

MÉTHODE DE DIAGNOSTIC DE FONDATIONS SUR PIEUX BOIS

DIAGNOSTIC METHOD FOR TIMBER PILE FOUNDATIONS

Philippe Reiffsteck¹, Chi-Wei Chen², Bastien Sage-Vallier², Myriam Duc¹, Benoît Pebosc¹, François Lansac¹

¹ Université Gustave Eiffel, GERS-SRO, Champs sur Marne, France

² SNCF Reseau, Saint-Denis, France

RÉSUMÉ – L'évaluation de la portance résiduelle des fondations en bois des ponts en site aquatique nécessite le développement d'une méthodologie de diagnostic adaptée. Cet article décrit plusieurs exemples d'intervention sur le terrain ainsi que la méthodologie appliquée puis les résultats obtenus et leur impact sur la compréhension du fonctionnement de l'ouvrage.

ABSTRACT – The evaluation of the residual bearing capacity of timber bridge foundations in aquatic sites required the development of an adapted diagnostic methodology. Several examples of field interventions are detailed in this paper and the methodology developed is described. The results obtained and their implication on the understanding of the functioning of the structure are presented.

1. Introduction

La chronologie et le détail des étapes du protocole d'inspection du système de fondation sur pieux bois sont l'excavation au droit des pieux en bois pour avoir accès à la fondation, la classification géotechnique des sols présents autour des pieux, la mesure de la géométrie des fondations, l'évaluation de la qualité de la maçonnerie et du béton présents, la réalisation d'un test de poinçonnement ou de forage, la prise de photos, l'échantillonnage du bois à l'aide d'un carottier, la détermination du tassement de la tête des pieux basée sur les nivellements disponibles et enfin la caractérisation du niveau de la nappe phréatique. Quelques-unes de ces étapes sont détaillées et illustrées dans les paragraphes qui suivent tout en faisant un retour d'expérience sur les chantiers réalisés.

2. Description de la manière d'atteindre les pieux sur site

Des excavations au niveau de la fondation et à proximité de celle-ci doivent être réalisées sans mise en danger de celle-ci. La mise en place d'un plan de prévention et de sécurité peut être nécessaire. La largeur de la fouille doit être d'au moins 50 cm au niveau de la tête de pieu. Elle peut être inférieure à 50 cm en dessous de la tête. Toutefois, les pieux et les traverses doivent être bien visibles et accessibles. La Figure 1 présente un exemple "au sec" de puits d'accès avec blindage.

La difficulté des fondations en site aquatique est souvent l'épuisement de la fouille pour avoir un accès permettant de mettre en œuvre le protocole sans risque d'abîmer le matériel ou perdre les échantillons. À l'instar d'une inspection d'ouvrage d'art, l'opérateur doit rendre compte de l'état de la structure en :

- classant les sols autour des pieux pour évaluer les circulations d'eau et les fluctuations de la nappe durant le cycle saisonnier,
- localisant la zone inspectée et en mesurant les éléments accessibles de la fondation, si possible au regard des plans d'archive,
- en faisant une description la plus complète possible des déformations ou distorsion de l'ensemble ou des éléments de fondation en bois,

- et en décrivant la qualité du béton et de la maçonnerie immergée ou enterrée qui serait visible à cette occasion



Figure 1. Blindage d'un puit d'accès en pied de culée

3. Évaluation de l'état des pieux par des essais de pénétration par poinçonnement ou perçage

Dans un premier temps, il s'agit de mettre en œuvre une des deux méthodes d'évaluation de la profondeur de dégradation soit avec un essai de poinçonnement, soit avec un essai de perçage. Ensuite, un prélèvement d'échantillons est réalisé. La méthode de poinçonnement est privilégiée en Hollande alors que la méthode de forage trouve un fort public aux États Unis d'Amérique du Nord et l'Australasie.

3.1. Évaluation par poinçonnement

Les tests de pénétration réalisés sur les fondations sont faits avec un matériel similaire à un scléromètre (Figure 2a). Les essais sont faits dans un plan perpendiculaire à la génératrice des pièces. Le protocole consiste à tester les pieux à trois reprises à 15 cm sous la connexion entre 15 et 45cm ou sous la maçonnerie ou la poutre en béton.

Il est souhaitable, par exemple en cas d'incertitude sur le niveau de l'eau souterraine, sur la qualité de l'eau souterraine ou lors de la période sèche (étiage), d'effectuer un test environ 15 cm en dessous du niveau de la nappe (voir même 15 cm encore en dessous). Si l'opérateur juge que la dégradation du bois est trop importante en fonction de la profondeur, il peut décider de réaliser des tests complémentaires.



Figure 2. (a) appareil de poinçonnement (b) appareil de prélèvement

Chacune des traverses et longrines fait l'objet d'un test. Chaque élément est pénétré au moins 3 fois lors du test et la distance minimale entre les points d'essais est de 10 cm. Les tests doivent être effectués à différents endroits afin de ne pas rencontrer uniquement des nœuds et les résultats des tests présentant des valeurs absurdes ne seront pas retenus dans l'évaluation. De plus, les tests réalisés sur des éléments autres que les pieux comme le grillage doivent l'être à une distance minimale de 20 cm en dessous de la tête des pieux. Les profondeurs de dégradation (radiales) mesurées sont utilisées pour définir les zones de prélèvement.

3.2. Évaluation par forage (perceuse instrumentée)

Depuis les années quatre-vingt, la mesure de résistance par forage a été étudiée afin d'obtenir une caractérisation du matériau bois en profondeur. Le Naour et Morlier (1991) et Le Naour (1988) ont posé le principe d'une perceuse instrumentée (Figure 3). Ils ont étudié la vitesse de pénétration et le couple de perçage, à poussée et vitesse de rotation, constantes. Leur analyse s'est orientée vers des critères d'énergie visant à caractériser la relation entre le travail nécessaire pour transformer l'unité de volume de bois en copeaux avec la contrainte de rupture du bois.

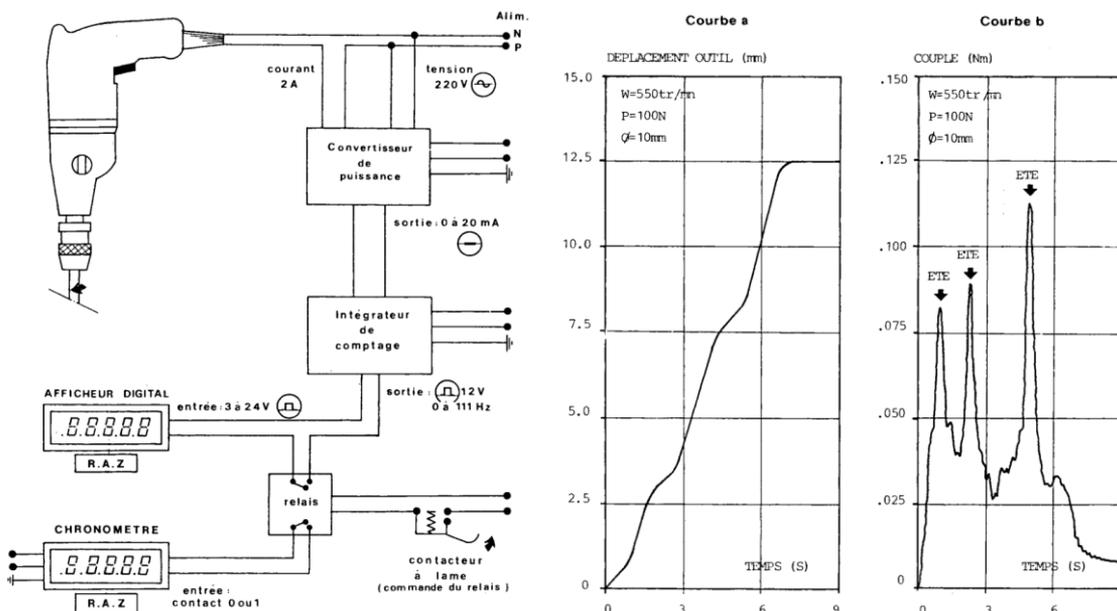


Figure 3. (a) schéma de l'instrumentation, (b) exemple d'enregistrement (Le Naour et Morlier, 1991)

Cette technique offre donc l'avantage de pouvoir observer en profondeur les pieux et de détecter d'éventuelles fissures ou vides intérieurs du bois. Cette technique a été popularisée à l'étranger par un auteur allemand qui a eu la même idée (Rinn, 1988 ; Gao et al., 2017).

Plus récemment, le département de l'agriculture des États Unis d'Amérique du Nord a mené une étude de validation de la perceuse instrumentée IML RESI F300-S (Brashaw, et al., 2005). Des poutres en bois d'un pont ont été sciées et percées pour comparer l'inspection visuelle à la mesure. Selon les auteurs, l'outil permet de déterminer avec précision la présence de pourriture dans les éléments de structure en bois. Cependant, ces données sont limitées au lieu de forage. L'outil peut localiser avec précision un défaut interne (poche de pourriture ou fente) dans la section transversale de l'élément. Cela peut être avantageux pour l'évaluation de l'état et la détermination de la charge.

La perceuse instrumentée IML RESI Power Drill que nous avons mis en œuvre dans cette étude est une évolution de cette dernière. La longueur du foret doit être adaptée à l'objet à observer. Pour les pieux en bois d'environ 15 à 20 cm de rayon, nous avons

employé un foret en acier de maximum 305 mm de long et d'un diamètre de 1,5 mm à 3,0 mm qui pénètre la structure en bois à une vitesse de pénétration (ici 100mm/mn) et une vitesse de rotation (ici 2500 rpm) uniformes tandis que la résistance au perçage est mesurée.



Figure 4. Résistomètre

La Figure 5 donne un exemple de mesure réalisée avec la courbe de couple (drilling curve) et de poussée (feed curve) révélant les variations de densité à l'intérieur des cernes du billon causées par les zones de bois précoce et de bois tardif. Les courbes sont données en pourcentage de l'amplitude maximale des capteurs de l'appareil soit le couple et la poussée. La mesure de couple inclut le couple pour le forage du bois mais également le frottement sur la tige de la mèche. Si un frottement important est mesuré, les courbes sont inclinées.

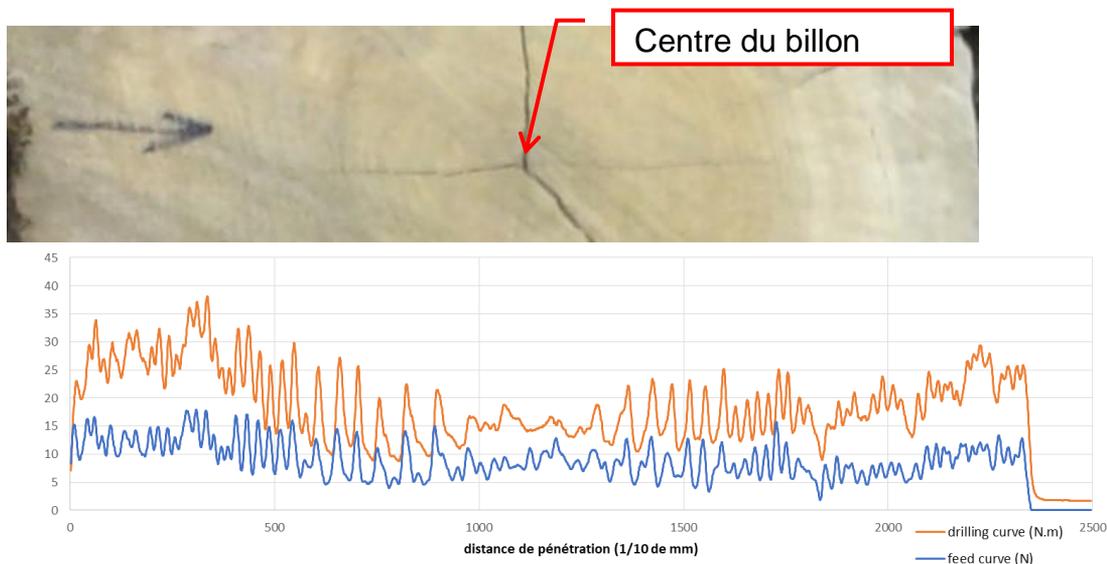


Figure 5 : Exemple de courbes pour un billon de pin (C Pin b 6)

Dans le cas idéal d'un forage dans la direction radiale (perpendiculaire aux cernes de croissance), les paramètres des cernes de l'arbre dans le bois sec révélés par les diagrammes ont montré d'excellentes correspondances avec ceux révélés par les diagrammes de densité des rayons X, tant qualitativement que quantitativement (Gao et al., 2017). On observe bien ces cernes sur la Figure 5.

4. Prélèvements d'échantillons et analyse microscopique

Le prélèvement d'échantillon est effectué avec un appareil de forage d'un diamètre intérieur de 10 mm, de préférence jusqu'au cœur du pieu (Figure 2b).

4.1. Prélèvement

Le nombre d'échantillons prélevés doit être représentatif de la fondation inspectée : les dommages, l'épaisseur des pieux, la détérioration des pieux doivent y figurer.

L'emplacement de l'échantillonnage doit être au plus près du test de pénétration et situé à environ 15 cm en dessous de la base de la longrine du platelage, de la connexion ou de la poutre en béton, selon le cas. L'échantillon prélevé est immédiatement placé dans un microtube (par exemple Eppendorf) et plongé dans l'eau du site, stocké et refroidit le plus rapidement possible (température entre 1 et 8°C). De retour au laboratoire, l'eau du site sera substituée par un produit de conservation : l'éthanol 50%.

4.2. Préparation

L'analyse passe par une première phase de préparation puis une seconde phase d'observation (Harroué et al., 2011). Lors de la phase de préparation, la section transversale de l'échantillon est découpée en fines lamelles de 20 µm d'épaisseur. Puis les différentes étapes suivantes doivent être suivies :

- Imprégnation des micro-carottes après déshydratation (Éthanol 50% pendant 4h, 70%-4h, 90%-3h, 95%-1h30, 100%-3h, Histo-clear-4h30, paraffine 60°C-1h30, paraffine 62°C-1h30) ;
- Enrobage et fixation dans la cassette ;
- Dégrossissage, trempage dans l'eau distillée et coupes anatomiques 5 µm ;
- Coloration.

Durant la phase d'observation, la structure du bois, la cause de dégradation et la présence de matières agressives sont analysées avec un microscope optique. L'annexe B est utilisée pour qualifier l'état de dégradation. Ainsi, la nature du bois peut être déterminée et la distinction entre les organismes primaires, secondaires et colonisant, effectuée.

4.3. Observations au microscope optique

Les coupes anatomiques sont observées à l'aide d'un microscope optique et une classification du niveau de dégradation pour les bois résineux et feuillus est décrite dans une fiche de référence. Les images obtenues après les découpes au microtome devront être comparées à celles des images de référence. Les images de la Figure 6 montrent un échantillon de pin sain aux échelles classiquement utilisées. Ces observations permettent de qualifier la dégradation en préciser l'origine et anticiper les caractéristiques résiduelles (Klassen, 2008).

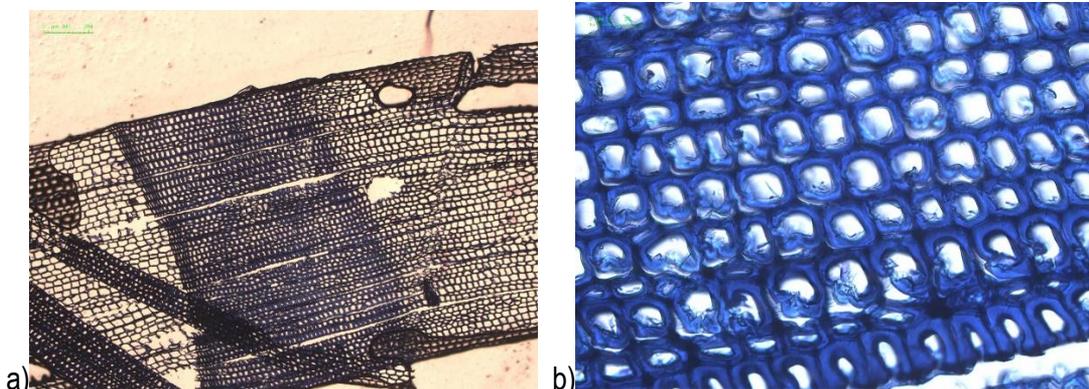


Figure 6 : Image au microscope d'un échantillon de pin sain (a) grossi 50 fois et (b) 400 fois

5. Application au recalcul

Le diamètre $B_{pi;d}$ à prendre en compte dans le calcul de capacité portante décrit par Reiffsteck (2019) et défini pour les tronçons de 1 à j situés en zone de marnage sera alors celui du pieu diminué des profondeurs maximales déduites de l'inspection ou du taux de dégradation. Dans le cas où l'on désire calculer la capacité portante à une échéance donnée, on estime une dégradation homogène sur la périphérie.

$$B_{pi;d;t+\Delta t} = B_{pi;d;t} - d_{\Delta t} \quad (1)$$

La vitesse r supposée constante, est donnée par l'additif à la norme NF P 94-262 et une évaluation prudente de t_{retard} est de 1 an (IFSTTAR, 2014).

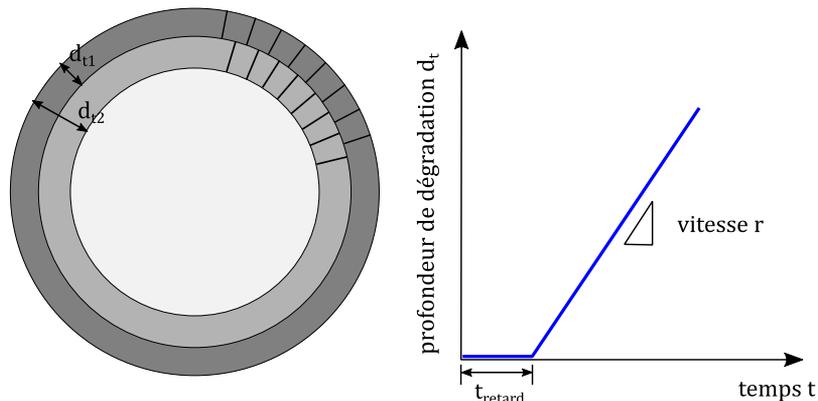


Figure 7 : Modèle idéalisé de l'évolution de la dégradation dans le temps

Cette évaluation est validée par l'analyse des résultats des essais de poinçonnement et forage et des observations au microscope. En appliquant ce type de modèle simple à l'exemple d'un pieu en pin chargé à 100 kN dans un sol intermédiaire, on observe une élévation de la contrainte en fonction de la dégradation. Cette évolution est représentée dans la Figure 8 pour quatre diamètres : 17, 20, 25 et 30 cm.

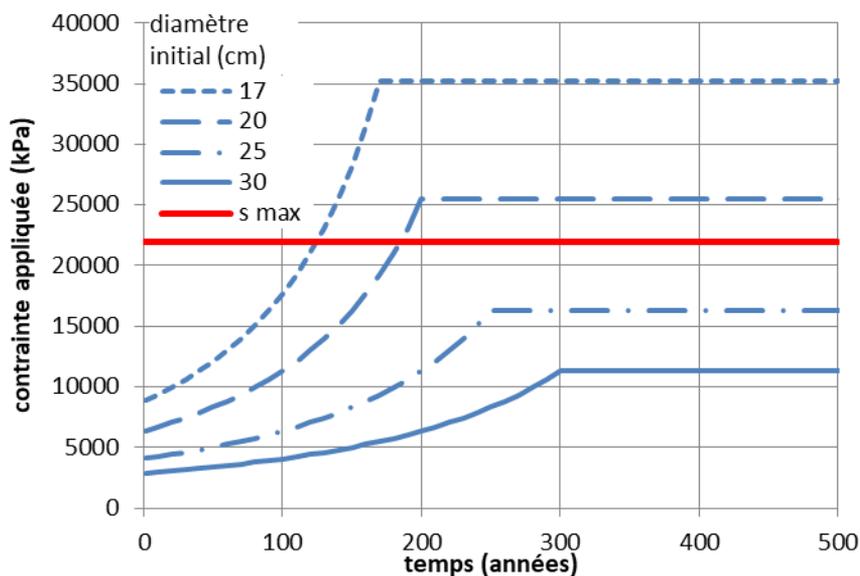


Figure 8 : Évolution de la contrainte dans un pieu en fonction de la dégradation dans le temps pour différents diamètres

Ainsi un pieu de 17 cm de diamètre, pour un t_{retard} nul, verrait sa contrainte dépasser, en une centaine d'années, la contrainte admissible du fait de sa diminution de section. Les

plateaux correspondent à 50 % du diamètre et la limite s_{\max} correspond à la contrainte de compression axiale maximale donnée par la norme EN338 (ligne rouge).

Un t_{retard} de 1 an, pour un pieu de diamètre 20 cm en pin avec une épaisseur de cerne moyenne de 3 mm, retarde la pénétration sensiblement. La contrainte admissible serait atteinte 100 ans plus tard.

La détermination des zones figurées dans le graphique est basée sur des caractéristiques moyennes du bois et sur le rapport entre le diamètre du pieu et la charge appliquée (pour un diamètre de 100 mm, la charge appliquée est de 30kN, pour un diamètre de 150 mm, la charge appliquée est de 60 kN et pour des diamètres de 200 et 250 mm, les charges appliquées sont respectivement de 110 et 160 kN).

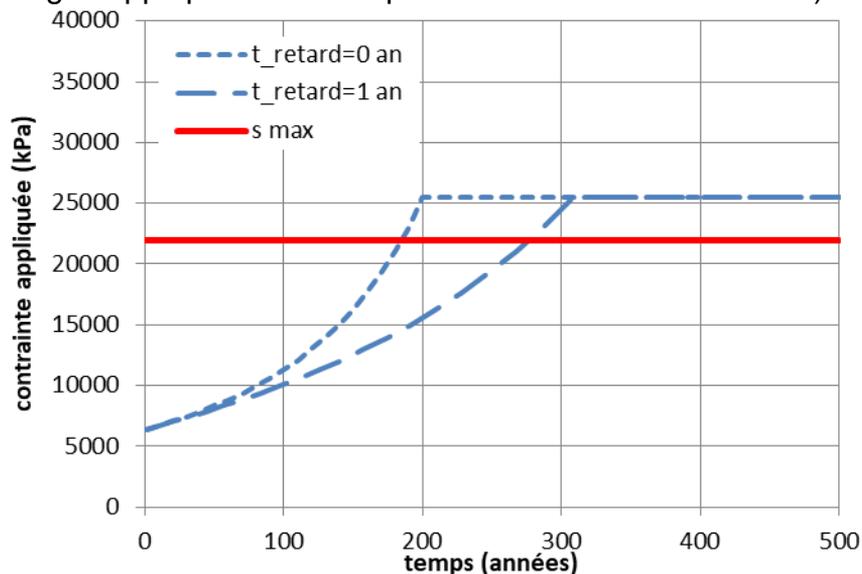


Figure 9 : Comparaison des résultats du modèle avec prise en compte ou non d'un temps de retard (pour diamètre 20 cm)

6. La prise en compte des pieux bois dans les Eurocodes

La prise en compte des pieux en bois dans l'Eurocode 7 n'a pas vraiment évolué entre l'ancienne génération et la nouvelle. Le bois est considéré comme un matériau et un type de pieu, mais les géotechniciens ne considèrent aucun aspect spécifique comme sa géométrie nécessitant des aboutages, sa nécessaire interaction avec l'eau du sol et sa dégradabilité. À contrario, l'Eurocode 5 sous la pression des praticiens hollandais a introduit des éléments dédiés. La vraie nouveauté vient d'un texte qui a eu le titre de chapitre puis maintenant d'annexe mais qui n'a probablement pas vocation de disparaître dans l'Eurocode 5. Les caractéristiques géométriques ainsi que les résistances sont précisées.

7. Conclusions

Cette communication a présenté le protocole d'inspection et les outils à même de tester les pieux en bois utilisés pour les fondations d'ouvrages. Cette mise à jour du protocole d'inspection proposé lors de l'édition de l'additif PieuxBois à la NF P 94-262 permet d'aider au recalcul simple des fondations sur pieux en bois en site aquatique.

8. Références bibliographiques

Brashaw, B. K.; Vatalaro, R.J.; Wacker, J.P.; Ross, R.J. 2005. Condition Assessment of Timber Bridges: 1. Evaluation of a Micro-Drilling Resistance Tool. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-159. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 8 p.

- Christin J., 2013, Système de fondation sur pieux bois : une technique millénaire pour demain, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Marne la Vallée, pp.160-163956
- Gao S., Wang X., Wiemann M.C., Brashaw B.K., Ross R.J., Wang L. (2017) A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees *Annals of Forest Science* 74:27, 13 pages, DOI 10.1007/s13595-017-0623-4
- Harroué, M.; Cornu, E. et Rathgeber, C. (2011). Méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons pour l'étude de l'activité cambiale et de la formation du bois. *Cah. Tech. Inra* 73:45-62.
- IFSTTAR, 2014, Additif pieux en bois à la NF P 94-262, 2014, Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7- Fondation profondes
- Klaassen, R. K. W. M. (2008). Bacterial Decay in Wooden Foundation Piles - Patterns and Causes: A Study of Historical Pile Foundations in the Netherlands. *International Biodeterioration & Biodegradation* 61(1):45–60.
- Le Naour F. (1988) Une méthode de reconnaissance du bois : le perçage, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux 1,
- Le Naour F., Morlier P. (1991) Le foramètre : un outil de reconnaissance mécanique du bois, *Ann Sci For*, 48, 47-61
- Reiffsteck, P. (2019). Fondations sur pieux en bois en milieu aquatique, Contrat SNCF, Rapport d'étude RP3-E19046, 225p.
- Rinn, F (1988) A new method for measuring tree-ring density parameters. Physics diploma thesis, Institute for Environmental Physics Heidelberg University
- Van de Kuilen, J.-W.G, 2006, Service life modelling of timber structures, *Materials and Structures*, pp.154-157
- Wang T.-Y., 2019, Investigation et calcul des ouvrages anciens sur fondations en bois : effets de groupe, Rapport de M2, MSROE-ENPC, 38 pages
- Zalada-Tumialan G., Konicki W., Westover P., Vatovec M., 2013 Untreated submerged timber pile foundations, Part 1 : Understanding biodegradation and compressive strength, *Structure Forensics*, 9-11
- Zalada-Tumialan G., Konicki W., Westover P., Vatovec M., 2014 Untreated submerged timber pile foundations, Part 2 : Estimating remaining service life, *Structure Forensics*, 10-13