



IFSTAR

enstib

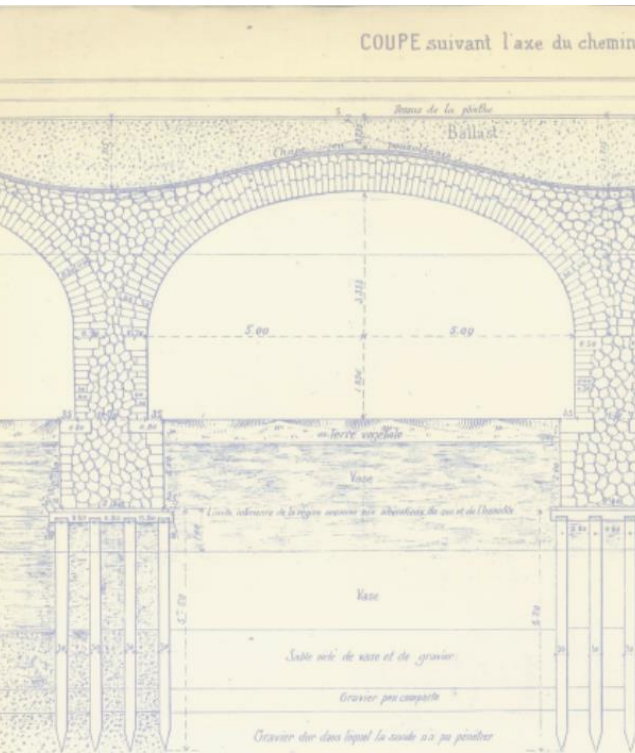
GROUZEL
Scierie

BatiPlus
Contrôle et Vérifications
Techniques

CANONICA
CARTIGNIES
ARCHITECTES

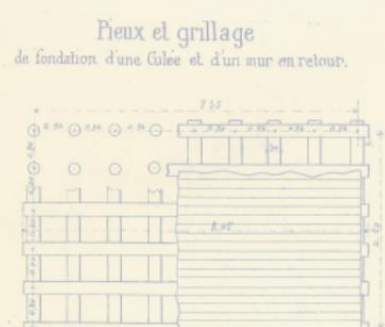
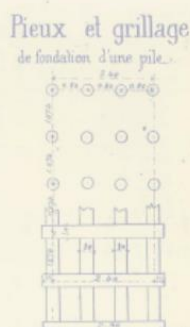
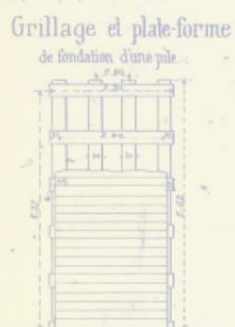


Projet Pieux Bois



Rapport général

Septembre 2013



Fiche signalétique

Titre du projet	Pieux Bois
Convention	DGITM n°09242 28/12/2009
Date de début	09/02/2010
Date de fin	09/02/2013
Groupement	
	Chef de projet
Nom, prénom	REIFFSTECK Philippe (directeur de recherche)
Organisme	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
Adresse	14-20 Boulevard Newton Cité Descartes, Champs sur Marne F-77447 Marne la Vallée Cedex 2
Tel, Fax	01 81 66 80 00
Courriel	philippe.reiffsteck@ifsttar.fr
	Partenaire 1
Nom, prénom	BOCQUET Jean-François (maître de conférence)
Organisme	LERMAB
Adresse	ENSTIB 27, rue du Merle Blanc BP 1041 88051 EPINAL Cedex 9
Tel	03 29 29 61 11 - 03 29 29 61 38
Courriel	Jean-Francois.BOCQUET@enstib.uhp-nancy.fr
	Partenaire 2
Nom, prénom	CARTIGNIES Alain (architecte)
Organisme	Cartignies-Canonica Architectes
Adresse	7 Rue Joffre 88600 Bruyères
Tel	03 29 50 12 77 – 03 29 50 16 63
Courriel	cartignies-canonica@wanadoo.fr
	Partenaire 3
Nom, prénom	GROUAZEL Jean-Pierre (Directeur)
Organisme	Grouazel SARL
Adresse	Zone Artisanale Plaisance 35133 St-Sauveur des Landes
Tel	02 99 98 81 15 – 02 99 98 80 28
Courriel	jpg@grouazel.fr
	Partenaire 4
Nom, prénom	YANEZ Adolfo (ingénieur)
Organisme	Batiplus SA
Adresse	Parc Descartes – Nobel, 25, rue Alfred Nobel, 77420 Champs-sur-Marne
Tel	01 64 61 88 52 – 01 64 61 69 92
Courriel	adolfo.yanez@batiplus.net

Résumé

Dans le cadre de l'appel à projet C2D2, l'IFSTTAR accompagné du laboratoire du bois LERMAB de l'ENSTIB d'Épinal et de la scierie Grouazel, du bureau de contrôle Batiplus et du bureau d'architecture Cartignies Canonica, a piloté un projet ayant pour ambition de redonner ses lettres de noblesse à la technique des pieux en bois. Le projet PieuxBois a créé les conditions nécessaires à l'émergence d'une expertise nationale sur le dimensionnement et la durabilité des pieux bois, au cours ou à la suite du projet. L'étude combinée des processus fondamentaux et l'étude sur sites réels et expérimentaux (incluant mesure et surveillance) ont été les points forts du projet mais les avancées en découlant ont conduit également à une meilleure maîtrise du comportement mécanique et physico-chimique et des risques par l'élaboration de méthodologies, dispositions constructives, grilles et critères aidant à établir des diagnostics de vulnérabilité des ouvrages anciens et à dimensionner des ouvrages neufs.

En cours de projet, plusieurs partenaires ont rejoint le projet PieuxBois en apportant leurs problématiques liés à la gestion d'un patrimoine important d'ouvrages : SNCF et GPMR. Développé avec le soutien de la région Aquitaine, un projet régional a vu le jour en complément du projet C2D2. Piloté par l'entreprise de travaux Sud-Fondation filiale GTS, il a rassemblé le CETE du Sud-Ouest et son laboratoire de géotechnique, l'université Bordeaux 1 et son laboratoire le I2M ainsi qu'un négociant, la société Boispays. Grâce à ces différents acteurs des deux projets, des expérimentations ont été menées sur les terrains du port de Rouen (Seine Maritime) et sur le site expérimental de Cubzac-les-Ponts (Gironde), portant au total sur une quinzaine de pieux. Ceux-ci ont été instrumentés avant d'être battus, afin de tester les dispositions constructives, l'aboutage et de mesurer le frottement latéral à différentes profondeurs, et ceci dans trois types de sols (limon sable, argile). Différentes essences ont ainsi été testées.

Les résultats collectés ont été complétés par des essais de pieux issus de la bibliographie et d'une base de données américaine. Cette centaine de pieux a servi à caler les différents coefficients à utiliser dans le cadre d'une application de la norme d'application de l'Eurocode pour les fondations profondes (NF P94-262).

Les mêmes essences ont subi, en laboratoire, un processus de vieillissement accéléré avec ensemencement fongique afin de définir des lois de dégradation propres à renseigner sur l'épaisseur sacrificielle à anticiper lors d'un dimensionnement. L'évaluation du profil d'humidité dans les pieux autour de la zone de marnage a été réalisée à intervalles réguliers par une méthode non destructive de tomographie par IRM. La corrélation de la perte de masse observée avec les paramètres mécaniques en fonction de l'essence testée a permis de compléter les données de la bibliographie.

Ce document a été élaboré dans le cadre du projet C2D2 PieuxBois avec le soutien du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat (DGITM). Il comporte un seul volume de 31 pages consacré à la synthèse des activités et réalisation du projet.

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		
Philippe REIFFSTECK	IFSTTAR	philippe.reiffsteck@ifsttar.fr
Co-auteurs		
Jérôme CHRISTIN	IFSTTAR	jerome.christin@ifsttar.fr
Alain LE KOUBY	IFSTTAR	alain.lekouby@ifsttar.fr
Adolfo YANEZ	BATIPLUS	Adolfo.yanez@batiplus.net
Jean-Pierre GROUAZEL	GROUAZEL	jpg@grouazel.fr
Alain CARTIGNIES	CARTIGNIES-CANONICA	cartignies-canonica@wanadoo.fr
Quentin KLEINDIENST	LERMAB	quentin.kleindienst@hotmail.fr
Jean-François BOCQUET	LERMAB	jean-francois.bocquet@univ-lorraine.fr
Laurent BLERON	LERMAB	laurent.bleron@univ-lorraine.fr
Marie-Christine TROUY	LERMAB	marie-christine.trouy@univ-lorraine.fr
Romain REMOND	LERMAB	romain.remond@univ-lorraine.fr
Arnaud BESSERER	LERMAB	arnaud.besserer@univ-lorraine.fr

Sommaire

1	<i>Introduction - Historique des fondations sur pieux en bois</i>	3
2	<i>Genèse du projet et déroulement.....</i>	5
2.1	Motivations du projet PieuxBois	5
2.2	Proposition et organisation du projet PieuxBois	6
2.3	Déroulement du projet et apparition du projet en région.....	7
3	<i>État des lieux.....</i>	7
3.1	Cadre général, filière bois et ressource visée.....	8
3.2	Historique des méthodes de construction et niveau technologique atteint	8
4	<i>Plots expérimentaux et base de données</i>	9
5	<i>Méthode de dimensionnement pour le renouveau.....</i>	11
5.1	Les méthodes de dimensionnement des pieux en France et à ailleurs	12
5.2	Proposition d'une méthode adaptée	12
6	<i>Techniques d'inspection</i>	13
7	<i>Durabilité et maîtrise de la dégradation</i>	14
8	<i>Retombées du(es) projet(s)</i>	17
8.1	Livrables	17
8.2	Audit des livrables par les évaluateurs du Ministère	17
8.2.1	Sur le rapport 1 – Généralités et état de l'art.....	17
8.2.2	Sur le rapport 2 – Instrumentation et essais de chargement de pieux en bois.....	18
8.2.3	Sur le rapport 4 – Étude de la dégradation de pieux en bois	21
8.2.4	Sur le rapport 5 – Guide d'inspection des fondations en bois des ouvrages	23
8.3	Valorisation	23
8.3.1	Publications.....	23
8.3.2	Évènements	23
8.3.3	Articles dans la presse professionnelle.....	23
8.3.4	Prix	24

9 ***Bibliographie choisie***..... **24**

10 ***Liste des annexes*** **26**

1 Introduction - Historique des fondations sur pieux en bois

Si les fondations superficielles existèrent de tout temps lorsque l'Homme décida de construire, l'histoire des fondations en « mauvais sol » est plus révélatrice des évolutions. Les premières civilisations lacustres eurent besoin dès le néolithique, pour fonder leurs cités de pilotis en bois sans aucun doute battus à la force humaine. Une des plus vieilles références se trouve dans la Bible par une évocation des pieux en cèdre employés à Babylone.

Plus près de nous, les celtes de la civilisation de la Tène employaient cette technique pour construire des ponts comme à Cornaux (Suisse) où un ouvrage d'environ 2,8 m de large et 90 m de long fut trouvé. La datation dendrochronologique d'un pieu indique une construction vers 300 av. J.-C. et les restes d'un chariot une destruction après 93 av. J.-C. Deux rangées de pieux de chêne de 20 cm de diamètre distantes de 2,4 m étaient renforcées par des pieux obliques formant contrefort de chaque côté. La distance entre les seize à vingt piles variait de 4,5 m à 5 m. Les longerons qui reliaient les piles portaient un tablier large d'environ 3 m constitué de rondins entrecroisés sur deux couches, recouvert de branchages, lestés par de grosses pierres qui ont été retrouvées dans la couche de destruction (V. Kruta, Les celtes, Ed. Robert Laffont).

L'amélioration des techniques et leur systématisation fut sans aucun doute l'œuvre des ingénieurs romains. On trouve dans « *Bella gallica* » de Jules César une description du pont sur le Rhin entre Coblenze et Cologne en 55 av. J.-C. (*Bellum Gallicum*, IV,17) (Figure 1). « Voici le nouveau procédé de construction qu'il employa. Il accouplait, à deux pieds l'une de l'autre, deux poutres d'un pied et demie d'épaisseur, légèrement taillés en pointe par le bas et dont la longueur était proportionnée à la profondeur du fleuve. Il les descendait dans le fleuve au moyen de machines et les enfonçait à coup de mouton, non point verticalement, comme des pilotis ordinaires, mais obliquement, inclinés dans la direction du courant ; en face de ces poutres, il en plaçait deux autres, jointes de même façon, à une distance de quarante pieds en aval et penchées en sens inverse du courant. Sur ces deux paires on posait des poutres larges de deux pieds, qui s'enclavaient exactement entre les pieux accouplés, et on plaçait de part et d'autre deux crampons qui empêchaient les couples de se rapprocher par le haut ; ceux-ci étant ainsi écartés et retenus chacun en sens contraire, l'ouvrage avait tant de solidité, et cela en vertu des lois de la physique, que la violence du courant était grande, plus le système était fortement lié. On posait sur les traverses des poutres longitudinales et, par dessus, des lattes et des claies. En outre, on enfonçait en aval des pieux obliques qui, faisant contrefort, appuyant l'ensemble de l'ouvrage, résistaient au courant ; d'autres étaient plantées à une petite distance en avant du pont : c'était une défense qui devait, au cas où les Barbares lanceraient des troncs d'arbres ou des navires destinés à le jeter bas, atténuer la violence du choc et préserver l'ouvrage. » On ignore le régime du Rhin dans la région considérée mais on peut estimer que sa largeur avoisinait 400 à 450 m, sa profondeur 5 à 6 m et sa vitesse 1,40 à 1,70 m/s. Le pont qui comportait 12 travées a été construit selon César en ... dix jours. Les techniques celte ou romaine sont donc très similaires.

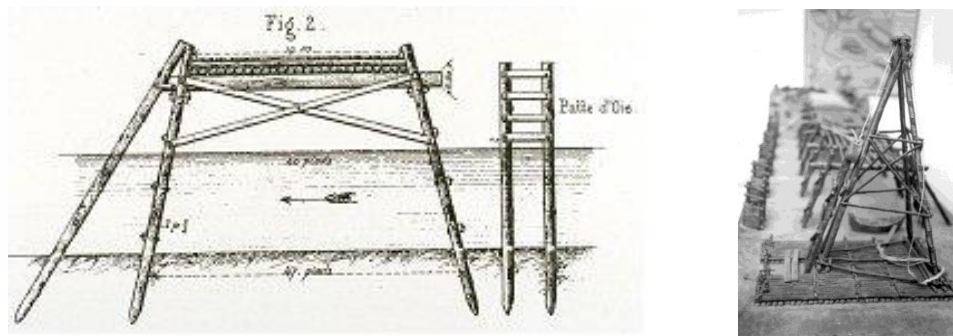


Figure 1 : Reconstitution des fondations sur pieux du pont sur le Rhin (Atlas de Napoléon III) et mode de mise en place (musée de la civilisation romaine - Rome)

Mais c'est dans *De Architectura* écrit par Vitruve, contemporain d'Auguste, que l'on trouve les premières traces écrites de « règles de dimensionnement » qui perdureront jusqu'à la révolution industrielle (livre III chapitre III de la traduction que Claude Perrault réalisa pour Louis XIV en 1673). « Il faut que les Fondemens soient creusés dans le folide, ou jusqu'au folide autant que la grandeur de l'Édifice le requiert. (...) Que si on ne peut aller jusqu'à la terre ferme, & que l'on pourra, y ficher des Pali Sublica (Pilotis) de bois d'aune, d'olivier ou de chefne un peu bruflez & les enfoncer avec des machines fort près à près : ensuite emplir de charbon les entre-deux des pilotis & bastir dans toute la tranchée qui aura été creufée, une maçonnerie tres solide. » On voit ici que les dispositions constructives des fondations profondes sont esquissées.

Bélibidor au XVIIIème siècle préconisait dans « *Science des Ingénieurs* » d'utiliser également des pieux en bois tout en améliorant la liaison avec la superstructure par des voûtes de décharges pesant sur le sol.

Il ajoute que l' « On doit proportionner le nombre de ces pilots à la charge qu'on leur donne à porter comme à la nature plus ou moins consistante du sol. » Plus tard, Rondelet précisera les différents types de fondations intégrant des pieux en bois en décrivant le radier et la fondation mixte.

Cette technique fut encore utilisée jusqu'au XIXème siècle et on ne compte plus les ouvrages du patrimoine bâti français classés patrimoine national ou monuments historiques fondés sur pieux en bois : château de Chambord, Grand Palais, corderie royale de Rochefort, bâtiments, nombreux ponts routiers dans les villes Françaises et ponts ferroviaires.



Figure 2 : Pont Wilson à Tours, 1978. Effondrement du tablier dû à un affouillement des piles.

Dans le contexte urbain moderne où des rabattements de nappe sont réalisés de manière inconsidérée ou involontaire (pompage à Paris et ailleurs, dragage à Tours, barrages mais parfois conséquence des sècheresses successives induites par le réchauffement climatique), les pathologies des bâtiments des centres urbains anciens, des monuments historiques et des ouvrages de franchissement routiers (Figure 2) ou ferroviaires comme les ponts en maçonnerie sont principalement dues au pourrissement du bois de leurs fondations lorsque celles-ci sont soumises à des alternances de sécheresse et d'humidité (Klaassen, 2008a ; Bjordal et al., 2000). Le bois est également attaqué par les animaux (notamment les tarets), d'où la nécessité d'une protection efficace (avec des produits polluants comme le créosote), l'enduit superficiel au goudron étant insuffisant (arrachement pendant le battage). Les fondations doivent alors le plus souvent être renforcées par l'ajout de nouveaux supports.

La question posée est alors simple : cette solution de fondation qui a montré sa robustesse, sa durabilité, qui a accompagné le génie urbain de plusieurs empires sur des siècles est-elle totalement en déphasage avec les besoins moderne d'une société où la quête du développement durables est au cœur de la démarche de la croissance raisonnée?

Nous allons présenter ci-après les éléments de réponse qui ont été l'aboutissement des travaux du projet PieuxBois.

2 Genèse du projet et déroulement

2.1 Motivations du projet PieuxBois

Les pieux en bois sont la technique de fondation profonde dont nous possédons les preuves de la plus grande antériorité et pour certains ouvrages de la plus grande longévité (plus de 2500 ans) comparativement aux pieux en acier ou en béton et pour laquelle le cadre réglementaire est inexistant sur le territoire français. Seuls des pays comme les Pays Bas avec la NEN 5491, le Canada avec le Canadian Foundation Engineering Manuel écrit sous l'impulsion de la Canadian Geotechnical

Society ou aux États-Unis d'Amérique avec le Timber Pile Design and Construction Manual publié par l'American Wood Preservers Institute ont mis en place un cadre réglementaire adapté. Actuellement 200.000 pieux en bois non traités sont mis en œuvre annuellement aux Pays Bas et tout récemment le British Research Establishment a réalisé une étude sur le potentiel des pieux en bois sur le territoire du Royaume Uni et a conclu à la viabilité technique et économique de ce produit en insistant sur son intérêt environnemental indéniable (Dewar et Watson, 2007 ; Reynolds et Bates, 2009) car contrairement aux autres techniques la fabrication du pieu est plus consommatrice de CO₂ que génératrice. En effet, les 32 millions de pieux présents dans le sol des Pays Bas sont équivalents à 8 millions de tonnes de CO₂ extraits de l'atmosphère (Klaassen, 2008b). Pour ce calcul, les dimensions caractéristiques d'un pieu sont 10 mètres de longueur et 25 cm de diamètre, 1 m³ de bois sec pèse 500 kg et 1 g de bois sec est équivalent à 1 g CO₂.

Malgré un parc français important d'ouvrage bâtis sur pieux bois, le retour d'expérience est faible et non capitalisé sur la portance résiduelle et la dégradation de ces ouvrages. On citera à titre d'exemple le choc vécu lors de l'effondrement du pont de Tours dû à la dégradation des pieux consécutive au creusement du lit par extraction des matériaux entraînant l'abaissement du niveau d'eau de la Loire. Choc qui n'a pas été vraiment suivi de développement d'expertise durable (SETRA-LCPC, 1980).

2.2 Proposition et organisation du projet PieuxBois

Dans le cadre de l'appel à projet C2D2, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (devenu par la suite IFSTTAR) accompagné du laboratoire du bois LERMAB de l'ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois) d'Épinal et de la scierie Grouazel, du bureau de contrôle Batiplus et du bureau d'architecture Cartignies Canonica, a déposé un projet ayant pour ambition de redonner ses lettres de noblesse à cette technique.

Le groupement candidat à l'appel d'offre a été constitué volontairement à partir d'entreprises de taille moyenne et implantées localement et ne comprenait pas d'entreprise de fondations spéciales pour plusieurs raisons :

- la mise en œuvre des pieux bois n'est pas un écueil technologique : les techniques de battage et de vibrofonçage existent déjà, c'est comme l'état de l'art le montre, la durabilité qui est le véritable verrou technologique à lever,
- le marché actuel est confidentiel et sa croissance passe par la réalisation de projet exemplaire au point de vue technique et environnemental mais aussi insertion locale,
- la taille du groupement doit également être un exemple incitatif pour de futurs projets.

Le contexte du projet est d'un côté celui d'une expertise scientifique et technique quasi-inexistante actuellement sur la scène nationale et d'un autre celui d'une expertise internationale mature tournée vers des problématiques différentes de celles intéressant le territoire français. Le projet devait donc créer les conditions nécessaires à l'émergence de cette expertise nationale sur le dimensionnement et la durabilité des pieux bois, au cours ou à la suite du projet. De plus, ce projet trouvait parfaitement sa place dans la « croissance verte » prônée par le MEDDE par le faible coût énergétique de la technique étudiée.

La démarche choisie pour arriver à cet objectif a été de mettre en œuvre des approches pluridisciplinaires : approche mécanique et approche physico-chimique des sols et du bois en interaction avec l'eau mais également étude de l'aspect socio-économique et étude du risque, générant ainsi des acquis de connaissances scientifiques au profit d'une aide à la décision et au dimensionnement (American Wood Preservers Institute, 2002 ; Bustamante et Gianceselli, 1981 ; Bustamante et Jézéquel, 1989 ; MELT, 1993 ; Dewar et Watson, 2007).

L'étude combinée des processus fondamentaux et l'étude sur sites réels et expérimentaux (incluant mesure et surveillance) ont été les points forts du projet mais les avancées en découlant ont conduit également à une meilleure maîtrise du comportement mécanique et physico-chimique et des risques par l'élaboration de méthodologies, dispositions constructives, grilles et critères aidant à établir des diagnostics de vulnérabilité des ouvrages anciens et à dimensionner des ouvrages neufs.

2.3 Déroulement du projet et apparition du projet en région

Le comité de pilotage chargé de la coordination scientifique s'est réuni deux fois par année pour faire le bilan de l'état d'avancement, des résultats obtenus et des difficultés rencontrées. La thématique durabilité a subi des retards et a eu quelques difficultés à rentrer dans le planning prévisionnel. Un des partenaires, le LERMAB de l'Université Poincaré de Nancy a subi la défection d'un doctorant en septembre 2012. Le coordinateur a été de trouver avec le partenaire, une solution pour finaliser ces travaux en conformité avec les attentes du projet. Un enseignant chercheur ainsi qu'un contractuel récemment arrivés ont été mobilisés pour poursuivre les expérimentations. Une adaptation du planning prévisionnel a été adoptée et des modifications mineures des objectifs accordées.

En cours de projet, plusieurs partenaires ont rejoint le projet en apportant leurs problématiques liés à la gestion d'un patrimoine important d'ouvrages : SNCF et Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) ou leur volonté de proposer la technique dans leur catalogue de solutions. Ces partenaires ont participé au comité de pilotage en tant qu'organismes partenaires non financés soutenant le projet.

Développé avec le soutien de la région Aquitaine, un projet régional a vu le jour en complément du projet C2D2. Piloté par l'entreprise de travaux Sud-Fondation filiale GTS, il a rassemblé le Centre d'Étude Technique de l'Équipement (CETE) du Sud-Ouest et son laboratoire de géotechnique (LRPC), l'université Bordeaux 1 et son laboratoire le I2M ainsi qu'un négociant, la société Boispays.

3 État des lieux

Les premières traces écrites détaillées de l'utilisation des pieux en bois dans les constructions sont datées de l'époque romaine. Le développement des techniques de reconnaissance des sols et des machines de battage ont permis aux romains de construire de nombreux ouvrages sur ce type de pieux, dont seuls des vestiges des fondations sont parvenus jusqu'à nous sauf quelques ouvrages comme le pont de Trèves.

Au cours des siècles qui ont succédé à la chute de l'Empire romain, les pieux en bois ont été largement utilisés en France dans les constructions d'ouvrages ; la France possède un patrimoine très riche de bâtiments et d'ouvrages d'art routiers et ferroviaires fondés sur des pieux en bois, parmi

lesquels beaucoup sont classés monuments historiques : citons le château de Chambord, le Grand Palais à Paris, le pont de pierre à Bordeaux ou encore la place Stanislas à Nancy.

Malgré un parc important d'ouvrages bâtis sur des pieux en bois, le retour d'expérience sur les méthodes de construction françaises employées au cours des siècles ainsi que sur les désordres relevés sur ces ouvrages reste faible et non capitalisé. Le choc vécu lors de l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978 ne fût pas réellement suivi d'un développement d'expertise durable sur les fondations en bois. Les choix des méthodes d'investigation des fondations et des solutions de confortement en fonction des pathologies observées s'avèrent néanmoins essentiels pour assurer la pérennité de ce patrimoine.

Il n'existe à ce jour aucune base de données nationale regroupant l'information sur les méthodes de construction des ouvrages sur des pieux en bois, leur nombre et leur localisation sur le territoire. L'information est partagée entre les archives des services gestionnaires, des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (devenus CEREMA), de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, les guides, les livres ou les sites internet traitant de ce sujet.

Le logiciel LAGORA (Logiciel d'Aide à la Gestion des Ouvrages d'Art) développé par le Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leur Aménagement (SETRA devenu CEREMA), en collaboration avec les Directions Interdépartementales des Routes (DIR) contient des informations sur la structure supérieure des ouvrages (géométrie, matériaux utilisés, limites de charges, surveillances et inspections), mais n'inclut pas les fondations.

Constat qui est transposable aux maîtres d'ouvrages comme la SNCF, les Ports, VNF et les collectivités territoriales.

3.1 Cadre général, filière bois et ressource visée

La première phase de travail a consisté à collecter les informations les plus pertinentes sur le matériau bois et les pilots. L'état actuel de la filière bois en France et à l'étranger a été relevé ainsi que les enjeux et les atouts environnementaux de ce matériau. Le comportement mécanique du bois et ses propriétés de durabilité de ce matériau dans cette utilisation spécifique ont également été étudiés. Enfin, les caractéristiques géométriques des pieux en bois et leur mise en œuvre dans le sol par battage des époques antérieures et moderne ont été collectées.

3.2 Historique des méthodes de construction et niveau technologique atteint

La seconde phase de l'état de l'art a traité de l'évolution des méthodes de construction des fondations des ouvrages, de l'époque préromaine jusqu'à l'abandon des pieux en bois au 19ème siècle. La majeure partie des informations disponibles sur les ouvrages bâtis sur des pieux en bois concerne les ponts routiers et ferroviaires situés dans les bassins versants des fleuves. De part leur taille et les enjeux économiques et stratégiques qu'ils représentaient, ces ouvrages ont été dimensionnés par d'illustres ingénieurs, tels que Perronet ou Gauthey. Les méthodes de construction mises en œuvre sont détaillées dans leurs mémoires.

Une base de données a été constituée (Figure 3).

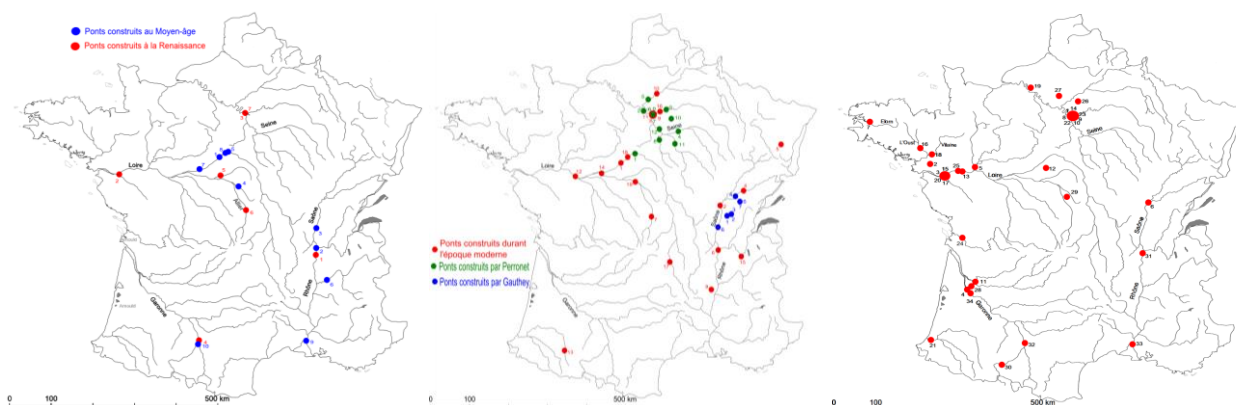


Figure 3 : Cartographie des ponts sur pieux bois construits du moyen-âge à la Renaissance (7^{ème} siècle – fin 16^{ème} siècle) à l'époque moderne (17^{ème} siècle –18^{ème} siècle) puis industrielle (19^{ème} siècle –20^{ème} siècle)

Par manque d'information, les bâtiments, les monuments, les ouvrages ferroviaires et autres édifices fondés sur des pieux en bois n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie.

Les désordres relevés sur les ouvrages d'art routiers construits sur des pieux en bois ont également été relevés dans cette deuxième phase. Les principales causes de ces désordres et les méthodes de renforcement des fondations mises en œuvre pour préserver ce patrimoine ont été analysées.

4 Plots expérimentaux et base de données

Les phénomènes d'interaction sol-pieu dépendent, d'une part, du type de matériau, de la géométrie et du mode de mise en œuvre du pieu dans le sol et d'autre part, des propriétés de résistance et de la nature du sol. Les propriétés de résistance d'interface entre un matériau et un sol peuvent être déterminées en laboratoire, au moyen d'essais de cisaillement, ou in situ, au moyen d'essais de chargement. Les essais de chargement des pieux, préalablement instrumentés avec des extensomètres amovibles, permettent de mesurer leur portance limite et de séparer le terme de pointe de la résistance de frottement. Les résultats donnent ainsi une estimation de la résistance des pieux en fonction des propriétés mécaniques du terrain.

Ils sont également l'occasion de tester des méthodes de mise en œuvre des dispositions constructives et ici plus particulièrement un dispositif d'instrumentation innovant conçu conjointement par L'IFSTTAR et le LERMAB (Figure 4).

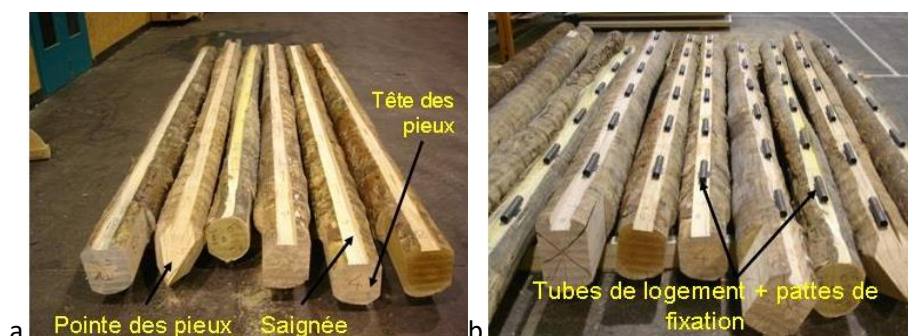




Figure 4 : Mise en palce de l'instrumentation : (a) saignée dans les pieux, (b) fixation des tubes sur les pattes, (c) fixation des tubes extérieurs dans la saignée, (d) protection de la pointe à l'aide de plats métalliques

L'objectif de l'instrumentation des pieux en bois est de mesurer à différentes profondeurs le raccourcissement élastique du pieu en fonction de la charge appliquée en tête (Bustamante et Jézéquel, 1989). La valeur du raccourcissement permet, via le module d'Young de chaque pieu, de déterminer la charge reprise par chaque tronçon du pieu et donc le frottement latéral entre le pieu et le sol à différentes profondeurs. La non-linéarité et la conicité naturelle du pieu, mêlées aux difficultés que représentent la fixation du tube en acier au bois rendent l'emploi de la méthode habituellement utilisée difficile. Un dispositif d'instrumentation à l'aide d'extensomètres amovibles spécifique aux pieux en bois a donc été élaboré de A à Z.

Les essais de chargement des pieux en bois fournis par le partenaire GROUAZEL ont été réalisés sur deux plots expérimentaux :

- Le premier se situe sur une parcelle en bordure de Seine appartenant au Grand Port Maritime de Rouen (GPMR), maître d'ouvrage public possédant de nombreux quais fondés sur des pieux en hêtre ;
- Le second plot expérimental est localisé sur le site historique des laboratoires des Ponts et Chaussées de Cubzac-les-Ponts, qui au cours des 25 dernières années, a servi à étudier le comportement des remblais sur sol compressible.

Grace à ces différents acteurs des deux projets, des expérimentations ont été menées sur les terrains du port de Rouen (Seine Maritime) et sur le site expérimental de Cubzac-les-Ponts (Gironde), portant au total sur une quinzaine de pieux (Figure 5). Ceux-ci ont été instrumentés avant d'être battus, afin de tester les dispositions constructives, l'aboutage et de mesurer le frottement latéral à différentes profondeurs, et ceci dans trois types de sols (limon sable, argile). Différentes essences ont ainsi été testées.

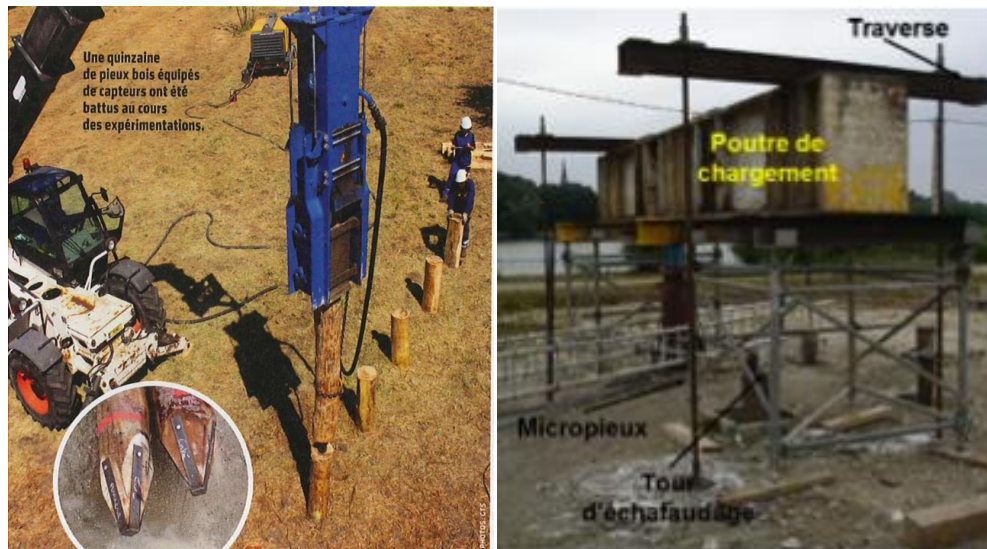


Figure 5 : Mise en place des pieux sur le site de Cubzac-les-Ponts et essais de chargement sur le site de Rouen

Les résultats collectés ont été complétés par des essais de pieux issus de la bibliographie et d'une base de données américaine. Cette centaine de pieux a servi à caler les différents coefficients à utiliser dans le cadre d'une application de la norme d'application de l'Eurocode pour les fondations profondes (NF P94-262). Le livrable comprend trois parties.

La première partie présente les essences et les caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux en bois retenus dans cette étude, ainsi que leur instrumentation avec des extensomètres amovibles.

Les seconde et troisième parties traitent des essais de chargement des pieux réalisés sur la parcelle des Moulineaux en bordure de Seine (à proximité de Rouen) et à Cubzac-les-Ponts. Les coupes géologiques des terrains et leurs propriétés de résistance déterminées au moyen de campagnes de sondages exhaustives y sont présentées. Le battage des pieux, les essais de chargement et leurs résultats sont également exposés.

5 Méthode de dimensionnement pour le renouveau

Dans l'état de l'art, nous avons relevé que l'abandon des pieux en bois dans les constructions en France est daté du milieu du 19^{ème} siècle.

Or la méthode de dimensionnement des fondations, dite « directe », utilisée au quotidien par les praticiens est une méthode semi-empirique principalement basée sur l'essai en place d'expansion de cavité appelé pressiomètre. Depuis son développement à la fin des années 1950 par L. Ménard, le pressiomètre a été largement utilisé en France pour déterminer les propriétés de résistance des sols. Les résultats de ces essais constituent aujourd'hui les « données d'entrée » des méthodes de dimensionnement françaises des fondations profondes.

L'abandon des pieux en bois étant antérieur d'un siècle au développement du pressiomètre, il n'existe à ce jour aucune règle professionnelle ni « contexte normatif » français permettant de justifier le dimensionnement et l'emploi de ce type de fondation dans la pratique actuelle.

A l'inverse, les États-Unis et les Pays-Bas ont su mettre en place des contextes normatifs nationaux favorables en publiant des documents officiels, comme le guide « Timber Pile Design and Construction Manual » (AWPI, 2002) et la norme NEN-67-43, (1991).

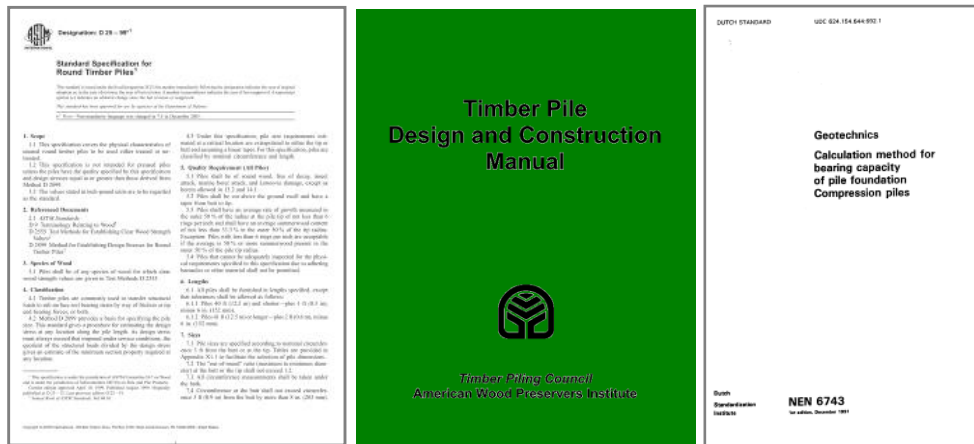


Figure 6 : Normes et règles professionnelles régissant les pieux en bois aux EUA, et aux Pays-Bas

5.1 Les méthodes de dimensionnement des pieux en France et à ailleurs

Un état de l'art des méthodes de dimensionnement des fondations profondes utilisées à l'étranger (Etats-Unis, Pays-Bas, etc.) et en France a été rédigé dans lequel l'évolution des méthodes de dimensionnement françaises des fondations profondes s'appuyant sur les résultats des essais pressiométriques, depuis les années 1960 jusqu'à la rédaction et la publication en 2012 de la norme d'application nationale française relative aux fondations profondes NF P 94-262 (AFNOR, 2012).

5.2 Proposition d'une méthode adaptée

Une méthode de dimensionnement des pieux en bois s'appuyant sur les caractéristiques pressiométriques des terrains a été proposée. Le paramètre adimensionnel $\alpha_{\text{pieu bois-sol}}$, le facteur de portance $k_{p,\text{pieu bois-sol}}$ et les coefficients de modèle ont été explicités et leurs valeurs déterminées.

La Figure 7 illustre l'étude des ratios entre les portances limites calculées et mesurées des pieux permettant de « masquer » les incertitudes liées aux mesures expérimentales et à la séparation des termes de pointe et de frottement. Le coefficient de modèle global $\gamma_{R;d1, \text{pieu bois}}$ relatif aux pieux en bois est déterminé à partir de l'étude statistique des ratios $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ (Figure 23). La portance limite des pieux est calculée à partir des valeurs des coefficients $\alpha_{\text{pieu bois}}$ et $k_{p,\text{pieu bois}}$ déterminées lors des essais sur sites et de la base de données collectées, présentés en §4.

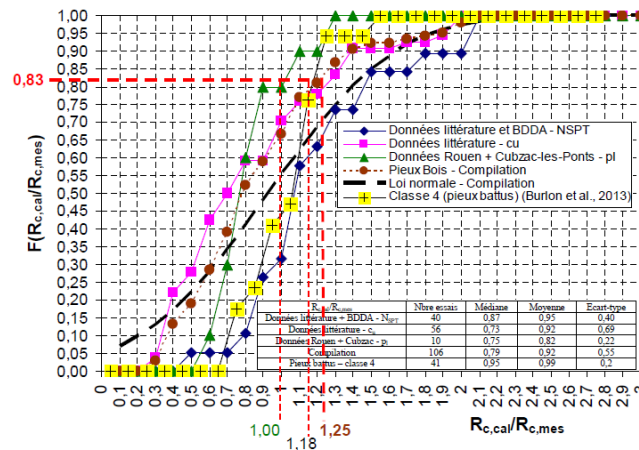


Figure 7 : Fonction de répartition de $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ pour les pieux en bois

Enfin, la dernière phase de cette étude s'est intéressée à définir deux lois de comportement d'interface sol-pieux bois, l'une exponentielle, l'autre trinéaire, et analyse la méthode de calcul hollandaise des tassements des pieux. Les tassements des pieux en bois déterminés à partir de ces lois de comportement et de la méthode hollandaise ont été ensuite comparés.

Ces travaux ont permis la rédaction d'un additif à la norme française traitant des fondations profondes par un groupe de travail IFSTTAR, BATIPLUS, SNCF et GTS, objet d'un livrable fourni en annexe.

6 Techniques d'inspection

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 (Figure 8).

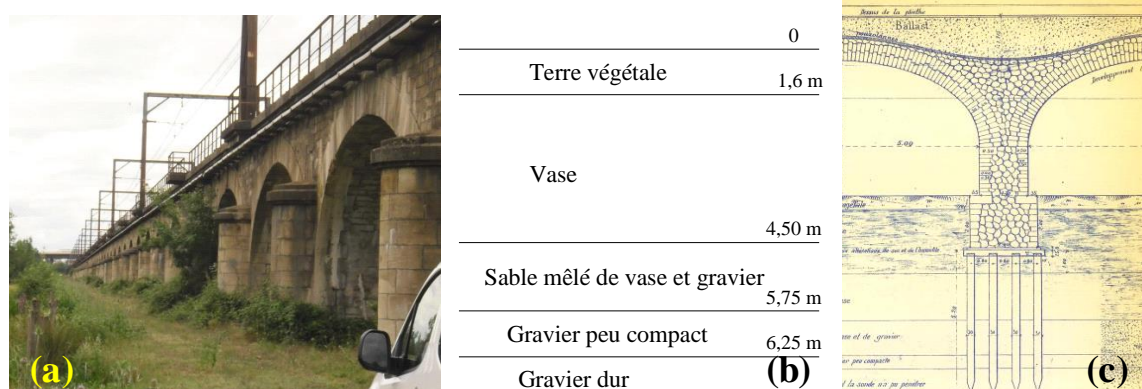


Figure 8 : Vue de l'ouvrage (a), coupe géologique du site (b) et coupe longitudinale des fondations (c)

Cette étude a permis d'appliquer le protocole d'inspection des fondations en bois. Les mesures de poinçonnement à l'aiguille (Figure 9) 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.

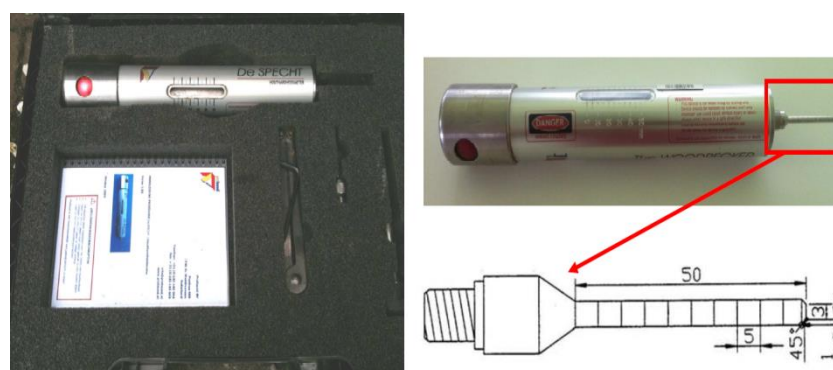


Figure 9 : Appareil de mesure assimilable à une aiguille Proctor

Cette étude a conclu que 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) est néanmoins recommandée.

7 Durabilité et maîtrise de la dégradation

Les ouvrages dont les fondations sont constituées par des pieux en bois sont nombreux et ce procédé a été largement utilisé dans le passé. Dans le contexte d'une réduction des émissions de CO₂, le remplacement de pieux béton par des pieux bois constitue une bonne alternative (Klaassen, 2008). Cependant le bois est un matériau constitué de matière organique et susceptible d'être dégradé par des microorganismes qui utilisent ses constituants comme source de nourriture. Lorsque des pieux sont mis en œuvre dans des sols ils sont exposés à une multitude d'attaques par différents agents biologiques. Le développement des microorganismes est dépendant de la présence d'eau et d'oxygène. Aussi, le fait que les pieux de fondation soient souvent en partie immergés dans une

nappe phréatique ou le lit d'une rivière dont le niveau fluctue va influencer sur le taux d'humidité du bois et donc la probabilité de développer des pathologies.

Dans ce contexte, cette tâche du projet PieuxBois s'est proposée :

- d'établir la cinétique de dégradation de différentes essences utilisées pour la réalisation de pieux de fondation en condition d'immersion partielle,
- d'établir un lien entre activité biologique de dégradation, perte de densité du matériau et perte de résistance mécanique,
- de proposer des méthodologies permettant d'établir précisément le type de dégradation biologique,
- de proposer une méthode de diagnostic qui peut être appliquée sur site qui s'appuie sur les résultats obtenus

Dans une première partie, nous présentons l'état de l'art des connaissances bibliographiques relatives aux phénomènes de dégradation biologique des pieux de fondation. Puis nous présentons les différentes expériences réalisées afin de répondre aux problématiques posées ci-dessus ainsi que les résultats qui en découlent. Nous avons analysé les dégradations mesurées dans le cadre d'expériences réalisées en système miniaturisé dans un environnement semi-contrôlé avec un inoculum complexe puis nous développerons les approches effectuées sur des mini-pieux afin de se rapprocher progressivement au plus proche des conditions réelles de mise en œuvre des pieux de fondation.

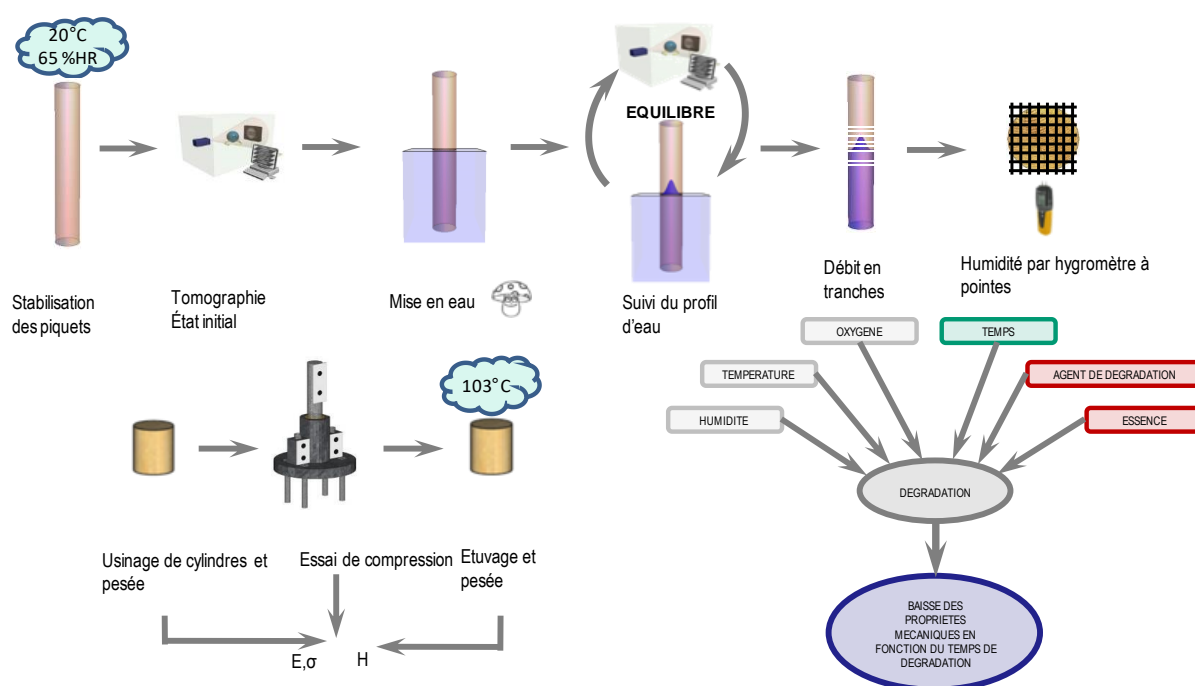


Figure 10 : Démarche d'étude de la dégradation fongique

Pour l'ensemble du projet, il a été choisi d'étudier trois essences : hêtre, pin sylvestre et chêne. Le chêne est l'essence historiquement utilisée en France pour les pieux de fondation, de par sa relative résistance aux agents de dégradation. Le pin a été choisi pour représenter les résineux, largement utilisés dans ce domaine à l'étranger (en particulier au Pays-Bas, et aux États-Unis). Le hêtre est une

essence susceptible de convenir, de part sa grande disponibilité, ses propriétés mécaniques intéressantes et son imprégnabilité, qui rend son traitement par autoclave possible et peut permettre d'améliorer sa stabilité dimensionnelle et sa durabilité.

Afin d'évaluer les cinétiques de dégradation de ces différentes essences ainsi que les altérations mécaniques qui en découlent une combinaison d'approches a été développée dans le cadre du projet afin de pouvoir mesurer différents paramètres en conditions semi-contrôlées de dégradation. Les évolutions de perte de masse, de densité, d'humidité ont été suivies lors de la dégradation d'éprouvettes de hêtre de chêne et de pin sylvestre afin de les relier à la perte de résistance mécanique. Cette dernière a été évaluée en utilisant la compression axiale et les efforts de perçage utilisés par le résistographe. Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation entre les méthodes de laboratoire et de terrain validant ainsi le résistographe comme méthode d'analyse. La perte de résistance mécanique est également corrélée positivement à la perte de masse lorsque cette dernière peut être mesurée de manière significative. La densité déterminée par tomographie rayons X est un bon indicateur de perte de masse. Nous avons également transféré ces mesures à l'échelle du pieu en conditions de dégradation. Une approche de biochimie a été développée afin de i) pouvoir déterminer une activité biologique en dessous du seuil de détection des méthodes conventionnelles et de ii) déterminer de manière précoce le type de dégradations causées. La combinaison de ces différentes méthodes nous a permis d'établir une cartographie tridimensionnelle des zones de risque dans les pieux.

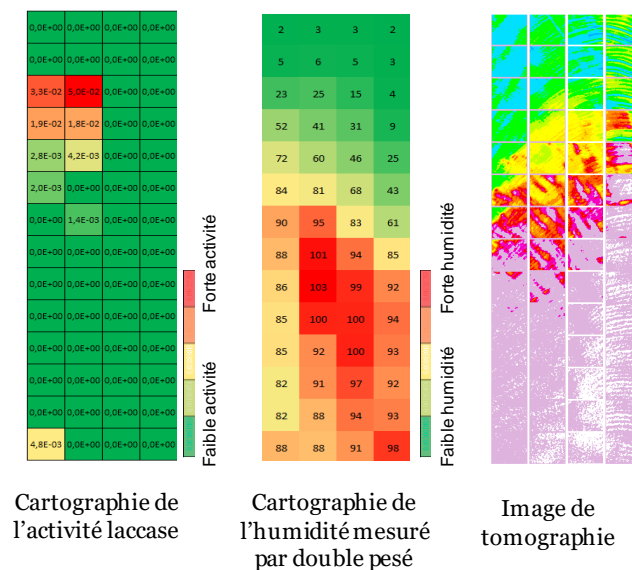


Figure 11 : Comparaison des images de tomographie avec les zones d'activités enzymatiques.

Nous avons ainsi montré que la combinaison de mesures au résistographe et des activités enzymatiques permet, en tenant compte de l'humidité et de la densité du bois, de rendre compte avec une grande précision de l'état de dégradation et de l'activité biologique présents dans les pieux. Les données acquises devraient permettre à court terme l'élaboration d'un modèle de dégradation des pieux de fondation.

8 Retombées du(es) projet(s)

8.1 Livrables

Grace à la démarche mise en œuvre, le(s) projet(s) PieuxBois a(ont) aboutis à des rapports détaillés sur :

- État des lieux de l'utilisation des pieux en bois en France et dans le monde, techniques de mise en œuvre et méthodes de dimensionnement (Livrable état de l'art),
- Expérimentations sur plots expérimentaux, description des expérimentations, programme d'essais, résultats détaillés (Livrable sites expérimentaux),
- Synthèse des résultats et élaboration d'une base de données, calage des coefficients de frottement latéral et de pointe dans le cadre de la norme NF P94 262 (Livrable dimensionnement),
- Expérimentations de dégradation de pieux en bois en présence d'attaque fongique et de cycles hydriques, mise au point des essais, résultats analyse (Livrable dégradation).

Les conclusions du projet sont rapportées dans des guides techniques à l'intention des professionnels sur les fondations en pieux bois pour :

- diagnostiquer et réparer des ouvrages du patrimoine ou des ouvrages d'art anciens (Guide d'inspection),
- proposer une méthode de dimensionnement pour des applications de type parcs naturels et récréatives (pontons, quais, ponts, etc.) ou de logement individuel (chalets, maisons, etc.) et poser les bases pour l'application à des ouvrages de plus grande ampleur (Additif norme NF P94-262).

Ces différents livrables sont joints en annexe au présent document.

8.2 Audit des livrables par les évaluateurs du Ministère

La clôture du projet a été l'occasion d'un audit du projet C2D2 PIEUX BOIS « Dimensionnement et durabilité des pieux en bois » par des évaluateurs extérieurs nommés par le Ministère. Nous avons rassemblé dans ce paragraphe les réponses apportées par les partenaires aux observations qui sont également insérées dans les rapports.

8.2.1 Sur le rapport 1 – Généralités et état de l'art

On peut regretter que les données présentées ne se basent pas sur les dernières versions des normes citées. Ainsi, la norme NF EN 335-2 est remplacée depuis mai 2013 par la norme NF EN 335. En outre, la notion de classes de risque pour les bois n'existe plus depuis 2005, seule celle de classes d'emploi figure aujourd'hui dans les normes. Enfin, les tableaux présentés dans le rapport sur ces classes et sur la durabilité du bois ne constituent pas les tableaux officiels. Les listes d'essences qui y sont nommées sont très incomplètes.

Le projet s'est terminé en février 2013, les documents rédigés en 2011 n'ont pas intégré cette nouvelle version de la norme. Nous reproduisons ci-dessous le tableau équivalent au tableau 7.

<i>Classes d'emploi</i>	<i>Situation en service</i>	<i>Exemples d'emploi</i>
1	<i>Situation dans laquelle le bois est à l'intérieur, non exposé à l'humidité. 6 < H% < 12%</i>	<i>Parquets, escaliers intérieurs, portes</i>
2	<i>Situation dans laquelle le bois est à l'intérieur ou sous abri, humidité ambiante élevée occasionnelle. 12 < H% < 20%. Séchage des bois très rapide.</i>	<i>Charpente, ossatures correctement ventilées en service</i>
3.1	<i>Bois soumis à une humidification fréquente sur des périodes courtes (quelques jours). Conception permettant l'évacuation rapide des eaux.</i>	<i>Toutes pièces de construction ou menuiseries extérieures verticales soumises à la pluie : bardages, fenêtres ...</i>
3.2	<i>Bois soumis à une humidification fréquente sur des périodes significatives (quelques semaines). Conception ne permettant pas une évacuation rapide des eaux.</i>	<i>... Pièces abritées mais en atmosphère condensante</i>
4	<i>H% > 20 %</i>	<i>Bois horizontaux en extérieur (balcons, coursive ...) et bois en contact avec le sol ou une source d'humidification prolongée ou permanente</i>
5	<i>Bois immergé ou partiellement immergé dans l'eau salée (milieu marin et eau saumâtre naturelle)</i>	<i>Piliers, pontons, bois immergés</i>

On remarque que la notion de classe de risque a été transformé en une classe d'emploi sans modification majeure et sans élément utile pour mieux définir si un pieu dans le sol est en zone sèche, non saturée, de battement de la nappe ou saturée. Ainsi la classe 4 correspond obligatoirement à une saturation du bois, ce qui est donc inutilisable dans le contexte géotechnique. La subdivision de la classe 4 en deux sous-classes de la version de 2007 : Bois à l'extérieur, en contact quasi permanent, sous classe 4.1, ou permanent avec le sol, la terre ou l'eau, sous classe 4.2, a disparu. La norme EN 335 s'avère donc peu applicable pour les praticiens cherchant à évaluer l'emploi et la durabilité des essences de bois pour les pieux. Une classification adaptée, rentrant dans ce cadre de l'EN 335, doit donc être développée.

La liste des essences n'est pas une redite de la norme car il ne s'agit pas de paraphraser ces documents destinés à encadrer l'utilisation du bois en œuvre mais de sérier ce qui a été et ce qui pourrait être utilisé pour les pieux en bois dans des conditions d'usage totalement différentes. En effet, il n'a pas été considéré de réaliser des pieux en bois comme l'aulne, le bouleau, l'érable, le peuplier ou le cèdre, ni en bois tropicaux pour ne retenir que des essences :

- ayant déjà été utilisées historiquement,*
- pouvant être fournies par la sylviculture locale à des prix concurrentiels,*
- permettant de balayer le spectre attendu des longévités.*

Le choix a été fait de ne pas reproduire dans ce document les informations sur les autres essences, ce qui aurait alourdi le texte.

8.2.2 Sur le rapport 2 – Instrumentation et essais de chargement de pieux en bois

· Le nombre de pieux testés par type de sol n'apparaît pas suffisant pour établir une loi de comportement ; par ailleurs, la variabilité des résultats obtenus est significative.

Il n'est pas facile de répondre à ce commentaire général et ne ciblant pas un paragraphe particulier du document, nous avons fait le choix d'y répondre dans cette partie introductive.

On précise que ce n'est pas le nombre de pieux qu'il faut comptabiliser mais le nombre de couples frottement unitaire axial et paramètres d'essai in situ (soit ici quatre par pieu). Les documents Fond72 édités par le SETRA en 1976 et le Fascicule 62TV du CCTG des Marchés publics édité par le ministère de l'équipement en 1993 s'appuyaient respectivement sur une dizaine et environ 130 essais de pieux. Sachant qu'ils couvraient de 5 à 11 types de pieux pour 5 classes de sols, il est clair que certaines classes n'étaient batiées que sur un ou deux essais. Pourtant ces deux règlements ont été utilisés par l'administration puis les maîtrises d'oeuvres privées sans désordre notable pour concevoir l'ensemble des ouvrages d'arts courants : passerelles, ponts routiers, autoroutiers et ferroviaires ou non courants : pont de l'île de Ré, de Normandie, viaduc de Millau, etc. Les ingénieurs du RST et du SETRA ont fait des choix en toute conscience pour proposer des lois de comportement. La consultation des articles écrits par les LRPC et le LCPC (voir les BLPC 70 de 1969, 73 de 1974, 80 de 1975, 82 et 84 de 1976, 106 de 1978, 107 de 1979, 119 de 1982, 128 de 1983, 137 de 1985, 160 de 1989, 128 de 1992, 189 et 191 de 1994, 195 et 199 de 1995, 208 de 1997) permet de voir que la dispersion des résultats est tout à fait classique. Pour appréhender ce phénomène, les géotechniciens ont depuis plusieurs dizaines d'années testé la géostatistique qui s'est révélée une impasse (voir les articles de Magnan dont la synthèse dans le BLPC 202 de 1996) et ont fait le choix de développer des approches statistiques adaptées (voir l'article Baguelin F, Kovarik JB (2000) Une méthode de détermination des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques, Revue française de géotechnique N°93 pp 35-41) qu'ils ont intégrés dans leurs règles et qui sont conformes à l'Eurocode 0 et 7. De ce fait, les ingénieurs du RST ont bati une méthode de calcul qui lors des benchmarks internationaux est souvent prise en référence, même utilisée par des ingénieurs étrangers. Pour s'informer sur ces méthodes, on peut consulter les articles de synthèse du BLPC de 149 de 1987, 170 de 1990, du congrès IFCEE de 2009 ou dans Géotechnique Vol64 de 2014).

Conscient par notre expérience brièvement résumée ci-avant de cet écueil qu'est la dispersion, les données collectées ont été complétées par une base de données américaine et des données tirées de la bibliographie, ce qui a amené à 106 essais exploitables pour les pieux en bois à comparer aux 530 environ utilisés pour les règles de la nouvelle norme NF P94-262 et, notons-le, qui concerne 20 types de pieux différents.

Ainsi, les partenaires du projet sont conscients que le nombre d'essais réalisé est faible, mais il semble tout à fait possible de proposer une loi de comportement dont le calage demandera pour augmenter en fiabilité que la base de données soit complétée. Dans le projet de prénorme il est suggéré de réaliser des essais pour d'une part diminuer les coefficients de sécurité (voir livrable 4) et alimenter la base de données.

Compte tenu de la non linéarité de la zone élastique de comportement mécanique du matériau bois, le module d'élasticité dynamique (vibratoire) n'est pas comparable au module d'élasticité statique. Il n'est donc pas surprenant d'observer les différences constatées.

Les différences de la dizaine de pourcent constatées entre le module du bois des pieux mesuré statiquement (valeurs issues des références bibliographiques) ou dynamiquement (valeurs obtenues dans le cadre du projet) sont tout à fait acceptables voire insignifiantes au regard de la dispersion des

modules de sol (voir figure 16 du rapport) et le ratio observé pour les sols entre ces modules évoluant entre 3 et 9 classiquement (voir Magnan J.P., Mestat Ph., Reiffsteck Ph., Delattre L. (2001) *Une perspective historique sur les modèles utilisés en mécanique des sols*. 1ère Conférence Internationale Albert Caquot, Paris, Presses de l'ENPC, Volume sur CD Rom, (8p.). Mestat Ph., Reiffsteck Ph. (2002) *Détermination des paramètres des lois de comportement élastoplastique*, Symp. Int. PARAM2002, Paris, Presses de l'ENPC. Nguyen T.L., Reiffsteck P., Bourgeois E., Mestat P., (2011) *Caractérisation de l'anisotropie des massifs de sols*, *Canadian Geotechnical Journal*, 48(10): 1520-1536.). De plus, si l'on compare la non-linéarité du matériau bois par rapport au matériau sol, on constate que l'écoulement plastique est atteint pour le sol bien avant les matériaux comme le bois ou le béton ou l'acier, le domaine des petites déformations est donc bien plus faible. Pour ces raisons, dans les règlements actuels comme la norme sur les fondations profondes NF P94-262 et les autres normes (fondations superficielles, parois et soutènements), il n'est pas envisagé pour les matériaux constitutifs des structures d'utiliser des lois non linéaires autres que élastique parfaitement plastique. Le choix a donc été fait d'utiliser les valeurs mesurées.

· L'instrumentation dissymétrique des pieux ne permet pas de distinguer les termes de flexion et compression (efforts parasites, défaut de verticalité du pieu, etc.), ce qui rend la lecture des charges portantes longitudinales approximative. Cette faiblesse n'a pas été approchée par un calcul d'incertitudes.

Cette dissymétrie est nécessaire du fait (dans les longueurs et diamètres utilisés) de l'impossibilité de forer sur toute la longueur ou de scier pour installer le système d'instrumentation. L'insertion de deux tubes dans les pieux aurait créé un renforcement artificiel du pieu. De plus, ces effets ne sont pas pris en compte car la présence d'une rotule lors des essais, conformes à la norme d'essai de pieux NF P 94-150-1, limite l'apparition de moments. Nous n'avons pas fait de calcul d'incertitude complet (voir page 42) car l'objectif de l'étude n'est pas le système d'instrumentation mais les caractéristiques d'interfaces et que la variation spatiale des paramètres du sol (nature, rugosité du pieu, teneur en eau, compacité ...) rend la notion d'incertitude peu applicable (cf. réponse aux remarques précédentes : le calcul d'incertitude sur la mesure de force ou de déplacement resterait de l'ordre de la dizaine de pourcent au maximum alors que les pressions limites varient de 50 à 200%). Nous avons privilégié une campagne d'essais paramétrique en laboratoire qui n'est pas reproduite dans ces livrables mais disponible dans le mémoire de thèse de Christin J. (2013).

· Les tests réalisés à l'instant initial auraient mérité d'être complétés par d'autres mesures prenant en compte les éventuelles relaxations dans le temps, afin que la stabilité (ou l'évolution) des paramètres recherchés puisse être établie.

Le LCPC a développé depuis 1965 une méthode d'essai spécifique valable pour tous les types de pieux (y compris pieux en bois) conforme à la pratique mondiale des essais, codifiée en 1989 par un mode opératoire et une norme française en 1991 dont l'équivalent existe en DIN, BS, NEN, NB et ASTM et bientôt en EN et ISO. Ce protocole d'essai normalisé a été appliqué sans modification car ce type de chargement par paliers de type oedométrique inclus les effets du temps (consolidation et fluage) inhérents au sol. Les différents congrès et recherches (DFI et projet vibrofonçage) n'ont d'ailleurs pas permis de conclure sur la comparaison des résultats obtenus avec différentes vitesses d'essais. Une étude sur modèle réduit récente confirme ce constat (Reiffsteck Ph., Bacconnet C., Gourvès R., van de

Graaf H.C., Thorel L. (2009) Measurements of soil compressibility by means of cone penetrometer, Soils and Foundations, Vol.49 No.3, pp 397-408).

Nous avons l'impression qu'il y a confusion dans les commentaires entre les effets du temps liés à la dissipation des pressions interstitielles générées dans le sol par le battage (consolidation appelée relaxation) et la dégradation du matériau bois qui elle n'est pas inéluctable. Pour ce dernier point, il est traité conformément aux échanges avec la DGITM lors de réunions du projet de mai 2010 et janvier 2011 dans le livrable 5. La durée d'essai (battage instrumentation, chargement) est inférieure à 1 mois et l'aspect dégradation en aucun cas ne peut être traité sur un plot expérimental sur 50 ans. Il a donc été choisi de simuler ce phénomène en laboratoire.

L'ensemble des résultats des essais de pieux figurants dans la base de données servant de support au développement de la méthode semi empirique directe de dimensionnement utilisée dans le Fascicule 62 du CCTP du MEDDE puis à partir de 2012 de la NF P94262 ayant été obtenus en appliquant ce protocole, il ne pouvait être envisagé de modification.

L'objectif du projet était le développement d'une méthode exploitable dans la pratique de l'ingénieur et sur des ouvrages pouvant recevoir du public et non une recherche sur les effets du temps sur les essais de pieux. Vu le faible nombre de pieux en bois disponibles, nous n'avons pu envisager des variations de protocole.

8.2.3 Sur le rapport 4 – Étude de la dégradation de pieux en bois

· Une première étape aurait pu consister à répertorier les principaux types de sols et les populations de champignons et de bactéries susceptibles d'y dégrader les bois. Cette étude aurait peut-être permis de distinguer des sols plus favorables que d'autres (acidité, compacité, capacité à retenir l'eau, etc.) et de reproduire en laboratoire un inoculum et des conditions d'essais plus réalistes.

L'accent a été mis sur le développement d'outils pratiques à destination des bureaux d'études. Il semble difficilement applicable d'exiger lors d'une étude en phase d'avant projet de compléter l'étude géotechnique par une étude de la population fongique et bactériologique du site. De plus, lors de la réalisation d'ouvrages, des travaux de terrassement, incluant le déplacement (apports ou enlèvements) des sols souvent sur une épaisseur indéterminée de 20 cm à 1 m est nécessaire pour des pistes pour l'accessibilité des engins de battage, la création des blocs techniques etc. Aucune certitude n'existe donc sur la nature et l'état du sol dans le premier mètre de sol. Un inoculum à spectre large étant jugé suffisamment défavorable, contrairement à celui défini dans les protocoles en vigueur, a été préféré pour initier cette recherche totalement inédite.

· Le rapport reste très elliptique sur les traitements préventifs. Quelques mots sont dits sur l'imprégnabilité de ces traitements selon les essences, mais rien n'est mentionné sur les produits utilisés, leur efficacité et leur compatibilité avec les exigences de respect de l'environnement. Par ailleurs, les techniques de traitement thermique telles que la réification ne sont pas évoquées : la fragilisation du bois qui pourrait découler de ces traitements est-elle compatible avec le battage ?

Lors des premières réunions du projet, il a été décidé de ne pas envisager les traitements préventifs, considérant que la démarche du développement durable était de travailler sur les ressources

disponibles en métropole et naturellement durables (l'acceptabilité, dans le futur, des traitements ayant été jugé nulle pour des bois en contact avec une nappe phréatique). De ce fait, il n'a pas été entrepris de faire l'état de l'art de ces techniques (voir les comptes rendus de réunion de suivi du projet fournis à la DGITM en mai 2010, janvier 2011, mai 2011, janvier 2012 et décembre 2012).

Quand à la solution particulière de la rétification, elle rend le bois fragile et inapte à être battu dans le sol, et elle nécessiterait l'équipement en fours de taille importante (on passerait de 6 m à 10 m minimum, ce qui semble peu envisageable). Si l'aboutement était privilégié et donc des tronçons de 2 m à 3 m produits industriellement, l'éclatement au niveau des aboutage demanderait la pose de manchon et l'usinage préalable.

Les partenaires du projet ont constaté en discutant avec les négociants que l'idée de mettre en œuvre toute méthode de traitement rend la solution pieux bois économiquement non viable (plus cher que le béton et proche de l'acier, ce qui ne permettra pas de créer une demande). Une étude économique réalisée par l'entreprise Sud-Fondation a confirmé ce constat..

· *L'état de l'art nous invite à considérer que la durabilité naturelle du bois à prendre en compte concerne les bois immergés (à quelques mètres sous le niveau de l'eau) en eau stagnante (dans le sol). Il serait intéressant dans ces conditions d'étudier la dégradation bactérienne des bois français dans leur diversité à partir d'excavation de pieux anciens (issus de chantiers de réhabilitation des sites/monuments historiques par exemple).*

Cette démarche a été envisagée par les partenaires dès les premières revues de projet. A cette fin, des échantillons bois ont été récupérés sur des fouilles archéologiques en rivière réalisées dans l'Yonne (fournis par la DRASSM-UMR5594 du MCC) et le Loiret et testés partiellement, toutefois les difficultés du partenaire LERMAB n'ont pas permis de mener à terme cette action. Lors de l'étude de cette piste, il s'est avéré que la population concernée allant de l'époque romaine à l'ère industrielle (-50 Av. JC à 1900) est trop ancienne pour que son étude soit instructive. La plage de temps qui nous intéresse pour construire un référentiel normatif applicable par les praticiens est de l'ordre de la dizaine d'année à 100 ans. Cette difficulté a été également soulevée dans le récent article de Klaassen (Klaassen R.K.W.M. (2013) Speed of bacterial decay in waterlogged wood in soil and open water, International Biodeterioration & Biodegradation, 7 pages).

Une deuxième tentative a été réalisée (d'autres ont avorté entre temps : pont Eiffel à Cubzac, quai port de Rouen, etc.) avec succès lors de l'inspection du Viaduc des cents Arches sur la commune d'Arveyres. Les résultats sont détaillés dans le document 5 qui traite spécifiquement de l'inspection.

Après un tour d'horizon du potentiel de ces fouilles et chantiers de réhabilitation, on constate qu'un panel très réduit d'essence peut être observé (chêne) alors que notre objectif était de comparer une essence durable disponible localement comme le robinier aux autres espèces moins durables. Ceci justifie pleinement l'étude paramétrique entreprise dans le cadre du projet et synthétisée dans ce document.

Note : cette démarche et ses réorientations ont été décrites dans les comptes rendus de réunion de suivi du projet fournis à la DGITM en mai 2010, janvier 2011, mai 2011, janvier 2012 et décembre 2012.

8.2.4 Sur le rapport 5 – Guide d’inspection des fondations en bois des ouvrages

Ce rapport présente le protocole de contrôle de pieux développé aux Pays-Bas. En l’absence de tout guide français, ce guide hollandais – traduit en français – constitue une première base intéressante. Néanmoins, pour que ce guide puisse être adopté en France, il sera nécessaire de justifier les critères de classement préconisés au regard des textes actuels (eurocodes, normes, etc.) et à partir d’une recherche documentaire plus complète sur les données ayant permis l’obtention des courbes présentées par la communauté hollandaise.

Cette recherche documentaire a été tentée (rencontre d’ingénieurs de Delft Geotechnics ayant participé aux campagnes, ainsi que R. Klaassen dans son institut) mais les correspondants de l’époque ont disparu du paysage technique et n’ont pas eu de successeurs et les archives sont devenues innaccessibles dans la restructuration des établissements publics : 3 changements entre Delft Geotechnics et Deltares. Tout comme il s’avère difficile lors des travaux de normalisation de retrouver les documents originaux de travail des groupes de travail des syndicats professionnels (AFPS, AFGC, CFMS...) ou des projets collaboratifs nationaux (PN ou ANR ou RGCU...), il a été également impossible de retrouver les dossiers correspondant à l’étude réalisée lors de l’effondrement du pont Wilson de Tours durant laquelle l’utilisation de ce type d’essai de poinçonnement avait été déjà envisagée. Les partenaires du projet ont considéré qu’il serait constructif de proposer cette méthode aux ingénieurs praticiens ce qui permettrait à la communauté de se l’approprier et de la critiquer, et on peut considérer que les ingénieurs néerlandais sont aussi attentifs que les ingénieurs français à l’adéquation de leurs méthodes avec les eurocodes.

8.3 Valorisation

8.3.1 Publications

Christin J., Reiffsteck P., Le Kouby A., Barthram C., Bocquet J.-F. (2012) Projet PieuxBois : construction d’un plot expérimental et instrumentation des pieux en bois, JNGG2012 Bordeaux, 641-649

Christin J. Le Kouby A. Reiffsteck P. Rocher-Lacoste F. (2013) Essais de chargement statique de pieux en bois instrumentés avec des extensomètres amovibles 18 ICSMFE Paris

Christin J., Reiffsteck P., Le Kouby A., Darras V., Chretien M. (2014) Description et application d’un protocole d’essai visant à évaluer l’état de dégradation des pieux en bois, JNGG2014 Beauvais, sous presse

8.3.2 Évènements

Ces livrables ont été présentés lors de journées de valorisation ont eu lieu les 11 juin 2013 à Paris la Défense et le 2 juillet 2013 à Bordeaux.

8.3.3 Articles dans la presse professionnelle

Le(s) projet(s) a(ont) fait l’objet d’une valorisation dans :

- Sud Ouest en avril 2012
- Le Moniteur du 29 mars 2013
- La maison écologique N° 74 - Avril-Mai 2013
- Chantiers De France de juin 2013
- Travaux N°900 d’octobre 2013 dans les pages ACTUS

JOURNÉE TECHNIQUE

Pieux

Le bois relève la tête

Deux « journées techniques de restitution » du projet national de recherche « Pieux bois » et de son pendant aquitain se sont tenues le 11 juin à Paris et le 2 juillet à Bordeaux. Principaux enseignements.

Lancé en 2010 par le ministère de l'Équipement et l'Inra avec l'Université Bordeaux-Mérignac de Bordeaux et le Centre d'Études et de Recherches Forestières de Bordeaux, le projet national de recherche « Pieux bois », dirigé par le directeur de recherche à l'Inra Philippe Raffin, a pour objectif de développer des pieux bois en tant que matériaux de construction durable et innovants.



Le projet pieux bois permet entre autres de développer le bois dans les fondations comme alternative au béton ou à l'acier.

Projet complémentaire
Développé avec le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et de la Région Aquitaine, ce projet complémentaire a pour objectif de développer des pieux bois en tant que matériaux de construction durable et innovants.

Moderniser les méthodes
Soutenu par GTS et la SNCF, le projet national vise à développer des méthodes de diagnostic et de suivi des pieux bois en tant que matériaux de construction durable et innovants.

Deux apports essentiels
Des préconisations techniques et des recommandations pratiques pour l'utilisation des pieux bois en tant que matériaux de construction durable et innovants.

Spécial TP La recherche collaborative doit se réinventer



Le pieu bois n'est pas un vœu pieux!

La technique traditionnelle tendant à être abandonnée au profit de nouvelles méthodes, la fondation en pieu bois a fait l'objet d'un projet national de recherche en 2010. Ses deux bénéficiaires, la fondation d'ouvrages et la promotion de pieu bois dans les ouvrages maritimes, particulièrement dans les habitats individuels, collectifs, équipements de collectivité.



Trancher pour des déblais réutilisés sur place
Un contrat régional a été signé entre le département de la Gironde et la commune de Bordeaux-Mérignac pour la réalisation de travaux de terrassement et de réutilisation des déblais sur place.

TRAVAUX ACTUALITÉ

RÉABILITER LES PIEUX BOIS EN FONDATION



Le projet pieux bois a pour objectif de développer des pieux bois en tant que matériaux de construction durable et innovants.

À 10 M DE PROFONDEUR
Les fondations en pieu bois sont utilisées pour la construction de bâtiments et d'ouvrages d'art.

TRAVAUX ACTUALITÉ

TAMPON DE VOIRIE EN COMPOSITE



Le projet pieux bois a pour objectif de développer des pieux bois en tant que matériaux de construction durable et innovants.

TRAVAILLER EN SÉCURITÉ
Les travaux de construction doivent être réalisés en toute sécurité.

Figure 12 : Revue de presses

8.3.4 Prix

Le procédé a été récompensé indirectement par l'attribution à l'entreprise GTS, le 19 novembre 2013, du prix "Ressources naturelles" décerné par la FNTP, Le Moniteur, Accenture, et la SMABTP, dans le cadre des Trophées des TP 2013 à l'occasion du Salon des Maires et des Collectivités Locales.

9 Bibliographie choisie

AFNOR (1989) Essai de champ pour déterminer l'efficacité protectrice relative d'un produit de préservation du bois en contact avec le sol. In, Vol NF EN 252

AFNOR (1992), Fondations profondes pour le bâtiment, Norme NF-P11-212, Paris, 72 pages (DTU n°13.12 CSTB)

AFNOR (1994) Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Partie 1 : guide des principes d'essai et de classification de la durabilité naturelle du bois. In.

AFNOR (1996) Produits de préservation du bois - Méthode d'essai pour déterminer l'efficacité protectrice vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores - Détermination du seuil d'efficacité. In NF_EN-113,

AFNOR (2001) Produits de préservation du bois - Détermination de l'efficacité vis-à-vis des micro-organismes de pourriture molle et d'autres micro-organismes du sol. In, Vol XP ENV 807.

AFNOR (2013) Durabilité du bois et des matériaux à base de bois — Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois. In, Vol NF EN 335., 19 pages.

American Wood Preservers Institute, (2002), Timber Pile Design and Construction Manual, 145 pages

Bjordal C.G., Daniel G., Nilsson T., (2000), Depth of burial, an important factor in controlling bacterial decay of waterlogged archaeological poles, *International Biodeterioration & Biodegradation* 45:15-26.

Bustamante M., Gianceselli L., (1981), Préviation de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale. Règles pressiométriques et pénétrométriques BLPC 113 :83-108.

Bustamante M., Jézéquel J.-F. (1989), Essai statique de pieu isolé sous charge axiale, *Méthode d'essai LPC n°31*, 12 pages.

Canadian Geotechnical Society, (2007) *Canadian Foundation Engineering Manual 4th Edition*, BiTech Publishers Ltd.

Dewar J., Watson M. (2007), *Developpement of UK grown timber for industrial applications – Final report*, BRE, 18 pages

Klaassen R, Abrami G, Björdal C, Creemers J, Eaton R, Gelbrich J, Huisman H, Hotchkiss S, Junga U, Keijer H, Retschmar E, Lamersdorf N, Landy E, Manders M, Mårdh S, Militz H, Mitchell J, Nelemans P, Nilsson T, Sass-Klaassen U, Vernimmen T (2005) *Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation poles and archaeological sites EVK4-CT-2001-00043*. In, Wageningen

Klaassen R.K.W.M., (2008a), Bacterial decay in wooden foundation piles—Patterns and causes: A study of historical pile foundations in the Netherlands, *International Biodeterioration & Biodegradation* (61)45–60.

Klaassen RKWM (2008b) *Some specific Dutch wood end use problems and chances*. In Conference COST E53, Delft, The Netherlands, 97-103.

MELT (1993), *Règles techniques de calcul et de conception des fondations des ouvrages de génie civil*, CCTG, Fascicule 62 Titre V, Texte officiel N° 93-3, 182 pages.

NEN (1991). *Geotechnics – Calculation method for bearing capacity of pile foundation - Compression pile NEN 6743*, 30 pages.

NEN (2009) *Quality requirements for timber - Piles - Coniferous timber NEN 5491*.

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

Reynolds T N (2003) *Timber piles and foundations*, BRE Construction Division, Digest 479, 12 pages.

Rowell RM (2012) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Second Edition. CRC Press.

SETRA - LCPC (1980), *Fondations de ponts en site aquatique en état précaire - Guide pour la surveillance et le confortement*, Document technique / Guide technique, 163 pages.

Venalainen M, Partanen H, Harju A (2014) *The strength loss of Scots pine timber in an accelerated soil contact test*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 86: 150-152.

10 Liste des annexes

Annexe 1 : Livrable état des lieux de l'utilisation des pieux en bois en France et dans le monde, techniques de mise en œuvre et méthodes de dimensionnement,

Annexe 2 : Livrable sites expérimentaux détaillant les expérimentations sur plots expérimentaux, description des expérimentations, programme d'essais, résultats détaillés,

Annexe 3 : Livrable dimensionnement faisant la synthèse des résultats et élaboration d'une base de données, calage des coefficients de frottement latéral et de pointe dans le cadre de la norme NF P94 262,

Annexe 4 : Livrable dégradation décrivant les expérimentations de dégradation de pieux en bois en présence d'attaque fongique et de cycles hydriques, mise au point des essais, résultats analyse,

Annexe 5 : Guide d'inspection permettant de diagnostiquer et guider dans les réparations des ouvrages du patrimoine ou des ouvrages d'art anciens,

Annexe 6 : Additif norme NF P94-262 proposant un cadre technique pour des applications de type parcs naturels et récréatives (pontons, quais, ponts, etc.) ou de logement individuel (chalets, maisons, etc.) et poser les bases pour l'application à des ouvrages de plus grande ampleur .

Résumé

Les objectifs de ce projet ont été de créer les conditions nécessaires à l'émergence d'une expertise nationale sur le dimensionnement et la durabilité des pieux bois en mettant en oeuvre des approches pluridisciplinaires : approche ouvrages, mécanique et physicochimie des sols et du bois en interaction avec l'eau mais également étude de l'aspect socio-économique. L'enjeu était de pouvoir :

- diagnostiquer et réparer des ouvrages du patrimoine ou des ouvrages d'art anciens,
- proposer une technique de fondation à faible impact environnemental et indirectement participant à l'enfouissement de CO2 pour des applications de type parcs naturels et récréatives (pontons, quais, ponts...) ou de logement individuel (chalets, maisons...)
- poser les bases pour l'application à des ouvrages de plus grande ampleur tout en restant dans le cadre d'une croissance raisonnée.

L'étude combinée des processus fondamentaux à partir de retour d'expérience et l'étude sur site expérimental réel ont été les points forts du projet mais les avancées en découlant aideront également à une meilleure maîtrise du comportement mécanique et physico-chimique et des risques par l'élaboration de méthodologies, dispositions constructives, produits ou techniques de (pré)traitement, grilles et critères aidant à établir des diagnostics de vulnérabilité des ouvrages anciens et à dimensionner des ouvrages neufs. Les résultats du projet PieuxBois sont de plusieurs ordres :

- l'élaboration d'une doctrine technique et d'une expertise nationale,
- méthode de diagnostic d'ouvrages existants,
- méthode de dimensionnement et dispositions constructives pour ouvrages neufs,
- méthode de diagnostic de l'état de dégradation sur ouvrages anciens et/ou d'estimation de durée de vie pour ouvrages neufs.

Abstract

A major goal of this project was to create conditions for the emergence of national expertise on the design and durability of timber piles. The methodology chosen to achieve this goal is to implement multidisciplinary approaches: structural approach, mechanical and physico-chemical approach of interaction of soil and wood with water but also study of the socio-economic achievements thus generating scientific knowledge for the benefit of a decision support while remaining within the framework of a rational growth. This project has addressed:

- Diagnosing and repairing heritage works and old structures,
- Proposing alternative foundation techniques for national parks and recreational facilities (docks, piers, bridges ...) or accommodation (chalets, houses ...),
- Laying the groundwork for application to more ambitious buildings or structures.

Combined study of fundamental processes from feedback and study on instrumented experimental site were the real strengths of the project but progress resulting from these studies will also result in better control of the mechanical and physico-chemical behaviour and risk by development of methodologies, constructive provisions, (pre) treatment products or techniques, grids and criteria to help diagnose the vulnerability of old structures and designing new structures. Major outcomes of WoodenPiles project are manifold:

- development of national doctrine and technical expertise,
- method of diagnosis of existing structures,
- design method and construction provisions for new structures,
- diagnosis method of the degradation state of old structures and / or estimating remaining life to new structures.