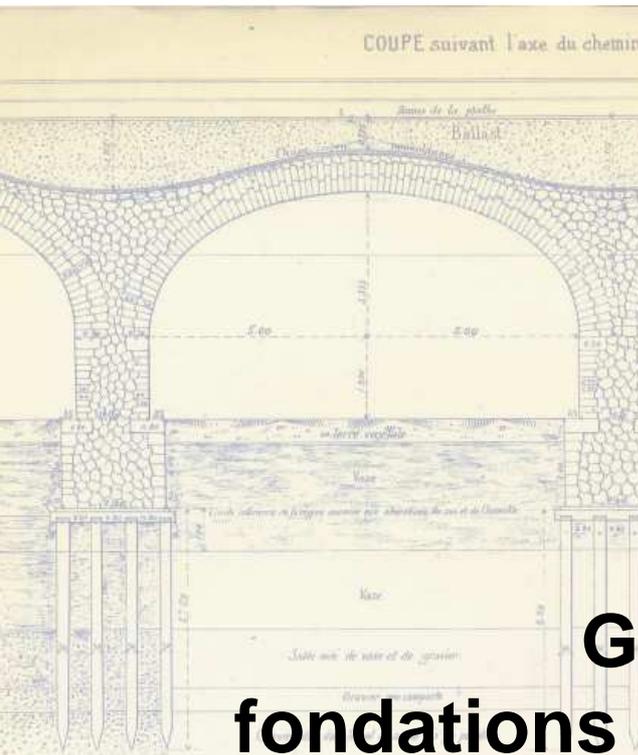
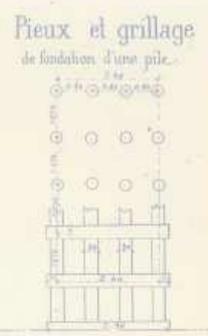




Projet Pieux Bois



Guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages



Septembre 2013

Guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages

Livrable du projet Pieux Bois 2010-2013

Ce document a été élaboré dans le cadre du projet C2D2 PieuxBois avec le soutien du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat (DGITM). Il comporte un seul volume de 23 pages consacré à un guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages. Les documents tels que rapports de recherche, plans et photographies proviennent des archives de l'IFSTTAR ou des CETE, certaines photographies ont été prises sur des sites internet ou des plaquettes publicitaires, la plupart des dessins ont été faits par le premier auteur. Les informations contenues dans ce livrable n'engagent que son auteur et ses co-auteurs. Ces derniers ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait en être fait.

Auteur		
Jérome CHRISTIN	IFSTTAR	jerome.christin@ifsttar.fr
Co-auteurs		
Philippe REIFFSTECK	IFSTTAR	philippe.reiffsteck@ifsttar.fr
Alain LE KOUBY	IFSTTAR	alain.lekouby@ifsttar.fr

Sommaire

Sommaire	1
Introduction	3
Partie I. Présentation du guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages	5
1 L'utilisation du protocole dans les investigations	5
2 Les différentes étapes du protocole	5
2.1 Excavation	5
2.2 Classification des sols	6
2.3 Mesures des éléments de la fondation	6
2.4 Qualité du béton et de la maçonnerie	6
2.5 Tests de poinçonnement à l'aiguille	6
2.6 Photos	8
2.7 Prélèvements d'échantillons de bois	8
2.8 Eaux souterraines	9
3 Tests en laboratoire	9
3.1 Analyse microscopique	9
3.2 Dégradation du bois	9
4 Estimation de la résistance à la compression du bois	9
Partie II. Application du protocole lors de l'inspection des fondations du viaduc ferroviaire des cent arches	11
1 Présentation du viaduc et de la zone de travail	11
1.1 Description de l'ouvrage et de ses fondations	11
1.2 Phasage des travaux	13
2 Résultats et analyses des mesures	15
2.1 Résultats des tests de poinçonnement	16
2.2 Résultats des analyses des carottes	17
2.3 Conclusions de l'étude	19
Conclusion	21
Références bibliographiques	23

Introduction

Les Pays-Bas possèdent de nombreux ouvrages fondés sur des pieux en bois. La géologie du sol et le niveau d'eau de la nappe proche du terrain naturel ont été à l'origine de leur utilisation régulière jusqu'à cette dernière décennie. Ainsi, 200000 pieux en bois ont été battus annuellement aux Pays-Bas au cours des 50 dernières années lors de la construction de routes, de bâtiments agricoles, de maisons et de centres sportifs (Reynolds et Bates, 2009).

Afin de prévenir tout dommage de ces ouvrages lié à l'état de dégradation des pieux en bois, la commission professionnelle hollandaise a rédigé en 2003 un protocole d'inspection des fondations en bois des bâtiments. Ce protocole, du domaine public, est régulièrement mis en pratique aux Pays-Bas dans la mesure où la loi hollandaise impose qu'un diagnostic des pieux en bois soit réalisé dès lors que la structure d'une maison est modifiée (agrandissement, création d'un garage) ou lorsque le propriétaire d'un immeuble souhaite vendre un étage. Ce protocole contient une méthodologie d'analyse et détaille les différentes étapes du diagnostic des fondations.

La première partie de ce livrable expose les différentes étapes de ce diagnostic.

La seconde partie présente la mise en pratique de ce protocole lors de l'inspection des fondations du viaduc ferroviaire des cent arches situé à proximité de Libourne.

Partie I. Présentation du guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages

Cette première partie reprend les différentes étapes de l'inspection des fondations en bois établies dans le protocole hollandais. Les illustrations proviennent d'un diagnostic de fondations en bois réalisé dans la banlieue d'Amsterdam en 2010.

1 L'utilisation du protocole dans les investigations

Cette partie présente les différentes étapes d'un examen détaillé de la fondation. L'inspection de la fondation peut être précédée d'une étude documentaire qui comporte les éléments suivants :

- Description de l'environnement

Caractéristiques du bâtiment et des fondations (plan d'implantation des pieux, caractéristiques du bois, identification du sol, compilation des données historiques disponibles) ;

- Description des pathologies et des désordres

Description des pathologies et des désordres relevés sur le bâtiment (fissures, tassements).

2 Les différentes étapes du protocole

2.1 Excavation

La fouille est réalisée autour de la fondation (Figure 1a) et doit posséder un rayon minimum égal à 1 m. Les pieux sont déterrés sur les 50 premiers centimètres. Un système de pompage est généralement mis en place afin de rabattre le niveau de la nappe pendant la durée de l'opération (Figure 1b et Figure 1c).



Figure 1. Vue d'ensemble d'une maison inspectée aux Pays-Bas (a), système de pompage (b) et inspection des fondations (c)

2.2 Classification des sols

La classification du sol prélevé lors de l'excavation est réalisée selon les recommandations établies dans la norme française NF P 11-300 (AFNOR, 1992). Le niveau du terrain naturel, les profondeurs de fin de couche, ainsi que la hauteur de battement du niveau de la nappe (fluctuations visibles avec les changements de couleurs) doivent être relevés.

2.3 Mesures des éléments de la fondation

L'objectif de l'inspection est d'identifier l'état de la fondation. Les éléments suivants doivent être mesurés (Figure 2) :

1. Diamètre du pieu ;
2. Distance entre deux pieux sous une traverse ;
3. Distance entre les traverses ;
4. Epaisseur de la traverse ;
5. Epaisseur, longueur et largeur de la longrine ;
6. Hauteur de battement du niveau d'eau de la nappe ;
7. Profondeur de la fondation par rapport au terrain naturel.



Figure 2. Pieu en bois et connexion en béton

Une description complète des éléments suivants doit être également effectuée :

1. Déformation éventuelle des traverses entre les têtes des pieux ;
2. Déformation éventuelle des têtes des pieux et de la connexion entre le pieu et la partie supérieure de l'ouvrage ;
3. Inclinaison éventuelle des pieux par rapport à la verticale.

2.4 Qualité du béton et de la maçonnerie

Une description visuelle de l'état de la maçonnerie et du béton est réalisée. Les fissures, les déformations de la maçonnerie et du béton, la qualité des assemblages sont relevées. Aucun échantillon de béton ou de maçonnerie n'est prélevé lors de l'inspection.

2.5 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 (Figure 3a), 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".

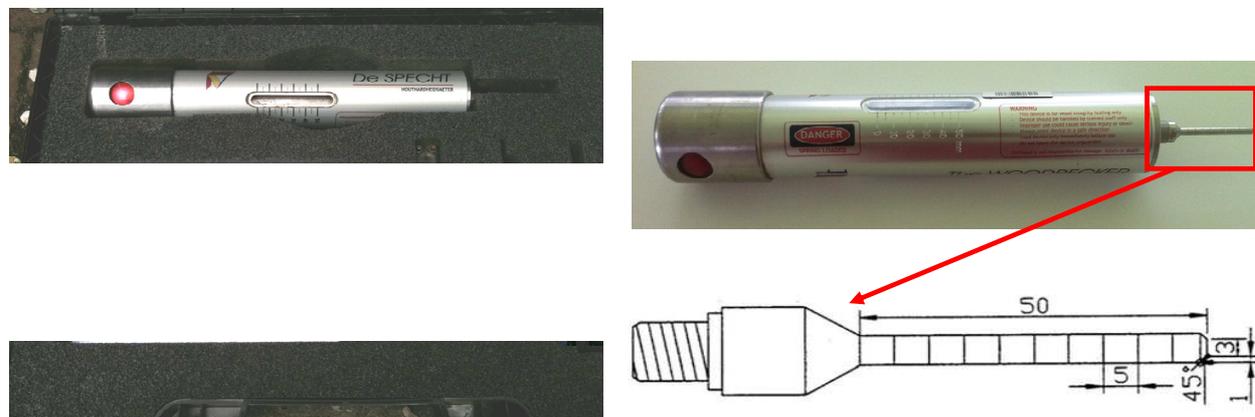


Figure 3. Appareil de mesure assimilable à une aiguille Proctor

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 sur la Figure 4.

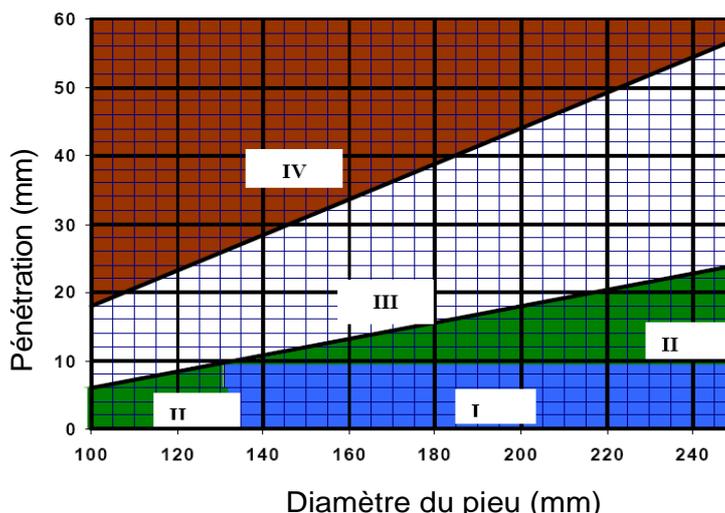


Figure 4. Longueur de pénétration de l'aiguille en fonction du diamètre du pieu

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.

2.6 Photos

L'ensemble de la fondation doit être photographié. Les pieux, les longrines, les traverses et la connexion en béton le sont également.

2.7 Prélèvements d'échantillons de bois

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 (Figure 5) de diamètre intérieur 7 mm et de longueur 30 cm.



Figure 5. Carottier (a et prélèvement d'échantillon à l'aide du carottier (b)

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 refroidit le plus rapidement possible (température entre 1 et 8°C).

2.8 Eaux souterraines

La hauteur du niveau d'eau de la nappe est mesurée. Des piézomètres peuvent être également posés à proximité de la fondation inspectée et le niveau d'eau mesuré durant quelques jours, voire quelques semaines après l'inspection.

3 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.

3.1 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.

3.2 Dégradation du bois

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

4 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 σ_c est calculée à partir de la formule suivante :

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

Avec H le taux d'humidité du bois et ρ la masse volumique du bois sec (kg/m^3)

Partie II. Application du protocole lors de l'inspection des fondations du viaduc ferroviaire des cent arches

Le protocole détaillé dans la Partie I de ce livrable a été appliqué lors de l'inspection des fondations en bois du viaduc ferroviaire des cent arches situé dans la palue d'Arveyres, à proximité de Libourne (33). Les objectifs de l'inspection étaient, d'une part, de déterminer et de caractériser l'état de dégradation des éléments en bois des fondations de ce viaduc (platelage, grillage, pieux) et d'autre part, de valider le protocole et de donner un avis sur l'état des fondations.

1 Présentation du viaduc et de la zone de travail

1.1 Description de l'ouvrage et de ses fondations

L'ouvrage est un viaduc en maçonnerie, situé dans la palue d'Arveyres sur la ligne n° 570 000 de Paris à Bordeaux, au Pk 550 + 433 (Figure 6a). Ce viaduc, dont la construction remonte à 1846-1850, est composé de 100 arches, de 10 m d'ouverture et fondées sur des pieux en bois. D'après les documents d'archives, l'épaisseur et la largeur des piles valent respectivement 1,70 m et 8 m (Figure 6b).



Figure 6. Localisation du site (a) et vue de l'ouvrage (en direction de Bordeaux) (b)

1.1.1 Coupe géologique du site

L'ouvrage est localisé dans une plaine alluviale, ancien méandre de la Dordogne. D'après les relevés piézométriques réalisés lors de la reprise de l'ouvrage en 1993-1994 et fin 2011, la nappe se situe à environ 2 m sous le terrain naturel. Deux piézomètres sous les arches n° 79 et n° 90 indiquaient, fin 2011, des profondeurs du niveau d'eau sous le terrain naturel respectivement égales à 1,37 m et 1,96 m.

La Figure 7 présente la coupe géologique du terrain au droit d'une pile (numéro inconnu). Cette coupe, établie à partir des plans d'archives, a été modifiée en fonction des relevés topographiques effectués sur le terrain en 2011.

	0
Terre végétale	1,6 m
Vase	
	4,50 m
Sable mêlé de vase et gravier	5,75 m
Gravier peu compact	6,25 m
Gravier dur	

Figure 7. Coupe géologique du site

1.1.2 Caractéristiques des fondations

D'après les documents d'archives (Figure 8), les fondations de chaque pile seraient constituées d'un platelage en bois (pin) de 8 cm d'épaisseur situé à 2 m sous le terrain naturel de l'époque (1850). Le platelage reposerait sur un grillage en bois de 25 cm d'épaisseur. La largeur des longrines et des traverses serait égale à 30 cm. Le grillage serait fixé à 4 rangées de 11 pieux de 30 cm de diamètre et 5,20 m de longueur. Les pieux seraient espacés longitudinalement de 80 cm et transversalement de 1,1 m. La tête des pieux serait située dans les vases à 2,3 m de profondeur et leur pointe encastrée dans les graviers durs.

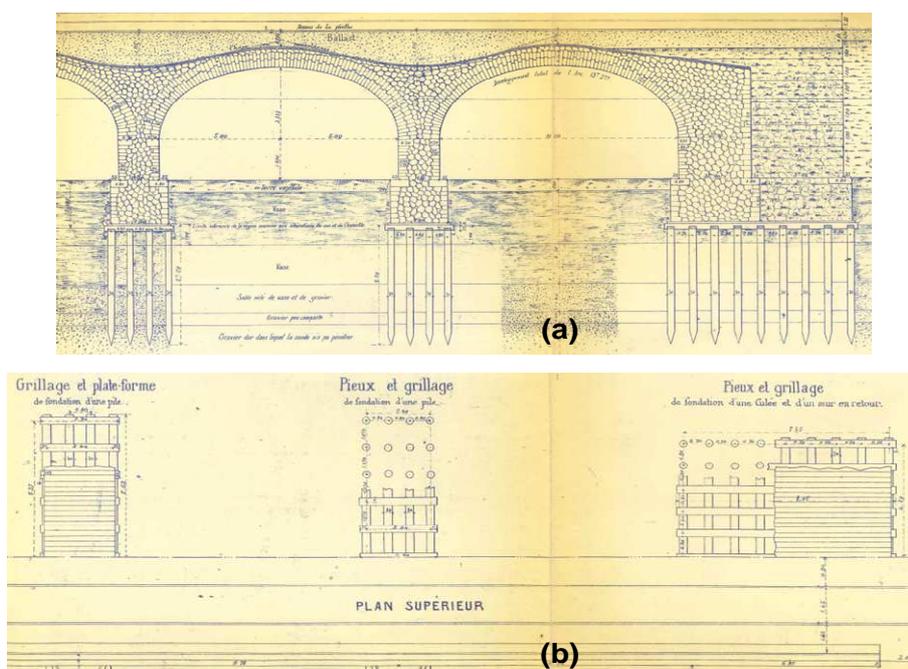


Figure 8. Coupe longitudinale des fondations (a) et vue en plan des fondations (b) (plans d'archives)

1.2 Phasage des travaux

1.2.1 Choix de la zone de fouille

La fouille a été réalisée sous l'arche n° 87 du viaduc. Cette arche a été retenue pour effectuer les travaux car elle était facile d'accès pour la pelle mécanique et sa structure ainsi que celles des piles et arches l'encadrant (n°88 et n°86) ne présentaient, d'après les précédents rapports d'inspection, que des désordres minimes au niveau de la voûte (Figure 9).

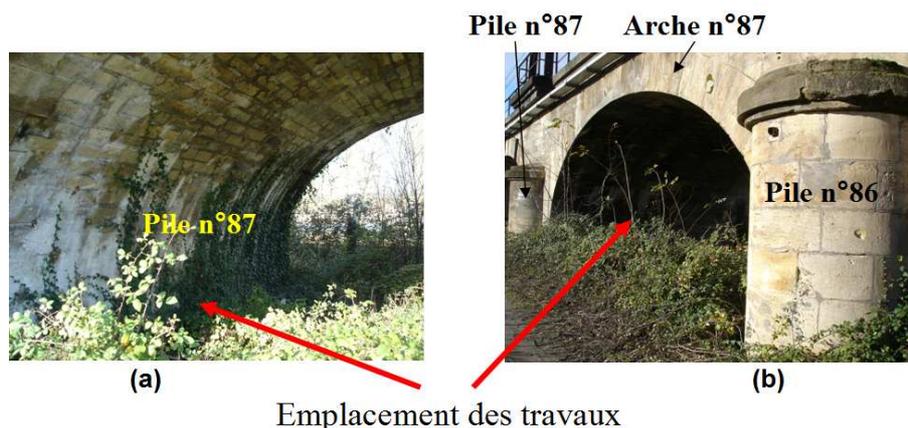


Figure 9. Photos de la pile n°87 (a) et de l'arche n°87 (b)

Des travaux de débroussaillage ont été préalablement réalisés sous l'arche n° 87 afin de dégager le terrain pour les travaux de fouille et d'établir une zone de dépôt temporaire des déblais.

1.2.2 Réalisation de la fouille et description des fondations

Les mesures relevées sur site fin 2011 ont montré que le terrain naturel était situé à 70 cm sous la naissance des voûtes, et non à 1,90 m comme l'indiquaient les plans d'archives du projet datés de 1850 (Figure 8).

Le terrain a été excavé sur 3,70 m de hauteur au droit de la pile. Les pentes de la fouille étaient de l'ordre de 3 : 2 (Figure 10a et Figure 10b). L'objectif initial de la fouille était de déterrer trois têtes de pieux sur une hauteur de 70 cm. Le niveau de la nappe se situant à 2,50 m sous le terrain naturel, un système de pompage a été mis en place afin de le rabattre au maximum (Figure 10c).



Figure 10. Réalisation de la fouille (a et b) et système de pompage (c)

La Figure 11a présente une coupe transversale de la fondation de la pile n° 87 avec les profondeurs du platelage, du grillage et des pieux en bois déterminées à partir des plans d'archives (en noir). La hauteur du terrain naturel, ainsi que les dimensions des éléments en bois (grillage, pieux) ont été relevées lors de la réalisation de la fouille (en rouge). La Figure 11b présente un zoom du grillage et des pieux.

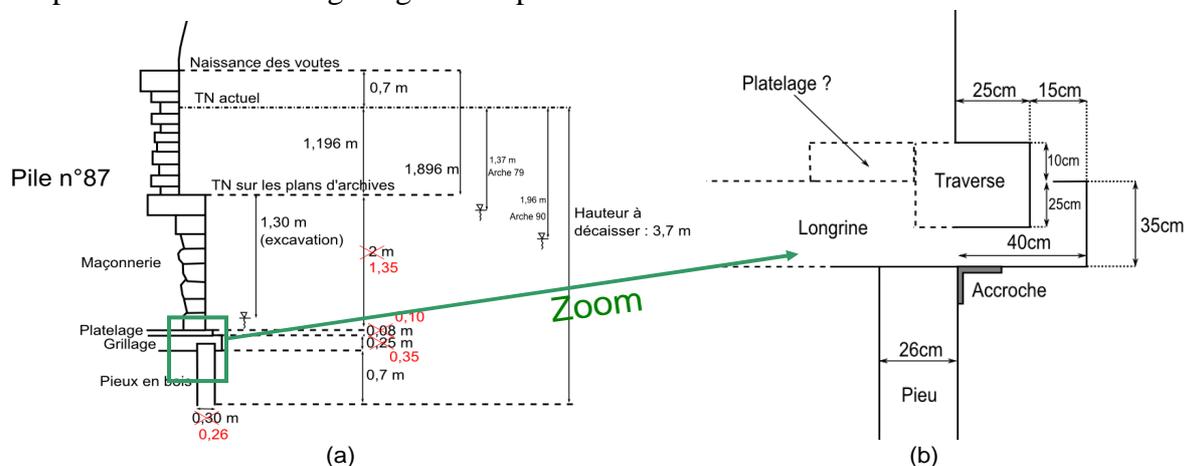


Figure 11. Coupe de terrain au droit de la pile n°87 (a) et zoom sur le platelage, le grillage et les pieux (b)

La Figure 11 montre que les dimensions inscrites sur les plans d'archives datés de 1850 diffèrent peu des mesures relevées sur site, attestant ainsi de leur fiabilité. Cependant, le nombre de rangées de pieux par pile n'a pas pu être vérifié. Le platelage en bois situé sous la maçonnerie (Figure 11b) n'était pas accessible.

La Figure 12 présente une vue de face de la fondation (a) comportant les mesures relevées sur site, ainsi que trois photos de la fondation (b, c et d).

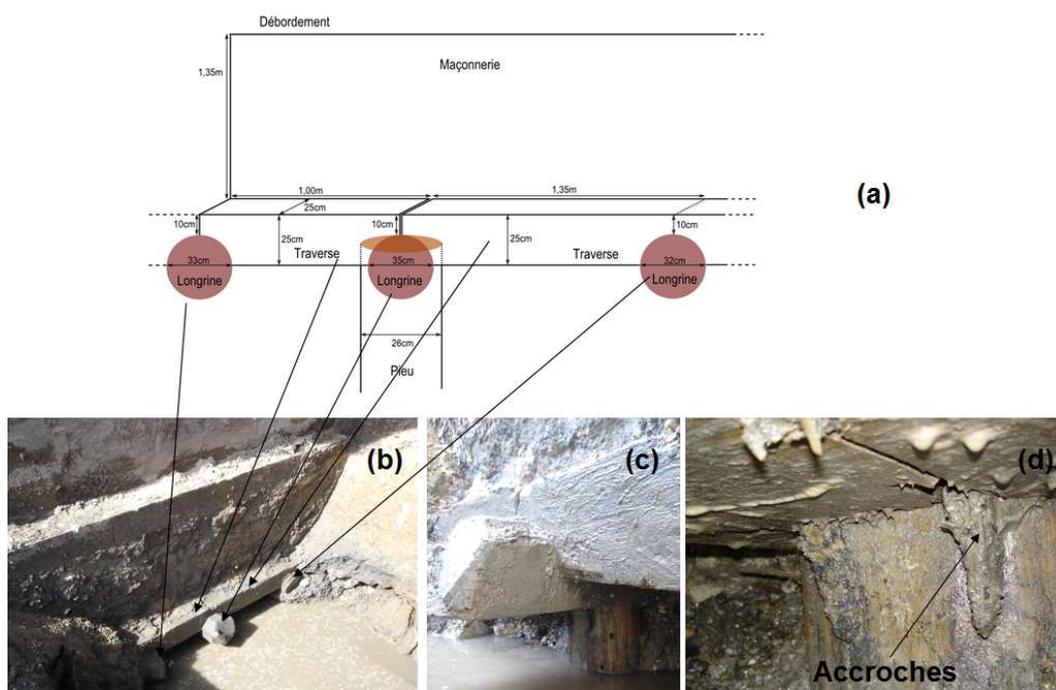


Figure 12. Vue de face de la fondation (a) et photos prises sur sites (b, c et d)

On retrouve, sur la Figure 11 et la Figure 12, les caractéristiques des fondations constituées de pieux en bois surmontés d'un grillage et d'un platelage. Les pieux en bois et les traverses du grillage ont été solidarisés avec des accroches (Figure 12d).

2 Résultats et analyses des mesures

Des mesures de poinçonnement à l'aiguille ont été réalisées sur les traverses et longrines du grillage ainsi que sur les pieux (Figure 13).

Ces tests ont été complétés par des prélèvements de carottes (notés SC sur la Figure 13) sur les trois éléments, analysées par la suite dans un des laboratoires de l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB).

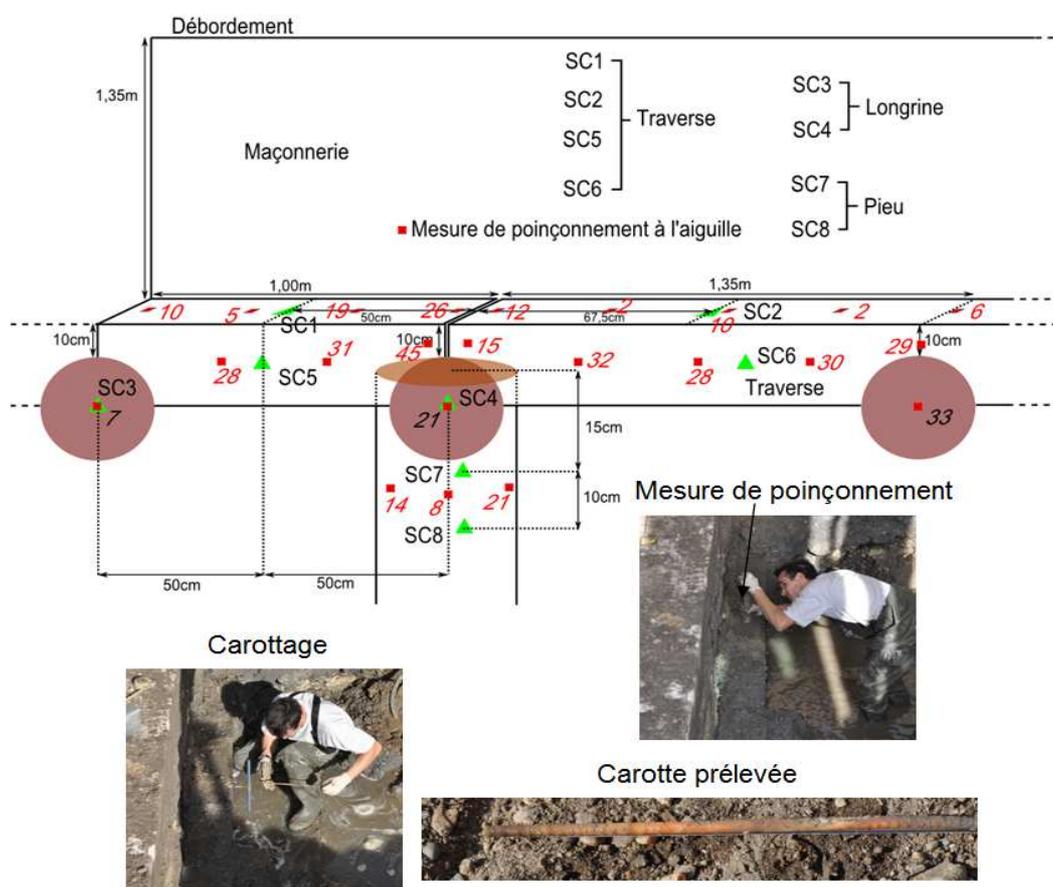


Figure 13. Plan d'implantation des tests de poinçonnement à l'aiguille et des prélèvements des carottes

23 mesures de poinçonnement à l'aiguille ont été réalisées et 8 carottes prélevées. Les résultats des mesures et de l'analyse des carottes sont présentés par la suite.

2.2 Résultats des analyses des carottes

Six des huit carottes prélevées sur le bois des fondations (Figure 13) ont été analysées : les carottes SC1 et SC6 sur les traverses, les carottes SC3 et SC4 sur les longrines et SC7 et SC8 sur le pieu.

Les analyses ont consisté en des observations en microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie optique, des mesures d'infradensité et des mesures d'activités enzymatiques. Les résultats présentés par la suite ont été repris du rapport rédigé par [Besserer et Trouy, \(2013\)](#).

Observations en Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et microscopie optique

Le bois des pieux (carottes SC7 et SC8) n'a pas été dégradé au niveau anatomique. Aucune présence de micro-organisme n'a été décelée (Figure 15a).

Au contraire, le bois des longrines (carottes SC3 et SC4) a été très dégradé au niveau anatomique (Figure 15b). La fissuration des parois en attestent. Des développements filamenteux ont été observés et pourraient correspondre à des bactéries. Enfin, aucun développement fongique n'a été décelé.

Le bois des traverses dans la direction longitudinale (carotte SC6) a été peu dégradé au niveau anatomique (Figure 15c), contrairement au bois dans la direction verticale (carotte SC1) (Figure 15d). Les parois ont été érodées en surface et creusées en tunnels. Aucun développement fongique n'a été détecté, mais des bactéries se sont probablement développées.

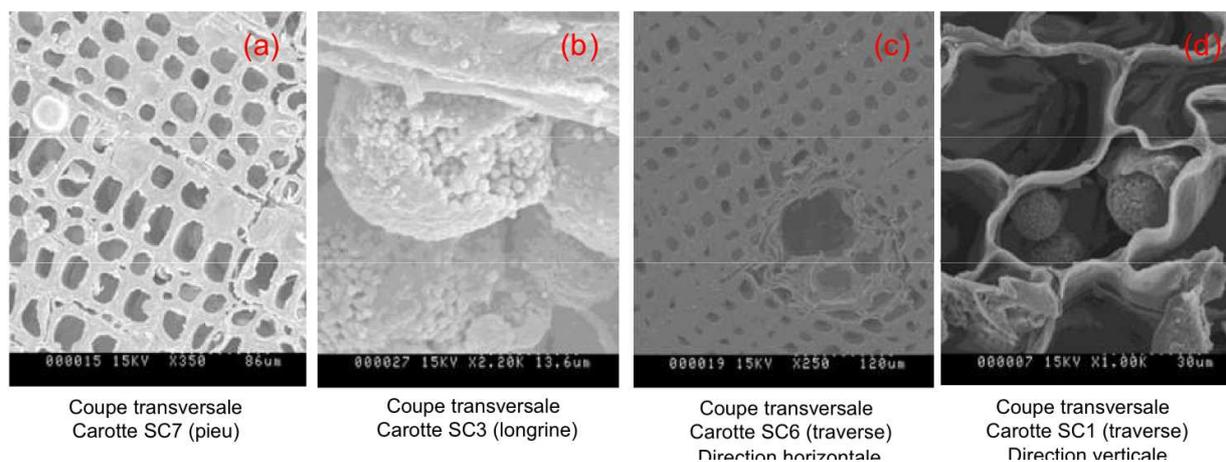


Figure 15. Coupe transversale des carottes SC7 (a), SC3 (b), SC6 (c) et SC1 (d)

Mesures d'infradensité

L'infradensité est le rapport de la masse anhydre sur le volume saturé. Elle donne des valeurs comparatives entre les trois éléments en bois (Tableau 1).

Tableau 1. Mesures d'infradensité des prélèvements

Eléments	Carottes	Infradensité (kg/m ³)
Pieu	SC7	544
	SC8	402
Longrines	SC3	223
	SC4	286
Traverses	SC1	213
	SC5	249
	SC6	457

Les mesures d'infradensité présentées dans le Tableau 1 ont corroboré les observations faites au microscope :

- Les prélèvements du bois des pieux ne présentent pas de dégradation notable ;
- Les prélèvements du bois des longrines présentent un état de dégradation important ;
- Le bois des traverses présente des états de dégradation variables selon les prélèvements.

Mesures d'activités enzymatiques

Les activités enzymatiques sont responsables de la dégradation des constituants du bois comme la cellulose et la lignine. Elles sont déterminées par dosage colorimétrique. Les résultats des mesures d'activités enzymatiques sont les suivants :

- L'activité de dégradation est élevée dans l'échantillon SC5 (traverses), mais n'est pas significativement différente des valeurs obtenues pour les autres échantillons et résulte probablement d'une attaque bactérienne ;
- De faibles activités enzymatiques ont été mesurées dans les échantillons les plus dégradés au niveau anatomique (carottes SC1 et SC3). Le développement des agents biologiques y a été probablement ralenti du fait de la diminution des ressources disponibles ;
- Enfin, aucune activité de dégradation significative n'a été mesurée sur les échantillons prélevés sur les pieux (SC7 et SC8).

En conclusion, les mesures d'activités enzymatiques ont conforté les observations de la microscopie et les mesures d'infradensité. Elles ont permis d'exclure une attaque fongique des pieux. Néanmoins, une activité bactérienne soutenue pendant un temps long a pu aboutir à une dégradation significative du bois. Cette dégradation s'est traduite par une perte de densité et donc de résistance mécanique. Elle a été observée sur les prélèvements des traverses et des longrines, mais pas sur ceux des pieux. Les pieux étant profondément enfouis, ils ont été sans doute soumis à un environnement différent et moins destructeur.

Enfin, les analyses des échantillons en laboratoire ont également montré qu'il n'existait plus d'activité biologique (activité enzymatique) dans les carottes prélevées sur les longrines et les pieux. Les dégradations de ces éléments en bois ont donc été antérieures à 2012 (année du prélèvement).

Les résultats des analyses des carottes ont donc permis d'apporter des résultats complémentaires aux mesures de poinçonnement. Les pieux en bois ne sont pas dégradés. A l'inverse, les longrines et les traverses présentent des états de dégradation avancés.

2.3 Conclusions de l'étude

Les conclusions de l'inspection des fondations en bois du viaduc sont les suivantes :

- Cette étude a permis, d'une part, d'appliquer le protocole d'inspection des fondations en bois. Les mesures de poinçonnement à l'aiguille permettent d'évaluer l'état de dégradation du bois. Les prélèvements et les analyses des carottes permettent d'approfondir ces résultats et de déterminer plus précisément l'état de dégradation du bois ;
- Les pieux en bois du viaduc des cent arches sont pérennes. Le grillage présente un état de dégradation avancé. Néanmoins, les risques de ruine de l'ouvrage par rupture du grillage sont faibles dans la mesure où les dégradations biologiques des traverses et des longrines sont antérieures à l'auscultation des fondations. Une surveillance de l'ouvrage à long terme (analyse des fissures de la maçonnerie, déchaussements de blocs, pose éventuelle d'inclinomètre) et du drainage des parcelles agricoles mitoyennes qui pourrait provoquer un rabattement de la nappe et une reprise des dégradations est néanmoins recommandée.

Conclusion

Ce livrable a détaillé un protocole d'inspection des fondations en bois élaboré aux Pays-Bas. La réalisation d'une fouille puis les mesures de poinçonnement à l'aiguille et les prélèvements de carottes permettent d'évaluer l'état de dégradation de ces fondations.

Ce guide a été appliqué lors de l'inspection des fondations du viaduc ferroviaire des cent arches dans la palue d'Arveyres. Le grillage et un pieu d'une des piles ont été mis à nus. Cette étude a montré que les pieux en bois du viaduc étaient pérennes, mais que le grillage présentait un état de dégradation avancé. Le protocole et sa mise en pratique ont par ailleurs été validés.

Références bibliographiques

Besserer A., Trouy M-C., (2013), Viaduc des cent arches – Analyse des prélèvements – ENSTIB, Non publié, 8 p

Norme NF P 11-300, (1992), AFNOR, Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières

Reynolds T., Bates P., (2009), The potential for timber piling in the UK, Ground Engineering, pp. 31-34