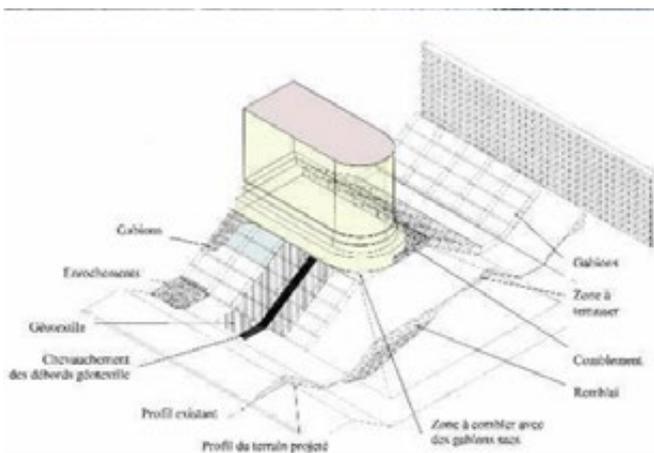


Figure 118 : Schémas de principes et d'exemple d'utilisation de gabions immergés en protection d'ouvrage (extrait guide STRES FABEM 6.3 V2)

#### Avantages :

- matériau naturel d'impact environnemental très réduit,
- création d'habitats naturels pour la faune aquatique (moins que dans les cas d'enrochements),

- plus stables que les enrochements et présentant moins de vides,
- engendrant moins de perturbations hydrauliques que les enrochements
- retenue de sédiments.

#### Inconvénients :

- les enrochements, de par leur perméabilité, n'évitent pas la mise à l'air des têtes de pieux bois en cas de niveaux d'étiage très bas,
- impossibilité de mise en œuvre pour combler une cavité / un affouillement sous-jacent à la pile par exemple.

### 5.2.4 Travaux de protection des sols et comblement des cavités par des sacs de sable

Cette technique est généralement utilisée dans des travaux d'urgence ou provisoires. Ils permettent de combler des cavités sans nécessiter la mise en place de coffrages latéraux ou de réaliser une protection des fonds au pourtour d'un appui affouillé.

L'intérêt de leur utilisation est, soit de conserver une possibilité d'un démontage aisé lors de travaux de confortement plus conséquents en ne les conservant pas, soit de les garder en place dans le cadre d'un confortement définitif de appuis.

Lorsqu'ils sont conservés définitivement et complétés par des injections, ils permettent de limiter les quantités de produits injectés.

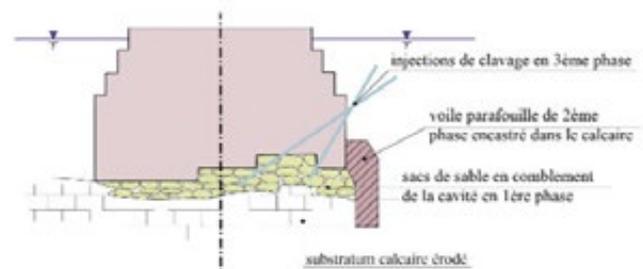


Figure 119 : Coupe de principe du confortement du pont Henri IV du XVI<sup>e</sup> siècle à Châtellerault sur la Vienne.

### 5.2.5 Travaux de comblement des cavités par bétonnage et injection

Les cavités peuvent présenter diverses origines :

- affouillement sous la pile et circulation d'eau au sein de la pile,
- dissolution des mortiers de chaux,
- érosion et abrasion des sols et roches.

Selon l'origine et l'ampleur des cavités, mettant directement en cause la stabilité des appuis, les travaux de comblement ou de restauration seront différents.

On distingue :

- le traitement des cavités largement ouvertes au pourtour du massif,
- le comblement de cavités étroites débouchant en périphérie,
- le comblement de cavités internes non accessibles directement,
- le comblement de lacunes sous les fondations superficielles.

Dans les 2 premiers cas, on procédera à une première phase de coffrage et bétonnage qui sera complétée par une phase d'injection grâce à des tubes de petit diamètre permettant de combler les vides résiduels après bétonnage.

Dans le 3ème cas, on procédera directement au comblement par injection après mise en place de tube d'injection par forage.

Dans le dernier cas, une attention particulière sera apportée à la stabilité de l'appui durant la phase de travaux.

Le lecteur est invité à se reporter au guide FABEM 6.3 V2 du STRRES.

## 5.2.6 Travaux de réfection de pieux bois endommagés

Bien que ces travaux soient délicats compte tenu du manque d'accessibilité à ces parties d'ouvrages et que peu pratiqués, la méthodologie de principe est la suivante.

Ces travaux sont exécutés sous l'eau par des scaphandriers après dégagement des alluvions à la lance à eau sous pression.

Une fois la partie supérieure altérée recépée (les parties dégradées doivent être éliminées totalement), le contact avec le platelage doit être rétabli par un remplissage d'un mortier de ciment injecté dans un forage télescopique.

En général, l'altération des têtes de pieux n'étant pas le seul désordre existant, il faut, en particulier, procéder au maintien des pieux par frettage latéral dans des enrochements à blocométrie continue et adaptée.

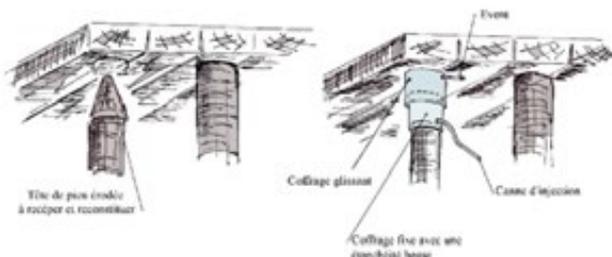


Figure 120 : Illustration de réparation d'une tête de pieu en bois sous un platelage (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)

## 5.2.7 Travaux de réalisation d'un radier général

Le radier, tout autour des différents appuis, consiste à recouvrir le fond du lit du cours d'eau d'un tapis non-érodable généralement conçu sous forme d'une dalle en béton armé continue pour les ouvrages de portée modeste. Le radier peut également être constitué de blocs d'enrochements judicieusement dimensionnés ou de gabions plats disposés selon un pavage continu, ou encore de dalles en béton armé articulées sur un filtre géotextile.

Cette technique de protection des fonds est ancienne, mais elle était peu employée. Elle était mise en œuvre avec l'aide d'une charpente bois formant des casiers qui étaient remplis d'enrochements ou de béton de chaux. Le radier ancien était parfois en maçonnerie de moellons de faible épaisseur, constituant alors un véritable pavage, mais sans débord, ni en amont, ni en aval. Il n'était pas toujours muni de rideaux parafouille amont et aval. Parfois, l'ouvrage était fondé directement sur le radier en maçonnerie établi en contre-voûte, ce dernier constituant l'élément porteur de fondation de l'appui.

Sur certains ouvrages, ce radier avait également un rôle de buton entre les appuis pour éviter le basculement des culées soumises à la poussée des terres des remblais d'accès établis sur sols compressibles. Dans ce cas, le radier buton, comme la contre-voûte, participe largement à la tenue de l'encastrement des fondations et à leur stabilité.

### Avantages :

- peu de perturbations hydrauliques et bon écoulement des eaux,
- pas de battage de palplanche sous les voûtes avec limitation de la hauteur de travail,
- protection très efficace des appuis.

### Inconvénients :

- le radier doit être mis en œuvre suffisamment bas pour laisser libre la circulation des sédiments et ne pas être affouillé.

## 5.2.8 Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques

Cette technique est fréquemment utilisée afin de servir :

- de coffrage ;
- de protection des sols de fondations contre l'affouillement (para fouilles verticales) ;
- d'enceinte étanche, par exemple pour la réalisation de rideaux d'engagement destinés à limiter la zone de sol à traiter par injection ;
- de batardeau, provisoire pour la mise à sec avant travaux d'un appui ou d'un ensemble d'appuis, ou le plus

souvent intégré au dispositif de protection de la fondation;

- d'élément porteur, à titre provisoire ou définitif, par des caissons de palplanches soudées, mais dont l'emploi est assez exceptionnel dans le cadre des travaux confortatifs.



Figure 121 : Illustration d'encagement des appuis par rideaux de palplanches (crédit photo JP Levillain)

## 5.2.9 Travaux d'encagement des appuis

L'encagement au pourtour d'un appui consiste à réaliser un écran étanche évitant les circulations d'eau au sein des matériaux constitutifs de la fondation (massif de béton de chaux) et sous les fondations superficielles. Ils peuvent également être envisagés pour se substituer aux rideaux de vannage en bois ayant servi de coffrage au béton de chaux enserrant les pieux pour assurer leur protection.

L'encagement peut être réalisé grâce à un rideau de palplanches servant de coffrage avant bétonnage et injection, mais peut aussi être réalisé par coffrage traditionnel.

**ATTENTION : Les encagements réalisés par coffrage traditionnels ne permettent pas d'assurer un ancrage important et peuvent être sujet à des affouillements ultérieurs (cf. chapitre 5.3.2). De plus, ils nécessitent une mise à sec préalable. De ce fait, il est souvent privilégié un rideau de palplanches permettant d'assurer un encastrement et de confiner la partie à bétonner sans nécessité de travaux de batardeau et de mise au sec.**

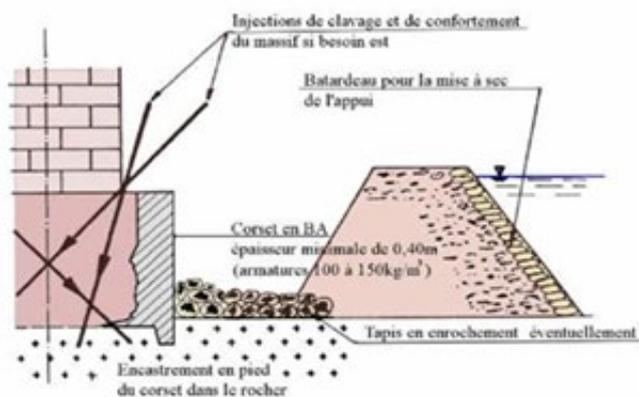


Figure 122 : Coupe de principe d'un encagement réalisé par coffrage traditionnel (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)

## 5.2.10 Travaux de confortement des fondations et massifs par injection sans déplacement des terrains

La technique de traitement des sols et des massifs de fondation par une injection sous forme d'incorporation d'un liant a pour objet d'améliorer les propriétés mécaniques des matériaux traités, sans agression, sous forme de déplacement de serrage.

Le guide STRRES FAFO 1 V2 Réparation et renforcement des fondations, présente les différentes méthodes d'amélioration ou de renforcement des sols de fondation par injection et le guide FABEM 6.3 V2 détaille aussi les différentes méthodes.

Les objectifs des travaux d'injection sont les suivants :

- injection de protection ou d'étanchement : l'injection de protection consiste essentiellement en la confection d'un rideau d'encagement permettant de délimiter convenablement le volume du traitement. En revanche, une injection d'étanchement correspond à l'exécution d'un écran contre les circulations d'eau. L'injection de protection peut venir selon les cas se substituer à un rideau de palplanches ;
- injection de remplissage ou de bourrage : l'injection de remplissage concerne le comblement de cavités ou de vides importants mettant en péril une fondation. Cela impose donc au préalable la réalisation d'un coffrage pouvant contenir les matériaux d'injection mis en œuvre gravitairement ou sous une très faible pression ;
- injection de collage, de serrage, de compactage ou de clavage : une telle injection a pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques de contact (collage) ou de volume d'un matériau donné en recherchant à densifier le matériau ou à combler de petits vides subsistant après certaines phases de travaux ;
- injection de consolidation ou de renforcement : ce type d'injection consiste à augmenter les caractéristiques mécaniques d'un matériau en remplissant les vides intergranulaires par imprégnation ou par intrusion d'un coulis approprié ;
- injection de scellement : cette injection correspond à une solidarisation soignée d'une armature métallique ou composite avec un matériau donné permettant la mobilisation d'une réaction déterminée ;
- injection de régénération : il s'agit de rendre à un matériau altéré, par exemple un mortier de hourdage, ses caractéristiques initiales.

## 5.2.11 Travaux de confortement des fondations par injection avec déplacement des terrains

Le principe de l'injection avec déplacement des sols est décrit dans le guide STRRES FAFO 1 V2 Réparation et au

### *renforcement des fondations.*

Pour des ouvrages établis sur fondations superficielles ou sur pieux en bois flottants et dont les sols de fondation présentent des caractéristiques mécaniques de faible valeur, la technique d'injection solide ou d'incorporation de mortier par compactage statique horizontal permet d'améliorer la stabilité vis-à-vis du poinçonnement et d'éviter des tassements absolus ou différentiels.

Cette technologie serait, théoriquement, applicable à des fondations sur pieux en bois, mais elle n'y a jamais été appliquée. En effet, la difficulté provient, dans ce cas, de réaliser suffisamment de forages verticaux situés entre les pieux pour traiter les sols sous la pointe des pieux

## **5.2.12 Travaux d'amélioration de la portance des fondations des appuis**

L'amélioration de la portance des fondations des appuis peut être recherchée :

- suite à une perte de portance des fondations induites par l'évolution de leur environnement,
- suite à une augmentation significative des charges (élargissement d'ouvrage et augmentation des charges d'exploitation par rapport à l'époque de conception).

L'amélioration de la portance des fondations peut être obtenues de différentes manières et par le biais de travaux très différents :

- réduire les charges appliquées au sol (travaux d'élégissement) ;
- reporter les charges en profondeur :
  - des colonnes de « jet-grouting » réalisées sous le niveau d'appui de la fondation,
  - des pieux réalisés au pourtour des appuis sous hauteur réduite,
  - des micropieux forés et ancrés en profondeur situés à l'extérieur de l'ouvrage ou à travers la pile et l'ancien massif de fondation ;
- améliorer les caractéristiques mécaniques des sols :
  - l'injection des sols sous faible pression et faible débit,
  - l'incorporation de mortier sec sous pression (compactage statique horizontal ou injection solide);
- améliorer la répartition des pressions sur le sol sous la fondation :
  - le radier général avec un corsetage au pourtour des appuis. Dans ce cas, le radier devient partiellement porteur,
  - le simple voile disposé au pourtour des appuis, formant para fouille et encagement des sols,
  - des barres scellées par injection dans le sol au pourtour et sous la fondation,
  - l'augmentation de l'encastrement de la

fondation.

- la modification de la fondation superficielle en fondation de type mixte au moyen de picots.

## 5.3 Compléments aux guides FABEM 6.3 V2 et FAFO 1 V2 et retours d'expériences

### 5.3.1 Reprise en sous-œuvre par micropieux

Lorsque l'on souhaite améliorer la portance des fondations des appuis, les reprises en sous-œuvre par micropieux sont une technique devenue courante car sa mise en œuvre ne nécessite que des ateliers de taille modeste permettant d'intervenir dans un espace réduit.

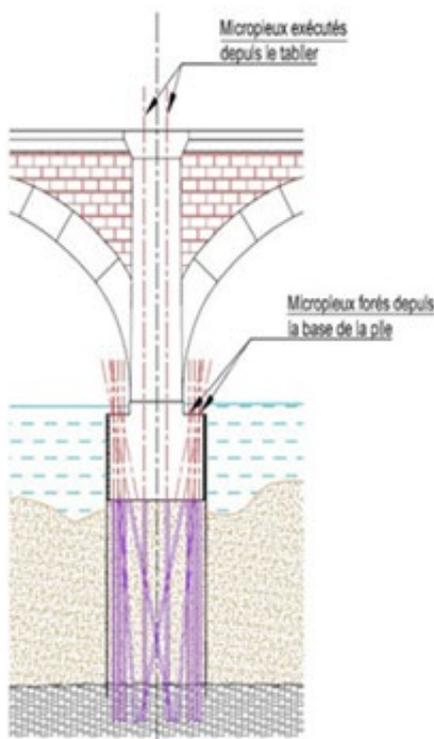


Figure 123 :  
Illustration de  
2 méthodes de  
mise en œuvre :  
Depuis le tablier  
ou depuis la base  
des piles.

**Attention :** Cette solution est plus complexe qu'elle n'y paraît.

La solution micropieux en renforcement des fondations des ponts en maçonnerie est souvent préconisée par facilité lors d'un diagnostic trop superficiel sur les sols et par manque de réflexion.

En effet, sans procéder à une analyse précise du comportement de l'ouvrage, le géotechnicien conclut dans la plupart des cas à un nécessaire renforcement

des fondations. Il préconise généralement une reprise en sous-œuvre par micropieux reprenant la charge totale exercée par l'appui. La fondation neuve envisagée vient en substitution de la fondation existante alors que celle-ci assurait la tenue de l'ouvrage depuis 150 ans environ.

L'étude et l'approche à envisager est bien plus complexe.

**Comportement d'une fondation :** Quand une charge est exercée sur un sol, celui-ci se déforme, la fondation tasse. Le schéma classique de la déformation du sol sous une charge est représenté figure 124. Jusqu'à la valeur de la charge de fluage  $Q_f$ , les déformations représentées par l'enfoncement «s» sont proportionnelles à la charge exercée. Le domaine des déformations est de type élastique. Au-delà de la valeur de fluage, le tassement s'amplifie et des ruptures locales peuvent se produire au sein du sol avec des zones de glissement interne limitées. Le domaine de sécurité des fondations est le domaine élastique pour que les tassements restent dans des valeurs acceptables pour la structure de l'ouvrage. La charge appliquée doit donc rester inférieure à la charge de fluage du sol pour la fondation considérée.

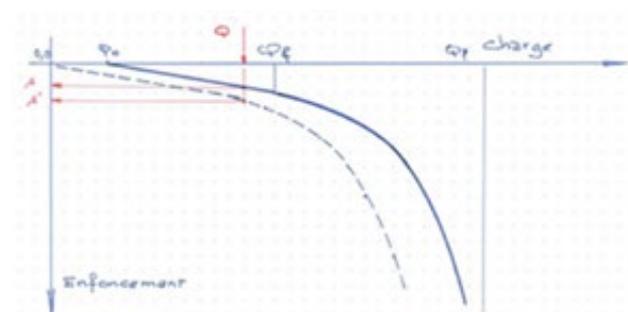


Figure 124 : Courbe de chargement de la fondation par micropieux

Il peut être difficile de situer la charge de fluage des sols à partir des essais pressiométriques en place, surtout si leur exécution ne respecte pas un savoir-faire minimum et une stricte application des techniques recommandées par la norme. Par cohérence avec le fait que l'ouvrage est en place depuis 150 ans et qu'il assure sa fonction sociale, force est de considérer que, à minima, la charge de fluage

du sol serait de l'ordre de grandeur de la charge exercée par les appuis de l'ouvrage.

L'origine des désordres provoquant des tassements en fondation est à rechercher dans des phénomènes d'érosion par entraînement des sols, par réduction de l'encastrement de la fondation, par érosion interne avec affaiblissement des propriétés mécaniques et la dégradation des matériaux.

Correspondant à une perte d'encastrement de la fondation, la courbe de chargement serait du type de la courbe en tireté de la figure 124 ci-dessus et l'enfoncement serait «s». Des tassements faibles mais significatifs se produisent. Pour étudier correctement les sols de fondation, il faut tenir compte du comportement structurel de l'ouvrage et en particulier analyser et rechercher dans l'observation de la structure l'origine des anomalies en relation avec la déformation des sols. Une évolution significative des charges de l'ouvrage conduit à une amplitude faible des tassements que l'on peut situer en général à quelques millimètres comme on l'observe sur la figure 124 ci-dessus.

**La recherche de l'amélioration de la sécurité vis-à-vis de la portance des sols doit se traduire par une réduction du risque de tassement potentiel des sols.**

**Orientations vers une réduction des risques de tassement des sols :**

**La question posée à l'ingénieur n'est pas de justifier la reprise de la charge par le sol mais surtout de déterminer comment limiter les risques des tassements aux valeurs admissibles par la structure.**

Il est ainsi conduit à rechercher comment améliorer les propriétés mécaniques des sols de fondation pour augmenter leur compacité et réduire leur compressibilité. Les techniques de renforcement des sols de fondation sont donc à rechercher en fonction des objectifs à atteindre et de la nature des sols.

Les types de travaux possibles sont très diversifiés. Les techniques classiques comme l'injection maîtrisée des sols permettent de densifier le terrain. La construction de corset périphérique et para fouille de confinement des massifs de béton de chaux permet de combler des cavités, de renforcer la base des appuis et d'augmenter la surface portante tout en réduisant les pressions appliquées sur le sol. La conception d'un radier général muni de para fouille amont et aval protège le lit et les fondations contre les érosions internes et améliore la tenue des appuis.

L'orientation vers un transfert partiel des charges appliquées sur une fondation additionnelle impose que la fondation existante tasse pour assurer ce transfert. La fondation additionnelle doit tasser pour mobiliser le sol en place et devenir porteur. Les tassements des deux fondations doivent devenir identiques. La reprise en sous-œuvre de la totalité de la charge appliquée par un appui est infondée. Le besoin n'est pas de reprendre la totalité de la

charge de l'appui mais seulement de réduire ou supprimer les tassements potentiels à venir.

**A cet égard, la technique souvent proposée et appliquée de la mise en œuvre des micropieux reprenant la totalité de la charge est inconséquente et superfétatoire.**

**Comportement des micropieux.**

La technique des micropieux est devenue un classique de la reprise en sous-œuvre par la facilité apparente d'exécution. Le micropieu est dimensionné en fonction de sa charge nominale, des conditions géotechniques, des difficultés d'accès aux machines et à partir d'autres critères. Ces micropieux de faible diamètre reprennent les charges appliquées par frottement latéral sur leur surface périmétrale. Ils présentent des raccourcissements nécessaires pour mobiliser les charges appliquées comme le montre la courbe de charge de la figure 125 ci-dessous.

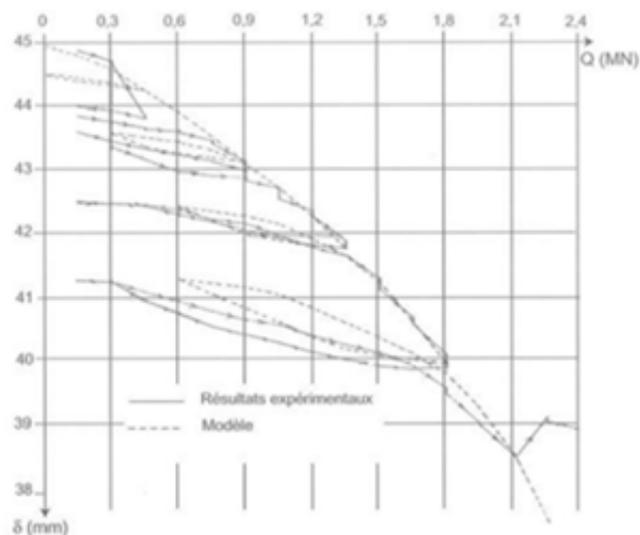


Figure 125 : Exemple de courbe de chargement d'un micropieu, page 90 de FOREVER 2004

Sous la charge nominale du micropieu, la valeur de raccourcissement est à apprécier à chaque cas en fonction de la nature du micropieu, de sa longueur et de son environnement géotechnique. Ainsi, pour un ouvrage qui tasse, l'ajout de quelques micropieux est envisageable pour réduire ou annuler des tassements permanents et ramener la charge sur le sol à une valeur inférieure à la charge de fluage. Leur liaison à l'ouvrage en maçonnerie ne doit pas modifier la géométrie de la base de l'appui, ni augmenter les charges par l'ajout d'un large corset par exemple, ni provoquer du cisaillement interne à la maçonnerie de l'appui.

**Application de la technique des micropieux au renforcement des fondations des ponts en maçonnerie.**

L'objectif du renforcement des fondations est donc de limiter les tassements potentiels et/ou de reprendre si

besoin des charges supplémentaires. En fonction du type de fondation on peut retenir les dispositions suivantes :

- fondation superficielle directe ou sur inclusions ou fondation mixte : la solution micropieux est généralement inadaptée. Sans tassement possible des fondations existantes, il ne peut y avoir report des charges,
- fondation sur pieux flottants : solution envisageable pour un ouvrage qui tasse et lorsque les tassements à venir restent admissibles par la structure,
- fondations sur pieux bois fichés au rocher : solution inappropriée car il ne peut y avoir transfert des charges sans le tassement des fondations existantes.

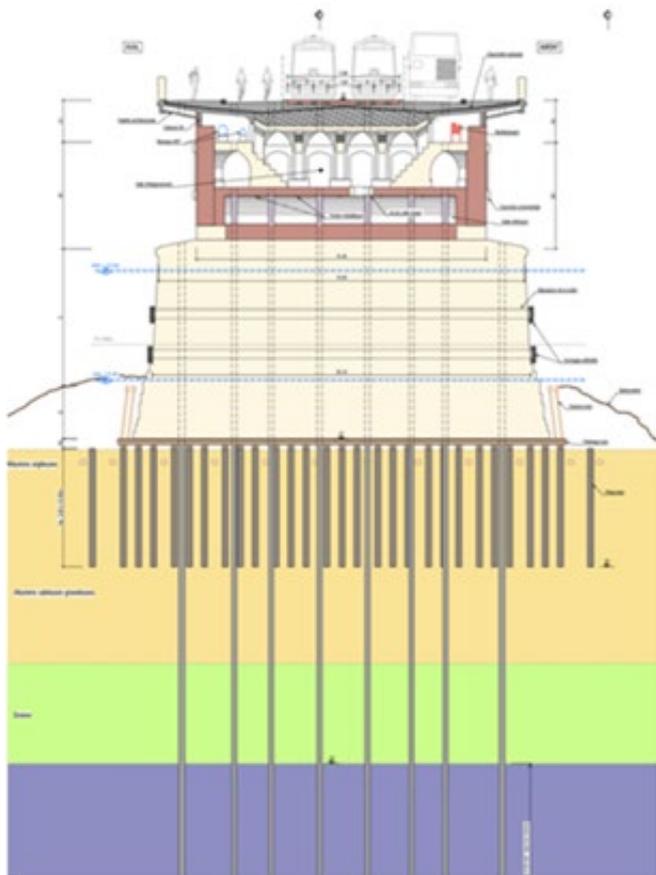


Figure 126 : Illustration du renforcement par micropieux du Pont de Pierre à Bordeaux : micropieux à réaliser depuis le tablier au travers des maçonneries, scellés sur toute la hauteur des maçonnerie et ancrés dans les marnes au-delà des couches alluvionnaires (document d'appel d'offre public)

On notera sur la figure 126 ci-dessus, illustrant le projet de confortement du Pont de Pierre à Bordeaux, ouvrage classé et complexe, la nécessité d'associer à la mise en œuvre des micropieux :

- le cerclage des piles,
- la mise en œuvre de tirants métalliques d'enserrement au niveau du tablier maçonné mais creux,

le tout permettant d'apporter la rigidité nécessaire à la reprise des efforts durant la mise en œuvre et induits à terme dans les maçonneries par ce nouveau système de fondations.

### 5.3.2 Travaux de confortement des fondations à l'aide de palplanches métalliques servant d'encagement des appuis

L'encagement d'un appui consiste à ceinturer celui-ci par un rideau étanche (le plus souvent en palplanches) de façon à supprimer les circulations d'eau dans les maçonneries et le sol de fondation.



Figure 127 : Réalisation de battage de palplanches

Lorsque la stabilité des ouvrages est précaire, il est nécessaire de procéder à un confortement des fondations (comblement des cavités, notamment) avant de fonder des palplanches à proximité immédiate de l'ouvrage.

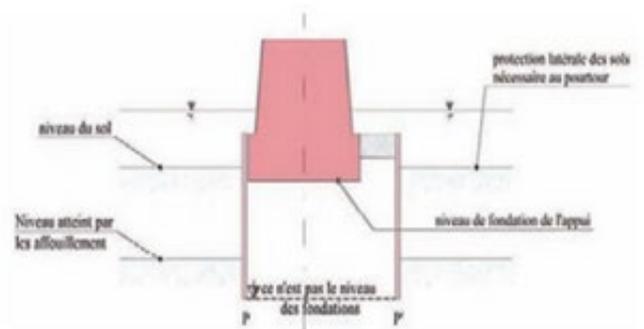


Figure 128 : Coupe de principe d'un encagement par rideau de palplanches (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)

Les encagements réalisés grâce à des palplanches permettent d'assurer un ancrage sous les niveaux d'affouillement potentiel. En revanche, ils doivent être dimensionnés pour reprendre les efforts de poussée induit par la descente de charges de l'ouvrage, et ceci en cas d'abaissement du lit.

Ces encagements, s'ils sont surdimensionnés, peuvent perturber les circulations hydrauliques et engendrer

des phénomènes d'affouillement. Ceci a notamment été constaté lorsqu'ils présentent des dimensions et emprises trop importantes.

Fort de ce retour d'expérience, les encagements doivent être conçus et mis en œuvre avec les emprises les plus réduites possibles et un ancrage suffisant.



Figure 129 : Illustration d'encagement réalisé en coffrage traditionnel, insuffisamment ancré et d'emprise importante ayant engendré des affouillements.

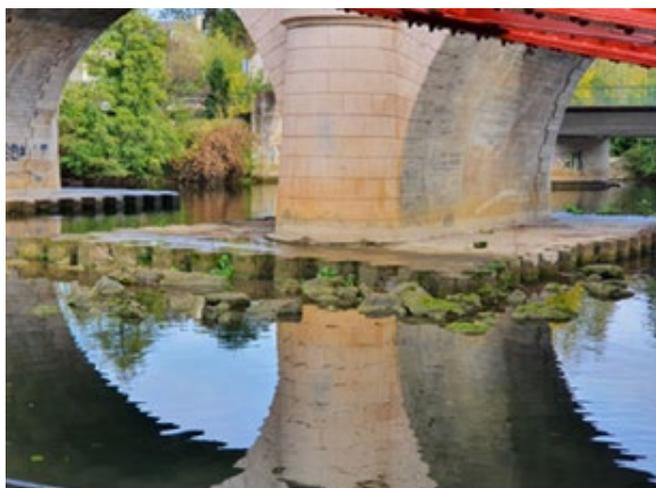


Figure 130 : Illustration d'encagements réalisés grâce à un rideau de palplanches correctement ancré mais de forte emprise ayant des incidences sur les circulations hydrauliques (crédit photo Romoeuf)



Figure 131 : Illustrations d'encagements correctement ancrés grâce à un rideau de palplanches et réalisés avec des emprises réduites limitant ainsi les perturbations hydrauliques (crédit photos Romoeuf)

### 5.3.3 Travaux de confortement des fondations et massifs par injection sans déplacement des terrains par injection de résine polyuréthane

En complément du guide FABEM 6.3 V2 qui traite des techniques d'injection :

- de coulis de ciment,
- de bentonite,
- de mélange argile - ciment,
- de lignochrome,
- d'émulsion de bitume,
- de gel de silice,
- de résine acrylamides et phénoliques,

on peut aujourd'hui ajouter les injections de résine polyuréthane qui permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols et donc d'améliorer la portance sous fondation.

L'injection de résine polyuréthane est une méthode utilisée pour renforcer les fondations, notamment sous

des structures telles que des piles de pont sur pieux bois. Cette résine est hydrophobe, polymérise rapidement, même en milieu aquatique et ne génère pas de surcharge en raison de sa faible densité. Elle est imperméable, inerte après polymérisation et présente un faible impact environnemental, étant non biodégradable, et n'émettant aucune substance nuisible dans le milieu naturel. La mise en œuvre de cette résine se fait par injection dans le sol via des perforations de petit diamètre (<32 mm) à l'aide de tubes d'acier, en fonction des caractéristiques géotechniques du site et du dimensionnement associé aux objectifs fixés. Après l'injection, l'amélioration des propriétés du sol est vérifiée.

Les principaux avantages de cette technique sont son efficacité immédiate, le contrôle du temps de polymérisation, ce qui permet une utilisation même en présence d'eau souterraine. Toutefois, son emploi est généralement limité à une profondeur maximum de 15 mètres.

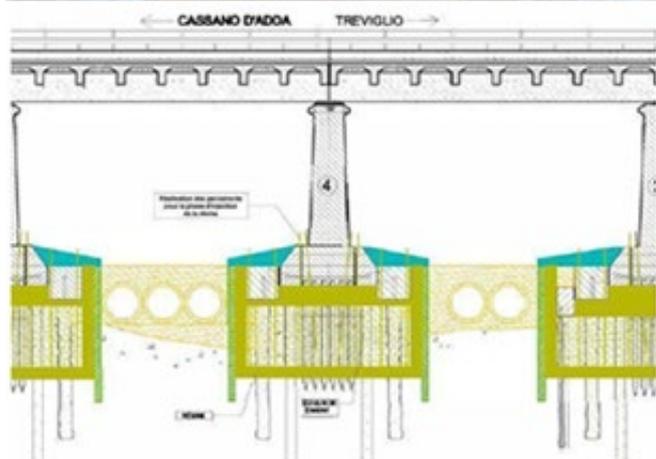


Figure 132 : Illustrations d'une injection de résine polyuréthane sous pile de pont fondée sur pieux bois en 2014 (crédit photo URETEK)



Figure 133 : Illustration d'un carottage sur système de fondation en bois injecté par résine à Venise en 2004 (crédit photo URETEK)

### 5.3.4 Cerclages des piles

Comme déjà évoqué, les ouvrages anciens maçonnés ne présentent que peu de rigidité. Ceci leur confère une certaine souplesse permettant d'accepter certaines déformations. Cependant, il peut être nécessaire d'augmenter la rigidité de ces ouvrages et particulièrement dans le cadre de travaux de confortement des fondations.

Au-delà des tirants d'enserrement entre tympans, une technique permettant d'apporter de la rigidité à l'ouvrage au niveau des piles est le cerclage de celles-ci.

Ce cerclage peut être passif ou actif (précontraint).

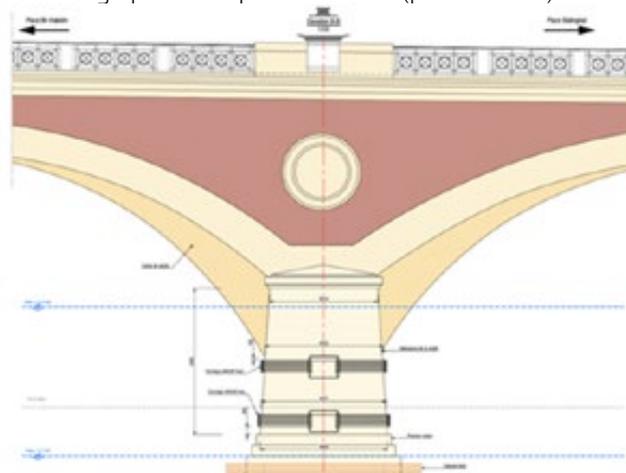


Figure 134 : Exemple de projet de cerclage de piles : Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)

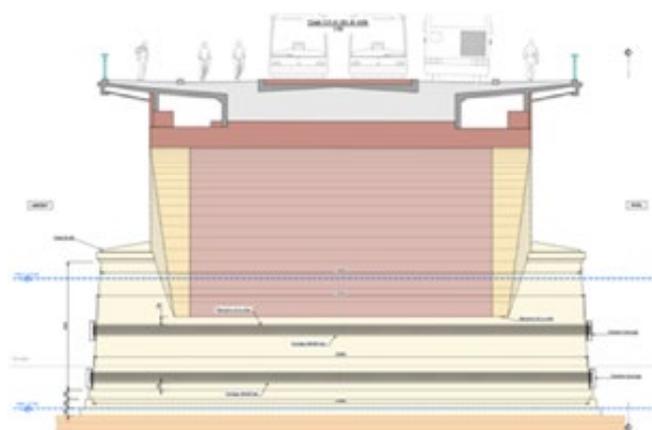


Figure 135 : Exemple de projet de cerclage de piles : Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)

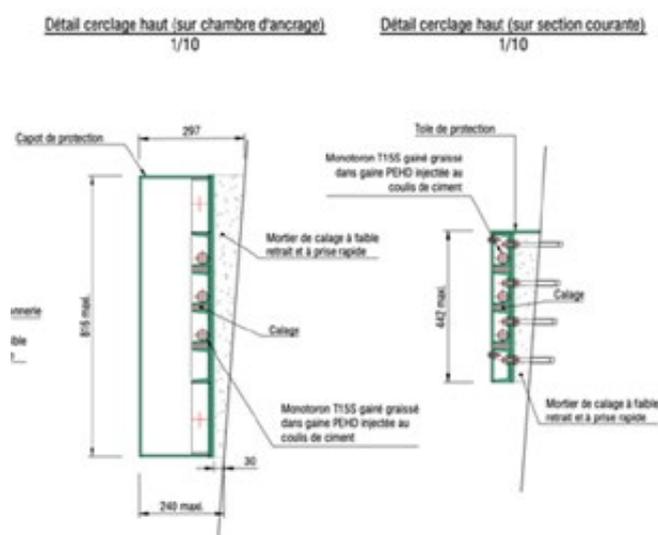


Figure 136 : Exemple de projet de cerclage de piles : Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)

### 5.3.5 Injection des maçonneries et massifs de fondation (travaux de confortement des fondations par injection sans déplacement des terrains)

En complément des STRRES FABEM 6.1 - V2, FABM 6.2 V2, FABEM 6.3 V2 et FABEM 6.4 V2, de manière générale, les exigences à prendre en compte pour procéder à des injections des maçonneries et massifs de fondations, exigences régulièrement retranscrites dans les CCTP, sont les suivantes :

- Les produits d'injection utilisés devront posséder les qualités suivantes :
  - Une facilité d'injection quel que soit le type de coulis ;
  - Un faible retrait et une faible décantation ;
  - Une bonne injectabilité sous faible pression pour éviter les désordres dans la maçonnerie ;
  - Une stabilité de leurs caractéristiques dans le temps après injection.
- Résistance à la compression à 28 jours (NF P 18-360) comprise entre 1,5 et 15 MPa
- Nombreuses contraintes d'accès aux zones de travaux sur les ouvrages.

### Les injections de coulis de ciment ou de chaux

Parmi l'ensemble des techniques et variantes d'injection énumérées dans les guides précités, le traitement par injection de coulis de bentonite/ciment est le plus utilisé dans les massifs sous pile en milieu aquatique, afin :

- de régénérer la maçonnerie et le béton de chaux ancien, délavé et/ou fracturé, de la fondation,
- d'ancrer le massif dans le substratum pouvant être sableux ou argileux, tout en améliorant les caractéristiques

mécaniques de cet horizon, altéré en sous face de fondation.

Ces traitements sont réalisés par une campagne de forages ceinturant l'appui selon différentes lignes. Une ligne extérieure, dite ligne de ceinturage ou mise en cage, et une à plusieurs lignes intérieures, dites d'injection à cœur.

Bien souvent, les forages de petits diamètres (80 à 100 mm) sont équipés de tubes à manchettes plastiques ou métalliques scellés dans un coulis de gaine présentant de faibles caractéristiques mécaniques. Ces tubes à manchettes sont composés d'un tube de diamètre 40mm, équipés de manchettes caoutchouc tous les 33cm (soient 3 manchettes par mètre). Les C/E de coulis, coulis de gaine et coulis de traitement, seront confirmés lors des essais de convenance avant le traitement.

De 12 à 24 heures après le scellement du tube manchette dans son coulis de gaine, il est procédé au traitement par injection. Il s'agit de réaliser l'injection du coulis bentonite/ciment à chaque niveau de manchette, en procédant au «claquage» du coulis de gaine, avec un obturateur simple ou double en une passe remontante du pied de forage vers la tête. Pour chaque injection de manchette, les critères de pression, débit et volume sont paramétrés et contrôlés, afin de respecter les critères définis au cahier des charges.

Pour le massif de fondation en béton à la chaux en milieu aquatique, une pression inférieure à 0,8 MPa et un débit inférieur à 400 l/h sont recommandés. Le volume de coulis à répartir régulièrement entre les manchettes est limité à 240 litres par mètre linéaire de tube. Toutefois, en cas d'atteinte de la pression «en refus» de 0,5 MPa ou de résurgences, le traitement de la partie de forage concernée sera arrêté.

Dans le cas où les critères de pression ne sont pas atteints à la première passe, une seconde passe peut être réalisée 24 heures après afin de s'approcher de la saturation du terrain.



Figure 137 : Illustration de forage oblique d'une pile (crédit photo SAS Romaeuf)

**Attention dans le cas de maçonnerie à la chaux, l'utilisation de ciment est à proscrire. Il convient d'utiliser des coulis de chaux ou des ciments surmoulus (type SPINOR) afin d'éviter toute incompatibilité de PH notamment.**

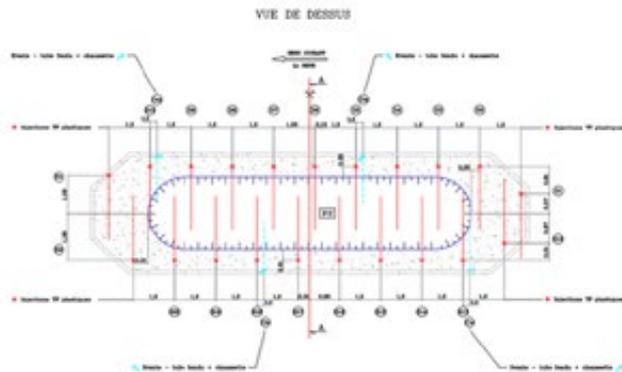


Figure 138 : Exemple de schéma d'implantation des points d'injection (document d'appel d'offre public)

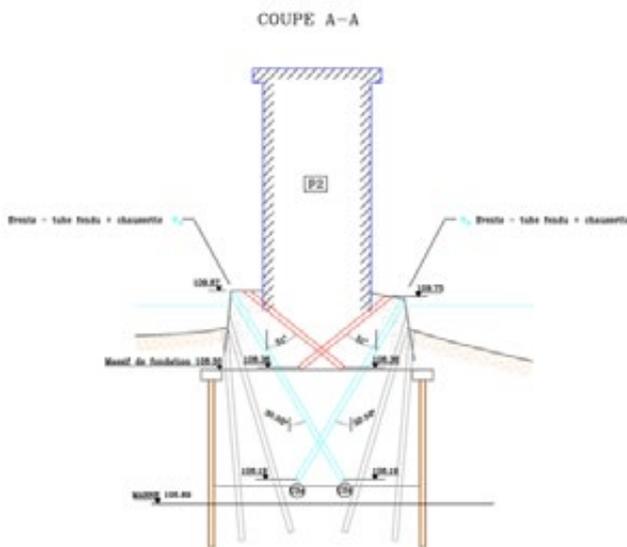


Figure 139 : Exemple de coupe schématique d'implantation des tubes d'injection (document d'appel d'offre public)

### Avantages :

- matériau injecté peu coûteux (à regarder dans une globalité avec les coûts matériels en fonction des conditions d'accès et de mise en œuvre),
- permet le comblement de vides importants,
- bonne injectabilité à faible pression,
- matériaux à base de chaux ou de ciment surmoulus compatibles avec la chaux, stable dans le temps après injection.

### Inconvénients :

- la mise en place des tubes d'injection par forage nécessite une attention particulière pour ne pas détruire les maçonneries,
- moyens matériels relativement lourds imposant des moyens d'accès et des emprises à prendre en compte,
- temps de prise important et difficulté en cas de

circulation d'eau,

- phénomène de décantation à prendre en compte,
- il peut exister des défauts de prise du coulis à long terme.

## Les injections de résines

**Le développement des techniques d'injection de résine et des résines elles-mêmes permet aujourd'hui de répondre aux exigences techniques citées en préambule de ce chapitre.**

L'injection de résine expansive est faite par mise en œuvre d'un produit expansif ne présentant donc ni retrait ni décantation, dont la pression de gonflement maximum (en condition de confinement ultime) est très faible (en général inférieure ou égale à 0.2 MPa).

La faible viscosité des résines d'injection utilisées autorise une pénétration de l'ouvrage au travers d'interstices de très faible dimension (de l'ordre de 50µm). La pression de gonflement intrinsèque à ces résines permet le comblement de vides verticaux ascendants qui ne pourraient être comblés gravitairement.

Les résines polyuréthane expansive proposées présentent une résistance à la compression pouvant atteindre 25 MPa quelques heures après la fin de leur polymérisation.

Les temps de polymérisation de ces produits sont courts (60 à 90 secondes), ce qui permet d'éviter les phénomènes de lessivage et de mieux contrôler les travaux d'injection (diffusion contrôlée) ainsi que les problématiques de rejets éventuels (puisque la polymérisation se fait aussi dans l'eau sans dilution avec celle-ci).

Les travaux sont réalisés à l'aide d'outillages manuels électroportatifs légers s'adaptant aisément aux différentes problématiques d'accès, l'exiguïté des emprises de travail ou encore d'exploitation des sites. Les percements réalisés sont de faible diamètre (Ø 14 à 32 mm). Ces percements ne génèrent que peu de sollicitations des structures existantes.

Les résines injectées, une fois polymérisées, sont imputrescibles, non biodégradable et inerte chimiquement. Elles ne modifient pas le Ph environnant.





Figure 140 : Carottages de maçonnerie après injection de résine illustrant le comblement de vides centimétriques et infra-millimétriques (crédit photo URETEK).

### Exemple d'injection de résine des maçonneries du pont de SAINT MAXIRE (79) :

Il était prévu des travaux de reprise en sous-œuvre par micropieux pour reprendre les nouvelles charges sur les piles existantes dans le cadre du changement du tablier.



Figure 141 : Vue des piles du Pont de St Maxire (79) (crédit photo URETEK)

Lors de la réalisation des micropieux (forage et injection de coulis) au travers des piles, une absence de cohésion de la maçonnerie s'est révélée.



Figure 142 : Injection de résine des piles du Pont de St Maxire (79) (crédit photo URETEK)

Il a été procédé à une injection de la maçonnerie des piles dans le but de leur redonner la cohésion nécessaire.



Figure 143 : Contrôle d'injection des piles du Pont de St Maxire (79) (crédit photo URETEK)

L'injection de résine a été réalisée sur l'ouvrage en partie immergée, présentant une porosité interne très élevée. Il a été observé lors des injections la résurgence, au niveau des percements adjacents, de l'eau contenue dans la maçonnerie.

La surveillance en phase d'exécution a été réalisée grâce à un radar 3D afin de s'assurer de ne générer aucun désordre sur les maçonneries.



Figure 144 : Illustration de résurgence de résine maîtrisée sur un parement (crédit photo URETEK)

#### Avantages :

- permet le comblement de vides importants mais aussi inférieurs au millimètre,
- très bonne injectabilité à faible pression,
- technique très peu invasive (perçements de petits diamètres),
- temps de prise/polymérisation très court, contrôle des temps de polymérisation et possibilité d'injection dans l'eau même en cas de circulation de celle-ci,
- matériaux sans interaction avec les matériaux en place.

#### Inconvénients :

- produit d'injection coûteux (à regarder dans une globalité avec les coûts matériels et fonction des conditions d'accès et de mise en œuvre),
- diffusion limitée de la résine compte tenu de faible temps de polymérisation impliquant des maillages plus réduits et donc un nombre de percements plus important.

# 6

## Conclusion

**«Ce monument demeurera debout aussi longtemps que les ingénieurs prendront soin de la garde des enrochements», ainsi parlait en 1822 Claude DESCHAMPS à l'ouverture du Pont de Pierre de Bordeaux qu'il avait conçu.**

**160 ans plus tard, les enrochements avaient disparu, une drague extrayait les graves du lit en amont du pont et des fosses profondes étaient apparues en amont et en aval, menaçant la stabilité des piles. La coupure totale de la circulation à Noël 1995 a créé un véritable traumatisme pour les usagers.**

**Depuis, l'État, puis la métropole de Bordeaux consacrent des budgets substantiels à sécuriser l'ouvrage. Par chance, l'influence du marnage de l'Océan, ainsi qu'une réalisation soignée des fondations à l'époque, le préservent du phénomène de pourrissement du bois.**

Cette anecdote illustre bien notre problématique qui trouve son origine à la création de nos ouvrages, qui évoluent inéluctablement avec le temps, qui est à la fois accentuée par l'activité humaine et l'impacte significativement, car nos ouvrages sont naturellement indispensables à nos mobilités.

Tant que l'on n'a pas disposé des techniques et des matériaux capables d'ancrer les ouvrages sur un substratum solide, on a utilisé le bois et la maçonnerie, en s'appuyant sur deux caractéristiques de ces matériaux : la résistance à la dégradation des bois constamment immergés et la souplesse des structures en maçonnerie. À défaut de contact avec le sol dur, on crée des massifs de renforcement qui permettent d'asseoir l'ouvrage et de consolider le sol moyennant des tassements acceptables.

Le patrimoine concerné par ce type de fondations est considérable et son âge est important. Par définition, les fondations sont peu visibles et difficiles d'accès, leur surveillance requiert des moyens techniques particuliers. Cependant, les conditions d'exploitation des ponts se sont dégradées au cours du dernier siècle.

Tout d'abord le creusement des lits des cours d'eau, qui est un phénomène naturel, a été accéléré par l'activité humaine (extraction de matériaux, curage mécanique).

Les charges roulantes se sont alourdies et induisent plus d'efforts dynamiques. La circulation routière s'est intensifiée. L'imperméabilisation des sols, le drainage concentrent les eaux de pluie plus rapidement vers les exutoires et augmentent les débits de cours d'eau. Le dérèglement climatique contribue à cette augmentation des débits, mais également à l'abaissement des niveaux d'étiage en cas de sécheresse. Le spectacle de ponts en maçonnerie submergés et emportés par des afflux d'eau inédits est devenu banal lors des catastrophes climatiques.

Mais les ouvrages ont également subi des travaux incompatibles avec leur fonctionnement mécanique d'origine. On a ainsi vu des dalles d'élargissement en béton armé mal réparties qui poinçonnent des voûtes, des élargissements destinés à alléger remplis de béton, des radiers en béton qui cachent des fondations affouillées sans garantir l'enrobage des pieux bois.

Depuis 1992 et la première version de la Loi sur l'eau jusqu'au Code de l'Environnement dans ses dernières versions, la réglementation s'est constamment renforcée afin de préserver le milieu vivant et la biodiversité. Il est certain que les rédacteurs de ces textes envisagent les ouvrages plus sous l'angle de leur impact sur la circulation de l'eau et des espèces vivantes que sous celui de la circulation routière ou ferroviaire. Si l'on considère le verre à moitié vide, on peut ironiser sur le fait que bon nombre des ouvrages en maçonneries existants ne recevraient pas aujourd'hui l'autorisation d'être construits. Mais force est de constater que des mesures telles que l'interdiction de l'exploitation des matériaux dans le lit



mineur des cours d'eau vont dans le sens de la sécurité des ouvrages.

**Bien que la loi sur l'eau et les réglementations associées favorisent la libre circulation de l'eau, des sédiments et des espèces vivantes, elle n'imposent pas systématiquement la suppression des obstacles, tels que les seuils notamment lorsqu'ils interagissent avec les ouvrages d'art. Des solutions existent pour concilier la préservation des ouvrages d'art essentiels à la mobilité avec la circulation de l'eau et du vivant. Cela nécessite une approche globale, à la fois environnementale et patrimoniale.**

Une approche purement économique consisterait à faire le constat de l'âge de ce patrimoine, de l'ordre de 200 ans, nettement supérieur aux durées prises en compte dans les calculs des ouvrages neufs (120 ans pour le viaduc de Millau) et programmer le remplacement de ces ponts amortis par des constructions plus fonctionnelles et en accord avec les prescriptions environnementales. Compte tenu du nombre d'ouvrages concernés et du coût, il est inutile de développer cette analyse, en dehors de toute considération architecturale ou paysagère. Rappelons toutefois que la démolition et le remplacement du Pont de Pierre de Bordeaux étaient prévus lorsque la guerre a annulé ce programme en 1941.

Pour autant, un projet de réparation ne peut être envisagé avec les règlements de calculs actuels. Le Pont de Pierre de Bordeaux monte et descend de quelques millimètres à chaque marée. Certaines fondations des piles du pont Eiffel à Cubzac les Ponts ont tassé de 1,20 m depuis leur construction en 1839 et l'altitude de l'ouvrage varie de 4 cm sur une année, au gré du remplissage et de la vidange des nappes phréatiques.

Au pont de Pierre de Libourne, frère jumeau de celui de Bordeaux, des plaques d'enduit au ciment recouvrant la voûte sèche rive droite se détachent en 2017, révélant une fracture traversante. Les archives révèlent que cette fracture est apparue vers 1950, peu après la reconstruction en béton des deux voûtes en rivière détruites à la guerre. Les spécialistes s'étaient longuement penché à l'époque sur la question, élaborant différentes hypothèses sur les fondations de la pile, sans arriver à une conclusion. Un enduit était donc venu masquer ce problème pendant presque 70 ans. Après instrumentation de la fissure, reconnaissances manuelles et sondages, la topographie de la fondation a été reconnue. La pile s'est vraisemblablement tassée à la reconstruction, en partie à cause du comblement intempestif des voûtes d'élégissement par du béton. Avec le temps, la fondation, bien protégée par le perré du quai, a repris sa portance. La voûte a été réparée avec ses matériaux d'origine, briques de Gironde sur Dropt, et repris son fonctionnement initial.

**Il faut donc, avant tout projet, procéder à une instrumentation et un suivi complet, et confier ces études**

**à des bureaux d'études et maîtres d'œuvre spécialisés.**

**Ce sont de nouveaux défis qui sont lancés aux acteurs et entreprises de la réparation.**

**Il faut que les maîtres d'ouvrage soient sensibilisés au problème, à sa complexité, et soient conscients des impacts et de l'impérieuse utilité de nos ouvrages.**

La surveillance des ouvrages d'art, quelle que soit leur nature, est d'ores et déjà un enjeu. Il faudra de plus insister sur les fondations. L'absence des désordres aériens n'est pas un gage exclusif de sécurité (cf. pont de Chamborigaud) et la présence de fissures n'est pas synonyme de pathologie grave.

En cas de doute, des investigations complémentaires et une surveillance sont à prévoir.

En cas d'intervention, l'ensemble des acteurs concernés (environnement, hydraulique, patrimoine architectural, gestionnaires, ...) est à consulter. Toutes ces démarches peuvent s'inscrire dans un temps long et orienter la conception des travaux.

Il faut adapter les solutions réparatoires au cas par cas, chaque ouvrage pris dans son environnement évolutif étant unique, et même savoir développer un éventail de solutions adaptées au fonctionnement des ouvrages.

Le béton armé, les injections de coulis ont parfois été employés sans tenir compte du fonctionnement mécanique des ouvrages, ni de la nature des matériaux (bois, pierre, joints). Un effort doit donc être fourni pour modéliser le comportement de ces structures et mettre en œuvre les solutions adaptées, voir retrouver les savoir-faire parfois oubliés.

Il y aura lieu de choisir la méthode la plus adaptée aux circonstances, empruntant un minimum d'espace autour des fondations. Des outils seront à développer pour travailler de manière plus précise en sous-œuvre. Enfin, les matériaux devront être adaptés pour répondre de la manière la plus précise aux exigences du chantier.

**La réparation des fondations en maçonnerie sur pieux bois est une problématique complexe, amenée à prendre de l'ampleur dans les années à venir. Elle n'est plus désormais l'apanage d'un seul corps de métier (prescripteur, concepteur ou réalisateur) mais nécessite l'assemblage d'un nombre important de compétences.**

**A nous tous de relever ce défi.**



# TABLE DES ILLUSTRATIONS

- *Figure 1 : Batardeau constitué d'une digue à talus incliné (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 2 : Batardeau à une ligne de palplanches (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 3 : Batardeau à deux lignes de palplanches fichées entre les lignes de pieux (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 4 : Batardeau à deux lignes de palplanches disposées contre les moises et en avant des pieux pour assurer une continuité du rideau de vannage (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 5 : Batardeau établi sur terrain rocheux (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 6 : Grand batardeau d'édification d'une pile et d'une culée du pont d'Orléans sur la Loire en 1751 (extrait de Construire des ponts au XVIII<sup>ème</sup> siècle, presse ENPC 1986)*
- *Figure 7 : Grand batardeau de construction du pont d'Orléans en 1751 (extrait de Construire des ponts au XVIII<sup>ème</sup> siècle, presse ENPC 1986)*
- *Figure 8 : Vue 3D du système de fondations du pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offres public)*
- *Figure 9 : Semelle de fondation de blocs taillés reposant sans encastrement sur le substratum rocheux. Pont Henri IV sur la Vienne à Châtellerauld construit de 1556 à 1609 (crédit photo J-P Levillain)*
- *Figure 10 : Vieux pont de Niort sur la Sèvre Niortaise de 1645, élargi en 1747. Fondation établie sur plancher bois reposant sur les alluvions sablo-graveleuses du lit (crédit photo J-P Levillain)*
- *Figure 11 : Semelle de fondation en maçonnerie de moellons hourdés au mortier de ciment (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 12 : Pont de Château-Garnier sur le Clain dont le parement de moellons taillés et maçonnés sert de coffrage à un remplissage de sable, de grave et d'argile. Semelle de fondation peu encastree vulnérable aux affouillements et aux érosions du lit de la rivière ((crédit J-P Levillain)*
- *Figure 13 : Pont de Régereau sur le Vicoin édifié latéralement à la rivière qui sera ensuite déviée sous l'ouvrage. Semelle de maçonnerie de moellons reposant sur le schiste et affouillée par le courant arrivant de biais (crédit photo J-P Levillain)*
- *Figure 14 : Pile centrale du pont de Chasseneuil-du-Poitou sur le Clain. Relevé des bois de fondation de la semelle lors de l'érosion du lit par affouillement en aval par effet de seuil (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 14 bis : Pont de Chasseneuil-du-Poitou sur le Clain. Semelle de fondation avec planches de réglage établie sans encastrement dans les alluvions graveleuses. Protection du lit par un radier de pavage de moellons ici affouillé par l'aval avec création de cavité sous la semelle par érosion régressive. (Crédit photo J-P Levillain)*
- *Figure 15 : Fondation sur enrochement (extrait d'Architecture hydraulique de Belidor de 1737)*
- *Figure 16 : Fondation par encaissement par un batardeau étroit (extrait d'Architecture Hydraulique, de Belidor, tome II de 1737)*
- *Figure 17 : Caisson étanche échoué sur les fonds préalablement dragués (extrait d'Architecture Hydraulique tome II par Belidor - 1756)*
- *Figure 18 : Fondation sur radier général (extrait du traité d'architecture de Philippe de La Hire)*
- *Figure 19 : Pont du XV<sup>ème</sup> siècle sur le Clain à Chasseneuil-du-Poitou à arches de faible ouverture fondé sur un pavage de gros moellons (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 20 : Fondation établie en 1836 sur radier général des piles du viaduc d'accès rive droite au pont sur la Dordogne à Cubzac (extrait d'archives)*
- *Figure 21 : Fondation par caisson étanche échoué sur les fonds (ministère des transport 1980)*
- *Figure 22 : Fondation sur massif de béton de chaux coulé derrière un rideau de vannage en bois qui sur cet ouvrage sur le Cher est détruit (crédit photo Hydrogéotechnique)*
- *Figure 23 : Fondation sur massif de béton de chaux immergé coulé à l'abri d'un rideau de palplanches bois (terrain inaccessible par épuisement). Pont Dumnacus sur la Loire aux Ponts - de - Cé 1846 -1850 (photo Wikipédia libre de droit et image d'archive)*
- *Figure 24 : Moulin pendu de Champtoceaux sur la Loire - Monument Historique du XIII<sup>ème</sup> siècle (crédit photo JP Levillain)*
- *Figure 25 : Plan d'archives du pont du Bouil sur le Langon*
- *Figure 26 : Élévation-coupe du pont du Bouil sur le Langon (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 27 : Représentation de pieux bois*
- *Figure 28 : Pieux bois*
- *Figure 29 : Fondation sur sol renforcé par un pilotis de pieux battus (extrait Traité des ponts - Gauthey 1756)*
- *Figure 30 : Élévation-coupe d'une pile du pont de Blois sur la Loire 1717-1724 (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 31: Fondation par épuisement d'un grand batardeau et battage des pieux bois selon une maille prédéfinie. Extrait de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert - 1765.*
- *Figure 32 : Fondation sur plancher bois et pieux battus contreventés par des enrochements (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 33 : Fondation sur pieux et caisson échoué (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 34 : Pont Cessart sur la Loire à Saumur (1755-1767) pile 3 sur 116 pilots recépés entre 2,50 m et 4,50 m sous l'étiage (crédit photo J-P Levillain)*
- *Figure 35 : Fondation sur pieux enchâssés dans un massif de béton de chaux (crédit J-P Levillain)*
- *Figure 36 : Le pont de Vouneuil sur la Vienne construit en 1878 où le platelage est proche du niveau d'étiage de la Vienne (extrait LinkedIn publication STRRES du 07/03/2020)*
- *Figure 37 : Pont de Port de Lanne sur l'Adour construit en*

1875 (photo d'archives)

- Figure 38 : Illustration de massif de béton de chaux enserrant les têtes des pieux
- Figure 39 : Puits havé
- Figure 40 : Fondation tubulaire (image d'archive)
- Figure 41 : Schéma de principe d'un caisson havé sous air comprimé
- Figure 42 : Extrait de l'encyclopédie de Travaux Public de 1896
- Figure 43 : Protection d'un appui par des enrochements
- Figure 44 : Protection d'un appui par une crèche.
- Figure 45 : Protection d'un appui par des rideaux parafeuilles
- Figure 46 : Protection par un radier général
- Figure 47 : Coupe de principe et constitution d'un tronc d'arbre (Barbe et Keller, 1996)
- Figure 48 : Observation microscopique d'un résineux et d'un feuillu (Barbe et Keller, 1996)
- Figure 49 : Classe de résistance et valeurs des propriétés de résistance, de rigidité et des masses volumiques (modifiée d'après la norme NF EN 338, AFNOR (2009))
- Figure 50 : Illustration de l'érosion, abrasion des matériaux des éléments constituant les fondations
- Figure 51 : Illustration de l'érosion, abrasion des matériaux des éléments constituant les fondations, et de la création d'une fosse d'érosion du lit aval (photo archive SNCF, extrait présentation technique « Gestion d'un patrimoine d'ouvrage sur Pieux bois - Diagnostic, pathologies et renforcement » du 25/01/2021)
- Figure 52 : Fondation sur plateforme en charpente et pieux en bois recépés juste sous l'étiage (pont Cessart Saumur)
- Figure 53 : Illustration d'un abaissement du lit aux pourtours d'appuis ayant fait l'objet de travaux d'encagement
- Figure 54 : Schéma de principe d'abaissement important du lit engendrant un déversement latéral
- Figure 55 : Effondrement du pont Wilson à Tours les 9 et 10 avril 1978 (photo archives CG37)
- Figure 56 : Illustrations de massifs en béton de chaux dégradés (photos SNCF)
- Figure 57 : Croquis des différentes manifestations de fractures selon les tassements des appuis.
- Figure 58 : Illustrations des déformations du profil en long d'ouvrages (photos 1 et 5 extraites présentation JP Levillain Journée technique « Les ponts en maçonnerie du diagnostic à la réparation » du 12/10/2015, photo 2 CETE de l'Ouest, photos 3 et 4 CETE de Lyon)
- Figure 59 : Illustrations de fractures de structures d'ouvrages induites par des tassements d'appuis (photo 2 viaduc d'Orzilhac avant sa démolition extraite de « Inventaire 43041,02Y Ponts et Viaducs détruits et/ou disparus, photo 3 DRIEA Ile de France)
- Figure 60 : Effondrement du pont de Chamborigaud en Cévennes dans le Gars en mars 2024 consécutif aux crues ayant affouillé une culée (crédit SDIS 30)
- Figure 62 : Schéma de principe du transport de sédiments dans un cours d'eau (source Malavoi et Bravard, 2010)
- Figure 63 : Illustration des équilibres morphologiques (balance de Lane, 1955)
- Figure 64 : Illustrations de principe et ordre de grandeur de l'affouillement localisé (sol frottant)
- Figure 65 : Illustration de fosses d'affouillement dues à la présence des piles (photo JP Levillain)
- Figure 66 : Coupe de principe de création d'une fosse aval en période de crue
- Figure 67 : Schéma du phénomène d'abaissement du lit induit par l'extraction de matériaux
- Figure 68 : Évolution de 1910 à 1978 suite aux dragages et aux prélèvements de sédiments. Abaissement de la ligne d'eau de 4 m à Nantes
- Figure 69 : Évolution des lignes d'eau à Ancenis pour différents débits.
- Figure 70 : Exemple d'abaissement du niveau du lit de la Loire mesuré à 125 m à l'aval du pont de Champtonceaux-Oudon en février 1974 et décembre 1977.
- Figure 71 : Fosse d'érosion à l'aval du pont de Thouare (octobre 1979)
- Figure 72 : Conséquences de l'abaissement de la ligne d'eau sur le pont de Thouaré à 30 km en amont de Nantes.
- Figure 73 : Enfoncement du lit de l'Adour en amont d'une gravière implantée à 4 km
- Figure 74 : 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 (photo extraite Journée technique « Les ponts en maçonnerie du diagnostic à la réparation JP Levillain 12/10/2015)
- Figure 75 : Illustration de mise à l'air d'éléments bois suite à l'abaissement de la ligne d'eau (crédit photo Romeouf)
- Figure 76 : Schéma de principe de l'influence d'un seuil
- Figure 77 : Illustration d'un seuil (photo JP Levillain)
- Figure 78 : Coupe de principe et illustration de l'interaction d'un seuil avec les fondations d'un ouvrage d'art situé en amont (Crédit JP Levillain)
- Figure 79 : Coupe schématique illustrant l'abaissement de la ligne d'eau et l'abaissement du lit par rapport aux systèmes de fondations
- Figure 80 : Tableau extrait de l'Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique ...
- Figure 81-1 Extrait de la présentation « La police de l'eau et mise en œuvre de la DDT du Gers » du 30-03/2023
- Figure 81-2 Extrait de la présentation « La police de l'eau et mise en œuvre de la DDT du Gers » du 30-03/2023
- Figure 81-3 Extrait de la présentation « La police de l'eau et mise en œuvre de la DDT du Gers » du 30-03/2023
- Figure 82 : Pont des moulins de Meaux - découverte des fondations anciennes (photo 2004 d'un particulier amateur)
- Figure 83 : Ancien pont en pierre sur le lit desséché d'une rivière (image FREEPIK - abonnement J Nicolli)
- Figure 84 : Figure 84 : Vieux pont Romain en Provence (image FREEPIK, Abonnement J NICOLI)
- Figure 86 : Tableau récapitulatif des évènements naturels dommageables survenus en France entre 1900 et 2021 (autres que les inondations) extrait rapport DATA LAB « Chiffres clés des risques naturels »).

- Figure 87 : Répartition des événements naturels (extrait rapport DATA LAB « Chiffres clés des risques naturels »).
- Figure 88 : Crue remarquable du 09 mars 2024 : Pont du Gard (photo météo Languedoc)
- Figure 89 : Figure 89 : Pont en arches en pleine crue (photo FREEPIK, abonnement J NICOLI)
- Figure 90 : OA de Laudun (crédit CEREMA)
- Figure 91 : 2021 : « La dernière crue de la Midouze a particulièrement abîmé l'ouvrage sans le mettre en péril ». (Crédit photo : G. B.)
- Figure 92 : Crue d'avril 2024 dans le loir et Cher, intervention d'ATS pour débayer les embâcles accumulés (crédit photo ATS)
- Figure 93 : Le pont de Drouilhédres a été submergé de nombreuses fois par les crues (Archives DR)
- Figure 94 : Courbe illustrant l'augmentation du débit de crue suite aux aménagements dans l'Hérault
- Figure 95 : Pont de Vaison-la-Romaine Vaucluse, France 1<sup>er</sup> siècle - Ouverture : 17,20 m Passage de la crue du 22 septembre 1992 (crédit photo IRSTEA de Lyon)
- Figure 96 : Schéma de principe d'application de la formule de Ramette permettant d'estimer les affouillements potentiels.
- Figure 97 : Coupe d'illustration du Pont Mayou à Bayonne avant et après une crue.
- Figure 98 : Pont situé sur la commune d'Arques qui a subi de plein fouet les problèmes d'affouillement suite aux inondations (Image STRRES)
- Figure 99.1 : Schéma synoptique d'une étude type
- Figure 99.2 : Schéma synoptique d'une étude type de reconnaissance des appuis en maçonnerie et leurs fondations
- Figure 100 : relevé bathymétrique manuel (crédit photo Romoef)
- Figure 101 : Exemple d'imageries obtenues par échosondeurs
- Figure 102 : Exemple d'image obtenue par sondeur multifaisceaux
- Figure 103 : Exemple d'image 3D obtenue par sondeur multifaisceaux après traitement informatique (crédit photo SATIF)
- Figure 104 : Exemple d'image obtenue par échosondeur superposée à l'image aérienne de la structure (crédit photo SATIF)
- Figure 105 : Levé Bathymétrique réalisé dans le cadre du projet de confortement du Pont de Pierre à Bordeaux par sondeur multifaisceaux (document d'appel d'offre public)
- Figure 106 : Vue 3D du relevé bathymétrique réalisé par sondeur multifaisceaux dans le cadre du projet de confortement du Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)
- Figure 107 : Illustration d'inspection subaquatique par plongeur (photos CETE Méditerranée)
- Figure 108 : Illustration d'une mise à sec de fondation d'ouvrage maçonné
- Figure 109 : Coupe schématique de principe d'un dégarnissage localisé
- Figure 110 : Illustration d'un dégarnissage localisé réalisé

à la pelle mécanique depuis un ponton flottant (crédit photo SAS Romoef)

- Figure 111 : Appareil de mesure assimilable à une aiguille Proctor (extrait guide d'inspection des fondations bois des ouvrages de l'IFFSTAR)
- Figure 112 : Diagramme longueur de pénétration de l'aiguille en fonction du diamètre du pieux (extrait guide d'inspection des fondations bois des ouvrages de l'IFFSTAR)
- Figure 113 : Tests de poinçonnement réalisés sur un chantier test (Viaduc des cents arches à Arveyre) et placés sur l'abaque du protocole d'inspection Hollandais (extrait guide d'inspection des fondations bois des ouvrages de l'IFFSTAR)
- Figure 114 : Coupe schématique illustrant les conséquences et l'interaction entre un seuil transversal et un ouvrage (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2).
- Figure 115 : Illustrations de massifs d'enrochement de protection (Crédit photo BTPS Atlantique)
- Figure 116 : Ouvrage de Luzou sur la ligne ferroviaire Luluque Tartas dans les Landes : Affouillement important sous une culée fondée sur pieux bois, comblé par enrochement permettant de retenir les sédiments sableux et recombler naturellement l'affouillement (Crédit photo BTPS Atlantique)
- Figure 117 : Illustration d'un tapis de gabions (photo CETE Nord Picardie)
- Figure 118 : Schémas de principes et d'exemple d'utilisation de gabions immergés en protection d'ouvrage (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)
- Figure 119 : Coupe de principe du confortement du pont Henri IV du XVI<sup>ème</sup> siècle à Châtelleraut sur la Vienne.
- Figure 120 : Illustration de réparation d'une tête de pieu en bois sous un platelage (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)
- Figure 121 : Illustration d'encagement des appuis par rideaux de palplanches (crédit photo JP Levillain)
- Figure 122 : Coupe de principe d'un encagement réalisé par coffrage traditionnel (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)
- Figure 123 : Illustration de 2 méthodes de mise en œuvre : Depuis le tablier ou depuis la base des piles.
- Figure 124 : Courbe de chargement de la fondation par micropieux
- Figure 125 : Exemple de courbe de chargement d'un micropieu, page 90 de FOREVER 2004
- Figure 126 : Illustration du renforcement par micropieux du Pont de Pierre à Bordeaux : Micropieux à réaliser depuis le tablier au travers des maçonneries, scellés sur toute la hauteur des maçonnerie et ancrés dans les marnes au-delà des couches alluvionnaires (document d'appel d'offre public)
- Figure 127 : Réalisation de battage de palplanches
- Figure 128 : Coupe de principe d'un encagement par rideau de palplanches (extrait guide STRRES FABEM 6.3 V2)
- Figure 129 : Illustration d'encagement réalisé en coffrage traditionnel, insuffisamment ancré et d'emprise importante ayant engendré des affouillements.

- *Figure 130 : Illustration d'encagements réalisés grâce à un rideau de palplanches correctement ancré mais de forte emprise ayant des incidences sur les circulations hydrauliques (crédit photo Romoeuf)*
- *Figure 131 : Illustrations d'encagements correctement ancrés grâce à un rideau de palplanches et réalisés avec des emprises réduites limitant ainsi les perturbations hydrauliques (crédit photos Romoeuf)*
- *Figure 132 : Illustrations d'une injection de résine polyuréthane sous pile de pont fondée sur pieux bois en 2014 (crédit photo URETEK)*
- *Figure 133 : Illustration d'un carottage sur système de fondation en bois injecté par résine à Venise en 2004 (crédit photo URETEK)*
- *Figure 134 : Exemple de projet de cerclage de piles : Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)*
- *Figure 135 : Exemple de projet de cerclage de piles : Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)*
- *Figure 136 : Exemple de projet de cerclage de piles : Pont de Pierre à Bordeaux (document d'appel d'offre public)*
- *Figure 137 : Illustration de forage oblique d'une pile (crédit photo SAS Romoeuf)*
- *Figure 138 : Exemple de schéma d'implantation des points d'injection (document d'appel d'offre public)*
- *Figure 139 : Exemple de coupe schématique d'implantation des tubes d'injection (document d'appel d'offre public)*
- *Figure 140 : Carottages de maçonnerie après injection de résine illustrant le comblement de vides centimétriques et infra-millimétriques (crédit photo URETEK).*
- *Figure 141 : Vue des piles du Pont de St Maxire (79) (crédit photo URETEK)*
- *Figure 142 : Injection de résine des piles du Pont de St Maxire (79) (crédit photo URETEK)*
- *Figure 143 : Contrôle d'injection des piles du Pont de St Maxire (79) (crédit photo URETEK)*
- *Figure 144 : Illustration de résurgence de résine maîtrisée sur un parement (crédit photo URETEK)*



# TEXTES DE RÉFÉRENCE

- DT494 Fondations de ponts en site aquatique en état précaire - Guide pour la surveillance et le confortement établi en décembre 1980
- Thèse IFSTAR Systèmes de fondations pieux bois
- Additif à la norme NF P94-262 édité par l'IFSTTAR
- Jean-Pierre Levillain Fondations courantes des ouvrages d'art anciens publication PFC 1980
- Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art Fascicule 10 - Fondations en site aquatique (édité par l'IDRRIM en août 2013)
- Inspection détaillée des ouvrages d'art (édité par l'IDRRIM en juin 2018)
- Présentation CEREMA Fondation d'ouvrages d'art de 2021
- Extrait du rapport du Laboratoire SRO (15 pages) de l'Université Gustave Eiffel - Confidentiel non diffusé
- Projet Pieux Bois : Guide d'Inspection des fondations en bois des ouvrages de septembre 2013
- Journée Technique « Construction Durable » du 25/01/2012 : Gestion d'un Patrimoine d'Ouvrages sur Pieux Bois (Diagnostic / Pathologie / renforcement) (Document Infra Ingénierie et SNCF)
- Journée Technique Les ponts en maçonnerie Du Diagnostic à la réparation Diagnostic de comportement et d'état JP Levillain 12/10/2015
- Journée technique Ouvrages en maçonnerie SNCF 12/10/2015
- Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art Fascicule 10 - Fondations en site aquatique (édition SETRA)
- Inventaire n°43041.02Y Ponts et Viaducs Démolis et/ou Disparus
- Conférence technique territoriale sur le programme national ponts CEREMA du 30/03/2023 « La police de l'eau et mise en œuvre par la DDT du Gers »
- Master 2 de Géographie, Aménagement, Environnement et Développement, Parcours Fonctionnement et Gestion des Environnements Ruraux et Naturels de HEITZ Nicolas « Reconstitution de la trajectoire temporelle (XVIIIe- XXIes.) du Rhin Supérieur entre Neuf-Brisach (68) et Marckolsheim (67), Soutenue le 26 Juin 2019 à Strasbourg
- Fascicule 10 de l'instruction technique «fondations en site aquatique» de 2013
- Synthèse des résultats et recommandations du projet national sur les micropieux FOREVER. Presses de l'ENPC 2004.
- Jean-Pierre Levillain - Bordeaux Pont de Pierre sur la Garonne - confortement des piles 2 et 3 par micropieux.
- Note technique LRPC d'Angers nov.1991.
- Besserer A., Trouy M-C., (2013), Viaduc des cent arches - Analyse des prélèvements - ENSTIB, Non publié, 8 p
- Reynolds T., Bates P., (2009), The potential for timber piling in the UK, Ground Engineering, pp. 31-34
- Conséquence de la surexploitation des sables de Loire sur la stabilité des berges et les fondations des ponts en Maine et Loire et Loire Atlantique par Jean-Pierre Levillain (mai 1980)
- Site internet de l'office Français de la Biodiversité : [ofb.gouv.fr/la-continuite-ecologique-des-cours-deau](http://ofb.gouv.fr/la-continuite-ecologique-des-cours-deau)
- Plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Parce) du 13 novembre 2009
- Plan d'action pour une politique apaisée de restauration de la continuité écologique
- Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau
- Sixième rapport du GIEC
- « Chiffres clés des risques naturels » édition 2023 par le ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.
- Procédure E4-2 de Reconnaissance des appuis en maçonnerie et leurs fondations établies par l'université Gustave Eiffel et le CEREMA
- Bulletin STRRES n°28 Pb fondations anciennes

## Notes et synthèse de Jean-Pierre Levillain:

- Incidence de la régulation des cours d'eau sur l'assise des ouvrages en maçonnerie,
- Considération sur l'utilisation des micropieux en renforcement des fondations des ponts en maçonnerie.

# GUIDES STRRES

- **FABEM 6.1 V2** Réparation et renforcement des maçonneries (Généralité et préparation des travaux)
- **FABEM 6.2 V2** Réparation et renforcement des maçonneries (Réparation non-structurale)
- **FABEM 6.3 V2** Réparation et renforcement des maçonneries (Réparation et renforcement structuraux)
- **FABEM 6.4 V2** Réparation et renforcement des maçonneries (Annexes)
- **FAFO 1 V2** Réparation et renforcement des fondations



# STRRES

## Les réparateurs d'ouvrages d'art

### COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL CHARGÉ DE L'ÉLABORATION DU GUIDE « LES FONDATIONS ANCIENNES PAR PIEUX BOIS »

- Julien NICOLI (BTPS Atlantique)
- Jean Pierre LEVILLAIN (JPL Conseil)
- Hervé DUGRENIER (Représentant IMGC, bureau d'études et Maîtrise d'œuvre ARS)
- Sylvain ROMOEUF (SAS ROMOEUF)
- Bastien SAGE VALLIER (SNCF Réseau)
- Carole ZOHOU (SATIF OA)
- Julien BERTHELOT (ANTEA)
- Chi Wei CHEN (SNCF Réseau)
- Frédéric PITOU (URETEK)
- Judith BERNIS (SEFI INTRAFOR)
- Gérard COLLE (Expert)
- François LOUVEL (SPIE BATIGNOLLES)
- Marie CHRETIEN (GLOBALIS BTP)
- Olivier MADEC (VINCI Construction)
- Pelayo VILLANUEVA (SNCF Réseau)
- Christian TRIDON (Président d'honneur du STRRES les réparateurs d'ouvrages d'art)
- Philippe GUIGNARD (Anciennement Conseil Général de la Gironde)

Le STRRES - Les réparateurs d'ouvrages d'art remercie tous les membres du groupe de travail pour leur contribution active apportée à ce document et, notamment, Jean-Pierre LEVILLAIN qui assure la transmission et la mémoire des techniques de construction de nos ouvrages d'art anciens.

Ce document a été réalisé avec le concours de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)

