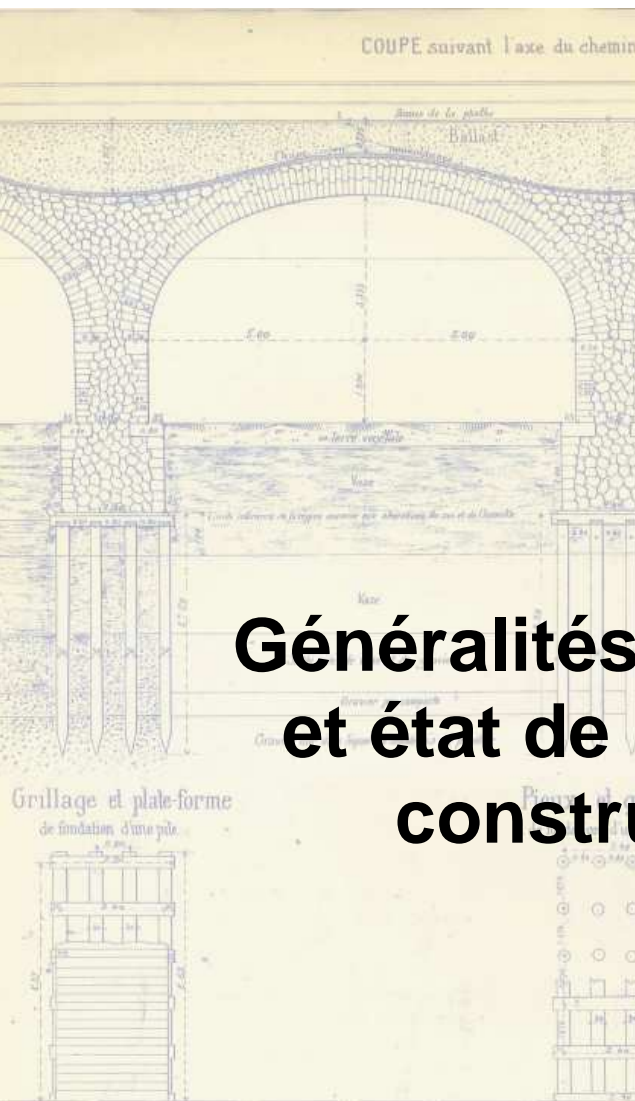




Projet Pieux Bois



Généralités sur les pieux en bois et état de l'art des méthodes de construction des fondations

Septembre 2013

Généralités sur les pieux en bois et état de l'art des méthodes de construction des fondations

Livrable du projet Pieux Bois 2010-2013

Ce document a été élaboré dans le cadre du projet C2D2 PieuxBois avec le soutien du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat (DGITM). Il comporte un seul volume de 106 pages consacré aux généralités sur les pieux en bois et état de l'art des méthodes de construction des fondations. Les documents tels que rapports de recherche, plans et photographies proviennent des archives de l'IFSTTAR ou des CETE, certaines photographies ont été prises sur des sites internet ou des plaquettes publicitaires, la plupart des dessins ont été faits par le premier auteur.

Les informations contenues dans ce livrable n'engagent que son auteur et ses co-auteurs. Ces derniers ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait en être fait.

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

Sommaire

Sommaire	5
Introduction	7
Partie I. Généralités sur le matériau bois et les pilots.....	9
1 Le matériau bois – essences, propriétés mécaniques et durabilité	9
1.1 Bois feuillus et bois résineux	9
1.2 Les forêts en France et dans le monde	10
1.3 La filière bois en France et à l'étranger.....	12
1.4 Comportement mécanique du bois	22
1.5 Durabilité du bois	31
2 Les pieux en bois – caractéristiques géométriques et battage	34
2.1 Caractéristiques géométriques des pieux	34
2.2 Battage des pieux en bois dans le sol	40
Partie II. Etat de l'art des méthodes de construction des fondations sur pieux en bois	49
1 Evolution des méthodes de construction des fondations	49
1.1 Les méthodes de construction des fondations à l'époque préromaine.....	49
1.2 Les méthodes de construction des fondations à l'époque romaine	52
1.3 Les méthodes de construction des fondations à l'époque du Moyen-Âge.....	56
1.4 Les méthodes de construction des fondations à la Renaissance.....	57
1.5 Les méthodes de construction des fondations à l'époque moderne	60
1.6 Les méthodes de construction des fondations à l'époque industrielle	67
1.7 Synthèse	74
2 Désordres et renforcement des fondations des ouvrages.....	80
2.1 Les désordres relevés sur les ouvrages.....	80
2.2 Méthodes de renforcement des fondations des ouvrages sur pieux bois.....	84
Conclusion	87
Références bibliographiques et sitographiques.....	89
Annexes	95
Annexe A : Caractéristiques des fondations en bois des ponts routiers	95
Annexe B : Travaux de confortement des fondations en bois des ouvrages routiers .	106

Introduction

Si les fondations superficielles existent depuis que l'Homme a décidé de construire, l'histoire des fondations dans des « sols mauvais » est plus révélatrice des évolutions. Dès le Néolithique, les premières civilisations lacustres ont eu besoin de pilotis en bois sans aucun doute battus à la force humaine. Les premières traces écrites 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.

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, de l'Ecole 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), 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.

Ce livrable est divisé en deux parties.

La première partie présente quelques généralités sur le matériau bois et les pilots. L'état actuel de la filière bois en France et à l'étranger est présenté ainsi que les enjeux et les atouts environnementaux de ce matériau. Le comportement mécanique du bois et ses propriétés de

durabilité de ce matériau sont également détaillés. Enfin, les caractéristiques géométriques des pieux en bois et leur mise en œuvre dans le sol par battage sont exposées.

La seconde partie de ce livrable traite de l'évolution des méthodes de construction des fondations des ouvrages, de l'époque préromaine jusqu'à l'abandon des pieux en bois au 19^{ème} 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.

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 sont également présentés dans cette deuxième partie. Les principales causes de ces désordres et les méthodes de renforcement des fondations mises en œuvre pour préserver ce patrimoine sont détaillées.

Partie I. Généralités sur le matériau bois et les pilots

1 Le matériau bois – essences, propriétés mécaniques et durabilité

1.1 Bois feuillus et bois résineux

Le bois est un matériau issu de l'activité biologique de l'arbre. La coupe transversale d'un tronc d'arbre (résineux ou feuillu) fait apparaître cinq parties différentes (Figure 1) :

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

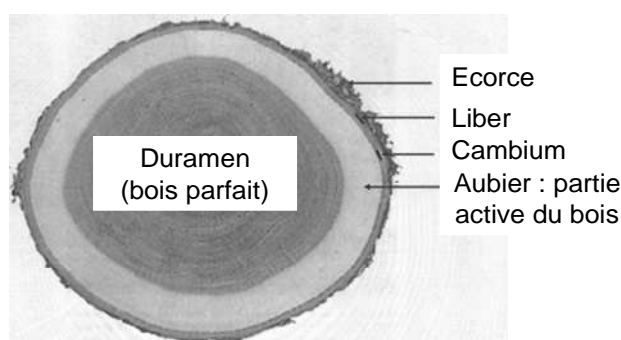


Figure 1. Coupe d'un tronc d'arbre (Barbe et Keller, 1996)

Les 3000 espèces de végétaux ligneux identifiées dans le monde sont réparties en deux classes de bois différentes, les résineux et les feuillus, dont les propriétés structurelles diffèrent (Figure 2) :

- Le bois des feuillus est constitué de différents types de cellules (vaisseaux, trachéides et cellules parenchymes), de vaisseaux particuliers assurant la conduction de la sève brute et de fibres ligneuses composées de cellules mortes donnant au bois sa résistance. Les vaisseaux sont principalement orientés dans la direction longitudinale de l'arbre. Ceux orientés radialement constituent les rayons ligneux et assurent trois fonctions principales : la conduction radiale de la sève, le soutien de la tige et le stockage de substances chimiques (Barbe et Keller, 1996). Les feuillus les plus connus sont le chêne, le hêtre, le châtaignier et le peuplier ;
- A l'inverse des feuillus, les résineux présentent une organisation simple et uniforme. Ils sont constitués de deux types de cellules : les trachéides et les cellules parenchymes. Le

transport vertical de la sève brute et le soutien vertical de l'arbre sont assurés par les trachéides, tandis que les cellules parenchymes permettent l'emmagasinement et la répartition des substances chimiques (Barbe et Keller, 1996). Les résineux, constitués à 90 % de trachéides, contiennent également des rayons ligneux.

Les résineux les plus connus sont le sapin, l'épicéa, le douglas, le pin maritime et le pin des landes.

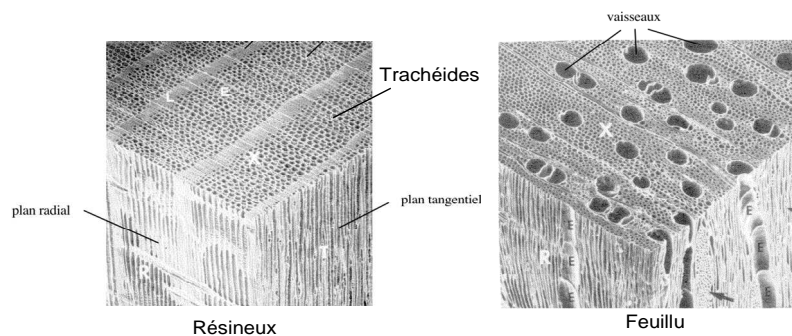


Figure 2. Observation microscopique d'un résineux et d'un feuillu (Barbe et Keller, 1996)

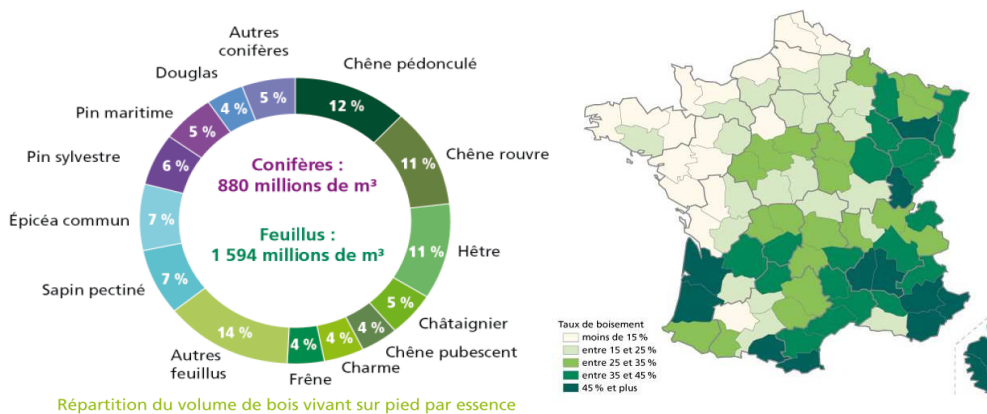
1.2 Les forêts en France et dans le monde

1.2.1 Cartographie des forêts et essences de bois françaises

Selon une campagne réalisée par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) entre 2005 et 2009 [1], la forêt en France métropolitaine couvre aujourd'hui environ 16 millions d'hectares (dont 15,3 millions d'hectares de forêt de production), ce qui représente un petit tiers du territoire. Elle ne recouvrait, en 1830, que 8 millions d'hectares. La France arrive au cinquième rang des pays européens en matière de surface forestière, derrière la Russie, la Finlande (avec respectivement 29 et 22 millions d'hectares), la Suède et l'Espagne (16 millions d'hectares). Elle possède néanmoins la première forêt de feuillus d'Europe, avec un peu plus de 10,3 millions d'hectares.

75 % des forêts métropolitaines françaises relèvent du domaine privé, 15 % sont gérées par les collectivités territoriales et 10 % appartiennent au domaine de l'Etat.

Contrairement aux autres pays européens, la forêt française présente une très grande diversité d'essences. En 2011, le MAAF (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt) a recensé sur le territoire 136 essences forestières, dont une trentaine couramment exploitée pour valoriser la filière bois [1]. Selon l'IGN, 27 % des forêts françaises sont constituées de chênes, 11 % de hêtres et 22 % de pins. Les feuillus en représentent 66 % et les résineux 34 % (INIGF, 2012) (Figure 3).



Répartition du volume de bois vivant sur pied par essence

Figure 3. Répartition du volume de bois vivant sur pied par essence (INIGF, 2012)

Les campagnes de prélèvement de bois menées par l'IGN au cours des dernières années ont permis d'établir avec précision les caractéristiques forestières (volumes de bois mort et vivant) de chaque région, ainsi que la répartition des essences sur le territoire. Cette campagne d'études est venue compléter celle réalisée par l'INRA en 1995 [2] (Figure 4 et Figure 5).

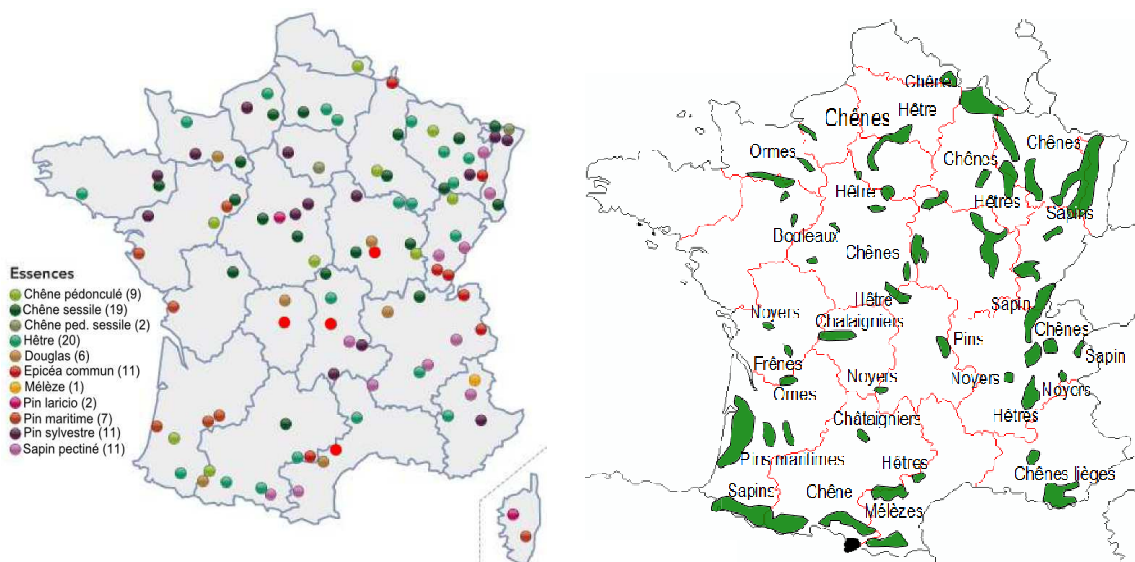


Figure 4. Localisation des différentes essences sur le territoire français en 1995 [2]

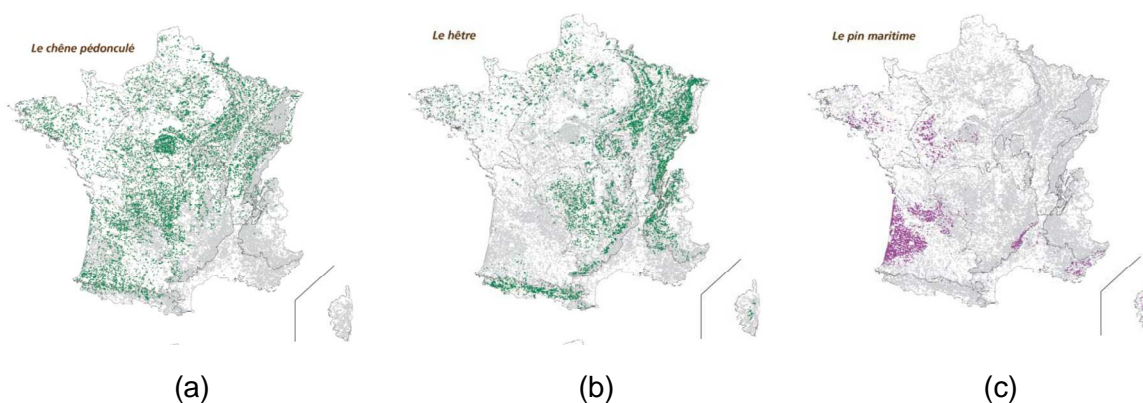


Figure 5. Répartition des essences de chêne pédonculé (a), de hêtre (b) et de pin maritime (c) sur le territoire (INIGF, 2012)

1.2.2 Les forêts en Europe et dans le monde

Les surfaces boisées dans le monde sont très diversifiées et couvrent, selon l'ONF [3], environ quatre milliards d'hectares à travers les continents. Seulement 800 millions d'hectares sont néanmoins destinés à la production. L'ONF distingue quatre types de forêts :

- La forêt boréale, caractéristique de l'hémisphère Nord et du pourtour du cercle polaire est essentiellement composée de conifères comme les sapins, les mélèzes, les épicéas et les pins ;
- Les forêts tropicales et subtropicales (ou forêt équatoriale et forêt humide), situées principalement en Afrique, en Amérique centrale, en Océanie et en Asie, sont composées de plusieurs étages de végétaux et se caractérisent par leur très grande richesse biologique (50000 espèces d'arbres) ;
- Les forêts tempérées, composées d'essences à feuilles caduques (peuplier, bouleau, charme, hêtre, chêne) et de conifères (selon les régions : pins, sapins, cèdres, séquoias...), sont majoritairement situées en Europe et en Amérique du Nord.

La Figure 6 présente le pourcentage de forêts dans les différents pays du monde par rapport à leur superficie, établi par l'Organisation sur l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) en 2005 [4].

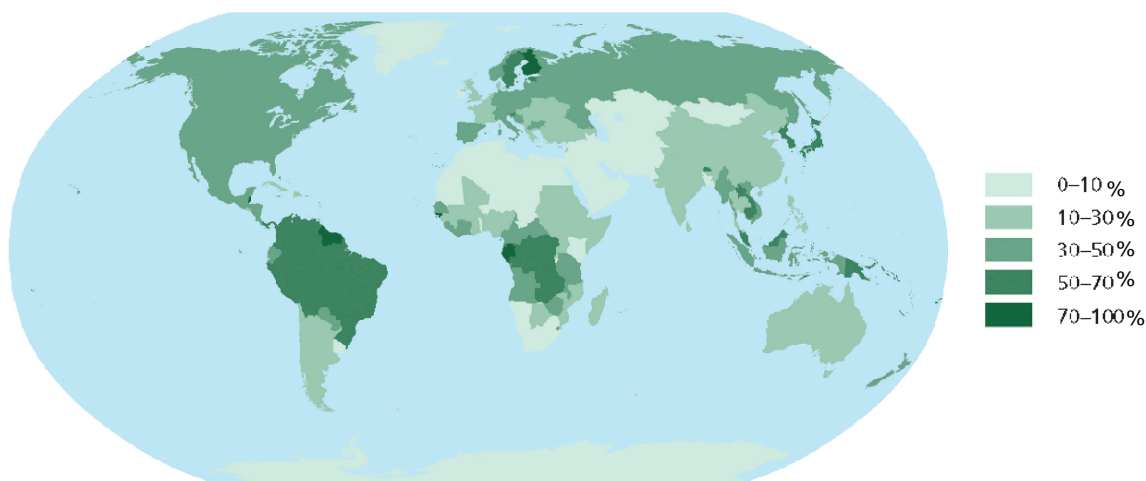


Figure 6. Superficie forestière en pourcentage de la superficie des terres par pays établie par la FAO en 2005 [4]

1.3 La filière bois en France et à l'étranger

1.3.1 Classification française des essences

Il existe, à travers le monde, des dizaines d'essences de bois qui diffèrent en fonction de leurs propriétés mécaniques, esthétiques ou de durabilité. L'ensemble de ces paramètres a conduit à définir quatre classifications des essences dépendant des conditions d'usage du bois [5] :

- La première regroupe les essences aux caractéristiques analogues. Elle est divisée en trois catégories :

- Les bois de pays ou bois de France, parmi lesquels on retrouve les essences présentes sur le territoire français : le chêne, le sapin, l'orne, le hêtre, le châtaignier, l'aulne ou encore le pin maritime (Davidian, 1969) ;
- Les bois d'importation ou bois étrangers. Cette catégorie regroupe les essences présentes sur les territoires français d'outre mer (notamment la Guyane) et dans les pays situés au nord de l'Europe (épicéa, pin sylvestre, bois vert) ;
- Les bois tropicaux, africains et américains qui incluent les essences originaires d'Afrique et d'Amérique, comme l'azobé, le pin d'Oregon (ou pin Douglas) ou l'épicéa américain ;
- La seconde est relative à l'aspect esthétique des bois ;
- La troisième a trait aux propriétés mécaniques des essences, établies dans la norme française NF EN 338 (AFNOR, 2009). Dans cette classification, la fonction principale des bois est de résister aux actions appliquées aux ouvrages (Partie I, § 1.4) ;
- La quatrième concerne la durabilité des essences. Cinq classes d'emploi ont été définies par l'Union Européenne et reprises dans la norme française NF EN 335-2 (AFNOR, 2007). Elles permettent d'évaluer, en fonction de la nature des essences, les risques auxquels le bois peut être exposé [5] et sont détaillées dans la Partie I, § 1.5.

1.3.2 L'état actuel de la filière bois et l'emploi des pieux en bois en France

1.3.2.1 La faible valorisation de la filière bois dans la société actuelle

La filière bois constitue aujourd'hui une chaîne professionnelle, commerciale et industrielle, dont le premier maillon est le bûcheron. Une fois les pièces de bois rassemblées en forêt (débardage), elles sont transportées jusqu'en scierie où elles subissent deux transformations : le sciage de tête et le traitement fongicide qui les protège des attaques fongiques et des insectes. Les pièces de bois sont ensuite distribuées (après une phase de négoce) et mise en œuvre par les différents corps de métiers.

Compte tenu des ressources naturelles présentes sur le territoire français, le développement de la filière bois représente aujourd'hui un enjeu majeur en France. Son potentiel forestier est peu valorisé : la part de marché de cette filière dans la construction atteint seulement un peu plus de 10 % [6], alors que la forêt recouvre 29 % du territoire et que la France possède la 5^{ème} surface forestière d'Europe ainsi que la première forêt de feuillus. Les perspectives de développement de cette filière sont donc importantes. Selon un rapport rendu public sur les perspectives de valorisation de la ressource de bois d'œuvre feuillus en France (FCBA, 2011), la part de marché de cette filière dans les constructions françaises est bien inférieure à celles des Etats-Unis et des pays scandinaves, évaluées respectivement à 50 et 20 %.

1.3.2.2 L'emploi des pieux en bois dans la filière bois française actuelle

Pendant des siècles, voire des millénaires, les bâtiments et ponts ont été érigés sur des pieux en bois battus dans des terrains possédant de faibles propriétés mécaniques.

Avant le 18^{ème} siècle, la sélection d'une essence de bois par rapport à une autre était liée à la nature des forêts situées à proximité des chantiers. Par exemple, l'abondance des forêts de

chêne dans l'est de la France ou du pin maritime dans le sud-ouest (Figure 5) en faisait des essences très utilisées dans ces régions dans la construction des fondations.

La révolution industrielle au 18^{ème} siècle et l'essor des réseaux ferré et routier au 19^{ème} siècle ont été à l'origine du développement du commerce et du charbon en Europe. Les progrès technologiques ont contribué à diversifier les essences jusque-là utilisées sur les chantiers. Ainsi, le pin sylvestre (produit essentiellement dans le nord de l'Europe) qui était moins coûteux que les autres essences a été largement utilisé dans la construction des fondations des bâtiments et ponts à cette époque en France.

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

Aujourd'hui en France, le matériau bois est largement utilisé dans les constructions d'ouvrages côtiers, maritimes et portuaires (épis, estacades, écrans-chasse). Il constitue généralement tout ou une partie de ces ouvrages (Figure 7). Les études menées par [Meaden et al., \(2012\)](#) ont montré que les bois mis en œuvre dans des environnements hostiles caractérisés par une « agressivité » maritime, des zones de marnage ou le frottement des sédiments devaient présenter des propriétés mécaniques et de durabilité élevées. Les auteurs ont identifié, suite à un retour d'expérience et aux résultats de travaux effectués sur la durabilité et la résistance mécanique, une vingtaine d'essences de bois qui pourrait se substituer aux bois tropicaux (comme l'azobé ou le greenheart) dans ce type d'ouvrage.



Figure 7. Ouvrage de protection littoral en Angleterre (a) et jetée de la Fenêtre à Cancale en Ile-et-Vilaine (b)

Les pieux sont également mis en œuvre dans les constructions des berges de canaux, des quais et servent de protection contre les phénomènes d'affouillement. De nombreuses passerelles et belvédères piétons sont aussi fondés sur des pieux en bois, puis construits avec ce même matériau pour des raisons esthétiques : les pieux sont généralement fichés dans le sol à l'aide de vibrofonçeurs (pneumatiques ou hydrauliques) ou de pelles mécaniques jusqu'au refus (Figure 8).



Figure 8. Construction d'un belvédère piéton dans la commune de Sanchev (Vosges)

Du fait de leur usage, les descentes de charges de ces ouvrages sont pour la plupart relativement faibles par rapport à celles des ouvrages d'art, bâtiments et habitats construits au cours des siècles derniers. Par exemple, les passerelles piétonnes sont actuellement dimensionnées en considérant des descentes de charges égales à 450 kg/m^2 , soit $4,4 \text{ kPa}$.

L'abandon des pieux en bois en France dans les constructions des ouvrages d'art et des bâtiments remonte à plus d'un siècle et demi. Plusieurs hypothèses permettent de justifier leur absence dans les constructions actuelles :

- Le déclin et l'abandon de l'utilisation des pieux en bois en France sont concomitants à l'invention de nouveaux matériaux comme la chaux hydraulique, intervenant dans la fabrication du béton immergé et dont la résistance est supérieure à celle du bois (Partie II, § 1.6.4) ;
- Il n'existe à ce jour aucun « contexte normatif » ni cadre réglementaire français permettant d'asseoir le dimensionnement des pieux en bois dans la pratique actuelle ;
- Le choc vécu lors de l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978 dû à la dégradation et à l'affouillement des pieux suite au creusement du lit de la Loire par extraction des matériaux a conforté l'emploi d'autres technologies de pieux, considérées comme « plus durables ».

Plus généralement, le dragage intensif des alluvions et sédiments des cours d'eau et des fleuves afin d'augmenter les tirants d'eau des bateaux a entraîné des rabattements de nappes et de niveaux d'eau importants. Suite à ces rabattements inconsidérés, des zones de marnage sont apparues et ont conduit localement à la dégradation fongique des platelages et des têtes des pieux des ouvrages. Ce phénomène a notamment été observé au niveau des quais du Grand Port Maritime de Rouen, sous lesquels le platelage et les têtes des pieux en hêtre se sont dégradés suite à l'abaissement du niveau de la Seine de plus d'un mètre (Figure 9).

Il existe néanmoins en France des Agences de l'eau ou des syndicats mixtes d'étude et de gestion des nappes phréatiques qui assurent le suivi du niveau des nappes. Les données piézométriques du bassin Seine-Normandie rendues publiques par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) permettent également de surveiller le niveau des nappes dans ce bassin. Elles peuvent être utilisées pour prévenir d'éventuels risques de dégradation fongique des pieux en bois d'ouvrages ou de bâtiments ;



Figure 9. Exemple de détérioration du platelage en hêtre sous les quais du Grand Port Maritime de Rouen

- Les études menées ces dernières années sur l'utilisation des différentes techniques de réalisation des pieux ont montré que près de 75 % des pieux mis en œuvre sur le territoire français étaient forés (Figure 10). La nature des couches géologiques ainsi que la volonté française de développer et d'exporter cette technologie à l'étranger permettent d'expliquer cette tendance actuelle.

Selon [Van Impe, \(2004\)](#), les pieux battus ne représentent que 4,6 % du marché actuel français (Figure 10). Le faible emploi de ce type de pieux en France pourrait s'expliquer par l'influence de la technique de réalisation des sondages au pressiomètre Ménard (réalisation d'un trou de forage dans le sol avant l'introduction de la sonde) dans la pratique actuelle.

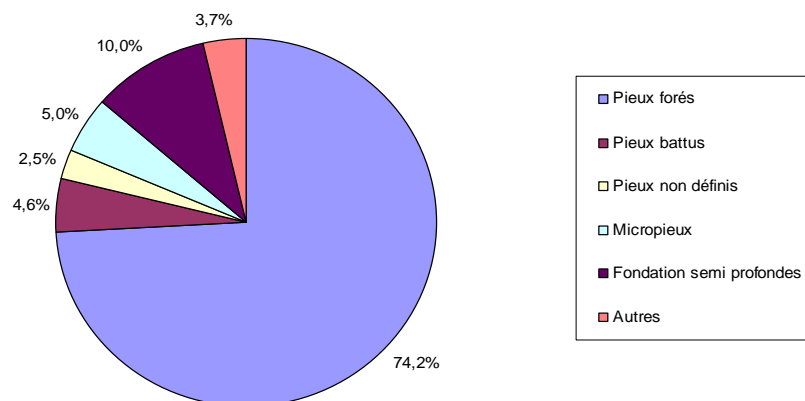


Figure 10. Types de pieux utilisés dans la pratique française (modifié d'après [Van Impe, 2004](#))

Les pieux en bois ne sont donc plus utilisés en France dans les constructions d'ouvrages d'art et de bâtiments depuis de nombreuses décennies. A l'inverse, bien après leur abandon dans les constructions françaises, les pieux en bois ont continué à être utilisés dans de nombreuses constructions à l'étranger.

1.3.3 L'emploi des pieux en bois dans les pays étrangers

Jusqu'à ces dernières années, les pieux en bois ont été largement employés à travers le monde dans les constructions des fondations des bâtiments et d'ouvrages d'art. Le choix des essences de bois utilisées aux Etats-Unis, aux Pays-Bas, au Canada ou dans les pays scandinaves était principalement fonction des ressources naturelles disponibles dans ces pays.

1.3.3.1 L'emploi des pieux en bois aux Etats-Unis

Aux Etats-Unis, les pieux en bois ont été très utilisés du fait d'une abondance de pins jaunes de Sud et de pins Douglas particulièrement adaptés à cette technique. Le pin jaune s'étendant du Mexique au Canada (en passant par les Etats-Unis), à des altitudes comprises entre 300 et 2000 m, il constitue une ressource importante et de proximité dans de nombreuses régions de ce pays. Selon [Dean, \(2006\)](#), jusqu'à 500000 pieux ont été battus annuellement sur ce vaste territoire au cours des dernières décennies. 90 % des pieux en bois étaient en pin jaune, 9 % en pin Douglas et 1 % en d'autres essences. L'utilisation de cette technologie de pieux a par ailleurs été renforcée avec la rédaction et la publication du guide « Timber Pile Design and Construction Manual » par l'institut « American Wood Preservers Institute » ([AWPI, 2002](#)), dans lequel l'ensemble des méthodes de dimensionnement des pieux en bois est détaillé.

Plusieurs grands bâtiments reposent aujourd'hui sur des pieux en bois aux Etats-Unis :

- Le superdôme de Louisiane a été bâti sur des pieux en bois supportant 13000 m³ de béton et 18000 tonnes d'acier ([Reynolds et Bates, 2009](#)) ;
- Dans la baie de Marsh à New York, un des terminaux de l'aéroport JFK a été construit sur 1000 pieux en bois de 12,20 m de longueur battus dans des sables ([Graham et James, 1996](#)).

1.3.3.2 L'emploi des pieux en bois aux Pays-Bas

L'emploi des pieux en bois aux Pays-Bas s'est généralisé à partir du 15^{ème} siècle, lorsque les constructions en maçonnerie ont été rendues obligatoires. Les bâtisseurs ont alors été contraints d'ériger les bâtiments sur des fondations solides en pieux.

Pour faire face à la demande croissante de bois dans le pays au 15^{ème} siècle, les Hollandais utilisaient principalement du pin dans les fondations car sa croissance rapide faisait qu'il était bon marché. La faible superficie des Pays-Bas par rapport aux autres pays européens a également conduit les hollandais à importer des essences provenant d'Allemagne ou des pays scandinaves, principalement du pin sylvestre et de l'épicéa.

Selon [Reynolds et Bates, \(2009\)](#), 200000 pieux en bois ont été battus annuellement aux Pays-Bas ces dernières années lors de la construction de routes, de bâtiments agricoles, de maisons et de centres sportifs. Les essences les plus utilisées étaient l'épicéa et le pin Douglas.

Le nombre et la disposition des pieux en bois sous les bâtiments diffèrent selon les régions : à Rotterdam (Figure 11a), une seule rangée de pieux en bois est positionnée au centre de la fondation en maçonnerie tandis qu'à Amsterdam, les fondations sont constituées d'une paire de pieux, sur laquelle repose un platelage en bois (Figure 11b).

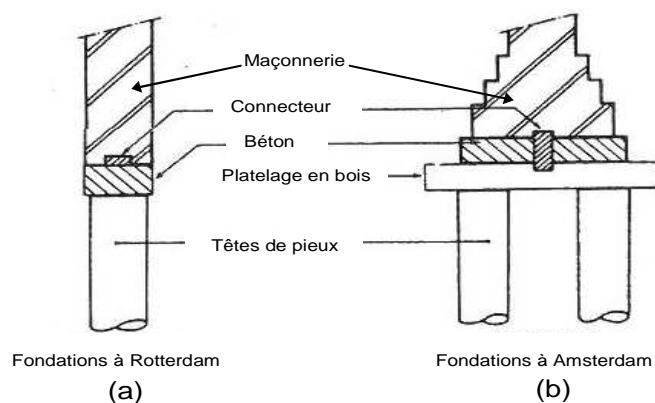


Figure 11. Disposition des pieux et nature des transitions entre les pieux et la maçonnerie à Rotterdam (a) et à Amsterdam (b) (modifié d'après De Leeuw, 1985)

Les nombreux ouvrages, bâtiments et habitats fondés sur des pieux en bois ont amené les Hollandais à rédiger et publier un protocole contenant une méthodologie d'analyse et de diagnostic de l'état des fondations en bois.

1.3.3.3 L'utilisation des pieux en bois en déclin à l'étranger

Bien que les Etats-Unis, les Pays-Bas, le Canada, les pays scandinaves ou encore l'Allemagne possèdent un patrimoine très riche d'ouvrages fondés sur des pieux en bois, on assiste, depuis quelques années, à un déclin de l'utilisation de cette technologie de pieux dans ces pays. Plusieurs facteurs environnementaux et sociétaux peuvent l'expliquer :

- La limitation des diamètres et des longueurs des pieux (Partie I, § 2.1.1) par les dimensions des arbres ;
- Les problématiques liées à la durabilité du bois nécessitant des conditions environnementales particulières (immersion permanente du bois non traité) (Partie I, § 1.5) ;
- L'augmentation de la portance limite des pieux sous les bâtiments et ouvrages d'art suite à la croissance du trafic et à l'augmentation du poids des ouvrages et des charges de transport.

Selon une étude réalisée par Van Impe, (2004), le pourcentage d'utilisation des pieux en bois par rapport à l'ensemble des pieux mis en œuvre en Europe (Figure 12a) et dans le monde (Figure 12b) atteint seulement 2 %. A titre de comparaison, les pourcentages de pieux battus en acier et en béton sont respectivement de 7 et 26 % en Europe, et de 8 et 23 % dans le monde.

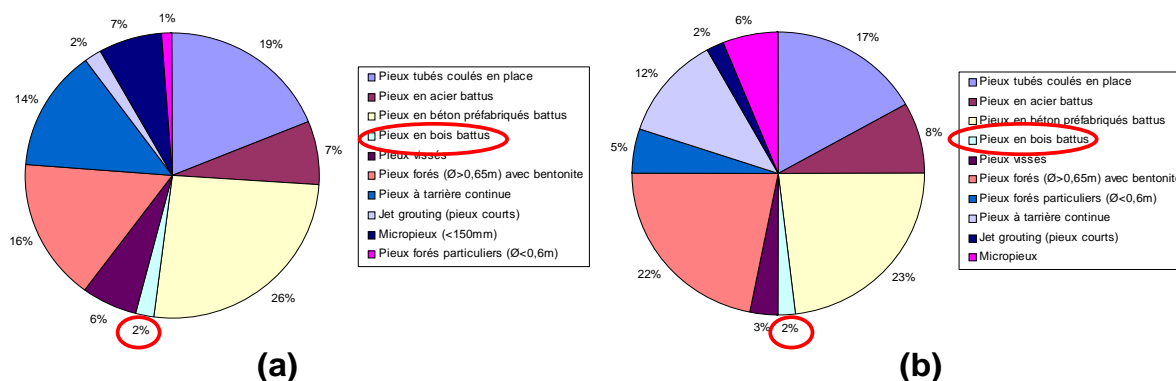


Figure 12. Types et pourcentages d'utilisation des pieux en Europe (a) et dans le monde (b) (modifié d'après Van Impe, 2004)

Aux Pays-Bas, les rabattements de nappe générés par la présence de réseaux d'évacuation des eaux usées situés sous le niveau des nappes (Figure 13) ont parfois entraîné l'apparition de zones de marnage et par conséquent la dégradation fongique des têtes des pieux (Partie I, § 1.5). Depuis ces sinistres, l'état hollandais a mis en œuvre, par l'intermédiaire de « syndicats » des eaux, une surveillance accrue afin de faire disparaître ou de limiter les rabattements. L'utilisation de pieux en bois dans ce pays pour de nouvelles constructions est aujourd'hui limitée à des structures légères comme des serres et des extensions de maisons individuelles.

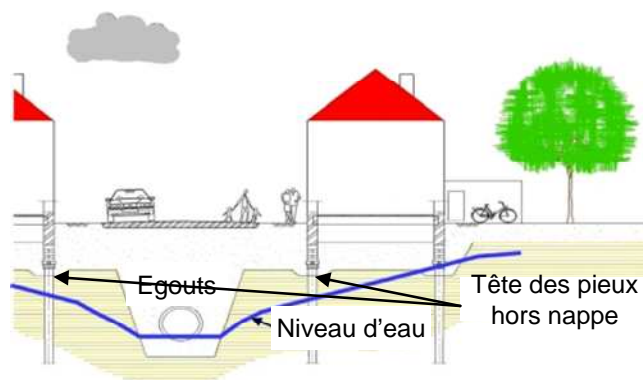


Figure 13. Abaissement de la nappe due aux réseaux d'évacuation des eaux usées (modifié d'après Stichting Platform Fundering Nederland, 2005)

1.3.4 Les pieux en bois, une alternative environnementale aux autres technologies de pieux

1.3.4.1 Atouts environnementaux du matériau bois

Les préoccupations liées au changement climatique et à l'épuisement progressif des ressources naturelles ont conduit l'Etat à développer, à travers la mise en œuvre du Grenelle Environnement, l'usage du bois dans la construction. Les enjeux du développement de cette filière dans la société d'aujourd'hui sont considérables, dans la mesure où le matériau bois présente de multiples avantages environnementaux par rapport aux autres matériaux comme le béton et l'acier :

- Le bois est un matériau renouvelable : un arbre se régénère en moins de 100 ans, contre quelques milliers d'années pour le pétrole ;
- Son faible poids par rapport à celui de l'acier ou du béton conduit à limiter l'énergie fossile consommée lors de sa transformation en produit de construction et à faciliter la manutention lors de sa mise en œuvre. Le bois est par ailleurs facilement ouvrable. Les troncs d'arbres ne nécessitent que peu de transformations pour concevoir un pieu ;
- Le bois constitue une ressource de proximité, abondante et disponible localement en France, permettant ainsi de réduire les émissions de dioxyde de carbone générées par le transport des matières premières. Il limite les quantités de gaz à effet de serre émises dans l'atmosphère en absorbant le dioxyde de carbone au cours de sa croissance. Son emploi dans la construction conduit à la séquestration de ce gaz absorbé lors de sa croissance et donc à l'absence de rejet dans l'atmosphère. Selon [1], l'équivalent de six années d'émissions de dioxyde de carbone en France serait ainsi stocké dans les arbres des forêts ;
- Le bois est également un matériau recyclable dans la mesure où les déchets rejetés lors de sa transformation en produit de construction peuvent être valorisés en énergie (sous forme de combustibles) ou recyclés dans l'industrie du papier ou dans la fabrication de pièces composites.

1.3.4.2 Les pieux en bois : une alternative aux pieux en béton et en acier

Compte tenu des préoccupations et de la volonté de l'Etat français de mettre en œuvre des politiques intégrant la notion de développement durable, ainsi que des multiples avantages environnementaux du bois (Partie I, § 1.3.4.1), les pieux en bois apparaissent, sur le plan des émissions carbone, comme une solution alternative performante aux pieux en béton et en acier.

Les données fournies par la base carbone de l'ADEME [7] permettent d'estimer, à partir d'un calcul simple, les émissions de dioxyde de carbone liées à la fabrication de pieux en acier, en béton (ferraillé) et en bois de 5 m de longueur et 30 cm de diamètre.

Le transport des granulats ainsi que des grumes de la zone de débardage jusqu'à la scierie dans laquelle les pieux en bois sont usinés est pris en compte. La distance est évaluée à 60 km, ce qui suppose dans la pratique d'utiliser des bois locaux.

La démarche et les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Comparaison des émissions de CO₂ pour la fabrication de pieux en béton, en acier et en bois

Pieu béton	Pieu acier	Pieu bois
Fabrication béton armé : 367 kg CO ₂ /tonne (ADEME) Extraction granulats : 88 kg CO ₂ /tonne (ADEME)	Fabrication acier ou fer blanc neuf : 3190 kg de CO ₂ /tonne (ADEME) Fabrication acier ou fer blanc recyclé : 1100 kg de CO ₂ /tonne (ADEME)	Fabrication bois d'œuvre : 36,7 kg de CO ₂ /tonne (ADEME)
$\rho_{\text{béton}} : 2200 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{\text{acier}} : 7500 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{\text{bois}} : 700 \text{ kg/m}^3$
Masse CO ₂ émise : 319 kg	Masse CO ₂ émise (acier neuf) : 8455 kg Masse CO ₂ émise (acier recyclé) : 2915 kg	Masse CO ₂ émise : 9 kg
Transport granulats : 10 kg de CO ₂		Transport de 10 grumes sur 60 km : Véhicules (PTAC) : de 3,51 à 5 tonnes Emission de CO ₂ à pleine charge : 175 g/km (ADEME) Emission de CO ₂ : 10,5 kg soit 1 kg CO ₂ par grume
Masse CO ₂ émise : 329 kg	Masse CO ₂ émise (acier neuf) : 8455 kg Masse CO ₂ émise (acier recyclé) : 2915 kg	Masse CO ₂ émise : 10 kg

Les résultats obtenus dans le Tableau 1 montrent que la fabrication d'un pieu en bois émet environ 30 fois moins de CO₂ que la fabrication d'un pieu en béton et 300 fois moins que celle d'un pieu en acier.

Le British Research Establishment (BRE) a réalisé, en 2007, une étude sur le potentiel environnemental des pieux en bois sur le territoire du Royaume-Uni et a conclu à la viabilité technique et économique de cette technologie en insistant sur son intérêt environnemental indéniable (Dewar et Watson, 2007 ; Reynolds et Bates, 2009). Les résultats de l'étude ont montré que :

- les fabrications du béton et de l'acier émettent respectivement en moyenne 173 kg/m³ et 15313 kg/m³ de CO₂, contre 141 kg/m³ de CO₂ pour la taille et l'usinage du bois ;
- 1 m³ de bois capte en moyenne entre 800 et 900 kg de CO₂ provenant de l'atmosphère.

Selon Reynolds et Bates, (2009), les pieux en bois présentent également un coût plus faible que celui des pieux en acier et en béton. Les auteurs ont comparé les coûts de réalisation de trois types de pieux battus (béton, acier et bois) lors d'un projet en 2008 nécessitant la mise en œuvre d'une centaine de pieux dans de l'argile molle à ferme (Tableau 2). Chaque pieu devait supporter une charge de 110 kN.

Tableau 2. Estimation et comparaison du coût de réalisation des pieux en béton, acier et bois (Reynolds et Bates, 2009)

Types de pieu	Pieu béton battu	Pieu acier battu	Pieu bois battu
Longueur (m)	10	10	10
Diamètre (cm)	20	14	20-30
Mobilisation du matériel (€)	2400	2400	2400
Matériel et installation	22 €/m	34 €/m	11 €/m
Divers (terrassment chantier, etc.) (€)	3600	3000	3600 (avec blocs de béton en tête des pieux)
Test de chargement d'un pieu (€)	1200	1200	1200
Coût du projet (€)	29000	54000	18000
Coût des pieux	29 €/m	54 €/m	18 €/m

Les résultats de cette étude ont montré que le coût de fabrication d'un pieu en bois, ramené au mètre linéaire, était respectivement inférieur de 30 et 66 % à celui d'un pieu en béton et en acier.

1.4 Comportement mécanique du bois

1.4.1 Hétérogénéité et anisotropie du bois

Le bois est un matériau hétérogène et anisotrope. Ses propriétés mécaniques dépendent de l'essence et de l'échelle considérées :

- Le bois est un matériau hétérogène. Les cellules qui le composent sont de natures et de formes différentes. Il présente une densité irrégulière dans le tronc de l'arbre. Les singularités et défauts de croissance de l'arbre au cours de sa vie (caractérisés par la présence de nœuds) permettent d'identifier et de différencier chaque échantillon de bois prélevé. La présence naturelle de nœuds entraîne une forte variation des propriétés mécaniques dans la direction longitudinale d'une structure en bois (Olsson et Källsner, 2012) ;
- Le bois est un matériau anisotrope. Du fait de sa constitution fibreuse, ses propriétés mécaniques varient en fonction de la direction d'application de l'effort. Trois directions d'observation principales sont définies : longitudinale, radiale et tangentielle (Figure 14). L'observation d'échantillons au microscope montre que les fibres sont majoritairement orientées dans la direction longitudinale du tronc (Figure 2). L'orientation et l'agencement de leur structure cellulaire diffèrent donc selon les directions d'observation. Selon Almeida, (2006), le bois peut être considéré comme un matériau homogène et orthotrope si l'échelle d'observation est macroscopique et ne dépasse pas quelques centimètres.

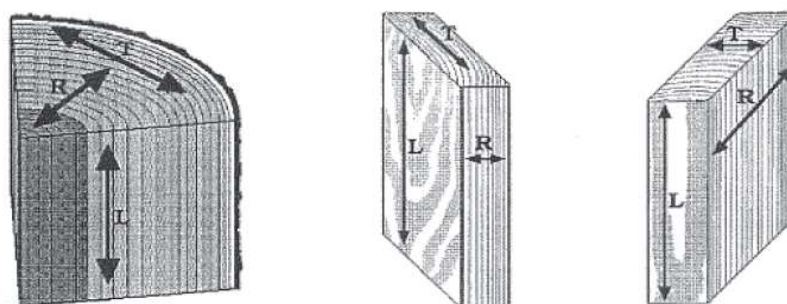


Figure 14. Directions principales du bois (L : longitudinale ; R : radiale ; T : tangentielle) (Wengert et Meyer, 2002, cités par Dinh, 2011)

Les propriétés mécaniques et thermiques du bois caractérisent son anisotropie dans les trois directions principales (longitudinale, radiale et tangentielle) :

- Les modules d'élasticité et de cisaillement, déterminés à partir de mesures expérimentales ;
- Le retrait et le gonflement des échantillons suite aux fluctuations de sa teneur en eau et quantifiés par sa variation dimensionnelle dans les trois directions principales ;
- La dilatation thermique mesurée avec le coefficient de dilatation thermique.

Le Tableau 3 présente quelques résultats d'études sur l'anisotropie du bois.

Tableau 3. Résultats d'études sur l'anisotropie du bois

Auteurs	Paramètres	Protocoles et résultats d'études																																																
<p>Kollmann et Côté, (1968)</p> <p>Dinckal, (2011)</p> <p>Guitard, (1987)</p>	<p>Module d'élasticité</p> <p>Module de cisaillement</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Selon Kollman et Côté, (1968), le module d'Young est plus élevé dans la direction longitudinale que dans les directions radiale et tangentielle ($E_{\text{longitudinal}} >> E_{\text{radial}} > E_{\text{tangentielle}}$). Le rapport E_L/E_R varie entre 41 et 182 chez les conifères et entre 12 et 62 chez les feuillus. • Selon Guitard, (1987), les fibres et trachéides d'un échantillon de bois sont orientées selon sa direction longitudinale et constituent des « éléments de renforcement » suivant cet axe. Ce renforcement fibreux conduit à un module d'élasticité plus élevé dans cette direction que dans les deux autres. Les rayons ligneux constituent également des « éléments de renforcement » suivant l'axe radial, ce qui explique que E_{radial} soit supérieur à $E_{\text{tangentielle}}$. • Les études menées par Guitard, (1987) sur des échantillons de peupliers ont montré que les modules de cisaillement dans les trois directions respectent la condition suivante : $G_{\text{long-rad.}} > G_{\text{tang-long.}} >> G_{\text{tang-rad.}}$. • Les résultats de l'étude menée par Dinckal, (2011) sont présentés dans le tableau ci-dessous : <table border="1" data-bbox="1070 544 1700 730"> <thead> <tr> <th colspan="6">Dinckal, 2011</th> </tr> <tr> <th>Module (GPa)</th> <th>Chêne</th> <th>Hêtre</th> <th>Douglas</th> <th>Epicéa</th> <th>Pin</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E_{Radial}</td> <td>2,13</td> <td>2,43</td> <td>1,02</td> <td>0,75</td> <td>0,94</td> </tr> <tr> <td>$E_{\text{Longitudinal}}$</td> <td>5,21</td> <td>5,58</td> <td>4,90</td> <td>3,98</td> <td>5,00</td> </tr> <tr> <td>E_L/E_R</td> <td>2,45</td> <td>2,30</td> <td>4,79</td> <td>5,31</td> <td>5,35</td> </tr> <tr> <td>G_{Radial}</td> <td>0,82</td> <td>0,91</td> <td>0,39</td> <td>0,29</td> <td>0,36</td> </tr> <tr> <td>$G_{\text{Longitudinal}}$</td> <td>2,13</td> <td>2,28</td> <td>2,03</td> <td>1,67</td> <td>2,14</td> </tr> <tr> <td>G_L/G_R</td> <td>2,60</td> <td>2,50</td> <td>5,21</td> <td>5,75</td> <td>5,94</td> </tr> </tbody> </table>	Dinckal, 2011						Module (GPa)	Chêne	Hêtre	Douglas	Epicéa	Pin	E_{Radial}	2,13	2,43	1,02	0,75	0,94	$E_{\text{Longitudinal}}$	5,21	5,58	4,90	3,98	5,00	E_L/E_R	2,45	2,30	4,79	5,31	5,35	G_{Radial}	0,82	0,91	0,39	0,29	0,36	$G_{\text{Longitudinal}}$	2,13	2,28	2,03	1,67	2,14	G_L/G_R	2,60	2,50	5,21	5,75	5,94
Dinckal, 2011																																																		
Module (GPa)	Chêne	Hêtre	Douglas	Epicéa	Pin																																													
E_{Radial}	2,13	2,43	1,02	0,75	0,94																																													
$E_{\text{Longitudinal}}$	5,21	5,58	4,90	3,98	5,00																																													
E_L/E_R	2,45	2,30	4,79	5,31	5,35																																													
G_{Radial}	0,82	0,91	0,39	0,29	0,36																																													
$G_{\text{Longitudinal}}$	2,13	2,28	2,03	1,67	2,14																																													
G_L/G_R	2,60	2,50	5,21	5,75	5,94																																													
<p>Charron et al., (2003)</p> <p>Dinwoodie, (2004)</p> <p>Skaar, (1988), cité Dinwoodie, (2004)</p>	<p>Retrait du bois</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Selon Charron et al., (2003), la diminution des dimensions (selon les directions longitudinale, radiale et tangentielle) des échantillons de bois suite à la diminution de son humidité sous le point de saturation des fibres est différente selon la direction considérée. • Les résultats de l'étude menée par Dinwoodie, (2004) concernant l'influence de la variation de la teneur en eau d'échantillons de bois (essences différentes) comprise entre 27 % (bois supposé vert) et 12 % sur le retrait sont présentés ci-après. L'étude a montré que le retrait (exprimé en % par rapport aux dimensions initiales) peut atteindre jusqu'à 10 % dans la direction tangentielle de l'échantillon et est limité à 1 % dans la direction longitudinale. <table border="1" data-bbox="1133 948 1650 1114"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Essence</th> <th colspan="3">Direction</th> </tr> <tr> <th>Tang.</th> <th>Rad.</th> <th>Long.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pin jaune</td> <td>3,5%</td> <td>1,5%</td> <td><1%</td> </tr> <tr> <td>Pin sylvestre</td> <td>4,5%</td> <td>3,0%</td> <td><1%</td> </tr> <tr> <td>Chêne (Europe)</td> <td>7,5%</td> <td>4,0%</td> <td><1%</td> </tr> <tr> <td>Hêtre (Europe)</td> <td>9,5%</td> <td>4,5%</td> <td><1%</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Selon Skaar, (1988), cité par Dinwoodie, (2004), les différences entre les variations des dimensions des échantillons de bois selon les trois directions sont dues à une densification plus importante des rayons ligneux (Partie I, § 1.1) dans les directions tangentielles et radiales que dans la direction longitudinale. 	Essence	Direction			Tang.	Rad.	Long.	Pin jaune	3,5%	1,5%	<1%	Pin sylvestre	4,5%	3,0%	<1%	Chêne (Europe)	7,5%	4,0%	<1%	Hêtre (Europe)	9,5%	4,5%	<1%																									
Essence	Direction																																																	
	Tang.	Rad.	Long.																																															
Pin jaune	3,5%	1,5%	<1%																																															
Pin sylvestre	4,5%	3,0%	<1%																																															
Chêne (Europe)	7,5%	4,0%	<1%																																															
Hêtre (Europe)	9,5%	4,5%	<1%																																															
<p>Dupraz et al., (2009)</p>	<p>Coefficient de dilatation thermique</p>	<p>Le coefficient de dilatation thermique α_{th} (exprimé en K^{-1}) varie fortement selon l'orientation des fibres. Selon Dupraz et al., (2009), la dilatation radiale est environ dix fois supérieure à la dilatation longitudinale. Néanmoins, les allongements et raccourcissements du bois dus aux variations thermiques dans la direction radiale sont négligeables par rapport aux variations dimensionnelles suite aux fluctuations de sa teneur en eau. Pour les résineux et les feuillus, $\alpha_{\text{th,Long.}} = 3-6 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$; $\alpha_{\text{th,Rad.}} = 15-45 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$; $\alpha_{\text{th,Tang.}} = 25-60 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$. Pour l'acier, $\alpha_{\text{th,acier}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ et pour l'aluminium, $\alpha_{\text{th,aluminium}} = 24 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.</p>																																																

L'utilisation de troncs d'arbres comme pieux de fondation est donc optimale car contrairement à la pratique actuelle en structure, les pieux sont mobilisés principalement dans la direction longitudinale en compression, soit la direction des caractéristiques les plus élevées du bois.

1.4.2 Comportement élastique du bois

1.4.2.1 Domaines élastique et plastique du bois

L'anisotropie du bois conduit à mesurer deux réponses différentes lorsqu'un échantillon est soumis à des sollicitations en compression et en traction. Ces réponses sont mesurées sous forme de chemins de déformation (essai à déplacement contrôlé) dans le plan (σ ; ϵ) et présentées sur la Figure 15.

La Figure 15 montre que les chemins de déformation diffèrent en fonction de la direction d'application de l'effort (parallèle, perpendiculaire ou tangentielle aux fibres) (Navi et Heger, 2005). On retrouve, à travers ces courbes, les conclusions de l'étude menée par Guitard, (1987) (Tableau 3) : les fibres de l'échantillon de bois orientées longitudinalement constituent des « éléments de renforcement » selon cet axe.

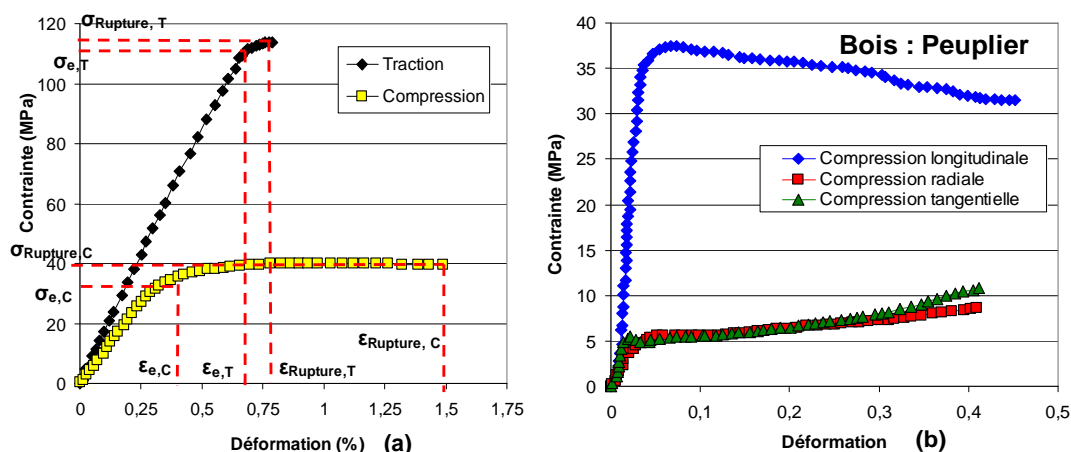


Figure 15. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation (modifié d'après Navi et Heger, 2005 ; Natterer et al., 2004)

Selon Natterer et al., (2004), le module d'élasticité du bois est légèrement plus faible en compression qu'en traction. Néanmoins, par souci de simplification, les deux modules sont généralement considérés comme égaux.

La résistance à la rupture en traction des échantillons de bois est supérieure à celle en compression. En compression, le chemin de déformation jusqu'à atteindre ϵ_{ec} (Figure 15a) correspond au domaine élastique du bois. $\sigma_{e,c}$ représente la limite élastique en compression et est inférieure à la limite élastique en traction $\sigma_{e,T}$.

La limite élastique en compression mesurée dans la direction longitudinale est atteinte pour de faibles déplacements. Une fois dépassée, on observe une plastification caractérisée par un flambage longitudinal et un écrasement progressifs des fibres. Tandis qu'en traction, le bois présente des propriétés mécaniques fragiles, mais nettement supérieures à celles mesurées en

compression (jusqu'à 200 à 300 % pour du bois sans défaut, c'est-à-dire sans nœud) (Natterer et al., 2004).

Enfin, le comportement fragile de l'éprouvette soumise à une contrainte en traction dans les deux autres directions (radiale et tangentielle) est encore plus marqué que dans la direction longitudinale. Selon Natterer et al., (2004), la discontinuité de croissance de l'arbre dans la direction radiale et le manque de liaisons structurelles (solidarisation des fibres par quelques rayons ligneux transversaux seulement) dans la direction tangentielle expliquent ce comportement fragile.

La Partie I, § 1.4.1 a permis de mettre en évidence que le bois est un matériau anisotrope dont les comportements mécanique et thermique dépendent de la direction d'application de l'effort. En particulier, le module d'élasticité du bois est supérieur dans la direction longitudinale que dans les directions radiale et tangentielle. Il dépend de nombreux facteurs, comme la teneur en humidité, la température, la densité, les défauts (présence de nœuds) ou encore les durées d'application des charges (Forest Products Laboratory, 2010 ; Armstrong, 1979). L'influence de trois d'entre eux est explicitée par la suite.

1.4.2.2 Influence de l'humidité du bois sur le module d'élasticité

L'effet de la teneur en humidité du bois sur ses propriétés mécaniques a été largement étudié dans la littérature. Elle est définie, selon la norme NF B 51-004 (AFNOR, 1985), à partir de l'expression générale suivante :

$$H = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

avec m la masse totale de l'échantillon à l'humidité H et m_0 sa masse anhydre obtenue après un passage à l'étuve à 103°C jusqu'à la stabilisation de sa masse.

Le point de saturation des fibres est atteint, sous une température de 20°C, lorsque la teneur en humidité du bois est égale en moyenne à 30 % (Perré, 1994, cité par Dinh, 2011). Il correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois va commencer à sécher en se contractant. Le point de saturation définit le domaine hygroscopique du bois. Selon les conditions extérieures auxquelles est soumis l'échantillon, l'humidité du bois varie et affecte ses propriétés élastiques. De nombreuses études ont montré que, pour une teneur en humidité supérieure à la limite de saturation, l'évolution de l'humidité du bois avait peu d'influence sur le module élastique et les variations dimensionnelles de l'échantillon (Pluvinaige, 1992, cité par Dinh, 2011 ; Forest Products Laboratory, 2010) (Figure 16). Le bois ne contient plus d'eau libre et les parois cellulaires sont saturées d'eau liée.

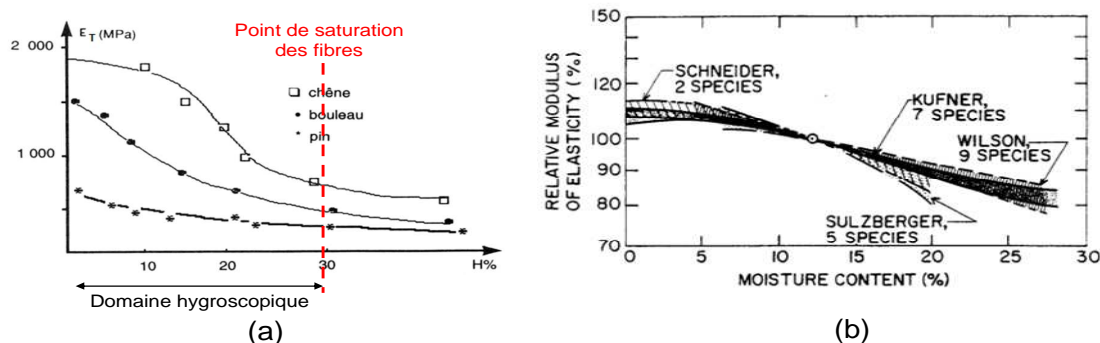


Figure 16. Variation du module d'élasticité $E_{Tangentielle}$ (a) et du module d'élasticité longitudinal relatif (b) en fonction du taux d'humidité du bois (modifié d'après [Pluvinage, 1992](#), cité par [Dinh, 2011](#) ; [Forest Products Laboratory, 2010](#))

A l'inverse, lorsque la teneur en humidité diminue dans le domaine hygroscopique, l'échantillon de bois devient plus sec. La perte d'humidité conduit à une augmentation de sa masse ligneuse et la paroi cellulaire devient plus compacte ([Panshin et De Zeeuw, 1980](#), cités par [De la Cruz Sanchez, 2006](#)). Enfin, les travaux menés par [Schlyter et Winberg \(1929\)](#), cités par [Moutee, \(2006\)](#) ont mis en évidence une diminution linéaire de la limite élastique du bois avec l'augmentation de la teneur en humidité entre 10 % et le point de saturation des fibres (environ 30 %) : les auteurs ont établi qu'une augmentation de 1 % de la teneur en humidité du bois dans ce domaine entraînait une diminution de 3 % de la limite élastique dans la direction longitudinale.

1.4.2.3 Influence de la température et de la densité du bois sur le module

La température et la masse volumique du bois sont deux autres paramètres influençant le module d'élasticité du bois :

- A déformation constante, l'augmentation de la température conduit à une diminution du module d'élasticité et de la résistance en compression du bois. Le bois se « ramollit » alors avec la température. [Bodig et Jayne, \(1982\)](#), cités par [Dinh, \(2011\)](#) ont établi une relation entre ce paramètre et les propriétés mécaniques du bois :

$$E'_{Long} = E_{Long} (1 + \alpha(T' - T))$$

Avec E'_{Long} et E_{Long} les modules d'élasticité mesurés aux températures T et T' et α le coefficient d'effet thermique, variant, pour les essences les plus connues, entre $-0,79 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (hêtre) et $-5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (épicéa) ;

- La masse volumique du bois caractérise la quantité de matière ligneuse comprise dans un volume donné. Elle varie au sein d'un arbre suite aux conditions de croissance particulières comme le climat et la nature du sol ([De la Cruz Sanchez, 2006](#)). Les résultats d'études menées par [Guitard, \(1987\)](#) ont montré qu'un bois possédant la masse volumique la plus élevée présentait également le module d'élasticité et la résistance à la compression les plus élevés. L'auteur a étendu ces résultats à l'ensemble des résineux et des feuillus, ainsi qu'aux modules d'élasticité mesurés dans les directions radiale et tangentielle (Figure 17).

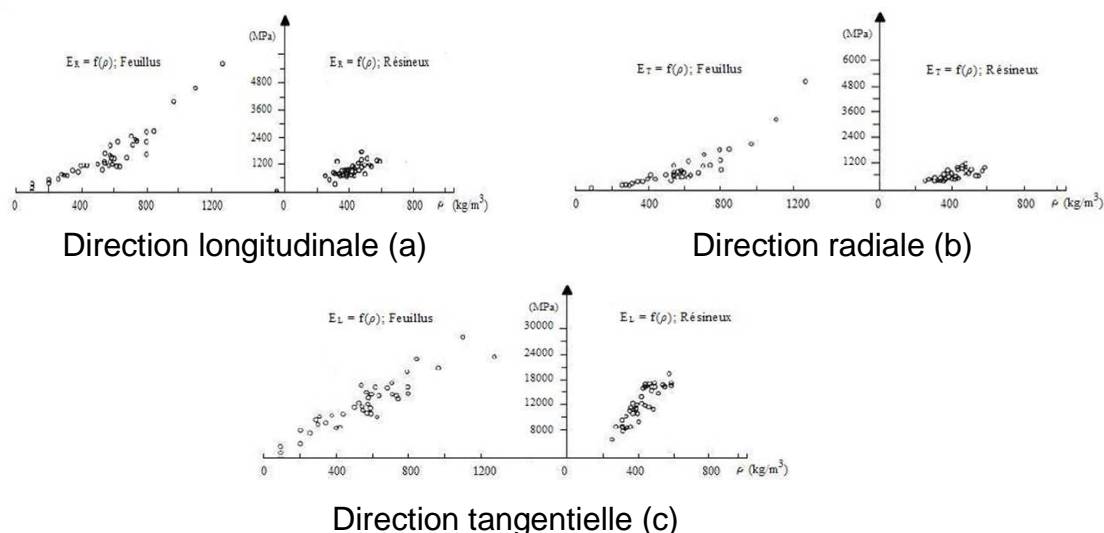


Figure 17. Evolution des modules d'élasticité (longitudinal (a), radial (b), tangentielle (c)) en fonction de la masse volumique des résineux et feuillus (Guitard, 1987)

1.4.3 Propriétés mécaniques du bois

1.4.3.1 Propriétés mécaniques du bois retenues en France et en Europe

La variabilité des essences et des qualités des bois, présentant différentes propriétés mécaniques, complique le dimensionnement des structures en bois. Afin de limiter cette variabilité, des classes de résistance des bois, fonction de leur nature (résineuse ou feuillue) et de leur résistance caractéristique en flexion (fractile à 5 %, exprimée en MPa) ont été établies dans la norme européenne EN 338, publiée en France sous la norme NF EN 338 (AFNOR, 2009).

Le Tableau 4 présente ces classes de résistance, ainsi que les propriétés de résistance (flexion, traction et compression axiales, cisaillement), de rigidité (modules moyens d'élasticité axial et transversal) et la masse volumique du bois. Les valeurs ont été établies pour une teneur en humidité du bois égale à 12 %.

Tableau 4. Classes de résistance et valeurs des propriétés de résistance, de rigidité et des masses volumiques (modifié d'après la norme NF EN 338 (AFNOR, 2009))

	Résineux												Feuillus							
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriétés de résistance (MPa) (valeurs caractéristiques)																				
Flexion	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Traction axiale	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Compression axiale	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Cisaillement	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
Propriétés de rigidité (GPa) (valeurs moyennes)																				
Module moyen d'élasticité axiale $E_{moy,Long}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Module moyen d'élasticité transversale	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Module moyen de cisaillement G_{moy}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Masse volumique (kg/m³) (valeurs moyennes)																				
Masse volumique moyenne	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080

Les classes de résistance ne faisant pas explicitement référence aux essences, le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA, 2007) a défini des classes de résistance maximales pour les principales essences de bois utilisées dans la construction (Tableau 5).

Tableau 5. Classes de résistance maximales pour les différentes essences utilisées dans la construction (modifié d'après AFNOR, 2009 ; CTBA, 2007 ; [10])

Essence de bois	Classes de résistance maximales (CTBA, 2007)	Module moyen d'élasticité axial (MPa) à 12% d'humidité (AFNOR, 2009 ; [10])
Sapin – Epicéa – Mélèze	C30	12000
Douglas – Peuplier	C24	11000
Pins sylvestre et maritime	C30	12000
Châtaignier	D30	11000
Acacia - Chêne	D35	12000
Azobé	D60	17000
Hêtre		10500

Du fait des conditions spécifiques liées à l'emploi des pieux en bois dans le sol (battage des pieux, variation de la teneur en humidité et de la température dans le sol), les valeurs présentées dans le Tableau 4 et le Tableau 5 ne sont probablement pas adaptées pour ce type d'utilisation. Néanmoins, en l'absence de données propres aux pieux en bois, il est tout de même possible d'utiliser ces jeux de paramètres.

1.4.3.2 Corrélations entre les modules d'élasticité et de cisaillement du bois

En raison de la complexité des procédures d'essais de torsion et de cisaillement, le module de cisaillement du bois est généralement déterminé à partir de son module élastique. Ce dernier peut être mesuré à partir d'essais de compression axiale d'éprouvette, ou bien évalué à partir de la littérature dans laquelle il est largement documenté.

La valeur du rapport $\frac{E_{moy,Long}}{G_{moy}}$ calculée à partir des données présentées dans le Tableau 4, est indépendante des classes de résistance et de la nature du bois (résineux ou feuillus) et est égale à 16.

La valeur de ce ratio a été établie dans les années 1970 par Bodig et Goodman, (1973), cités par Khokhar, (2011), à partir d'essais de torsion et de compression effectués sur des éprouvettes de bois clair.

D'autres études réalisées par Hindman et al., (2001), cités par Khokhar, 2011 ; Chui, (1991) ont néanmoins montré que ce ratio n'était pas constant et qu'il variait en fonction de l'essence étudiée.

Les résultats de l'étude menée par Khokhar, (2011) sur des planches d'épicéas sitka et norvégien de classes C16 et C34 et de longueur variant entre 2,4 et 3,6 m ont mis en évidence qu'il n'existait pas de relation significative entre les modules d'élasticité et de cisaillement de chaque essence (Figure 18).

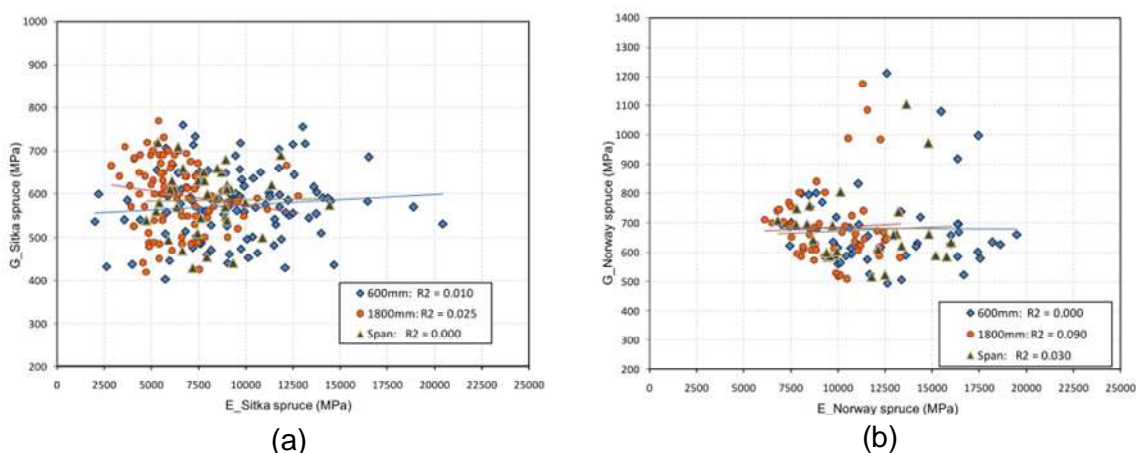


Figure 18. Corrélations entre le module de cisaillement et le module d'élasticité des épicéas sitka (a) et norvégiens (b) (Khokhar, 2011)

L'auteur a justifié l'absence de corrélation entre ces deux paramètres par des directions d'application des contraintes différentes lors des mesures des modules d'élasticité et de cisaillement :

- Le module d'élasticité a été mesuré suite à l'application d'une contrainte parallèle aux fibres du bois, qui ont été allongées ou raccourcies dans la direction longitudinale ;
- Le module de cisaillement du bois a été déterminé lors d'essais de torsion des échantillons. Les contraintes de cisaillement, dont les directions étaient tangentielles à la section transversale de l'éprouvette, ont déformé le bois, mais les fibres n'ont pas été allongées ou raccourcies dans la direction longitudinale.

Ces deux paramètres pourraient être corrélés à partir du coefficient de Poisson ν dans le cas d'un matériau isotrope. Néanmoins, le bois étant un matériau anisotrope, l'équation

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

n'est pas vérifiée.

Enfin, l'étude menée sur des planches d'épicéa norvégien de dimensions 50×150×3900 mm par Olsson et Källsner, (2012) a confirmé les résultats obtenus par Khokhar, (2011). Les auteurs ne sont pas parvenus à déterminer de relation significative entre le module d'élasticité et le module de cisaillement, les coefficients de corrélation entre ces deux paramètres étant égaux à 0,01 (Figure 19a) et 0,03 (Figure 19b).

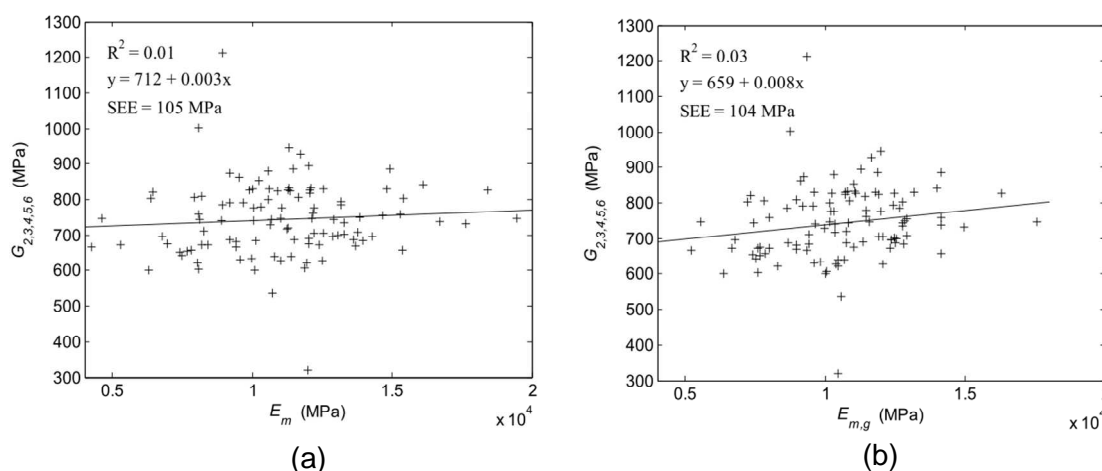


Figure 19. Corrélation entre le module de cisaillement et le module d'élasticité (épicéas norvégiens) (Olsson et Källsner, 2012)

1.4.3.3 Propriétés mécaniques des pieux en bois retenues aux Etats-Unis

Aux Etats-Unis, les propriétés géométriques et mécaniques des pieux en bois (résistances à la compression, à la flexion et au cisaillement, conicité des pieux en fonction de leur longueur et des diamètres en pointe et en tête, etc.), ainsi que les procédures d'essais à respecter pour les évaluer sont détaillées dans les normes rédigées par l'organisme de normalisation américain (ASTM) et intitulées [ASTM D 25, \(1991\)](#), [ASTM D 2899, \(1995\)](#) et [ASTM D 2555, \(1998\)](#). L'ensemble de ces propriétés a été repris dans le document « Timber Pile Design and Construction Manual » rédigé par l'institut américain « American Wood Preservers Institute » ([AWPI, 2002](#)).

Le Tableau 6 présente, pour certaines essences, quelques uns de ces paramètres établis dans ce document.

Tableau 6. Contraintes et modules d'élasticité des essences (modifié d'après [AWPI, 2002](#))

Essences	Compression axiale (kPa)	Flexion (kPa)	Cisaillement perpendiculaire aux fibres (kPa)	Compression perpendiculaire aux fibres (kPa)	Module d'élasticité (MPa)
Pin du Sud	8270	16540	758	1723	10338
Douglas	8615	16885	793	1585	10338
Chêne rouge	7581	16885	930	2412	8615
Pin rouge	6203	13094	586	1068	8821

Ce document fait également office de guide normatif pour le dimensionnement des pieux en bois. Les différentes méthodes de dimensionnement y sont détaillées en fonction de la nature des terrains.

1.5 Durabilité du bois

1.5.1 Dégradation biologique du bois

La dégradation biologique du bois se produit en présence d'eau et d'oxygène. La combinaison de ces deux facteurs conduit au développement de champignons (dégradation fongique) et d'insectes (capricornes, lyctus) qui altèrent ses propriétés mécaniques (Dupraz et al., 2009). Ce phénomène intervient généralement lorsque le bois est soumis à des conditions de marnage, caractérisées par une alternance de cycles d'humidité et de sécheresse. Ses conséquences sur ses propriétés mécaniques et la structure supérieure de l'ouvrage sont alors multiples :

- Une excavation de 6 m de profondeur réalisée à proximité d'un bâtiment fondé sur des pieux en bois à Gijón en Espagne (Gayarre et al., 2009) a entraîné un abaissement du niveau de la nappe sur une hauteur de 90 cm. Suite à l'émersion des têtes des pieux, le bois a été partiellement dégradé par des champignons et insectes, conduisant à un tassement différentiel du bâtiment d'environ 35 cm ;
- Au cours des dernières décennies, suite aux variations de la nappe sous le parlement allemand à Berlin (Katzenbach et Ramm, 2006), les attaques fongiques des pieux en bois situés sous le bâtiment ont entraîné des dégradations variables de l'aubier et conduit à une diminution de sa résistance à la compression.

1.5.2 Classes de risque et de durabilité du bois

Les conditions environnementales et la dégradation du bois par des agents extérieurs (insectes et champignons) jouent un rôle important dans la durabilité des ouvrages. A cet effet, les risques de biodégradation sont pris en compte en définissant des classes de risque associées à des situations de service. Des classes de durabilité du bois sont également définies et présentées par la suite.

1.5.2.1 Classes de risque du bois

Cinq classes de risque, correspondant chacune à une situation de service particulière et à des risques biologiques, sont définies dans la norme française NF EN 335-2 (AFNOR, 2007) (Tableau 7). La classe 1 représente un faible risque biologique et la classe 5 un risque important de dégradation. Les essences sont intégrées dans les différentes classes de risque en fonction de leur durabilité naturelle.

Tableau 7. Classes de risque des bois (modifié d'après norme NF EN 335-2 (AFNOR, 2007))

Classes de risque	Situations de service	Exemples d'emploi	Zone sensible	Risques biologiques	Durabilité naturelle essences
1	Bois sec, humidité toujours inférieure à 20 %	Menuiseries intérieures à l'abri de l'humidité : parquets, escaliers, etc.	2 mm	Insectes, termites dans les régions infestées	Toutes sauf sapin, épicéa, hêtre et Ayous
2	Bois sec mais dont l'humidité peut occasionnellement dépasser 20 %	Charpente, ossature correctement ventilée	2 mm	Insectes, champignons de surface, termites dans les régions infestées	Toutes sauf sapin, épicéa, hêtre et Ayous
3	Bois à l'humidité fréquemment supérieure à 20 %	Toute pièce de construction ou menuiserie extérieure soumise à la pluie. Pièce abritée, mais en atmosphère condensante	Toute la partie humidifiable de la zone non durable naturellement	Pourritures, insectes, termites dans les régions infestées	Toutes sauf sapin, épicéa, hêtre, Ayous, pin sylvestre
4	Bois à une humidité toujours supérieure à 20 %	Bois horizontaux en extérieur et bois en contact avec le sol ou une source d'humidification prolongée ou permanente		Pourritures, insectes y compris termites	Châtaignier, robinier, Doussié, Iroko (bois africains), Teck d'Asie
5	Bois en contact permanent avec l'eau de mer	Piliers, pontons, bois immergés		Pourritures, insectes, térébrants marins	X

Les pieux en bois étant généralement en contact avec une source d'humidification prolongée (pieux battus dans le sol), ou en contact permanent avec l'eau de mer (ouvrages maritimes, côtiers et portuaires), les classes de risque n°4 et n°5 sont associées à ces situations de service. Les risques de dégradation biologique sont alors élevés.

1.5.2.2 Classes de durabilité du bois

Les classes de durabilité du bois sont détaillées dans la norme NF EN 350-2 (AFNOR, 1994). Elles ont été établies à partir de tests simples consistant à enfouir partiellement dans le sol des poteaux en bois de dimensions 50x50 mm. Plus la longévité du duramen (bois parfait) des poteaux est élevée dans le sol, plus le bois est considéré comme durable. Les essences sont classées en fonction de leur degré de résistance aux champignons. La dégradation par des insectes n'a pas été prise en compte.

Le Tableau 8 présente les différentes classes de durabilité et les principales essences de bois associées.

Tableau 8. Classes de durabilité des bois (modifié d'après la norme NF EN 350-2 (AFNOR, 1994))

Classe	Description	Exemples d'essences
I	Très durable (>25 ans)	Acacia Essences tropicales
II	Durable (15 à 25 ans)	Chêne d'Europe Châtaignier Acacia
III	Moyennement durable (10 à 15 ans)	Chêne d'Europe
IV	Peu durable (5 à 10 ans)	Chêne rouge d'Amérique Pin Hêtre
V	Très peu durable (<5 ans)	Hêtre

1.5.3 Imprégnabilité et traitements des bois

Les premiers traitements du bois sont apparus aux Etats-Unis dans les années 1800 lors du développement des chemins de fer. Ils ont permis de limiter la vulnérabilité de ce matériau face aux attaques biologiques par des champignons et des insectes.

Les deux principales méthodes de traitement du bois actuellement utilisées sont le trempage et l'imprégnation par injection en autoclave (procédé de vide et pénétration du produit dans le bois).

La norme française NF EN 350-2 (AFNOR, 1994) classe les essences de bois en quatre catégories dépendant du degré d'imprégnabilité du duramen (bois parfait) et de l'aubier :

- Imprégnables ;
- Moyennement imprégnables ;
- Peu imprégnables ;
- Non imprégnables.

A titre d'exemple, les duramens du chêne et du pin maritime ne sont pas imprégnables mais les aubiers le sont. Le duramen du châtaignier n'est pas imprégnable, tandis que l'aubier l'est moyennement. Enfin, l'érable et le hêtre le sont intégralement.

Les deux produits les plus utilisés au cours des dernières décennies dans le traitement du bois ont été la créosote (mélange d'hydrocarbures) et un mélange de cuivre, de chrome et d'arsenic connu sous le nom de CCA (arséniate de cuivre chromé). La créosote a été largement utilisée dans le traitement des traverses des voies de chemins de fer et des ponts car elle rendait le bois insensible à l'eau. La CCA a été développée dans les années 1930 et a été utilisée dans de nombreux pays du fait de ses propriétés insecticides qui la rendaient très efficace face aux attaques biologiques.

Ces deux produits sont actuellement utilisés aux Etats-Unis. La créosote était, il y a encore quelques années, le produit le plus employé dans les traitements du bois, mais l'augmentation du coût des matières premières nécessaires à sa fabrication a limité son utilisation. Aujourd'hui, 90 à 95 % des pieux en bois en pin jaune battus aux Etats-Unis sont traités à la CCA. La créosote est uniquement utilisée dans les sols acides et corrosifs. L'usage de ces deux produits est néanmoins contrôlé par des normes rédigées par l'association américaine de conservation du bois (AWPA).

L'emploi de la créosote est interdit en Europe depuis 2002 à l'intérieur des locaux et pour certains usages externes. Elle est considérée, depuis 2003, comme une substance cancérigène. Sa commercialisation est interdite en France depuis cette date (en s'appuyant sur un arrêté datant de 1997 et relatif aux limitations de mise sur le marché et d'emploi de certains produits contenant des substances dangereuses).

Dès les années 1990, les pays européens ont légiféré sur l'usage de la CCA dans la conservation du bois. En France, les conditions de mises sur le marché des produits à base d'arsenic ont été réglementées en 2004 (Décret n° 2004-1227 du 17 novembre 2004 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi de l'arsenic et de ses composés, du colorant bleu, du pentabromodiphényléther et de l'octabromodiphényléther). Le traitement du bois avec ce produit est notamment interdit en France depuis cette date.

2 Les pieux en bois – caractéristiques géométriques et battage

2.1 Caractéristiques géométriques des pieux

2.1.1 Diamètre et longueur des pieux

2.1.1.1 Diamètres et longueurs des pieux – dispositif d'entures

A l'époque où les pieux en bois étaient encore utilisés en France sur les chantiers de construction, leur diamètre et leur longueur étaient variables et dépendaient de nombreux paramètres comme :

- la ressource naturelle disponible à proximité du chantier ou importée ;
- la profondeur d'encastrement des pieux dans le sol suite au battage et à l'évaluation empirique de leur charge portante à partir des formules dynamiques.

La ressource naturelle disponible intervenait dans le choix des dimensions des pieux dans la mesure où leur diamètre et leur longueur étaient limités par ceux des arbres.

Les campagnes de recensement des essences peuplant les forêts françaises, ainsi que l'étude des propriétés géométriques des arbres réalisées par l'IGN entre 2005 et 2007 ont permis d'estimer la hauteur moyenne des arbres en fonction de leur diamètre (Figure 20). La Figure 20 donne ainsi un ordre de grandeur des diamètres maximaux des pieux disponibles en fonction de leur longueur.

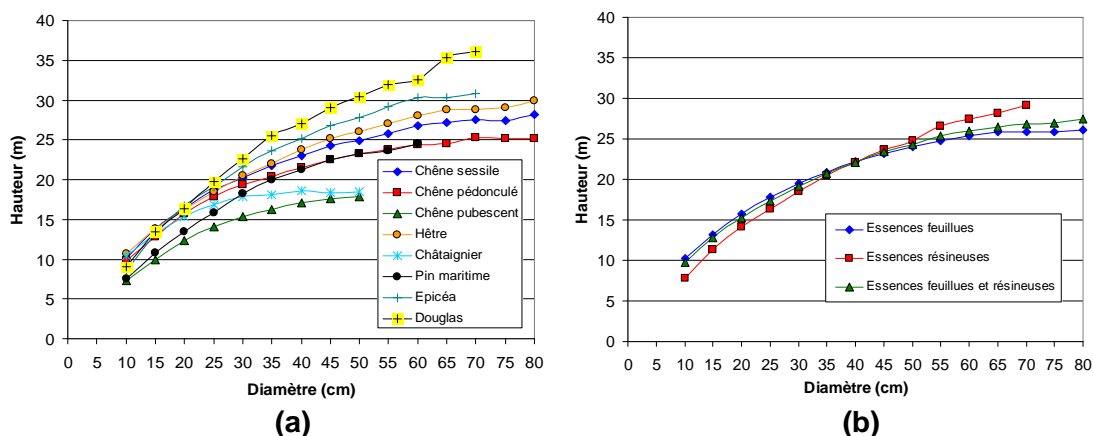


Figure 20. Variation de la hauteur moyenne des arbres en fonction de leur diamètre pour les différentes essences (a), les feuillus et les résineux (b) (modifié d'après des données brutes de l'IGN mesurées lors d'une campagne entre 2005 et 2007)

Selon Mesqui, (1986), les diamètres des pieux en bois utilisés dans les fondations des ouvrages et des bâtiments étaient généralement compris entre 25 et 35 cm, mais pouvaient atteindre exceptionnellement 40 cm. Selon l'auteur, les longueurs des pieux variaient en moyenne entre 4 et 12 m.

On verra également, dans la Partie II, § 1.7 que parmi l'ensemble des ponts routiers français identifiés sur des pieux en bois :

- 83 % d'entre eux ont été bâtis sur des pieux de longueurs variant entre 2 et 15 m, les 17 % restants reposant sur des pieux de longueurs supérieures à 15 m ;
- 83 % d'entre eux ont été bâtis sur des pieux dont les diamètres étaient compris entre 25 et 35 cm, les 17 % restants reposant sur des pieux de diamètres variant entre 20 et 25 cm et entre 35 et 40 cm.

Les dimensions des pieux en bois étant limitées par celles des arbres, les constructeurs employaient des dispositifs d'enture (technique d'aboutage) constitués de pièces en fer (goujons, éclisses) (Figure 21) pour augmenter leur longueur. Les entures étaient également utilisées durant la phase de battage lorsque la hauteur de chute de la masse frappante était trop importante ou lorsque les têtes des pieux avaient été préalablement recépées.

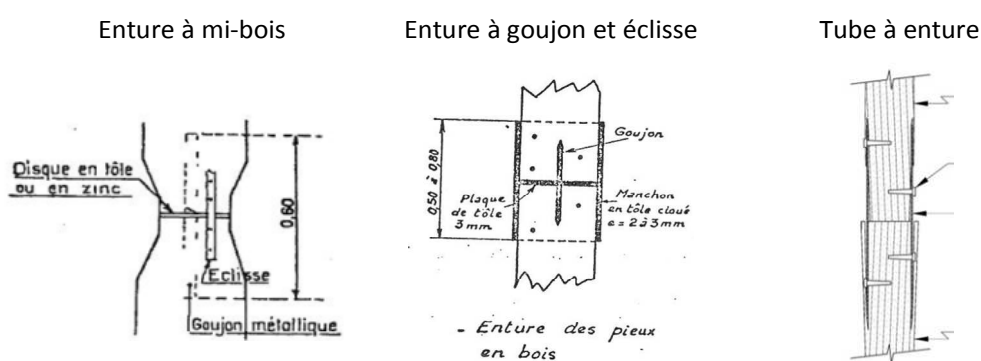


Figure 21. Dispositifs d'enture (Davidian, 1969 ; Spencer, 2009)

2.1.1.2 Formules empiriques reliant les diamètres aux longueurs des pieux

Selon Davidian, (1969), les pieux en bois devaient être conformes à un certain nombre de règles empiriques et respecter les critères géométriques et structuraux suivants (l'auteur n'a pas mentionné les époques au cours desquelles ces règles ont été établies et appliquées) :

- Les pieux ne devaient pas présenter de défauts particuliers (fentes, moisissures) pouvant altérer leur résistance ou leur durabilité ;
- L'axe entre les centres de la pointe et de la tête des pieux devait se situer à l'intérieur des pieux. La flèche ne devait pas excéder 1/100 de leur longueur ;
- Le rapport entre le diamètre de la tête et celui de la pointe devait être inférieur à 1,5, ce qui représentait, pour un pieu de 10 m de longueur avec un diamètre en tête de 30 cm, une conicité maximale de 5 mm/m (Partie I, § 2.1.2.1) ;
- Dans les terrains résistants, le diamètre à mi-longueur des pieux devait être inférieur à 1/30 de leur longueur et dans les terrains meubles, supérieur à 1/40 de leur longueur.

Le diamètre minimum des pieux en bois dépendait de leur longueur et était déterminé à partir de formules empiriques (Tableau 9). Le rapport entre la hauteur et le diamètre moyen des pieux correspondait à l'élancement.

Tableau 9. Formules donnant le diamètre des pieux en bois en fonction de leur longueur (Davidian, 1969 ; Bellidor, 1765)

Auteurs	Formules	Conditions d'application
B (m) était le diamètre mesuré à mi-longueur du pieu et L (m) sa longueur		
Perronet (1708-1794)	$B = 0,24 + 0,015 \times (L - 4)$	Longueur du pieu supérieure à 4 m
Formule moderne (date inconnue)	$B = 0,30 + 0,015 \times (L - 6)$	Longueur du pieu supérieure à 6
Règle empirique (date inconnue)	$B = 0,15 + 0,02L$	
Bellidor (1765)	$\frac{L}{B} = 12$	B était exprimé en pouces et L en pieds

Après la seconde guerre mondiale, en 1947, le Ministère Français de la Reconstruction et de l'Urbanisme a publié le REEF (Recueil des éléments utiles à l'Établissement et à l'Exécution des projets et marchés du bâtiment en France) contenant les règles suivantes (Davidian, 1969) :

- Les diamètres de la tête et de la pointe des pieux en bois devaient être respectivement supérieurs à 12 et 23 cm ;
- La somme des périmètres en pointe et en tête devait être supérieure à 1,15 m pour des pieux de longueur supérieure à 10 m.

2.1.2 Conicité des pieux

2.1.2.1 Définition et ordres de grandeur

Le tronc d'arbre destiné à devenir un pieu en bois est naturellement conique : la base du tronc (correspondant généralement à la tête du pieu) présente un diamètre supérieur à celui de la cime (pointe du pieu). Les pieux coniques s'opposent donc aux pieux à section droite pour lesquels les diamètres en tête et en pointe sont égaux.

Selon la norme ASTM D 25, (1991), la conicité ω du pieu (exprimée en degré ou en mm/m) est définie à partir de l'expression générale suivante (Figure 22) :

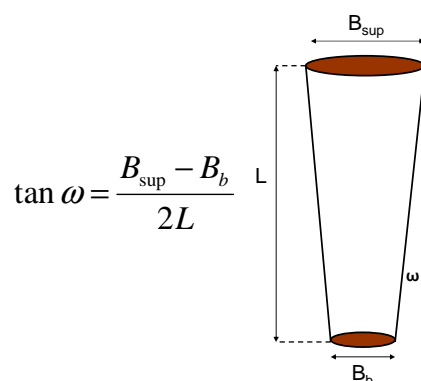


Figure 22. Conicité des pieux en bois (modifié d'après AWPI, 2002)

Cette définition de la conicité a été reprise dans l'ouvrage « Timber Pile Design and Construction Manual » (AWPI, 2002).

Les croissances longitudinale et radiale de l'arbre dépendent de nombreux facteurs environnementaux, comme la composition du sol à proximité, l'exposition à la lumière

solaire, ou encore les conditions climatiques. L'ensemble de ces facteurs agit donc sur la conicité de l'arbre.

Dans la mesure où ce paramètre n'était pas le principal critère de sélection d'une essence de bois par rapport à une autre, aucune règle spécifique n'a été établie au cours des siècles précédents. La géométrie des pieux dépendait principalement de la ressource naturelle disponible.

Cependant, les recommandations établies par le Ministère Français de la Reconstruction et de l'Urbanisme dans le REEF en 1947 (Davidian, 1969) donnent quelques indications sur la conicité des pieux en bois battus dans le sol en fonction de leur diamètre en pointe, en tête et de leur longueur (Tableau 10).

Tableau 10. Longueur, diamètre en pointe et en tête et conicité des pieux (modifié d'après Davidian, 1969)

Longueur des pieux (m)	Diamètre mesuré à 1 m sous la tête (cm)	Diamètre en pointe (cm)	Conicité des pieux (mm/m)
5	20 à 22 jusqu'à 25	9 à 13 jusqu'à 15	9
7,5	22 à 24 jusqu'à 27	10 à 16	7,8
10	22 à 25 jusqu'à 30	10 à 19	5,8
12,5	25 à 26 jusqu'à 35	12 à 18 jusqu'à 20	5,6
15	25 à 29 jusqu'à 40	13 à 20	5,3

Aux Etats-Unis, l'utilisation intensive des pieux en bois a conduit l'organisme de normalisation américain (ASTM) à définir des valeurs minimales des diamètres en pointe des pieux en fonction de leur longueur et de leur diamètre en tête (mesure effectuée à trois pieds (90 cm) sous la tête des pieux). Ces trois paramètres permettent d'établir les conicités maximales des pieux (Tableau 11).

Tableau 11. Conicité maximale des pieux en fonction de leur diamètre en tête et de leur longueur (modifié d'après AWPI, 2002)

Diamètre minimum tête de pieu (cm)	17,8	20,2	22,6	25,1	28,3	30,7	33,1	35,6	38,0	40,4	46,1
Longueur pieu (m)	Conicité maximale (mm/m)										
6,1	4,0	6,0	8,0	8,6	8,6	8,6	8,6				
7,6	3,2	4,8	6,4	7,4	7,7	8,0	7,7	7,7			
9,1	2,7	4,0	5,3	6,6	7,1	7,1	7,1	7,1			
10,7				5,7	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4		
12,2				5,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0		
13,7					5,6	5,7	5,9	5,9	5,9	5,9	
15,2					5,0	5,6	5,8	5,8	5,8	5,8	
16,8						5,2	5,7	5,7	5,7	5,7	6,1
18,3						4,9	5,5	5,6	5,6	5,6	5,7
19,8						4,5	5,1	5,4	5,7	5,7	5,9
21,3						4,2	4,7	5,3	5,8	5,8	5,8
22,9							4,4	5,0	5,5	5,7	5,8
24,4							4,1	4,6	5,1	5,6	5,8
25,9							3,9	4,4	4,8	5,3	5,7
27,4							3,7	4,1	4,6	5,0	5,5
29,0							3,5	3,9	4,3	4,7	5,3
30,5							3,3	3,7	4,1	4,5	5,2

Les ordres de grandeur des conicités indiquées dans le Tableau 11 sont similaires à ceux définis par le Ministère Français de la Reconstruction et de l'Urbanisme (Tableau 10) sur la plage de longueurs 0-15 m et évoluent peu au-delà.

2.1.2.2 Influence de la conicité des pieux sur leur portance

Les nombreuses études publiées dans la littérature et réalisées à partir d'essais en laboratoire ou *in situ* ont montré que la portance limite des pieux en bois, en béton ou en acier coniques était supérieure à celle des pieux à section droite.

Le Tableau 12 détaille quelques résultats de ces études.

Tableau 12. Résultats d'étude sur l'influence de la conicité des pieux sur leur résistance

Auteurs	Caractéristiques des pieux et du sol	Résultats de l'étude
Blanchet et al., (1980)	Pieux en bois de 15 m de long. Diamètres moyens égaux à 27,5 cm	La conicité des pieux en bois (égale à 10 mm/m selon les auteurs) conduit à une augmentation de la réaction latérale du sol lors de la phase de battage et à doubler la résistance de frottement par rapport à celle des pieux à section droite.
Tavenas, (1971)	Pieux en bois coniques de longueurs comprises entre 6 et 10,5 m et de diamètres égaux à 25,5 cm. Pieux battus dans du sable au Québec	La conicité des pieux en bois égale à 10 mm/m multiplie la valeur de la résistance de frottement par un facteur compris entre 1,5 et 2,5.
Tomlinson, (1969)	Etudes réalisées sur des pieux en béton, en acier et en bois (coniques et à section droite) battus dans l'argile	La résistance de frottement des pieux coniques est supérieure à celle des pieux à section droite. L'auteur explique les différences observées par le fait que les vides formés par les vibrations induites lors du battage des pieux coniques dans un sol normalement consolidé se referment davantage qu'avec les pieux à section droite. Le facteur d'adhérence au Danemark utilisé dans le calcul de la résistance de frottement des pieux à section droite (méthode $\alpha-c_u$) est multiplié par 1,2 pour les pieux coniques.
Paik et al., (2009)	Etude réalisée en laboratoire sur des pieux en acier dans le sable <ul style="list-style-type: none"> à section droite (longueurs et diamètres égaux à 0,7 m et 6 cm) coniques (longueurs et conicité égales à 0,7 m, 18 mm/m (soit 1°) et 25,5 mm/m (soit 1,5°)) 	La résistance de frottement des pieux augmente avec la conicité, indépendamment de la densité et de l'état de contrainte dans le sable. Elle est en moyenne 20 % plus élevée que celle des pieux à section droite. En revanche, la résistance de pointe augmente avec la conicité des pieux dans le sable moyennement dense ($D_R=55\%$) et diminue avec la conicité dans le sable dense ($D_R=86\%$) (écart de 30 % entre le pieu à section droite et le pieu conique (18 mm/m)). La portance limite du pieu à section droite est atteinte pour un tassement équivalent à 2 % de son diamètre, contrairement aux pieux coniques qui l'atteignent pour un tassement égal à 40 % de leur diamètre.
El Naggar et Wei, (1999)	Pieux en acier à section droite (longueur et diamètre égaux à 1,52 m et 16,8 cm) et coniques (longueurs et conicités égales à 1,52 m et 16,7 mm/m (0,95°)). Pieux battus dans du sable lâche ($D_R=18,4\%$) et moyennement dense ($D_R=32,7\%$)	La portance limite du pieu conique en compression (conicité égale à 16,7 mm/m) est 35 à 40 % supérieure à celle du pieu à section droite dans le sable moyennement dense. La résistance à la traction du pieu conique (16,7 mm/m) est 14 % plus faible que celle du pieu à section droite.

2.1.3 Géométrie des pieux en fonction de leur utilisation

La géométrie des pieux en bois mis en œuvre dans les constructions dépendaient de leur usage.

Les pieux de fondation des ouvrages et bâtiments étaient en majorité des grumes, cylindriques, écorcées ou non (Figure 23). Ils n'étaient donc pas préalablement travaillés.



Figure 23. Pieux de fondation en bois cylindriques, écorcés ou bruts

Certains pieux équarris servant à supporter à la fois le cadre et la semelle de charpente de ponts romains ont néanmoins été découverts à Mayence, Cologne ou Trèves (situés sur le Rhin ou la Moselle).

Selon [8], les pieux circulaires présentent certains avantages par rapport aux pieux équarris :

- Dans les zones de marnage, les pieux équarris possèdent en moyenne une longévité plus faible que celle des pieux circulaires dans la mesure où l'épaisseur de bois entre la surface latérale extérieure du pieu équarri et le duramen (épaisseur constituée de l'écorce, du liber, du cambium et de l'aubier, Figure 1) est plus faible que celle des pieux circulaires ;
- Une fois battus dans l'eau, la forme des pieux en bois équarris conduit à générer des zones de turbulences en aval du pieu, augmentant ainsi le risque d'affouillement et de rupture du pieu (Figure 24).

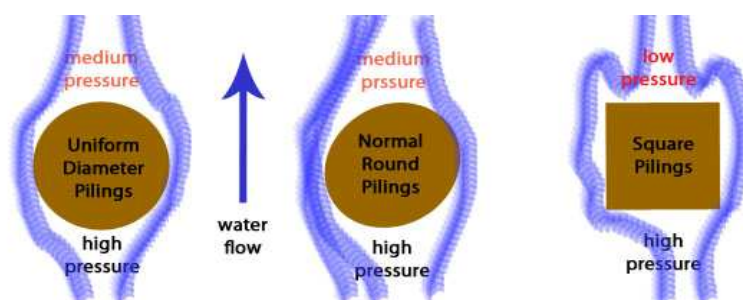


Figure 24. Influence de la géométrie des pieux sur l'écoulement de l'eau [8]

Les pieux équarris étaient majoritairement utilisés dans les constructions de batardeaux, sous formes de palplanches ou de berlinoises (Figure 25) : l'équarrissage permettait aux pieux d'être jointifs et donc de limiter les arrivées d'eau à l'intérieur du batardeau. On rappelle que les batardeaux étaient des enceintes destinées à la retenue d'eau provisoire dans lesquelles les ouvriers pouvaient travailler à sec.

Certains bâtisseurs exigeaient parfois que les pieux équarris soient rainurés afin d'assurer une meilleure étanchéité (Mesqui, 1986).

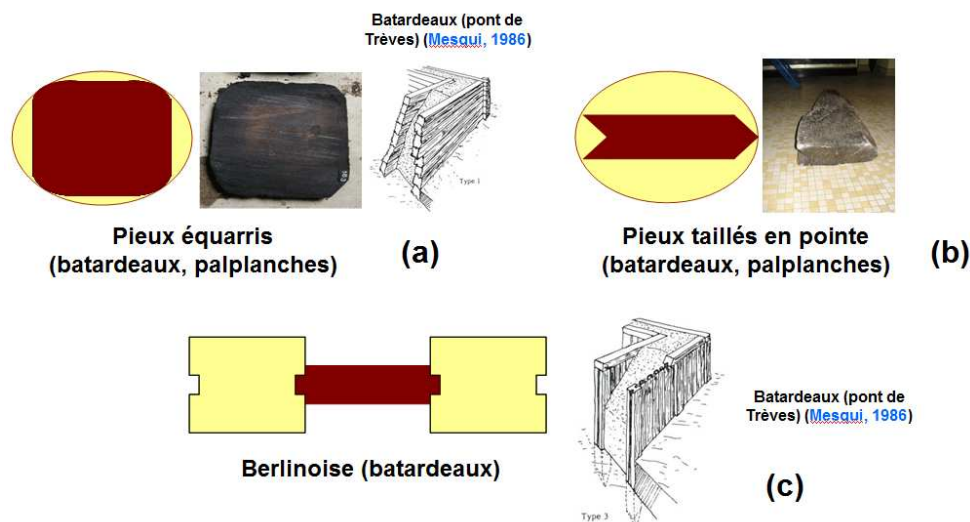


Figure 25. Pieux équarris (a), pieux taillés en pointe (b) et berlinoise (c)

2.2 Battage des pieux en bois dans le sol

2.2.1 Géologie des terrains adaptée au battage des pieux en bois

2.2.1.1 Classification des sols

Jusqu'à l'époque moderne (17^{ème} – 18^{ème} siècle), l'absence de technique de reconnaissance des sols empêchait les bâtisseurs d'identifier la nature des sols dans lesquels les pieux en bois étaient battus.

A partir du milieu du 18^{ème} siècle, des classifications sommaires ont été établies dans les documents de référence. [Bellidor, \(1765\)](#) a différencié, dans son ouvrage, trois natures de sols :

- *Le tuf et le rocher ;*

Le tuf et le rocher étaient facilement reconnaissables par leur grande résistance mécanique.

- *Le sable ;*

Le sable était divisé en deux catégories, le sable ferme et le sable qualifié de « mouvant ». Les pieux pouvaient être fichés dans le sable ferme, tandis que le sable qualifié de « mouvant » présentait une faible résistance mécanique. La distinction entre ces deux natures de sable était effectuée avec des sondages à la tarière.

- *La terre ;*

[Bellidor, \(1765\)](#) distinguait quatre natures de terre différentes : la terre ordinaire, la terre grasse, la glaise et la tourbe. La terre ordinaire était située dans les terrains « secs » à de faibles profondeurs. La terre grasse était composée de vase sans consistance. La glaise était située en profondeur ou proche du terrain naturel. Enfin, la tourbe, de couleur noire, était caractéristique des milieux aquatiques et marécageux.

2.2.1.2 Influence de la nature du sol sur les conditions de battage

Les conditions de battage des pieux en bois dépendaient de la nature et des caractéristiques mécaniques des couches de sol traversées. Deux types de refus pouvaient être différenciés lors de la phase de battage des pieux :

- Le refus pouvait être atteint lorsque la pointe était encastrée dans une couche considérée comme « incompressible » (Maillard, 2006). Un facteur de sécurité sur la portance dynamique théorique des pieux calculée à partir des formules de battage était alors appliqué ;
- Le refus pouvait être atteint lorsque la résistance dynamique du pieu était supérieure à la charge appliquée par la masse frappante (Partie I, § 2.2). La pointe n'était pas encastrée dans une couche incompressible et le pieu était flottant.

Le Tableau 13 présente le comportement des pieux en bois et les types de refus rencontrés lors de la phase de battage de pieux en bois dans différentes natures de sols par l'ingénieur Gauthey au 18^{ème} siècle (Maillard, 2006).

Tableau 13. Comportement des pieux dans différentes natures de sols (modifié d'après Maillard, 2006)

Nature du sol	Comportement du pieu dans le sol	Type du refus	Possibilité de ficher le pieu
Argile raide + gravier	Sols de trop grande compacité pour battre un pieu	Refus en pointe	Oui (pieux encastrés)
Tuf			
Glaise + gravier			
Sable (compact)	Enfoncement aisé au début (fiche faible) puis augmentation de la résistance de frottement jusqu'au refus	Refus par frottement	Non (pieux flottants)
Vase	Augmentation de la résistance de frottement le long du pieu, mais n'entraînant pas un refus		Oui, mais dans une couche sous-jacente
Argile de faible compacité			
Sable de faible compacité			
Rocher	Sols de trop grande compacité pour battre un pieu	Refus en pointe	Oui (pieux encastrés)

2.2.2 Les machines de battage

Le battage des pieux en bois dans le sol consistait à soulever une masse frappante, appelée également mouton, jusqu'à une certaine hauteur, puis à la laisser tomber, sous l'effet de son propre poids ou en l'accélégrant jusqu'à l'impact avec la tête du pieu. L'onde de choc produite entraînait la pénétration du pieu dans le sol par refoulement. Un système de guidage permettait d'assurer la verticalité de la masse frappante et la précision du point d'impact afin de limiter les pertes énergétiques (Figure 26). La masse frappante était reliée au guide de battage par l'intermédiaire d'une poulie de faisceaux de cordes appelés tiraudes.

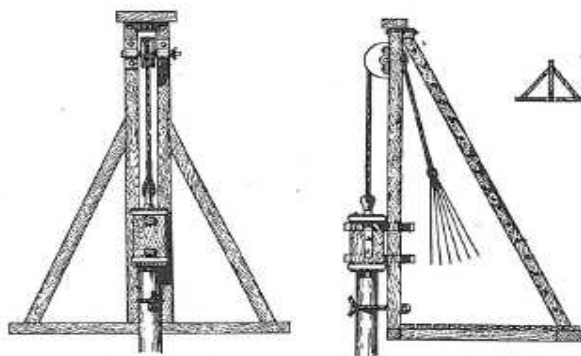


Figure 26. Machine de battage munie d'un guide (Davidian, 1969)

Deux autres « outils » ont également été utilisés pour enfoncer les pieux en bois dans le sol :

- Le maillet était composé d'un rondin de bois (principalement en noyer) fretté aux deux extrémités sur lequel était fixé un manchon en chêne (Figure 27a). L'ouvrier saisissait le manchon et venait frapper la tête du pieu. Cet outil était utilisé pour le battage des pieux de faible diamètre (inférieur à 12 cm selon Davidian, (1969)). Leur enfoncement dans le sol est alors limité à quelques mètres ;
- L'énergie cinétique acquise par le maillet étant relativement faible, les ouvriers utilisaient également un autre outil, la hie. Elle était constituée d'une partie centrale en bois ou en fer sur laquelle étaient fixés trois manchons inclinés (Figure 27b). Ces derniers permettaient aux ouvriers de la soulever et de la lâcher au-dessus de la tête du pieu à partir d'une plate forme surélevée. La hie était utilisée pour des pieux de plus grands diamètres (compris entre 12 et 18 cm) que ceux battus avec le maillet (Davidian, 1969). La hie pouvait être également constituée d'un bâti et de tiraudes, mais n'était pas munie d'un guide de battage (Figure 27c) (Mesqui, 1986).

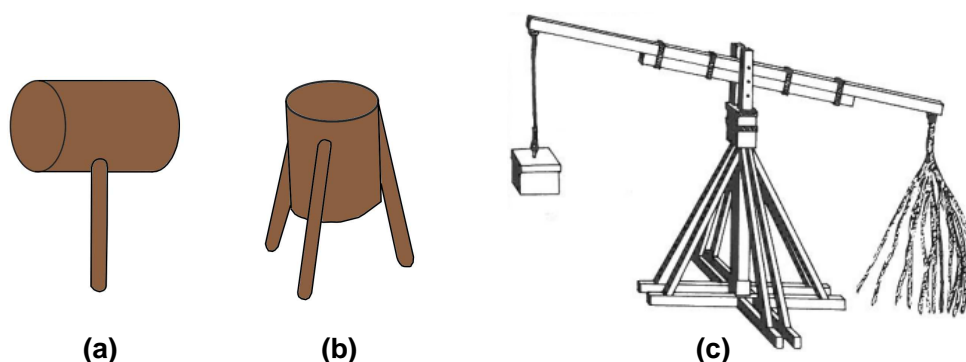


Figure 27. Maillet (a) et hie (b et c) (Davidian, 1969 ; Mesqui, 1986)

- Les machines de battage ont progressivement été automatisées au début du 19^{ème} siècle. Elles ont été successivement munies d'un treuil à vapeur, puis d'un treuil électrique. Aujourd'hui, les moteurs diesel et hydrauliques sont les plus utilisés pour le battage des pieux. Leur guide peut être fixe ou à rotation libre. Sa fonction première est de maintenir l'alignement du système de marteau avec le pieu, afin qu'il ne dévie pas de sa trajectoire lors de la phase de battage. Le guide fixe (Figure 28a) ne possède pas de point de rotation

avec la grue et reste donc à une distance constante de la cabine de pilotage, tandis que le guide à rotation libre peut tourner librement à l'extrémité de la grue (Figure 28b) ;

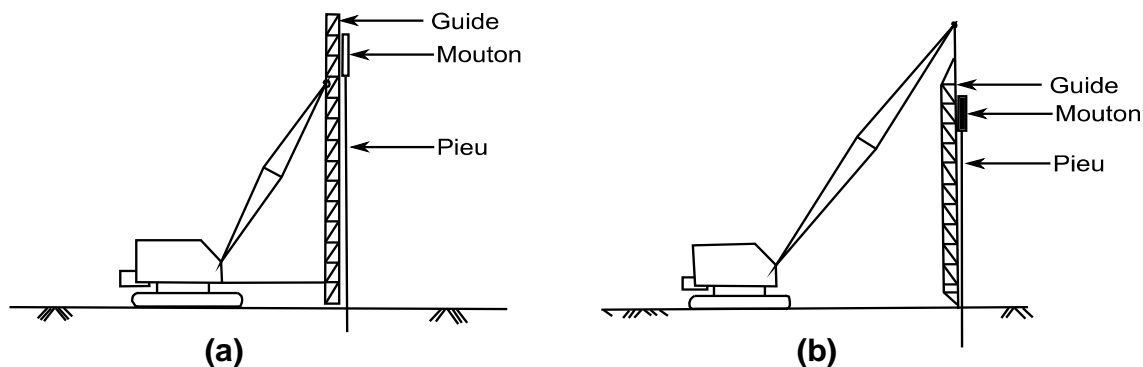


Figure 28. Guides fixe (a) et à rotation libre (b) (AWPI, 2002)

2.2.3 Transmission d'énergie de la masse frappante au pieu

Janbu, (1952) a différencié quatre phases particulières lors du battage d'un pieu, de la chute de la masse frappante jusqu'à l'arrêt de l'enfoncement du pieu dans le sol sous son impact :

- La première phase consiste à soulever la masse frappante jusqu'à atteindre son énergie potentielle maximale (Figure 29a) ;
- La masse frappante rentre ensuite en contact avec la tête du pieu et lui transmet son énergie. Des pertes énergétiques liées au frottement de la masse sur les rails du guide et dans l'air surviennent lors de sa chute (Figure 29b) ;
- Le choc entre la masse frappante et le pieu s'accompagne d'une perte d'énergie liée à l'impact, aux vibrations du pieu transmises dans le sol et aux propriétés élastiques du casque (Partie I, § 2.2.5). Pour limiter les pertes énergétiques, l'établissement britannique BRE (Building Research Establishment) a inventé un casque hydraulique expérimental assurant la transmission de l'ensemble de l'énergie de la masse frappante au pieu et permettant d'ajuster les coups de la masse en fonction des ondes transmises dans le pieu (Nanninga, 1953) (Figure 29c) ;
- Le pieu travaille en frottement et en pointe dans la quatrième phase et s'enfonce dans le sol (Figure 29d).

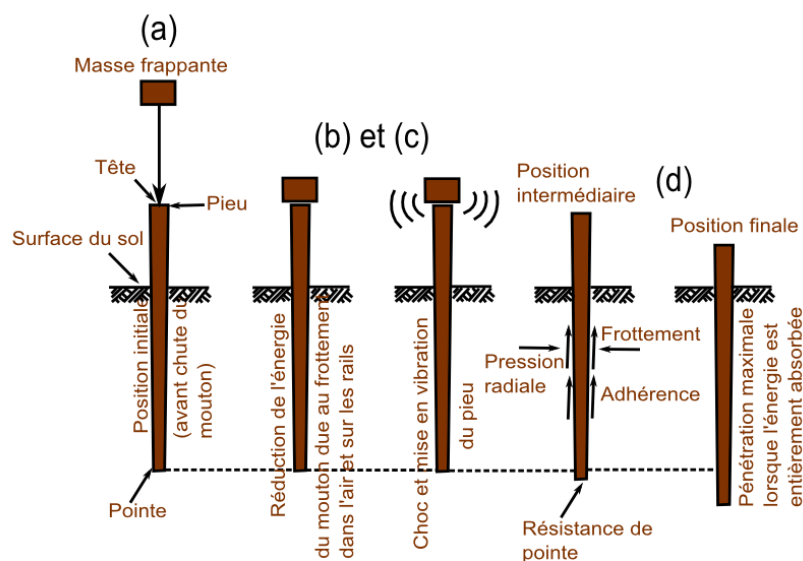


Figure 29. Transmissions d'énergie et déplacement du pieu suite à un coup de la masse frappante (modifié d'après Janbu, 1952)

2.2.4 Nature des contraintes et propagation de l'onde de choc dans le pieu

La phase de battage conduit à l'apparition de quatre types de contraintes différentes dans le pieu en bois : des contraintes de compression et de traction et des contraintes de flexion.

En effet, aux contraintes de compression ou traction axiales peuvent venir s'ajouter des contraintes de flexion et de torsion résultant de l'excentrement du point d'impact de la charge.

Les travaux menés par Rausche et al., (1988), cités par Hussein et Rausche, (1991) ont montré que les caractéristiques des contraintes de compression axiales suite au choc de la masse frappante sur la tête du pieu dépendaient principalement du module d'élasticité et de la densité du bois. La contrainte de compression axiale dans le pieu en bois s'accompagne également d'une contrainte de compression transversale lors de l'impact entre la masse frappante et la tête du pieu.

Enfin, Hussein et Rausche, (1991) ont distingué trois configurations différentes lors de la propagation de l'onde de compression axiale dans le pieu (Figure 30) :

- L'onde se propage dans le pieu jusqu'à la pointe, provoque un déplacement du pieu dans le sol puis est réfléchi avec une amplitude plus faible suite à une perte d'énergie lors du déplacement du pieu (Figure 30a) ;
- Si l'onde de compression est supérieure à la résistance du pieu, ce dernier se fissure en tête. La réduction des contraintes en tête du pieu peut être assurée par la mise en place d'un casque (Nanninga, 1953) (Figure 30b) ;
- Si la résistance du sol est trop faible et l'amplitude de l'onde réfléchi trop importante, le fût se fissure (Figure 30c).

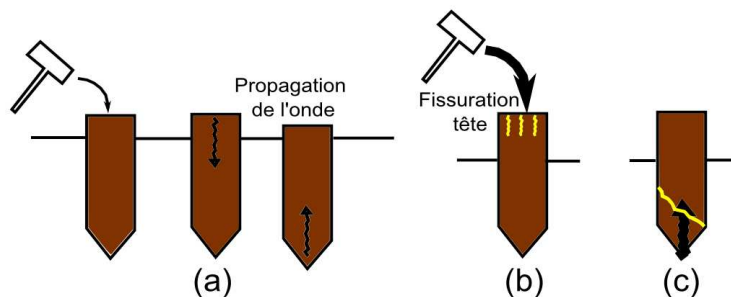


Figure 30. Dommages causés au pieu lors de la phase de battage

2.2.5 Limitation des contraintes induites dans le pieu

La Partie I, § 2.2.4 a présenté la nature des contraintes induites dans le pieu durant la phase de battage, ainsi que les conséquences du battage sur son intégrité.

Les pieux en bois étaient généralement équipés de protections en tête et en pointe afin de limiter leur fissuration et d'empêcher leur fracturation (fendage des têtes).

2.2.5.1 Protections en pointe du pieu

Les protections en pointe des pieux dépendaient de la nature des sols dans lesquels ils étaient battus :

- Dans les sols fins (sols limoneux ou argileux), les bâtisseurs brûlaient les pointes des pieux afin d'augmenter leur dureté et leur résistance (Mesqui, 1986) ;
- Dans les sols granulaires plus compacts (sols sablo-graveleux), les pointes des pieux étaient munies d'un sabot métallique permettant d'obtenir une meilleure pénétrabilité dans le sol (Maillard, 2006).

La Figure 31 illustre les différents modes de rupture des pointes lorsqu'elles n'étaient pas protégées, ainsi que l'état d'une pointe d'un pieu prélevé sur une ancienne digue de la Saône (à Auxonne) et datée de 1673. La pointe présente seulement quelques fissures.

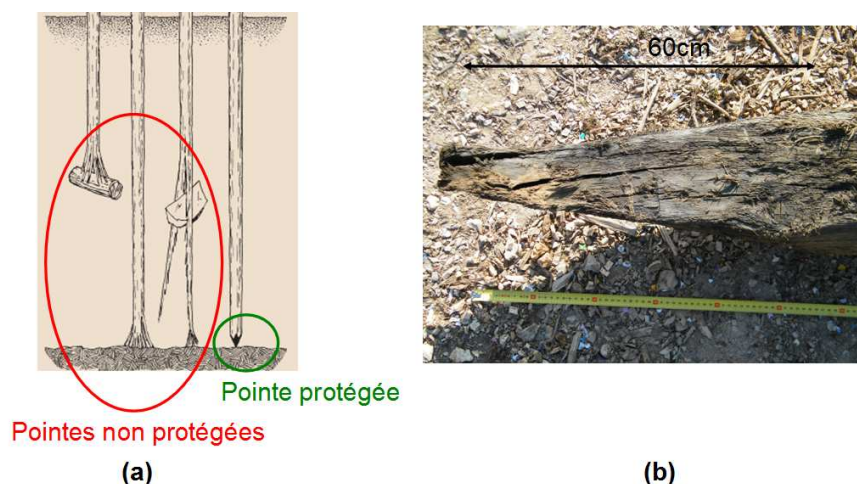
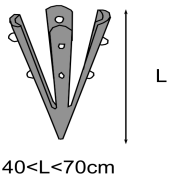
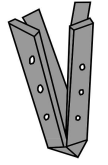
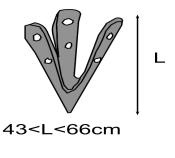

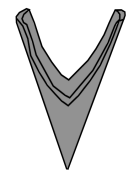


Figure 31. Rupture des pieux battus sans protection de la pointe (DFP-Foundation-Product, 1993) (a) et pointe d'un pieu prélevée à Auxonne (2011) (b)

Les pointes des pieux étaient armées de sabots métalliques pour limiter les risques de rupture lors de la phase de battage. Le Tableau 14 présente leur géométrie, ainsi que les ponts sous lesquels ils ont été découverts.

Tableau 14. Modèles de sabots (modifié d'après Mesqui, 1986)

Nature du sabot	Types de sabots				
	Sabot à quatre languettes	Sabot à quatre languettes « soudées »	Sabot à trois languettes	Cône divisé	Cône à deux languettes
Illustration					
Date d'existence avérée	Epoque romaine	1840	1 ^{er} siècle ap. JC	Epoque romaine (Trèves) Epoque indéterminée (Chalon)	Epoque indéterminée
Ponts	Trèves, Mayence, Genève, Avignon, Chalon-sur-Saône,	Argenteuil	Trèves	Trèves (24 < L < 30cm) Chalon (L=42cm)	Chalon-sur-Saône

Des sabots à quatre languettes ont été retrouvés sur la pointe des pieux d'une ancienne digue de la Saône construite en 1673 à Auxonne (Figure 32) ainsi que sur des pieux de fondation du pont Royal à Paris.



Figure 32. Pieux provenant d'une ancienne digue de la Saône (1673)

Les pointes des pieux étaient aussi protégées par des sabots en fonte, munis par la suite d'une tige encastrée dans le pieu (Degrand et Résal, 1888) (Figure 33a).

Le sabot de Camuzat (Figure 33b) était également très utilisé pour protéger la pointe des pieux. Il était constitué d'une feuille de tôle épaisse enroulée autour de la pointe et rivée suivant une génératrice : cette génératrice était fixée au pieu par de longs clous à tête plate (Davidian, 1969).

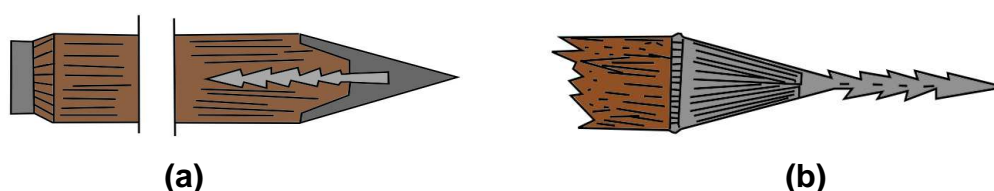


Figure 33. Sabots en fonte (a) et de type Camuzat (b) (modifié d'après Davidian, 1969)

2.2.5.2 Protections en tête du pieu

Les têtes des pieux battus en France et dans les pays étrangers étaient généralement frettées, c'est-à-dire cerclées avec un anneau de fer chaud. En se refroidissant, l'anneau de fer se resserrait et venait comprimer les fibres du bois et ainsi augmenter leur résistance. La frette était située à quelques centimètres sous la surface des têtes, afin d'éviter tout contact avec la masse frappante lors du battage (Davidian, 1969) (Figure 34).

Selon Terzaghi, (1916), les têtes des pieux devaient être préalablement taillées à l'herminette, puis frettées. Les frettes, en se resserrant, écrasaient les fibres du bois qui constituaient dès lors un « bourrelet » les protégeant. Leur hauteur et leur épaisseur étaient respectivement supérieures à 6 et 2,5 cm.

Le Tableau 15 présente les dimensions des frettes mesurées par Terzaghi, (1916) et Davidian, (1969). Ce dispositif a également été utilisé aux Pays-Bas lors du battage des pieux de fondation (Figure 34c).

Tableau 15. Caractéristiques des frettes

Auteurs	Epaisseur frette	Hauteur frette	Hauteur entre tête du pieu et frette
Terzaghi, (1916) (Figure 34a)	> 2,5 cm	> 6 cm	?
Davidian, (1969) (Figure 34b)	2 cm	7 cm	2 à 3 cm

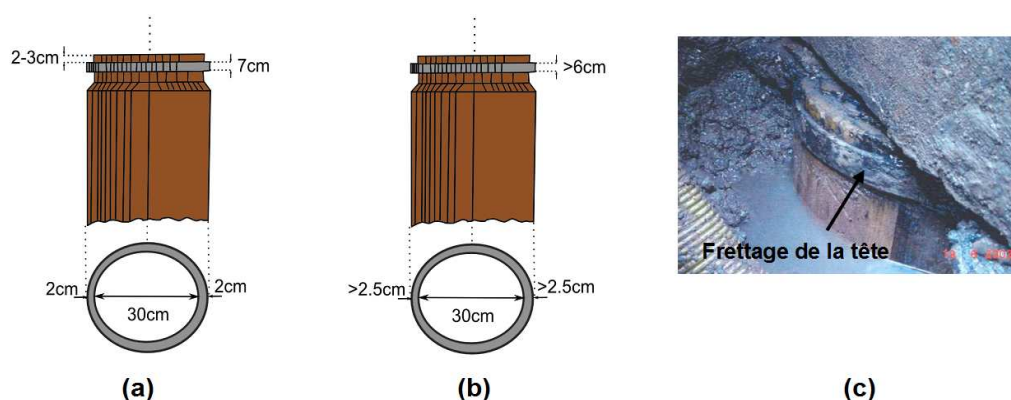


Figure 34. Frettage des pieux en bois (a) et (b) – frettage de pieux de fondation employé aux Pays-Bas (c)

Le frettage des pieux en bois aurait été utilisé en France jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle - début du 19^{ème} siècle (Davidian, 1969).

Dans la pratique actuelle, les têtes des pieux en bois sont protégées par un dispositif différent du frettage (AWPI, 2002). Un casque métallique est fixé en tête du pieu et a pour objectifs principaux de fournir une surface libre lors du contact entre la masse et le pieu et

d'uniformiser la transmission de l'énergie fournie lors de l'impact dans toute la tête du pieu. Le casque doit alors être adapté à la tête du pieu afin de maintenir un alignement concentrique entre la masse frappante et le pieu.

Ce type de protection est utilisé aux Etats-Unis (Figure 35) : un amortisseur en plastique vient en complément du casque et est fixé à la masse frappante afin d'amortir les chocs lors du battage.

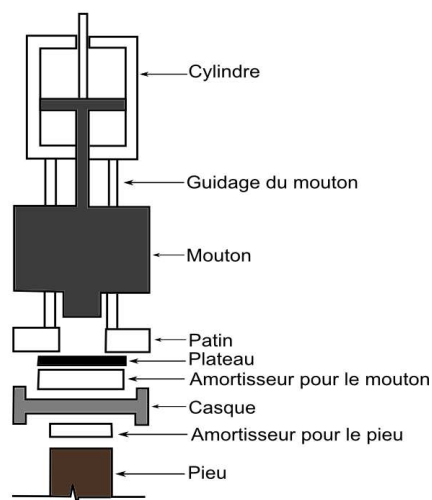


Figure 35. Casque en acier et amortisseurs utilisés lors du battage (AWPI, 2002)

Aux Pays-Bas, le frettage de la tête des pieux et le casque en métal ont été largement utilisés. L'arrêt de l'emploi de ces casques a été concomitant de l'invention et du développement du béton aux Pays-Bas. Dès le début du 20^{ème} siècle, les Hollandais ont remplacé les casques par des dés en béton pour protéger les têtes des pieux en bois. Ces blocs de béton permettaient également de maintenir les pieux totalement immergés (les dés se situant au niveau de la zone de marnage de la nappe) et servaient de connexion entre les fondations et la partie supérieure de l'ouvrage (Figure 36a).

Dans un second temps, les dés en béton ont été renforcés par des armatures métalliques (Figure 36b).

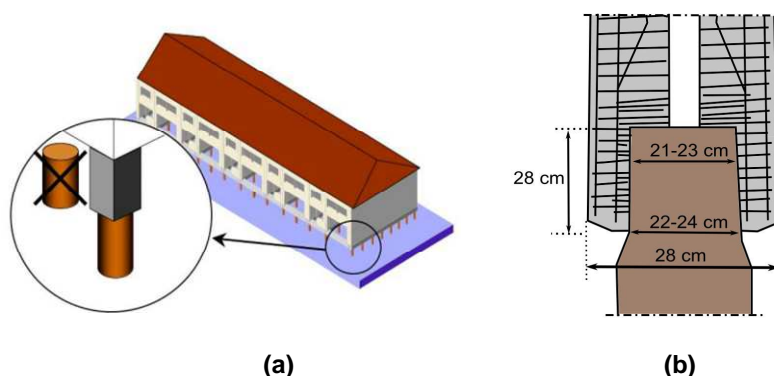


Figure 36. Connexion entre les fondations et la partie supérieure du bâtiment (a) - Dé en béton renforcé par des armatures métalliques en tête des pieux (b) (Stichting Platform Fundering Nederland., 2005 et 2007)

Partie II. Etat de l'art des méthodes de construction des fondations sur pieux en bois

1 Evolution des méthodes de construction des fondations

Le premier paragraphe de cette partie traite de l'évolution des méthodes de construction des fondations des ouvrages routiers sur des pieux en bois, de l'époque préromaine à l'époque industrielle (Tableau 16).

Tableau 16. Dates et limites des époques étudiées

Epoque	Date définissant la période
Préromaine	De 6000 av. JC au 1 ^{er} siècle av. J-C
Romaine	Du 1 ^{er} siècle av. JC à la fin du 6 ^{ème} siècle
Moyen-Âge	Du 7 ^{ème} siècle à la fin du 15 ^{ème} siècle
Renaissance	Du début du 15 ^{ème} siècle à la fin du 16 ^{ème} siècle
Moderne	Du 17 ^{ème} siècle à la fin du 18 ^{ème} siècle
Industrielle	Du 19 ^{ème} siècle au 20 ^{ème} siècle

Les caractéristiques des ponts construits au cours des différentes époques sont détaillées en Annexe A. Les villes et cours d'eau franchis, les dates de construction, la géométrie, la nature des terrains dans lesquels les pieux ont été battus ainsi que la nature des fondations y sont présentés. L'état des ponts (en service ou ruiné) est également précisé dès lors que l'information était disponible.

1.1 Les méthodes de construction des fondations à l'époque préromaine

Dès l'époque du Néolithique, l'homme a su exploiter les matériaux de son environnement et développer des méthodes de construction pour asseoir les bâtiments et habitats nécessaires à son développement.

Les archéologues et anthropologues ont retrouvé de nombreux sites, datés de l'époque néolithique, sur lesquels des pieux en bois ont été utilisés comme pieux de fondation des cités lacustres. Les résultats de ces recherches ont permis d'affirmer, qu'il y a plus de 6000 ans, les hommes possédaient des techniques pour fonder des habitats lacustres sur des pilotis (Figure 37).



Figure 37. Cité lacustre [11]

Sans notion spécifique de règles de calcul ni disposition nécessaire pour assurer la pérennité de ces structures, les hommes parvenaient à enfoncer des pilots dans le sol. Les machines de battage n'ayant pas été développées, les pieux étaient fichés dans le sol à la force humaine [9]. Des habitats fondés sur des pieux en bois de chêne et de frêne et datés de l'âge de bronze (de 1800 à 700 av. JC) ont été découverts près des lacs jurassiens de Neuchâtel (Suisse), de Chalain ou de Clairvaux (Maillard, 2006). La méthode d'enfoncement des pieux en bois était la suivante :

- La tête des pilots était préalablement taillée en gueule ; c'est-à-dire en une encoche profonde réalisée à l'extrémité supérieure et destinée à recevoir un bois horizontal (plancher ou parois de l'habitat) (Figure 38a) ;
- La liquéfaction des craies lacustres sous l'effet des vibrations permettait aux hommes de ficher les pilots dans le sol à une profondeur d'environ 2 m (Figure 38b et Figure 38c). Selon [11], les pilots pouvaient supporter plusieurs centaines de kilos.

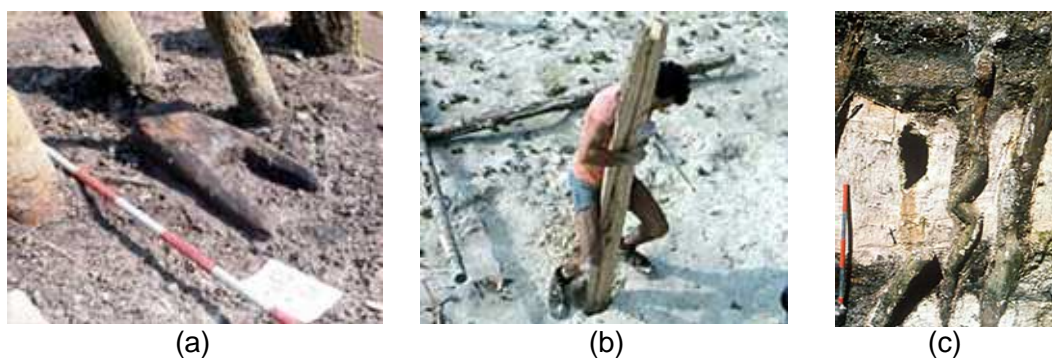


Figure 38. Pilots taillés en gueule (a) ; Restitution moderne de l'enfoncement d'un pilot dans le sol (b) ; Coupe stratigraphique contenant des pieux (c) (Clairvaux, la Motte-aux-Magnins) [11]

Onze sites d'habitats, datés de l'an 1000 av. JC et fondés sur des pieux en chêne, ont été découverts dans le lit mineur de la Saône. Selon Maillard, (2006), il s'agissait d'édifices d'ampleur modérée dans la mesure où l'ensemble du site contenait environ 500 pieux.

Enfin, des vestiges d'un pont fondé sur des pieux en bois ont également été retrouvés entre les lacs de Bienne et de Neuchâtel en Suisse. Ce pont, appartenant à la civilisation celte de la Tène et daté de l'an 300 av. JC, possédait une longueur et une largeur égales à 90 m et 2,80 m. Il comportait deux rangées de pieux de chêne de 20 cm de diamètre, espacées de

2,4 m. Les 16 à 20 piles étaient distantes de 5 m. La stabilité des rangées était renforcée par des pieux obliques jouant le rôle de contrefort (Kruta, 2000).

Le Tableau 17 présente les caractéristiques des ponts et habitats fondés sur des pieux en bois et datés de l'époque préromaine.

La Figure 39 illustre la localisation de ces constructions.

Tableau 17. Caractéristiques des ponts et habitats datés de l'époque préromaine ([11] ; Maillard, 2006 ; Kruta, 2000)

Numéro du site	Nom	Ville / Emplacement	Cours d'eau franchi	Datation	Caractéristiques
1	Maisons	Lacs jurassiens de Neuchâtel	X	3000 av. JC	Maisons en milieu humide, fondées sur des pieux en bois de chêne ou de frêne.
2	11 sites d'habitats	Lit mineur Saone	X	1000 av. JC	Plateformes supportant les maisons reposant sur des pieux en chêne fichés dans les alluvions. Edifices d'ampleur modérée.
3	Pont	Entre les lacs de Bienne et de Neuchâtel	Thielle	300 av. JC	Pont de 90 m de longueur, 2,8 m de largeur, comportant 2 rangées de pieux de chêne de 20 cm de diamètre et espacés de 2,4 m. La distance entre les 16 à 20 piles était de l'ordre de 5 m.

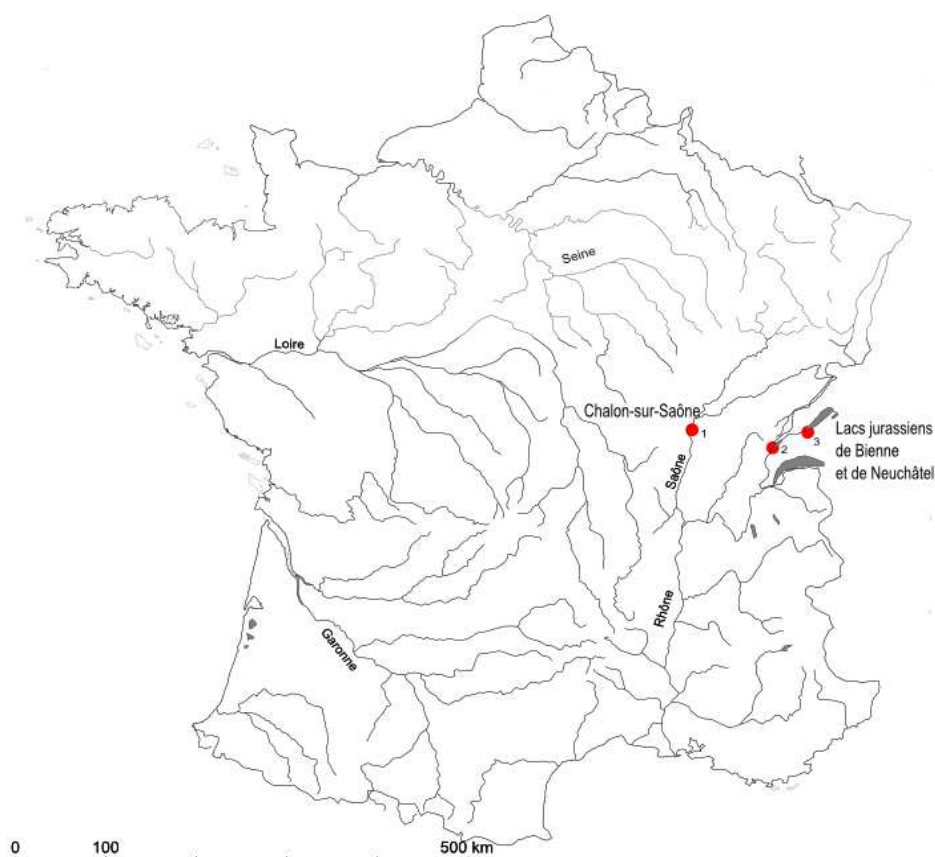


Figure 39. Localisation des constructions datées de l'époque préromaine

Seuls des vestiges de ces constructions sont parvenus jusqu'à nous (Figure 38c). Les dates de ruine des parties supérieures de ces ponts et habitats sont, à ce jour, inconnues.

1.2 Les méthodes de construction des fondations à l'époque romaine

1.2.1 Les méthodes de construction des fondations sur pieux

1.2.1.1 La construction des ponts vue par César

Les premières traces écrites des constructions des ponts fondés sur des pieux en bois sont datées de l'époque romaine.

A Rome, une légende raconte qu'Hercule aurait été le premier homme à avoir construit un pont pour traverser le Tibre, lorsqu'il amenait avec lui les troupeaux conquis sur le Géryon (Degrand et Résal, 1888).

Dans ses ouvrages, César a décrit les ponts construits par les Gaulois : « *les culées et les piles se composaient de troncs d'arbres disposés par assises régulières et se croisant à angles droit ; les vides étaient remplis à l'aide de blocs de rocher fortement tassés, et les assises qui formaient saillies les unes par rapport aux autres, se rejoignaient vers la partie supérieure, suivant une sorte de profil ogival pour supporter le tablier* » (Degrand et Résal, 1888).

Dans son ouvrage « *Bella Gallica* », César a également détaillé la construction d'un pont sur le Rhin entre Coblenze et Cologne en 55 av. JC. « *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* » (Reiffsteck, 2009).

La Figure 40 présente les fondations de ce pont reconstituées dans les albums de Napoléon III.

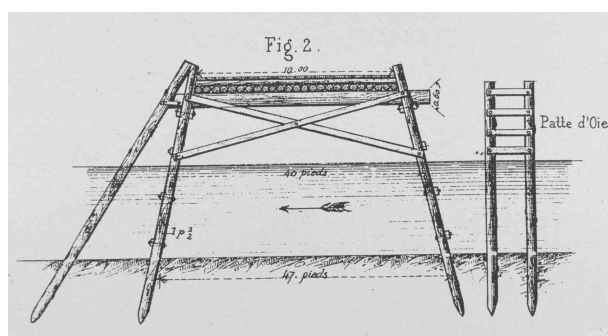


Figure 40. Fondations sur pieux du pont sur le Rhin (Reiffsteck, 2009)

1.2.1.2 Une connaissance maîtrisée des types de fondations

Les vestiges des ponts et les écrits datés de cette époque montrent que les romains mettaient en œuvre diverses méthodes de construction des ponts sur pilotis et adaptaient les types de fondations en fonction de la nature du sol.

Les premières machines de battage ont été inventées au cours de l'époque romaine. Les romains tiraient sur une corde pour remonter une pierre, puis la laissaient tomber jusqu'à l'impact sur le pilot. D'autres systèmes de battage, plus perfectionnés que la simple pierre et munis d'un système de guidage (Figure 41) ont également été développés.

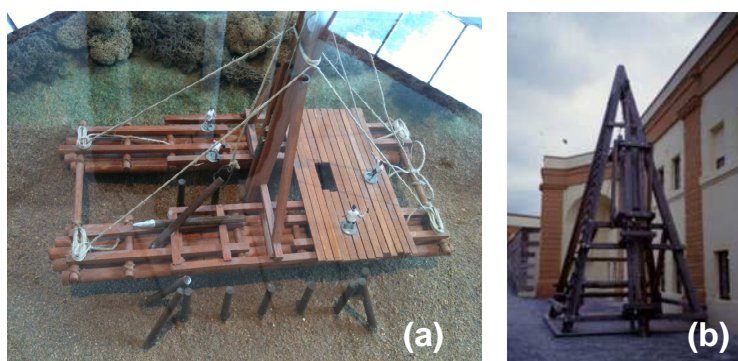


Figure 41. Machines de battage exposées aux musées de Trèves (a) et de la civilisation romaine (b) (Reiffsteck, 2009)

Dans son traité, Vitruve différenciait deux types de fondations (Mesqui, 1986) :

- Les fondations superficielles ou semelles étaient privilégiées lorsque le substratum pouvait être facilement atteint. Le pont du Gard et le petit pont de Spoy ont notamment été construits sur ce type de fondation ;
- Les ouvrages reposaient sur des pilotis lorsque la profondeur du substratum était trop importante pour fonder superficiellement. Dans cette configuration, des pieux en chêne, en olivier ou en aulne étaient brûlés en pointe afin d'augmenter leur résistance puis battus dans le sol. Les pointes des pieux pouvaient être également munies de sabots métalliques (Partie I, § 2.2.5.1). Ce type de fondation a été largement utilisé à l'époque romaine et identifié sous des ponts à Genève, à Ambroix près de Gallargues, en Avignon, à Chalon-sur-Saône, en Mayence ou encore à Cologne. 300 à 500 pieux battus sur 160 m² (soit une moyenne de deux à trois pieux battus par m²) ont été découverts sous les fondations du pont de Trèves.

Les fouilles pratiquées sous les ponts romains ont permis de mieux comprendre les méthodes de construction : un premier ensemble de pieux, longs et équarris (40 cm de côté), avait pour objectif de supporter le cadre et la semelle en charpente. A l'intérieur de cet ensemble était battu un second ensemble de pieux, de section plus petite. L'argile et les cailloux étaient compactés et venaient combler les vides entre ces deux ensembles. Ils empêchaient ainsi la dislocation ou le flambement des pieux lors de leur éventuel dégarnissage (Mesqui, 1986).

Les deux rangées de pieux pouvaient être également remplacées par des caissons constitués de madriers de bois horizontaux et fixés à des pieux verticaux. Ces caissons étaient ensuite remplis de blocs de pierre non taillés. Selon Guyon, (2000), cette méthode aurait été mise en œuvre lors de la construction du pont de Pontoux sur le Doubs, du pont de Fondettes sur la Loire ou encore celle du pont de Mayence sur le Rhin.

Enfin, des pieux battus en amont des piles ont été retrouvés à proximité de plusieurs ponts datés de l'époque romaine, laissant présager que les romains protégeaient leurs ponts contre d'éventuels chocs pouvant survenir lors d'embâcles (Guyon, 2000).

1.2.2 Les vestiges des ponts romains en France

Les études menées par les archéologues en France ont permis de découvrir les vestiges d'une trentaine de ponts datés de l'époque romaine et fondés sur des pieux en bois. Onze d'entre eux étaient situés sur la Loire. La datation de ces ouvrages a été rendue possible avec la présence quasi-systématique de l'aubier des pieux en chêne (Dumont, 2011).

Les vestiges de ces ponts attestent de la diversité des méthodes de construction :

- Le pont Saint-Laurent à Chalon-sur-Saône, daté de 14 av. JC, reposait sur des pieux en chêne ;
- A Chalon-sur-Saône, un pont romain avec un tablier en bois reposant sur des piles en maçonnerie a été daté du 3^{ème} siècle ap. J-C. Des pieux appartenant à un précédent pont construit intégralement en bois ont été réutilisés lors de son édification (Maillard, 2006) ;
- Les fondations des piles du pont de Chassenard, datées du milieu du 1^{er} siècle av. J-C, ont été construites à l'aide de caissons en bois remplis de blocs de pierre et de remblais ;
- Les fouilles entreprises sur de nombreux sites romains dans le département du Cher ont également permis de déterrer un pieu de fondation du pont de Saint-Satur, daté du 1^{er} siècle ap. J-C (Figure 42).



Figure 42. Pieu de fondation du pont mixte de Saint-Satur (Dumont, 2011)

Ce pieu est composé de trois parties distinctes : l'extrémité supérieure en cône d'érosion était émergée à l'étiage. La partie du pieu immergée située sous le cône d'érosion a été érodée par le courant (la section du pieu est plus faible que dans la partie inférieure). Enfin, l'extrémité

inférieure du pieu est restée encastrée dans les sédiments et n'a donc pas été érodée par le courant (Dumont, 2010).

Le Tableau 19 en Annexe A présente les caractéristiques des ponts romains fondés sur des pieux en bois ayant fait l'objet de fouilles (Dumont, 2011). La majeure partie a été construite au cours des deux premiers siècles de notre ère, durant l'époque du Haut-Empire, marquée par une stabilité intérieure et une prospérité économique. La Figure 43 permet de les localiser sur le territoire français.

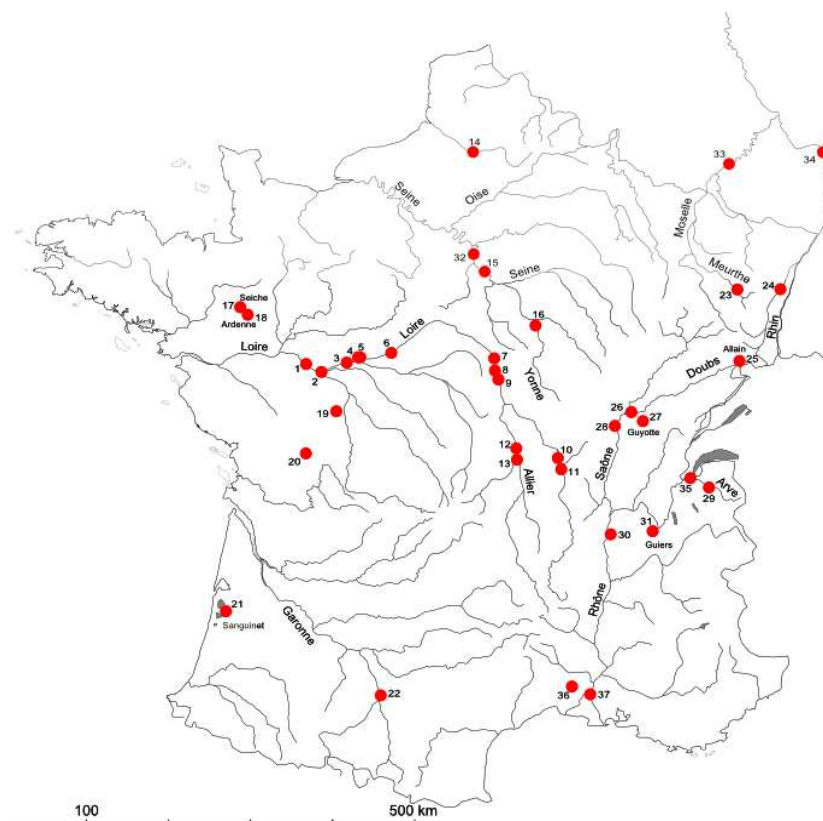


Figure 43. Localisation des ponts datés de l'époque romaine

L'étude des fondations des ponts romains situés sur le territoire français et à l'étranger (notamment en Allemagne) n'a pas permis de mettre en évidence une méthode de construction des fondations caractéristique de cette époque. On peut néanmoins affirmer que le chêne était l'essence la plus utilisée dans les constructions romaines en bois dans la mesure où son caractère imputrescible dans l'eau et sa grande résistance à l'air libre avaient été identifiés.

La majeure partie des ponts romains construits sur des pieux en bois ont été détruits au cours des siècles qui ont succédé à leur édification. Selon Dumont, (2010), les parties supérieures des ponts étaient essentiellement constituées de bois. Elles ont été fragilisées ou ruinées suite à l'action humaine (faits de guerre) ou à l'érosion naturelle des cours d'eau. Des hypothèses liées à des défauts de conception, à l'absence d'entretien ou aux aléas naturels (comme les

crues ou les embâcles) ont également été avancées pour expliquer la ruine de ces ouvrages. Mais les dates et raisons exactes de leur destruction sont pour la plupart inconnues.

Suite à la ruine de la partie supérieure de certains ponts, les fondations en bois ont parfois été réutilisées pour asseoir les structures d'ouvrages plus récents. Ainsi, plusieurs piles du pont de Trèves en Allemagne reposent aujourd'hui sur les massifs maçonnés fondés sur des pieux en bois datés de l'époque romaine.

1.3 Les méthodes de construction des fondations à l'époque du Moyen-Âge

La chute de l'empire romain, marquant le début du Moyen-Âge, a conduit à une disparition progressive des savoirs et des méthodes de construction acquis pendant près de 7 siècles. Nous disposons actuellement de très peu de sources sur la période du Moyen-Âge.

Les ouvrages et bâtiments édifiés au cours de cette époque reposaient toutefois également sur des fondations profondes ou superficielles.

Ces dernières étaient généralement préférées aux fondations profondes, d'une part, pour des raisons budgétaires et d'autre part car les constructions sur pieux présentaient un inconvénient majeur : les pieux en bois devaient être battus dans des terrains dont les propriétés mécaniques étaient méconnues des constructeurs (Partie I, § 2.2.1).

Malgré le faible coût de construction des fondations superficielles par rapport à celui des fondations profondes, les bâtisseurs au Moyen-Âge redoutaient la qualité médiocre des premières couches de sol. En 1499, les termes du marché relatif à l'édification du pont de Malzéville indiquaient que les fondations devaient reposer sur un sol « bon et ferme ». Si la profondeur du substratum était trop importante, les piles devaient être construites sur des pieux (Mesqui, 1986).

Certains ouvrages ont donc été construits sur des fondations profondes au Moyen-Âge : les piles du pont de Lyon ont été édifiées en utilisant des pieux de longueurs comprises entre 3,9 et 5,9 m. Une pile d'un pont dans l'actuelle ville de Romans-sur-Isère, daté de 1389, repose sur une trentaine de pieux en pin de 17,5 m de longueur. Enfin, en 1404, des pieux en aulne de 5,8 m de longueur ont servi à édifier le bec d'une pile d'un pont à Macon (Mesqui, 1986).

Les connaissances limitées des bâtisseurs sur les propriétés mécaniques des sols, conjuguées à l'hétérogénéité des terrains au droit des ouvrages et aux difficultés de réalisation des fondations les ont amenés à diversifier les types de fondations des ouvrages :

- Les fondations d'une des piles du pont d'Orléans (construit entre 1389 et 1449) étaient constituées d'un simple blocage de moellons sans mortier, tandis que des pieux battus en bois ont été retrouvés sous quatre autres piles de ce pont (Mesqui, 1986) ;
- Une des piles du pont de Beaugency (11^{ème} – 15^{ème} siècle) reposait sur un grillage en bois supporté par des pieux, tandis qu'un enchevêtrement anarchique de pieux a été découvert sous une autre pile.

Les informations contenues dans la littérature ont permis d'identifier dix ponts construits partiellement ou intégralement sur des pieux en bois. Ils sont présentés dans le Tableau 20, en Annexe A. La Figure 44 permet de les localiser sur le territoire français.

La période du Moyen-Âge s'étendant sur près de 1000 ans, il en existe probablement d'autres qui n'ont pu, par manque d'information, être présentés dans cette étude.

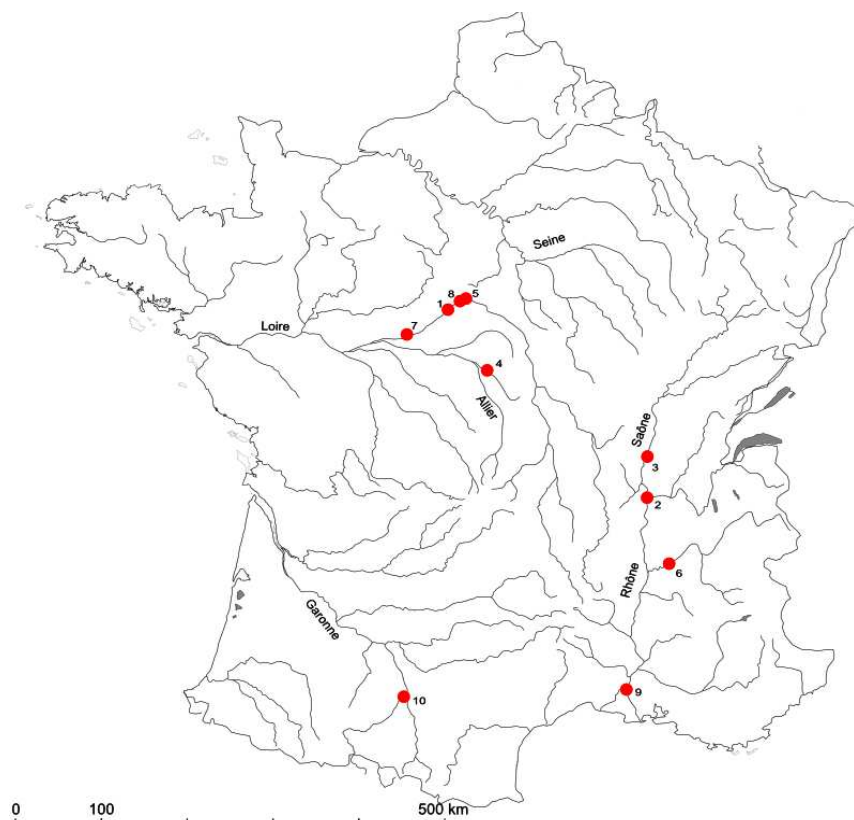


Figure 44. Localisation des ponts datés de l'époque du Moyen-Âge

Parmi les 10 ponts datés du Moyen-Âge, trois d'entre eux sont actuellement en service. Trois autres ont été détruits. Le manque d'information au sujet des quatre derniers n'a pas permis de déterminer leur état actuel (Tableau 20).

L'origine de la ruine des ponts Saint-Benezet et de la Daurade est inconnue. Les ponts de Beaugency et d'Orléans sur la Loire et le pont Saint-Nicolas sur le Loiret sont en service et semblent avoir traversé les siècles. Néanmoins, les probables défauts de construction des ponts, les aléas naturels (7 arches du pont d'Orléans ont été détruites par un embâcle en 1435 (Mesqui, 1986)) ainsi que les faits de guerre survenus au cours des 7 derniers siècles laisseraient penser que la partie supérieure et les fondations actuelles de ces ouvrages ne sont pas d'origine.

1.4 Les méthodes de construction des fondations à la Renaissance

L'époque de la Renaissance a marqué une rupture progressive avec le Moyen-Âge dans le choix du type de fondation. Dans son traité, Alberti (1404-1472), cité par Mesqui, (1986) recommandait de réaliser « une fondation sur semelle de bois solidarisée à un pilotis battu à

refus », indépendamment de la nature du terrain. Selon l'auteur, la semelle devait posséder « le double de la largeur de la pile, et les pieux une longueur égale au huitième de la hauteur de l'ouvrage, et un diamètre égal au douzième de leur longueur ».

Deux siècles plus tard, en 1612, un devis établi pour la construction d'un pont sur la Guyenne reprenait les recommandations établies dans le traité de Vitruve : les fondations devaient être constituées de pilotis si le substratum était trop profond pour fonder superficiellement (Mesqui, 1986).

Si les premiers traités visant à établir des méthodes de dimensionnement des fondations profondes ont été rédigés à la Renaissance, les textes et plans datés de cette époque indiquent que les méthodes de construction des fondations restaient néanmoins empiriques et diversifiées.

Les nombreuses tentatives entreprises lors de la construction des fondations du pont Neuf à Toulouse entre 1544 et 1614 en attestent :

- Trois piles de la rive gauche ont été fondées superficiellement, mais le bec de la troisième pile s'est déversé suite aux descentes de charges trop élevées (Figure 45) ;
- La quatrième pile du pont présentait la particularité d'être fondée superficiellement en aval et en amont et sur des pieux en bois au centre (Figure 46). La maçonnerie a été montée par la suite sur un mortier coulé entre les têtes des pieux (Mesqui, 1986).

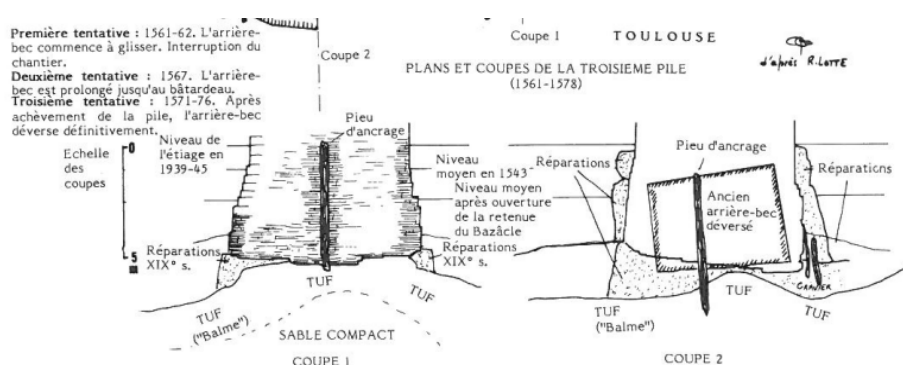


Figure 45. Plan et coupe de la 3^{ème} pile du pont de Toulouse (Mesqui, 1986)

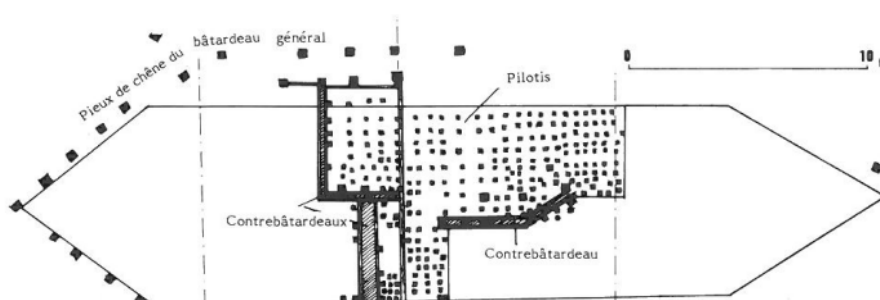


Figure 46. Plan de la 4^{ème} pile du pont de Toulouse (Mesqui, 1986)

A l'inverse, les piles du pont de Gière (Vienne) ont été édifiées en 1547 sur des pieux en bois recépés à 1,5 m sous le niveau d'eau, sur lesquels a été fixée une semelle en bois constituant le platelage. Les vides entre les têtes des pieux ont été comblés par un béton de chaux et des moellons.

La construction des fondations de ces deux ponts met en évidence le manque de connaissance des bâtisseurs sur l'importance du platelage en bois dans la stabilité de l'ouvrage. Selon Mesqui, (1986), il assurait la répartition des contraintes, solidarisait les têtes des pieux entre elles et limitait les risques de flambement.

Le descriptif des sept ponts datés de l'époque de la Renaissance est présenté dans le Tableau 21 en Annexe A. La Figure 47 permet de les localiser sur le territoire français.

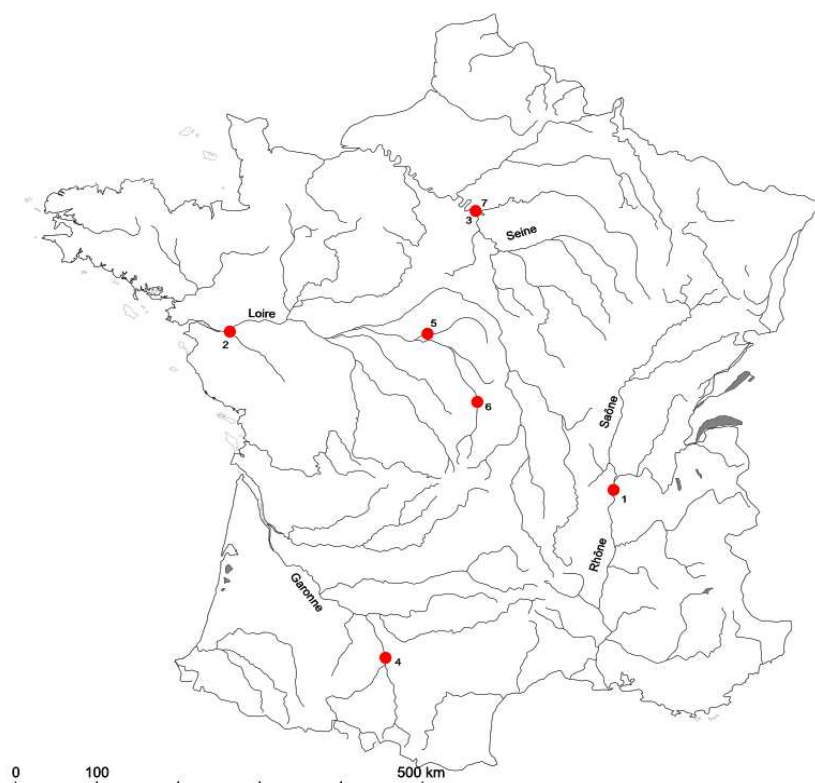


Figure 47. Localisation des ponts datés de l'époque de la Renaissance

Selon Mesqui, (1986), les fondations étaient régulièrement mises en cause dans la ruine des ouvrages. Elles pouvaient se déchausser par affouillement. La portance limite des pieux pouvait être également surestimée. Enfin, les embâcles de glace fragilisaient ou détruisaient la structure supérieure des ponts.

Lorsque le débouché du cours d'eau était trop grand pour le passage de l'eau, les piles des ponts s'enlisaient suite à l'accumulation de matériaux alluvionnaires. Les crues créaient alors de nouveaux passages. Ainsi, le pont de Nevers (type de fondation inconnu) sur la Loire a été rallongé trois fois en 90 ans (de 1580 à 1669) afin d'assurer le franchissement du fleuve.

Parmi les huit ponts présentés dans le Tableau 21 en Annexe A, le pont Notre Dame, le pont Neuf à Paris sur la Seine et le pont Neuf à Toulouse sur la Garonne sont en service. Le pont de Moulins édifié sur l'Allier a été détruit, mais la date de sa ruine est inconnue. Enfin, les recherches bibliographiques n'ont pas permis de déterminer l'état actuel des trois autres ponts construits sur l'Isère, la Loire et le Cher.

1.5 Les méthodes de construction des fondations à l'époque moderne

1.5.1 L'harmonisation des méthodes de construction au 17^{ème} siècle

Les méthodes de construction des fondations des ouvrages ont évolué au cours du 17^{ème} siècle : lorsque la fondation sur pieux était recommandée ou imposée, les longueurs des pieux à battre étaient déterminées en fonction de la profondeur du substratum.

Lors de la construction du pont Saint-Michel à Paris en 1616, le « devis » établi par les constructeurs a imposé de battre des pieux en bois de 2,91 m de longueur. Leur diamètre en tête était égal à la distance entre deux pieux. Après remplissage des intervalles par des moellons, un platelage en bois de 12 à 15 cm d'épaisseur a été fixé aux têtes des pieux. Chaque pile du pont reposait sur 650 pieux en bois (Mesqui, 1986) (Figure 48).

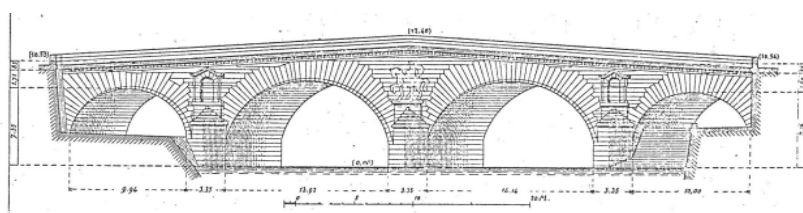


Figure 48. Coupe du pont Saint-Michel (Darche, 1986)

Le pont de la Trésorerie à Grenoble a été construit en 1622 sur des pieux en bois de longueurs comprises entre 3,9 et 4,9 m. Des madriers horizontaux ont été solidarisés aux têtes des pieux et ont servi d'assises à la maçonnerie (Mesqui, 1986) (Figure 49).

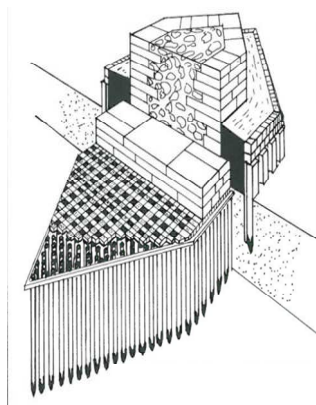


Figure 49. Coupe d'une des piles du pont de la Trésorerie (Mesqui, 1986)

A la fin du 17^{ème} siècle, l'Académie d'Architecture a proposé des critères relatifs au choix du type de fondation en fonction de la nature des terrains et des difficultés de réalisation (Mesqui, 1986) :

- « Dans un sol de sable et de gravier ferme, il suffit de dégager les alluvions superficielles pour réaliser une fondation superficielle.
- Dans un sol de sable et gravier menu, on fouillera sur 2 à 3 pieds d'épaisseur, puis on battra un pilotis sur lequel sera assise une plate-forme de bois.
- Dans un sol de « sable mouvant », où l'on ne peut atteindre le ferme avec des pieux, on battra néanmoins un pilotis supportant une grille de bois.

- Enfin, dans un sol de « glaise », on évitera de battre un pilotis, et l'on établira un radier général superficiel, recouvert de pierres. »

Suite à ces règles, les fondations sur pieux ont été privilégiées aux fondations superficielles sur de nombreux chantiers. Leurs méthodes de construction se sont diversifiées au cours du 18^{ème} siècle.

1.5.2 Le développement des méthodes de construction au 18^{ème} siècle

Les méthodes de construction des fondations profondes mises en œuvre au 18^{ème} siècle dépendaient de la hauteur du niveau d'eau : les têtes des pieux pouvaient être fixées soit à un grillage et à un platelage, soit à un caisson immergé.

Les fondations des ponts construits par Perronet et Gauthey étaient principalement constituées de pieux solidarités à un grillage et à un platelage en bois.

L'ensemble de ces méthodes est détaillé par la suite, ainsi que les ponts construits au cours de l'époque moderne.

1.5.2.1 Fondations sur pieux solidarités à un grillage et un platelage

Les méthodes de construction des fondations différaient en fonction de la hauteur du niveau d'eau : les têtes des pieux pouvaient être recépées à quelques centimètres ou à quelques mètres sous l'étiage.

Têtes des pieux recépées à quelques centimètres sous l'étiage

Les pieux en bois étaient battus puis recépés dans un même plan horizontal sous l'étiage. Des enrochements étaient déposés en fond de cours d'eau afin de prévenir d'éventuels affouillements de la fondation ou déversements des pieux s'ils étaient faiblement fichés (terrains compacts).

Dans un second temps, les traverses étaient fixées aux têtes des pieux (préalablement taillées en tenon) par l'intermédiaire de boulons (Figure 50).

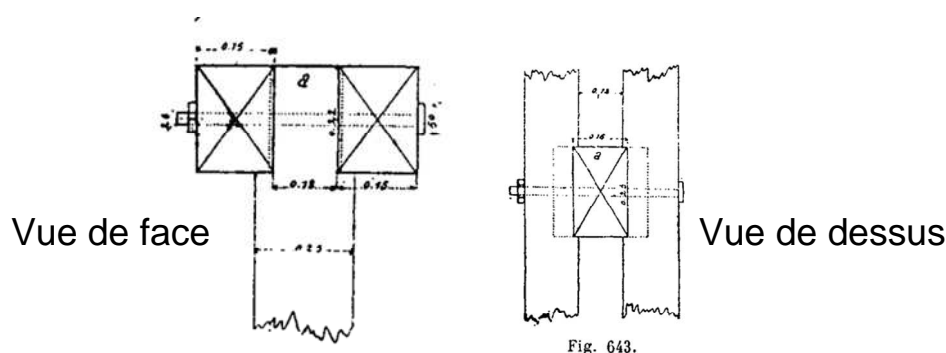


Figure 50. Fixation des traverses aux têtes des pieux taillées en tenon (modifié d'après Chaix, 1890)

Les longrines et les traverses étaient rendues solidaires avec un assemblage à mi-bois et constituaient le grillage. Le platelage en bois, composé de madriers, était posé et fixé au grillage à l'aide de broches (Levillain, 1980). Enfin, la maçonnerie était montée à sec, en

période d'étiage (Chaix, 1890) (Figure 51). Selon Levillain, (1980), les fondations de certaines piles du pont Wilson à Tours ont été construites selon cette méthode.

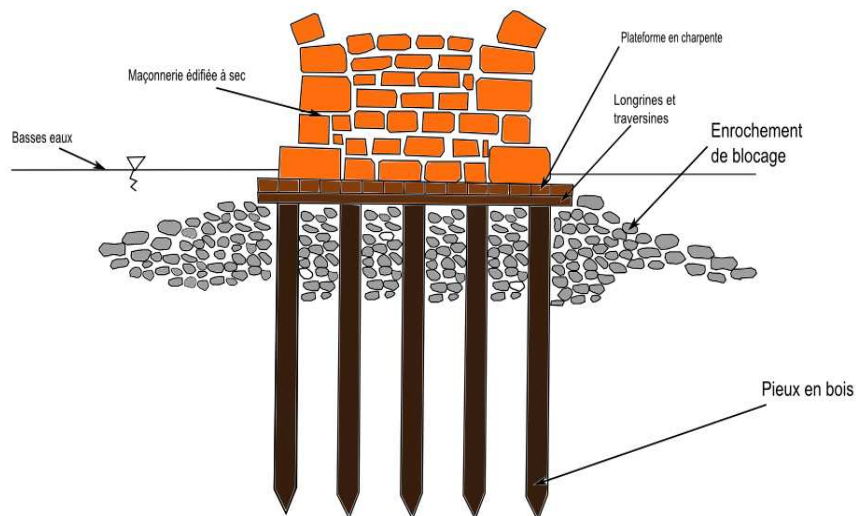


Figure 51. Fondation sur plateforme en charpente et pieux en bois recépés à quelques centimètres sous l'étiage (modifié d'après Levillain, 1980)

Têtes des pieux recépées à quelques mètres sous l'étiage (hauteur inférieure à 3m)

Une fois les pieux battus et leurs têtes recépées (Figure 52a) à quelques mètres sous l'étiage (hauteur d'eau inférieure à 3 m selon Levillain, (1980)), des batardeaux étanches constitués de palplanches en bois (Partie I, § 2.1.3) étaient mis en place autour du groupe de pieux. Après épuisement de l'enceinte, les traverses, les longrines et le platelage étaient assemblés à sec, selon le même mode opératoire que celui décrit ci-dessus (Figure 52b).

Les fondations des piles du pont de Pont Sainte-Maxence sur l'Oise ou du pont Georges V sur la Loire à Orléans ont été construites selon cette méthode (Tableau 24 en Annexe A).

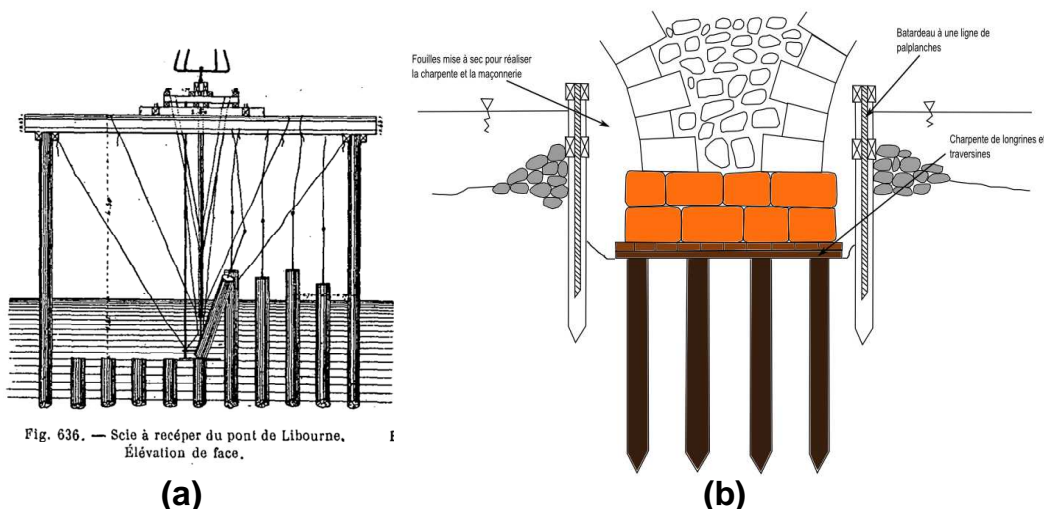


Fig. 636. — Scie à recéper du pont de Libourne. Élévation de face.

Figure 52. Recépage des pieux (a) et fondation sur pilotis recépés à 2 ou 3m sous l'étiage (b) (modifié d'après Chaix, 1890 ; Levillain, 1980)

1.5.2.2 Les méthodes de construction des fondations de Perronet

Jean-Rodolphe Perronet (1708-1794), ingénieur et architecte français, a dimensionné et supervisé la construction de onze ponts au cours du 18^{ème} siècle.

Dès lors que les ouvrages étaient construits en rivière, Perronet faisait édifier des batardeaux afin de construire les fondations à sec. Si les terrains étaient perméables, les épaissements étaient permanents.

Les batardeaux étaient constitués d'une double file de palplanches rendues étanches avec de la glaise au centre. L'intervalle entre les deux files pouvait atteindre 2 m. Une fois les batardeaux construits, les fonds de fouille étaient déchargés et descendus jusqu'à 2,5 m sous l'étiage. Cette étape permettait alors de maintenir les têtes des pieux en bois et le platelage constamment immergés en période de sécheresse. Le décaissement du terrain précédait le battage et le recépage des pieux. Le grillage, constitué de longrines et de traverses, était fixé aux têtes (Maillard, 2006). La maçonnerie était ensuite montée après comblement des interstices du grillage par des moellons (Figure 53).

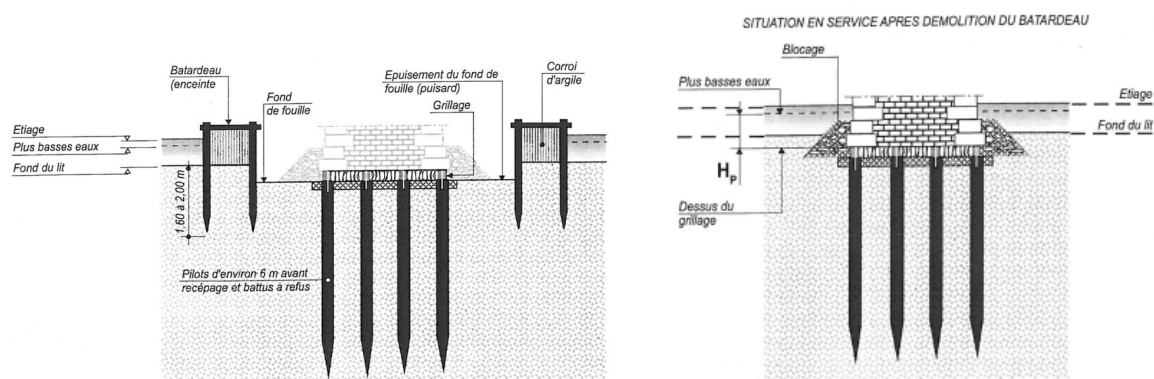


Figure 53. Principe de construction des fondations par Perronet (Maillard, 2006)

Par exemple, les fondations du pont de Neuilly à Paris sur la Seine (1768-1774) ont été édifiées selon cette méthode de construction (Figure 54).

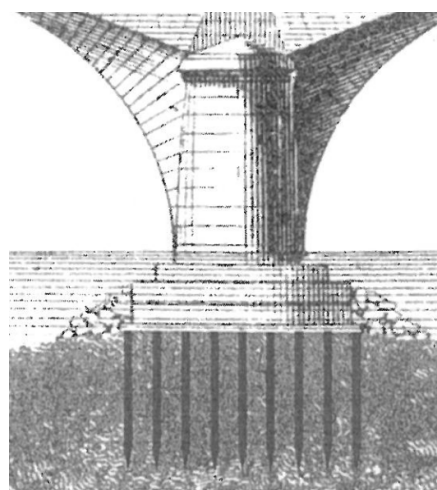


Figure 54. Fondation d'une pile du pont de Neuilly (Maillard, 2006)

Les caractéristiques des ponts construits par Perronet et fondés sur des pieux en bois sont détaillées dans le Tableau 22 en Annexe A.

1.5.2.3 Les méthodes de construction des fondations de Gauthey

Emiland Gauthey (1732-1806) a eu en charge la construction de treize ponts à la fin du 18^{ème} siècle, dont sept fondés sur des pieux en bois. Sa méthode de construction des fondations était la suivante :

- Des pieux en bois de 30 cm de diamètre, qualifiés de « soutien » car porteurs de la structure, étaient battus au refus (Maillard, 2006). Ces pieux, espacés en moyenne d'un mètre, étaient battus à l'aide d'une sonnette à tiraudes, puis rebattus avec une sonnette à déclic munie d'une masse frappante plus lourde (245 kg lors du battage, 490 kg lors du rebattage) ;
- Des pieux en bois, qualifiés de pilots de « remplage », étaient battus aux extrémités de la fondation et avaient pour principale fonction de combler les intervalles entre les pieux porteurs (Maillard, 2006). Ils présentaient un diamètre et une fiche plus faibles que ceux des pieux porteurs, respectivement de l'ordre de 20 cm et 1,6 m (Figure 55) ;

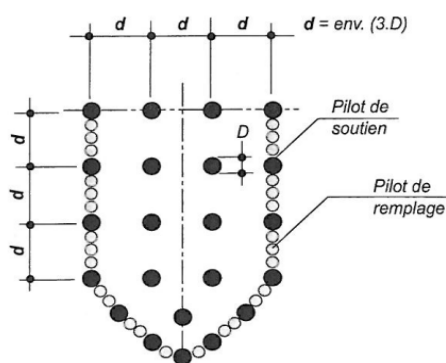


Figure 55. Disposition des pieux de soutien et de remplage (Maillard, 2006)

- Les pieux étaient recépés à 30 cm sous l'étiage et le grillage en bois fixé aux têtes. Cette hauteur, relativement faible, pouvait conduire à l'émersion des têtes des pieux à l'étiage durant les périodes de sécheresse ;
- Le sol était dragué sur 30 à 60 cm de hauteur. Un mortier (composé de chaux et de ciment durcissant au contact de l'eau) était coulé à l'intérieur de la fondation jusqu'à atteindre la base du grillage ;
- Des moellons étaient ensuite déposés dans les interstices du grillage, puis la maçonnerie montée à sec (Figure 56).

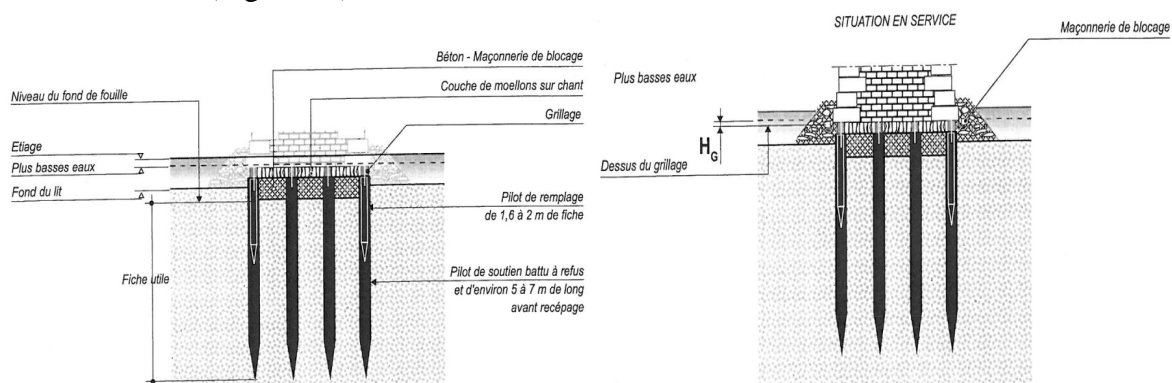


Figure 56. Principe de construction des fondations par Gauthey (Maillard, 2006)

Les caractéristiques des ponts construits par Gauthey et fondés sur des pieux en bois sont détaillées dans le Tableau 23 en Annexe A.

1.5.2.4 Fondations sur pieux sous-jacents à un caisson immergé

Les résurgences d'eau dans les terrains perméables rendaient les batardeaux inefficaces et contraignaient les bâtisseurs à mettre en œuvre d'autres méthodes de construction pour monter la maçonnerie à sec. La technique du caisson immergé a alors été développée.

Les pieux étaient battus dans le sol, recépés et les enrochements déposés au niveau du sol de fondation. Le caisson en charpente était rendu étanche avec de la terre glaise mise en place entre les joints des madriers (Chaix, 1890). Il était amené à la verticale des pieux (par l'intermédiaire de câbles), lesté avec des pierres de taille et posé sur les têtes des pieux. Le fond du caisson, constitué de longrines et de traverses, était ensuite fixé aux têtes. Une fois les pierres de taille au-dessus du niveau d'eau, les parois du caisson étaient enlevées (Figure 57).

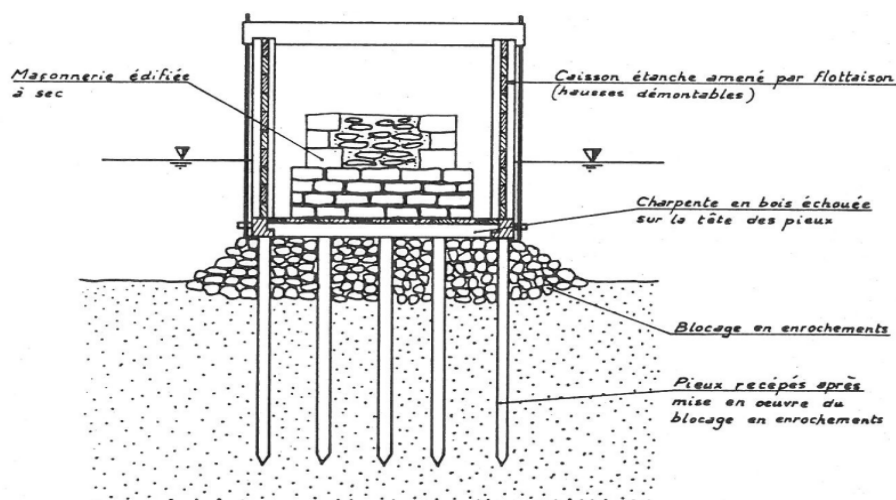


Figure 57. Principe du caisson immergé (Levillain, 1980)

La première utilisation du caisson immergé en France remonte à la construction du pont de Saumur sur la Loire en 1756. 116 pieux en chêne de 25 cm de diamètre et 6 m de longueur (Figure 58b) ont été battus au droit de chaque pile et recépés sous le niveau d'eau. Un caisson étanche a été lesté avec un lit de pierres et fixés aux têtes des pieux (Figure 58b).

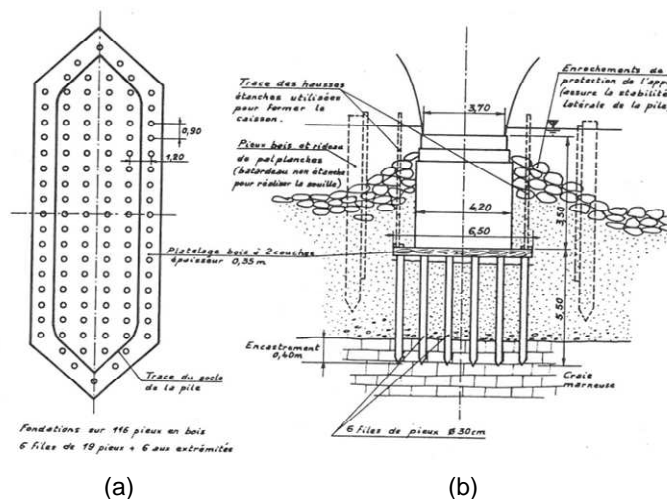


Figure 58. Fondations du pont de Saumur (Levillain, 1980)

1.5.3 Les ponts routiers construits au cours de l'époque moderne

Les caractéristiques des ponts fondés sur des pieux en bois et construits au cours de l'époque moderne (autres que ceux construits par Perronet et Gauthey) sont présentées dans le Tableau 24 en Annexe A.

La Figure 59 permet de les localiser sur le territoire français.

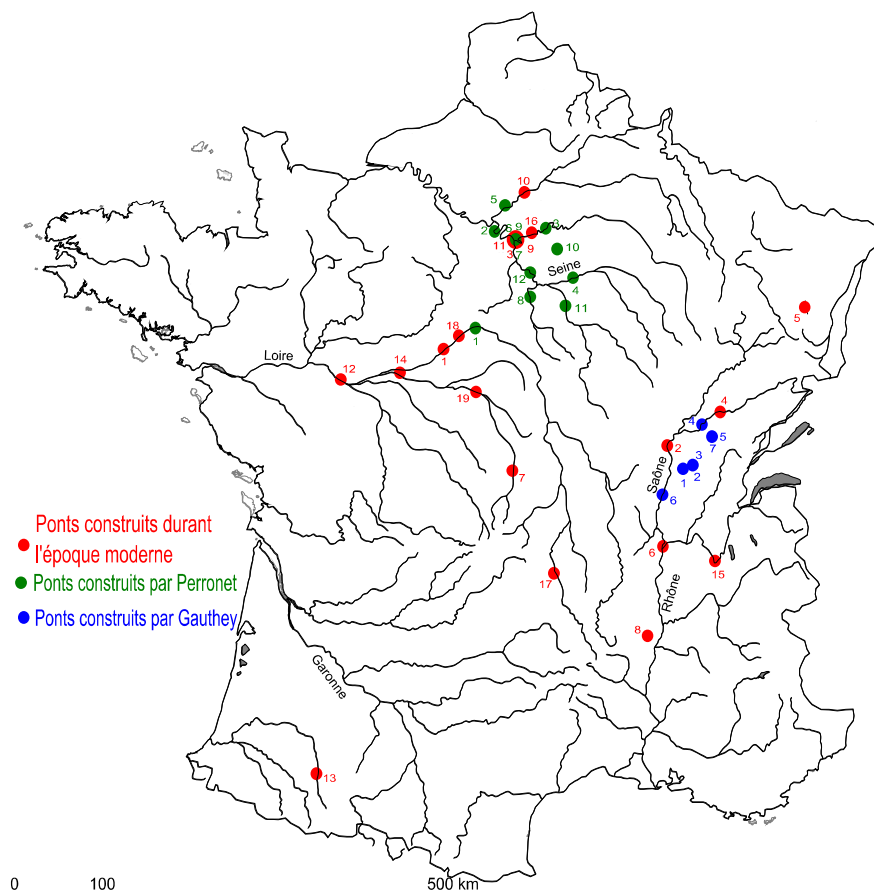


Figure 59. Localisation des ponts datés de l'époque moderne

Les ponts fondés sur des pieux en bois et construits par Perronet se situent sur la Seine et ses affluents, tandis que ceux construits par Gauthey sont localisés en Bresse Bourgogne, sur la Saône et ses affluents.

La Figure 59 montre que les ponts édifiés au cours de cette époque se situent principalement dans les bassins versants des fleuves de la Loire, de la Seine et du Rhône et de la Saône.

Parmi les 37 ponts identifiés, 48 % sont actuellement en service. Les causes à l'origine de la ruine des autres ponts sont multiples :

- Certains ont été détruits pendant les guerres, comme le Pont de Pont-Sainte-Maxence sur l'Oise (destruction au cours de la première guerre mondiale). Le pont de Trilport sur la Marne fut détruit en 1815 pour résister à l'invasion de la coalition européenne [12] ;
- Suite à la dégradation et à l'affouillement des pieux par creusement du lit de la Loire (Partie II, § 2.1), le pont Wilson à Tours s'est effondré en 1978 ;
- Le pont Saint Michel, édifié entre 1606 et 1618, a été volontairement détruit en 1857 puis reconstruit. Le pont au Change à Paris a été également détruit en 1850, puis reconstruit car il ne se trouvait plus dans la direction des grandes voies ouvertes ou projetées suite au prolongement du boulevard de Sébastopol et à l'agrandissement du Palais de Justice [12].

1.6 Les méthodes de construction des fondations à l'époque industrielle

L'emploi du béton dans les constructions s'est généralisé à partir du 19^{ème} siècle. Dès la fin du 18^{ème} siècle, Gauthey utilisait un mortier à prise rapide en complément de la maçonnerie de blocage mise en place entre les interstices du grillage (Degrand et Résal, 1888).

Le béton permettait d'obtenir une assise relativement plane au niveau des têtes des pieux, contrairement aux blocs de la maçonnerie de blocage dont les formes et tailles étaient disparates.

1.6.1 L'emploi du béton dans les fondations profondes

1.6.1.1 Fondations sur pieux - hauteur d'eau inférieure à 3 m

Si la hauteur du niveau d'eau était inférieure en moyenne à 3 m, un batardeau constitué de palplanches jointives était construit autour de la fondation. Des enrochements étaient mis en place à l'extérieur du batardeau et assuraient le rôle de contre butée une fois le béton coulé (Figure 60).

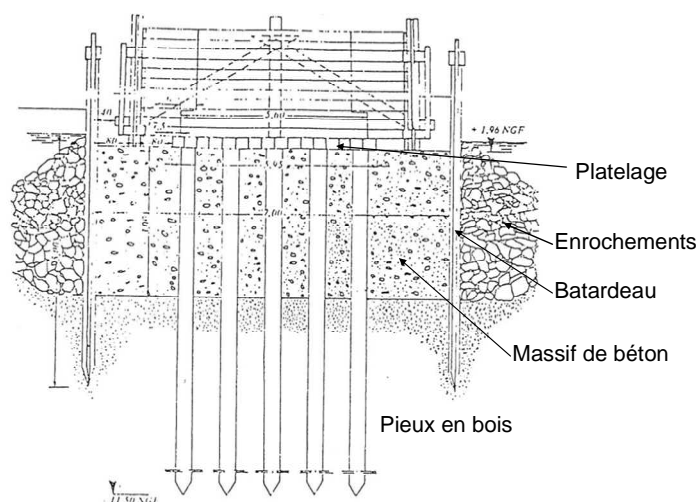


Figure 60. Coupe des fondations sur pieux enserrés dans un massif en béton immergé réalisées lors de la construction du pont de Thouare (modifié d'après [Levillain, 1980](#))

Le dragage de l'enceinte précédait le battage des pieux. Une fois battus, le béton était coulé à l'intérieur du batardeau et enserrait les têtes des pieux recépées.

Dans un second temps, un grillage était fixé aux têtes et ses interstices remplis avec du béton. Un platelage était ensuite posé sur le grillage puis la maçonnerie montée à sec ([Chaix, 1890](#) ; [Levillain, 1980](#)).

Le béton immergé a remplacé les enrochements à l'extérieur du batardeau dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle.

La Figure 61 présente une coupe des fondations du pont de Thouaré construit sur la Loire en 1879. Elles sont constituées de pieux enserrés dans un massif en béton immergé.

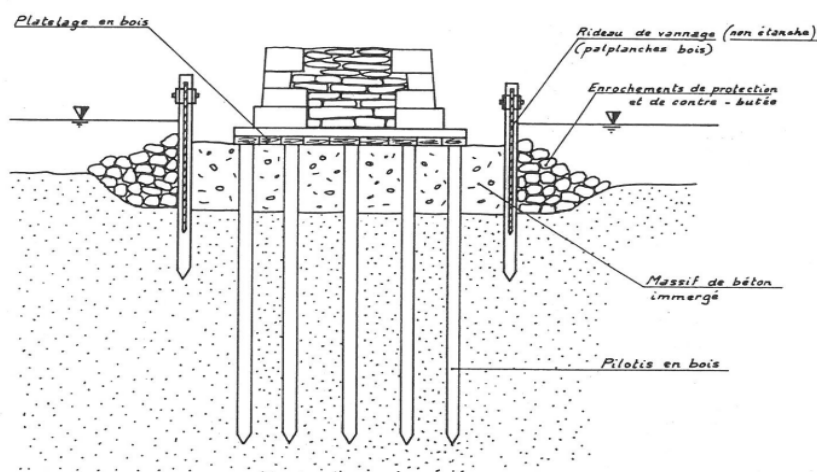


Figure 61. Fondations sur pieux enserrés dans un massif en béton immergé ([Levillain, 1980](#))

1.6.1.2 Fondations sur pieux - hauteur d'eau supérieure à 3 m

Technique du caisson immergé

Si la hauteur d'eau était supérieure en moyenne à 3 m, l'absence de batardeau ne permettait pas de couler le béton et de construire la maçonnerie à sec. Les fondations étaient donc établies de la manière suivante :

- Les pieux en bois étaient battus dans le sol et recépés. Des lignes de palplanches étaient mises en place à l'extrémité supérieure des files de pieux (Figure 62) ;
- Le béton immergé était coulé dans l'enceinte de palplanches et enserrait les têtes des pieux ;
- Un caisson immergé, dans lequel était déposée la maçonnerie, était lesté et posé sur les têtes. Un coulis de ciment pouvait être injecté à travers le caisson afin de combler les vides entre le caisson et le béton immergé (Levillain, 1980) ;
- La maçonnerie était ensuite montée.

La Figure 62 présente une coupe des fondations du pont de Belle-Croix construit sur la Loire en 1861. Les têtes des pieux ont été enserrées dans un massif en béton immergé sous-jacent à un caisson immergé.

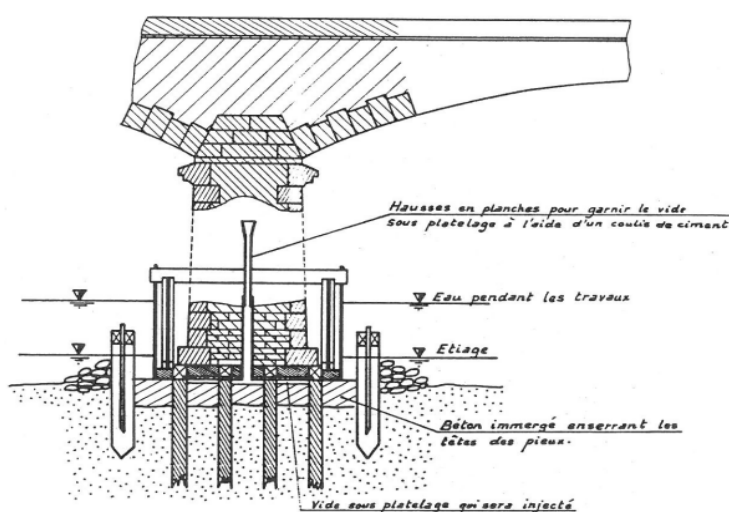


Figure 62. Coupe des fondations sur pieux enserrés dans un massif en béton immergé et emploi d'un caisson immergé - pont de Belle-Croix (Levillain, 1980)

Le premier emploi du caisson immergé reposant sur des têtes de pieux enserrées dans un massif en béton remonte à la construction du pont d'Iéna sur la Seine en 1806 (Degrand et Résal, 1888). Deux rangées de palplanches solidarisiées avec des traverses ont été battues au droit des piles et avaient pour objectifs de rompre le courant et de faciliter la prise du béton. Le béton immergé a été coulé entre les pieux et le caisson immergé contenant la maçonnerie. Une fois montée, les palplanches ont été remplacées par des enrochements (Degrand et Résal, 1888 ; Croizette-Desnoyers, 1885) (Figure 63).

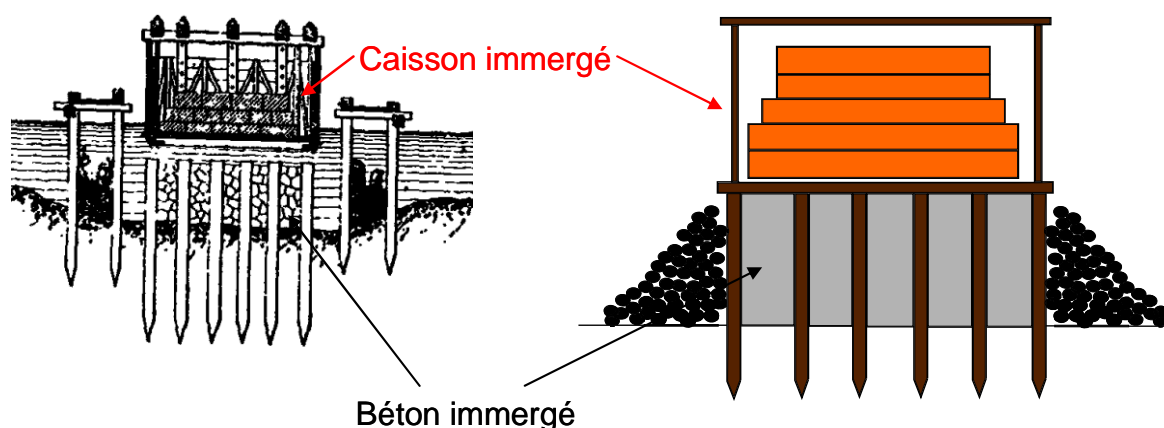


Figure 63. Coupe des fondations d'une pile du pont d'Iéna (modifié d'après Degrand et Résal, 1888)

Technique du caisson sans fond

L'autre méthode employée au 19^{ème} siècle pour établir des fondations sous une hauteur d'eau importante consistait à utiliser des caissons sans fond dans lesquels le béton était coulé. Ces caissons pouvaient être étanches, perméables, ou étanches en partie supérieure et perméables en partie inférieure.

- Selon Chaix, (1890), les caissons étanches étaient utilisés si du sable ou de la vase risquait de pénétrer à l'intérieur du caisson après dragage du sol de fondation ;
- Les caissons perméables étaient employés si les risques de pénétration du sable ou de la vase à l'intérieur des caissons étaient limités ;
- Enfin, les caissons étanches en partie supérieure et perméables en partie inférieure étaient utilisés lorsque le béton enserrant les têtes des pieux devait être élevé à un niveau bien inférieur à celui du cours d'eau. Le béton était coulé en partie inférieure du caisson jusqu'à atteindre la partie supérieure. L'eau dans le caisson était ensuite épuisée et la maçonnerie montée à sec (Chaix, 1890).

Les fondations du pont de la Morinière ont été construites en 1880 à l'aide de caissons étanches sans fond en acier (Figure 64). Les pieux ont été battus dans le sol et les caissons déposés sur le sol de fondation. Le béton a été coulé dans les caissons, le grillage fixé aux têtes des pieux et la maçonnerie montée (Levillain, 1980).

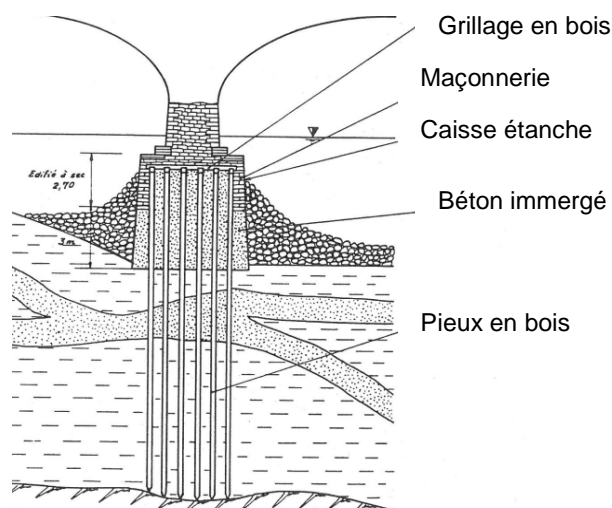


Figure 64. Fondations du pont de la Morinière (modifié d'après [Levillain, 1980](#))

1.6.2 L'abandon du platelage et grillage dans les fondations

Le platelage a été progressivement abandonné dans les constructions des fondations à partir du 19^{ème} siècle. Le béton était alors coulé dans les interstices du grillage et la maçonnerie montée par-dessus.

Par exemple, les fondations des piles du pont Rousseau construit sur la Loire à Nantes en 1840-1841 (Figure 65) sont constituées de pieux en bois dont les têtes sont enserrées dans le béton et fixées au grillage. La maçonnerie a été montée sur le grillage et le béton.

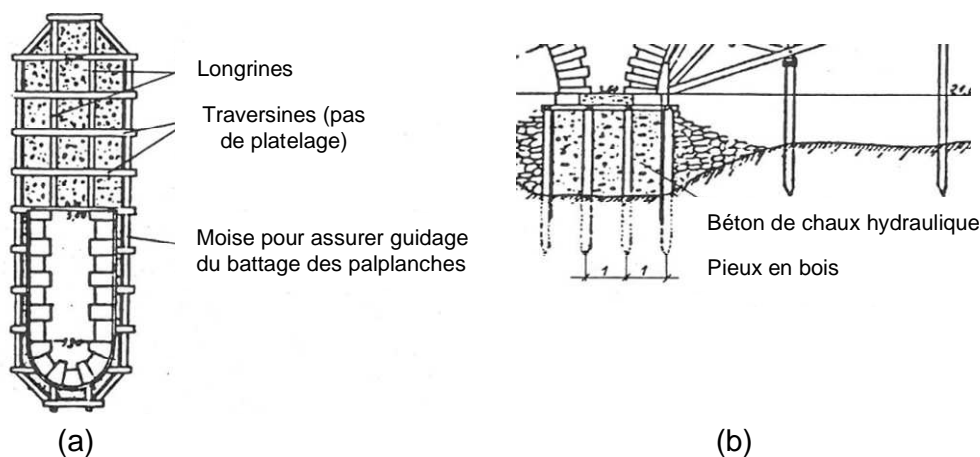


Figure 65. Vues de dessus (a) et de profil (b) des fondations du pont Rousseau construit sur la Loire (modifié d'après [Levillain, 1980](#))

L'abandon du platelage dans les fondations a précédé celui du grillage dont la fonction principale était de lier les têtes des pieux entre elles. Elles ont été par la suite noyées dans le massif en béton et la maçonnerie montée sur ce massif (Figure 66).

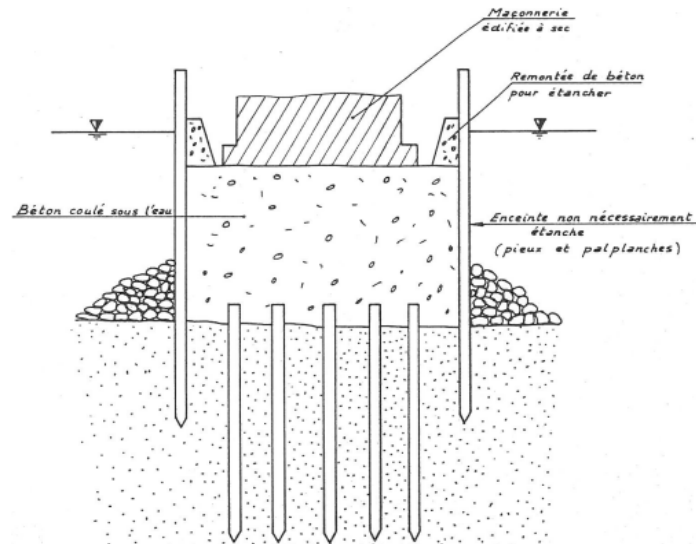


Figure 66. Fondation sur pieux et plate-forme en béton (Levillain, 1980)

La Figure 67 présente un schéma récapitulatif des différentes méthodes de construction des fondations sur des pieux en bois au 19^{ème} siècle.

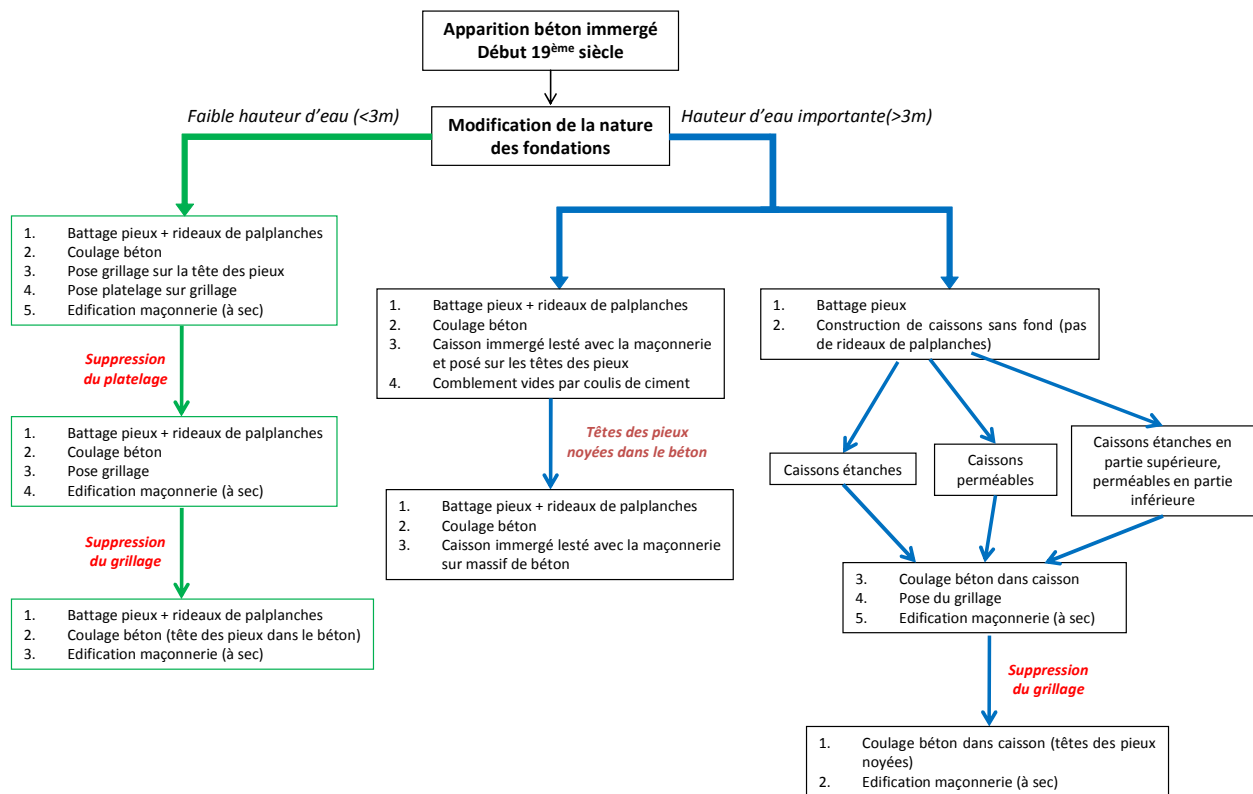


Figure 67. Schéma récapitulatif des méthodes de construction des fondations sur des pieux en bois mises en œuvre au cours de l'époque industrielle

1.6.3 Les ponts routiers construits au cours de l'époque industrielle

Les caractéristiques des ponts fondés sur des pieux en bois et construits au cours de l'époque industrielle sont présentées dans le Tableau 25 en Annexe A. La Figure 68 permet de les localiser sur le territoire français.

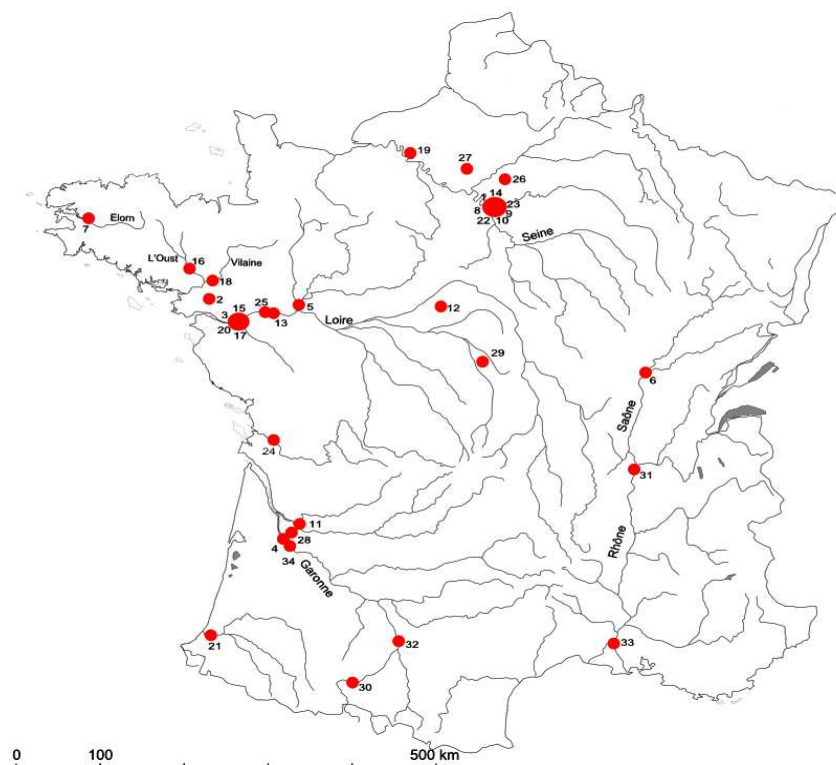


Figure 68. Localisation des ponts datés de l'époque de l'époque industrielle

La Figure 68 montre que les ponts construits sur des pieux en bois au cours de l'époque industrielle se situent principalement dans les bassins versants de la Loire et de la Seine. L'évolution des modes de transport fluvial et ferroviaire a contribué au développement et à la croissance des villes et nécessité la construction de nombreux ponts sur le territoire.

La majeure partie des ponts identifiés dans ce travail et datés de l'époque industrielle sont actuellement en service. Seuls 18 % d'entre eux ont été détruits. Les causes à l'origine de la ruine de ces ponts sont multiples : le pont de Belle-Croix à Nantes sur la Loire a été détruit lors d'un bombardement sur la ville en 1943, tandis que le pont Saint-Pierre construit en 1852 à Toulouse a été ruiné lors de la crue séculaire de la Garonne en 1875 [12].

Enfin, on rappelle que la liste des ponts présentée dans ce paragraphe est loin d'être exhaustive. Il existe d'autres ouvrages routiers fondés sur des pieux en bois, mais pour lesquels les documents d'archives sont inexistantes ou ont été détruits au cours des deux derniers siècles.

Si on étudie le tracé des voies de chemins de fer à la fin de cette époque, on peut penser qu'à l'exception de l'Auvergne et des zones montagneuses, la majorité des ouvrages ferroviaires ont été construits sur des pieux en bois.

1.6.4 L'abandon progressif des pieux en bois

L'étude des fondations des ouvrages construits au cours des époques antérieures a permis de montrer que la France possédait de nombreux ponts fondés sur des pieux en bois. Les plus récents sont datés de la fin du 19^{ème} siècle.

Les 19^{ème} et 20^{ème} siècles ont été marqués par un déclin progressif de l'emploi des pieux en bois dans les constructions et l'émergence de nouvelles technologies, principalement les pieux métalliques et les pieux en béton. Les origines et causes du déclin et de l'abandon de cette technologie de pieux sont multiples :

- L'invention des chaux hydrauliques industrielles intervenant dans la fabrication du béton immergé a facilité la mise en œuvre de ce matériau dans les constructions, dans la mesure où sa prise sous l'eau ne nécessitait plus de rendre étanches les batardeaux ;
- Les préjugés des constructeurs sur la résistance du bois par rapport à celle du béton ou de l'acier ont conduit à limiter l'emploi de ce matériau dans les constructions ;
- Les nouvelles technologies de pieux, comme les pieux vissés, ont progressivement remplacé les pieux en bois : la vitesse d'exécution et leur portance limite supérieure à celle des pieux en bois sont quelques raisons expliquant ce déclin ([Darche, 1986](#) ; [Chaix, 1890](#)).

Ce retour d'expérience n'a pas permis d'identifier des ponts routiers construits sur des pieux en bois au 20^{ème} siècle.

La Partie I, § 1.3.2.2 a néanmoins mis en évidence que de nombreux ouvrages portuaires et aménagements fluviaux datés de ce siècle reposent actuellement sur ce type de fondation. A titre d'exemple, l'écluse Saint-Félix à Nantes a été fondée sur des pieux en bois dans les années 1930. Suite à leur destruction au cours de la seconde guerre mondiale, les quais du Grand Port Maritime de Rouen ont été reconstruits sur des pieux en hêtre dans les années 1950. Plus récemment, en 2009, des pieux en bois ont été battus dans la baie de Saint-Malo dans le cadre de la protection des côtes.

1.7 Synthèse

Cette synthèse a pour objectifs de comparer les méthodes de construction des fondations sur des pieux en bois et le nombre de ponts construits au cours des différentes époques.

1.7.1 Les ponts français construits sur des pieux en bois

1.7.1.1 La construction des ponts à travers les siècles et les époques

L'étude des méthodes de construction des fondations des ouvrages présentées dans cette partie a permis d'identifier 125 ponts fondés sur des pieux en bois entre l'époque romaine et l'époque industrielle (Figure 69).

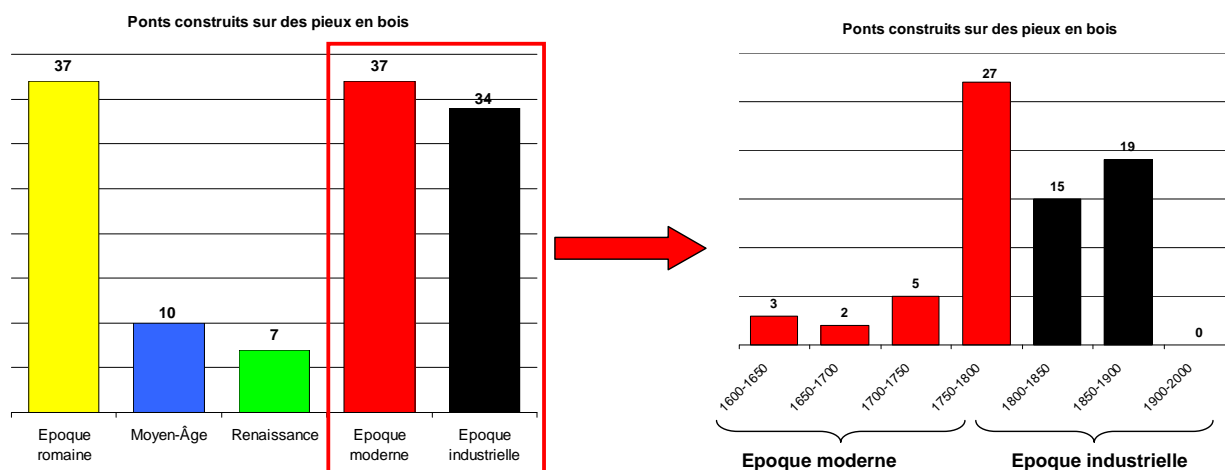


Figure 69. Nombre de ponts construits sur des pieux en bois par époque

85 % des ponts construits au cours de l'époque moderne sont datés de la deuxième moitié du 18^{ème} siècle, époque marquée par l'extension des réseaux routier et ferroviaire et pendant laquelle Perronet et Gauthey ont eu en charge la construction de 18 ponts fondés sur des pieux en bois (Tableau 22 et Tableau 23 en Annexe A).

Enfin, l'intégralité des ponts identifiés dans ce retour d'expérience et datés de l'époque industrielle a été édifiée au cours du 19^{ème} siècle.

1.7.1.2 Localisation géographique des ponts sur le territoire

La Figure 70 présente la localisation des ponts français fondés sur des pieux en bois et construits entre les époques du Moyen-Âge et industrielle. Les ponts romains, dont la plupart a disparu au cours des siècles précédents, ne sont pas pris en compte dans la suite de la synthèse.

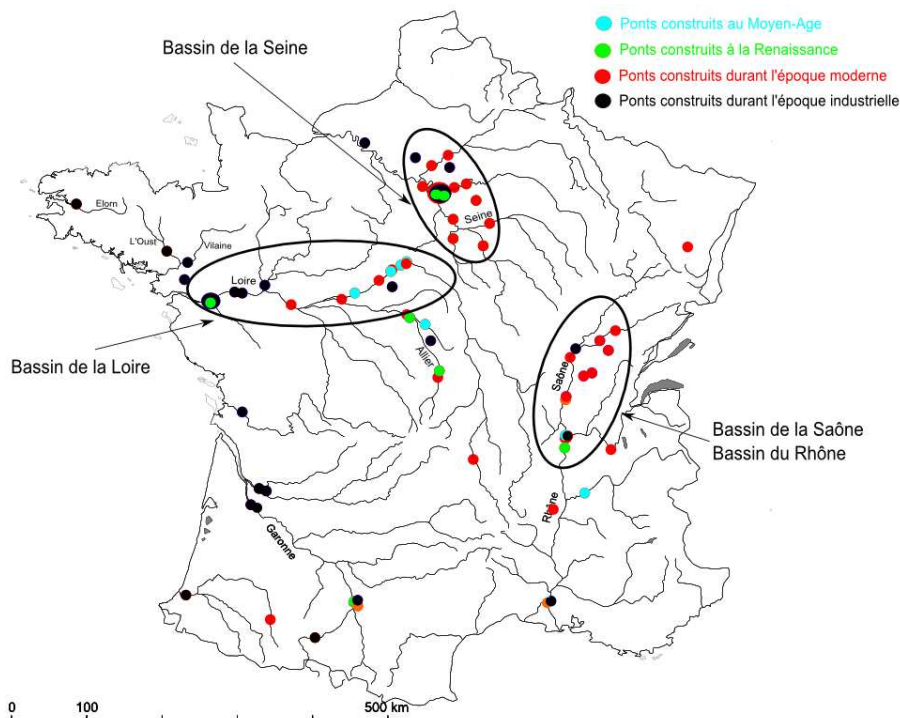


Figure 70. Ponts construits entre les époques du Moyen-Âge et industrielle

La Figure 70 montre que la majeure partie des ponts, indépendamment de leur époque de construction, se situe dans les bassins versants de la Seine, de la Loire, de la Saône et du Rhône. En effet, les fleuves représentaient des axes maritimes stratégiques (notamment durant l'époque napoléonienne au début du 19^{ème} siècle) et propices au développement des villes. D'autres ponts fondés sur des pieux en bois ont probablement été construits sur des rivières de plus faible importance mais accueillant dans leur lit des villes d'importance régionale comme par exemple Bayonne.

1.7.1.3 Les ponts français fondés sur des pieux en bois et en service

L'étude des fondations des ponts détaillées dans les précédents paragraphes a permis de mettre en évidence diverses causes à l'origine de la destruction des ouvrages fondés sur des pieux en bois. Elles sont reprises et détaillées dans la Partie II, § 2.

La Figure 71 présente le nombre de ponts actuellement en service en fonction de leur époque de construction.

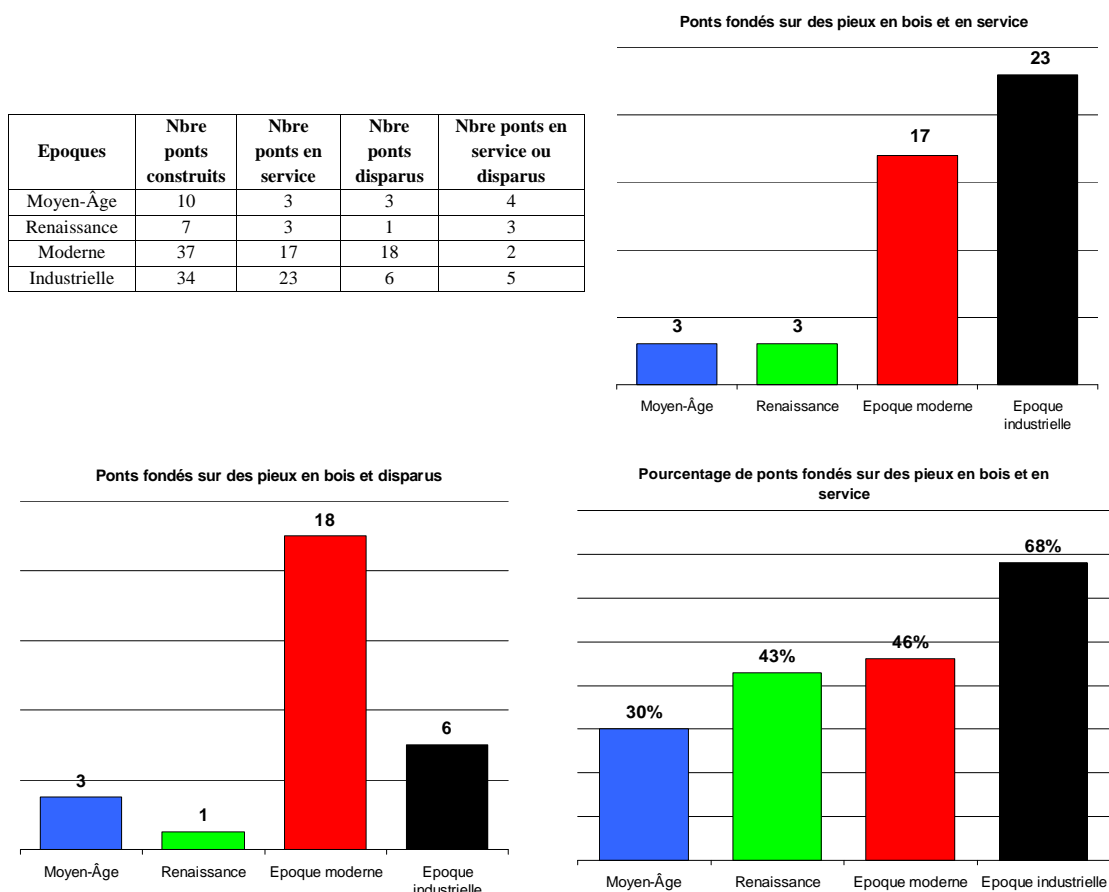


Figure 71. Nombre de ponts fondés sur des pieux en bois et actuellement en service

46 % des ponts construits au cours de l'époque moderne sont actuellement en service. 68 % des ponts datés de l'époque industrielle le sont également. Ce pourcentage élevé peut s'expliquer d'une part, par l'emploi du béton dans les fondations assurant un renfort de la structure et d'autre part, par des constructions relativement récentes (datées de moins de deux siècles).

30 et 43 % des ponts datés respectivement du Moyen-Âge et de la Renaissance sont en service. Néanmoins, ces pourcentages ont été établis à partir d'un nombre limité d'ouvrages (10 pour le Moyen-Âge, 7 pour la Renaissance).

Enfin, la Figure 72 présente la localisation géographique et l'état actuel des ponts fondés sur des pieux en bois sur le territoire français.

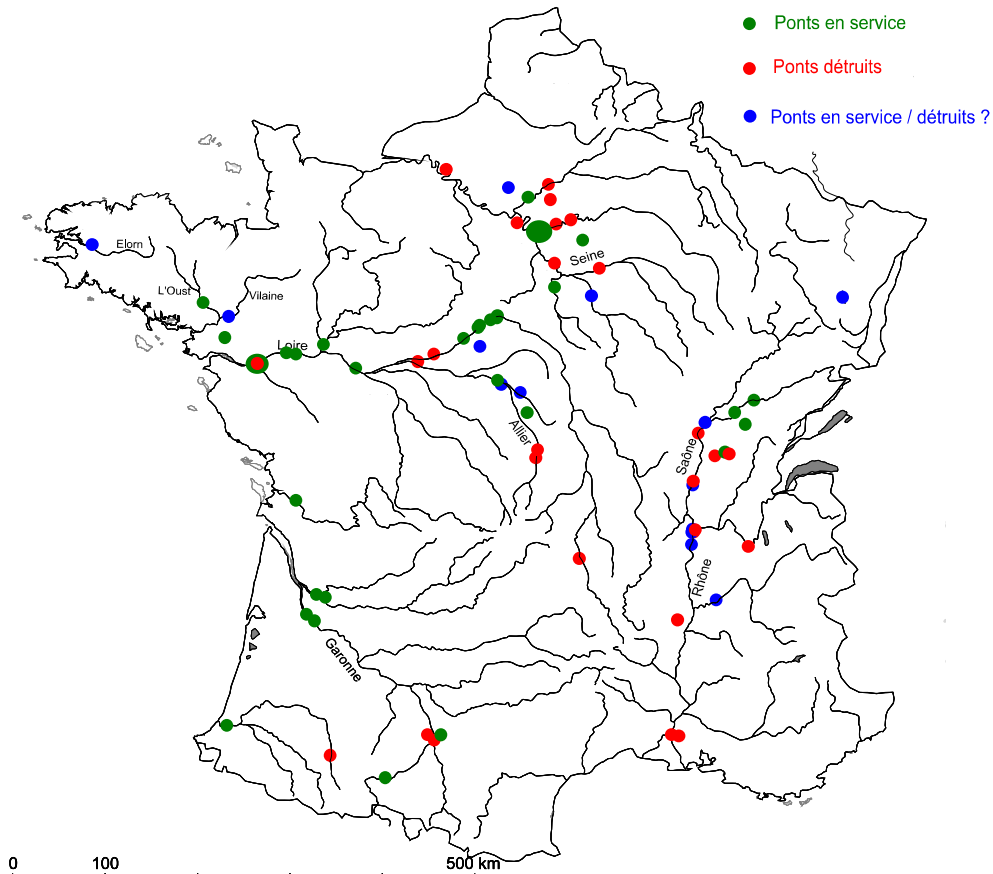


Figure 72. Localisation et état actuel des ponts fondés sur des pieux en bois sur le territoire

Il existe à ce jour de nombreux ponts bâtis sur des pieux en bois et localisés sur la Loire et ses affluents : 61 % des ponts identifiés dans le bassin versant de ce fleuve sont en service.

9 ponts (sur les 17 identifiés) sont situés dans le bassin versant de la Seine et 4 dans les bassins versants du Rhône et de la Saône.

Enfin, le manque d'information n'a pas permis de déterminer l'état actuel de 14 ponts routiers, ce qui représente 16 % de l'ensemble des ponts construits sur des pieux en bois identifiés dans cette étude.

1.7.2 Les fondations des ponts

1.7.2.1 Les types des fondations

L'étude des méthodes de construction des ponts présentées dans cette partie a également mis en évidence la diversité des types de fondations.

Les fondations des ouvrages édifiés au cours des époques moderne et industrielle sont pour la plupart connues. En revanche, l'absence d'écrits et de documents d'archives datés du Moyen-Âge et de la Renaissance n'a pas permis d'identifier les types de fondations de nombreux ouvrages construits au cours de ces deux époques.

La Figure 73 présente le nombre de ponts routiers fondés sur des pieux en bois en fonction des méthodes de construction de leurs fondations.

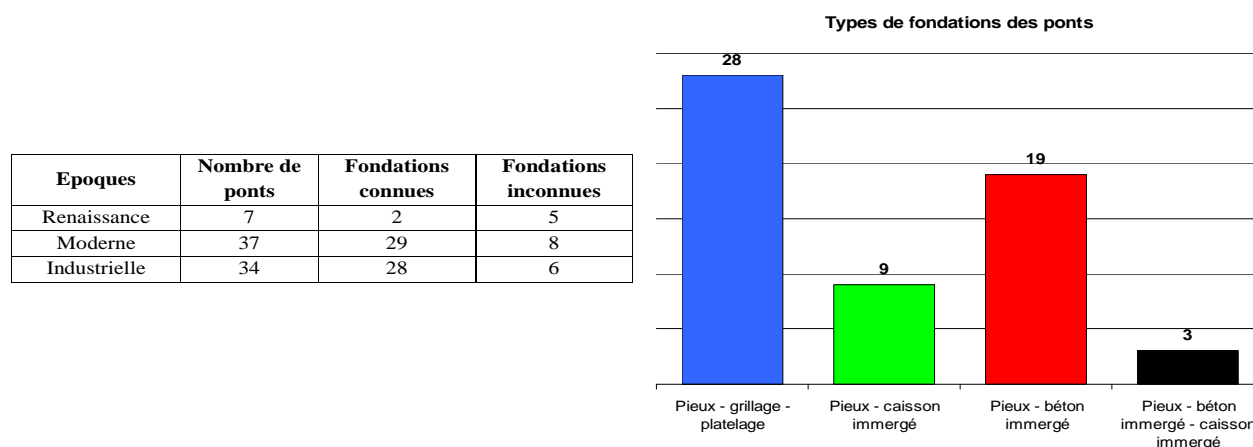


Figure 73. Nombre de ponts en fonction des méthodes de construction des fondations

La Figure 73 montre que :

- 47 % des ponts routiers identifiés dans ce travail reposent sur des pieux en bois solidarisés à un grillage et à un platelage ;
- 53 % des ponts construits sur des pieux en bois fixés à un grillage et à un platelage ou à un caisson immergé sont actuellement en service ;
- 54 % des ouvrages dont les fondations sont constituées de pieux en bois et de béton immergé sont en service.

1.7.2.2 Les caractéristiques géométriques des pieux en bois

Les longueurs et les diamètres des pieux en bois battus sur les chantiers ont été identifiés à partir des données publiées dans la littérature et contenues dans les mémoires des constructeurs (Figure 74).

Epoques	Nombre de ponts	Ponts avec longueurs des pieux connues	Ponts avec diamètres des pieux connus
Moyen-Âge	8	5	5
Renaissance	6	1	0
Moderne	37	17	13
Industrielle	34	17	12

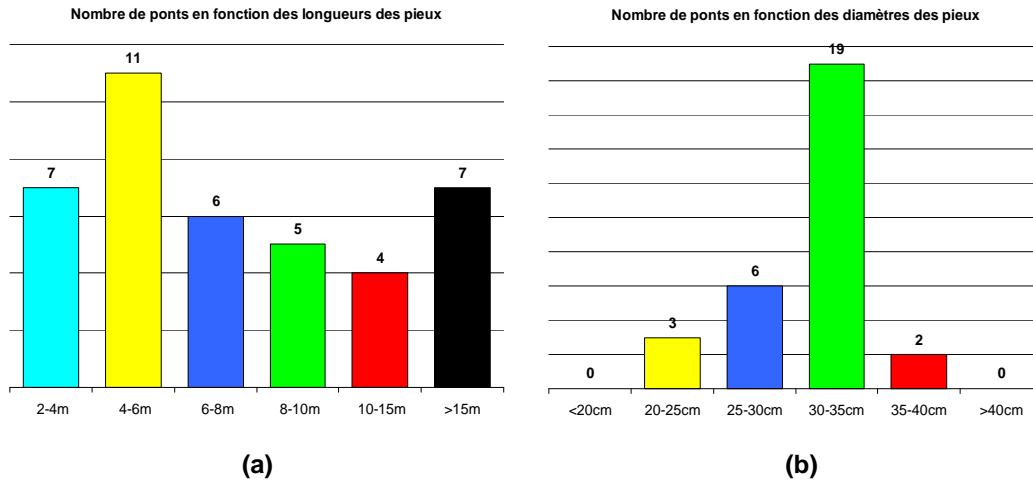


Figure 74. Nombre de ponts en fonction des longueurs (a) et des diamètres des pieux (b)

La Figure 74a montre que 83 % des ponts ont été construits sur des pieux en bois de longueurs comprises entre 2 et 15 m.

63 % des pieux battus ont un diamètre compris entre 30 et 35 cm (Figure 74b).

2 Désordres et renforcement des fondations des ouvrages

2.1 Les désordres relevés sur les ouvrages

2.1.1 Désordres des ponts situés dans les bassins de la Loire et de la Garonne

La Partie II, § 1 a permis d'établir que de nombreux ouvrages fondés sur des pieux en bois avaient été détruits puis reconstruits au cours des siècles passés.

Un des faits marquants du 20^{ème} siècle a été l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978. Suite à cet effondrement, le ministère de l'Équipement de l'époque a lancé une campagne de reconnaissance et d'inspection des ouvrages situés sur la Loire et ses affluents. Elle avait pour objectifs de relever les désordres sur ces ouvrages et d'identifier leurs origines, puis de réaliser les travaux de confortement nécessaires pour assurer leur pérennité. Les documents d'archives des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées relatifs à ces investigations ont permis d'établir les désordres (avec leurs origines) relevés sur ces ouvrages.

Le Tableau 18 présente les désordres relevés sur huit ponts construits sur des pieux en bois et situés sur la Loire et ses affluents ainsi que sur quatre autres ponts construits sur la Garonne, la Dordogne et le Gave de Pau.

Tableau 18. Caractéristiques et désordres des ponts dans les bassins versants de la Loire et de la Garonne

Nom Construction	Ville Cours d'eau	Longueur (m) Largeur (m) Nbre piles	Nbre pieux / pile Long pieux (m) Diam pieux (cm) Espacement pieux (m) Essence	Géologie du terrain	Désordres	Origine des désordres
Pont de Beaugency (18 ^{ème} siècle)	Beaugency Loire	460 10 27	120 3 20 à 30 0,9 ?	Alluvions sablo-graveleuses	Dégradation de la maçonnerie, de la tête des pieux Joints altérés	Affouillements des piles causés par des pieux extérieurs non jointifs
				Calcaire dur	Mauvais état des piles et des voûtes.	Absence d'un rideau continu de pieux favorisant les circulations des filets d'eau et le lessivage des enrochements noyés dans la matrice argileuse. Erosions des alluvions sous-jacentes
Pont Wilson (18 ^{ème} siècle)	Tours Loire	436,6 15 14	122 7,8 27 1,2 Chêne	Alluvions sablo-graveleuse	Vides de 15 cm retrouvés sous le platelage d'une des piles (rôle minime dans l'effondrement)	Glissement et abaissement des talus d'enrochements, enlèvement du sable situé sous le grillage provoqués par l'affouillement
				Substratum de calcaire gréseux contenant du sable (tuffeau turonien)	Instabilité latérale des pieux dégarnis sur une certaine profondeur sous le platelage Approfondissement du lit de la rivière et augmentation de la vitesse de l'eau	Abaissement général du niveau de la Loire provoqué par une extraction intensive de matériaux et par l'arasement d'îles afin de faciliter l'écoulement des eaux
Pont Georges 5 (18 ^{ème} siècle)	Orléans Loire	325 23 8	202 2,6 à 18,5 30 1 Chêne	Alluvions	Tassement d'une des piles en 1758 lors de la construction de voûtes Mauvaise qualité et dégradation du blocage situé entre le sol de fondation et le platelage	Développement d'affouillements
				Calcaire tendre à très tendre avec des niveaux discontinus de calcaire induré	Erosion par circulation d'eau	Erosion par circulations d'eau du toit des sols de fondation
Pont de Thouare (19 ^{ème} siècle)	Thouare Loire	212±392 ? 12	41 18 30 ou 40*40 ? Sapin	Alluvions sableuses	Disparition locale du rideau de vannage et du béton cyclopéen	Augmentation importante des vitesses du courant et formation de fosses d'érosion causées par une réduction du débouché superficiel due à la protection des piles et des massifs d'enrochements
				Argile		
				Sable grossier Substratum micaschiste	Disparition progressive des enrochements	Extraction de granulats et déroctages de certains seuils rocheux entraînant l'affouillement des piles
Pont de Saumur (18 ^{ème} siècle)	Saumur Loire	277 ? 11	116 6 25 ? Chêne	Alluvions (sables de Loire)	Affaissement de la pile n°5 en 1968, en quelques heures (24 cm en aval et de 32 cm à l'amont), puis poursuite du mouvement pendant les cinq semaines suivantes pour atteindre 32 cm à l'aval et 35 cm à l'amont	Affouillement de la pile n°5 (avec création de vides sous le platelage)
				Craie marneuse du Turonien	Vides sous le platelage de la pile n°5	
				Marne grise compacte	Rupture du platelage à la périphérie de la pile et cassure de certains pieux	
Pont sur l'Arnon (18 ^{ème} siècle)	Saint-Hilaire de Court Arnon	76 13 4	44 3,5 30 0,9 ?	Alluvions sablo-graveleuses lâches à très lâches	Mauvais état des parois avec la friabilité de béton de chaux Dégarnissage des têtes des pieux	Manque de protection efficace contre les affouillements entraînant une détérioration des mortiers et des pierres des sousassements
				Argile tendre et marnes grisâtres très raides	Faibles caractéristiques mécaniques de la maçonnerie Altération ou rupture du platelage sur l'une des piles	

Nom Construction	Ville Cours d'eau	Longueur (m) Largeur (m) Nbre piles	Nbre pieux / pile Long pieux (m) Diam pieux cm) Espacement pieux (m)	Géologie du terrain	Désordres	Origine des désordres
Saint-Florent-sur-Cher (19 ^{ème} siècle)	Saint-Florent-sur-Cher	120 ?	26 ?	Cailloux et blocs avec du sable argilo graveleux	Maçonnerie de mauvaise qualité	Approfondissement du lit, affouillement et dégarnissage du lit
	Cher	6	30 ?	Calcaire dur	Joints en béton de chaux friables et même parfois délavés	Manque de protection efficace contre les affouillements
					Altération du platelage et de la tête des pieux	
Pont Saint-Nicolas (13 ^{ème} siècle)	Saint-Hilaire Loiret	128 7,80-8,50 7	21-43 ? ? ?	Matériau alluvionnaire à dominante sableuse	Affaissement des appuis	Conditions hydrauliques défavorables. Massif calcaire est le siège d'importantes circulations d'eau qui provoquent une dissolution et une érosion mécanique de calcaire
				Massif de calcaire hétérogène	Affouillement localisé sous la maçonnerie	
						Erosion du sol support
Pont de pierre (19 ^{ème} siècle)	Bordeaux Garonne	487 14,8 16	250 8 à 10 25 à 30 0,85 à 0,9 Pin	Vase et argile molle	En 1995, effondrement du talus au voisinage de la pile 7, avec dégarnissage de la première rangée de pieux sur toute la hauteur et sur le tiers de la face aval du massif de fondations	Les faibles caractéristiques mécaniques de l'argile et de la vase sont à l'origine du tassement des piles n°1 à 5. La dégradation partielle des pieux en bois et les vides observés sous la plateforme ont participé à l'aggravation du phénomène.
				Sables et graviers		
					Marnes calcaires de raides à très dures	Tassement des piles 1 à 6
Pont Eiffel (19 ^{ème} siècle)	Cubzac-les-ponts Dordogne		632 15 30 0,85 ?	Remblai Alluvions (argile limoneuse, sol organique argilo-limoneux et sols grenus (sables et Marne avec faciès marneux, argileux et sableux)	Tassement de la pile culée rive droite l'été, stabilisation l'hiver	Mauvaises caractéristiques mécaniques du sol responsables des tassements
					Dislocation de la maçonnerie	
Pont de Nay (19 ^{ème} siècle)	Nay	110 12,6	? ?	Sable	Vides sous le platelage (poche d'air atteignant 30cm de hauteur)	Vitesse d'érosion élevée à la suite de plusieurs crues d'hiver et de printemps
	Gave de Pau	5	27*27 0,9 à 1,2 ?	Argile	En 1971, mise à nu de la partie supérieure des pieux jusqu'au platelage	Développement d'affouillements
Pont de Libourne (19 ^{ème} siècle)	Libourne Dordogne	178 16 8	180 ? ? 0,9 ?	Argile molle noirâtre ou vase	En 1968, nombreuses fissures et fractures sur le fût des pieux	Désordres liés au mouvement des fondations (tassement ou affouillement)
				Sables et graviers	Vide relatif lié aux enrochements dans lequel des circulations d'eau ont pu être mises en évidence	
				Substratum marno-calcaire		

Le Tableau 18 montre que les désordres relevés sur les ouvrages fondés sur des pieux en bois sont multiples. En site aquatique, ils sont soumis, selon le [Ministère des Transports, \(1980\)](#), à deux types d'actions des eaux qui peuvent s'exercer sur l'ensemble de l'ouvrage ou localement. Ils sont détaillés dans la Partie II, § 2.1.2 et § 2.1.3.

2.1.2 Action du cours d'eau sur l'ensemble de l'ouvrage

En 1979, le [Ministère des Transports, \(1980\)](#) de l'époque a estimé que 5200000 tonnes de matériaux avaient été prélevés annuellement dans la Loire alors que l'approvisionnement naturel en sédiments était négligeable et que les seuils existants (enlevés au fur et à mesure des années) étaient faibles. Cette extraction intensive des matériaux a entraîné le creusement du fond du lit du cours d'eau et par la suite un dégarnissage de la tête des pieux en bois sous les fondations. La modification du profil peut également conduire à un exhaussement du fond. Ces deux phénomènes ont été observés sous les fondations du pont de Saint-Hilaire-de-Court situé sur un affluent de la Loire (l'Arnon) (Tableau 18).

L'affouillement général des fondations peut se produire en période de crue lorsque la vitesse élevée du courant lessive l'ensemble des particules en fond de cours d'eau. Le déchaussement et le dégarnissage d'une partie des pieux de fondation dans le terrain entraînent alors une diminution de la portance limite des pieux (Figure 75).

Le dégarnissage des pieux a été la principale cause responsable de l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978 (Tableau 18). L'abaissement général du niveau de la Loire a résulté de l'extraction intensive de matériaux et de l'arasement d'îles pour faciliter l'écoulement des

eaux. Cette extraction intensive a conduit à un approfondissement du lit du fleuve et à une augmentation de la vitesse de l'eau. Elle a également entraîné une modification de la granulométrie et une diminution de la densité des alluvions qui sont devenues plus mobiles. Les talus d'enrochements déposés au droit des piles ont progressivement glissé et le sable situé sous le grillage a été lessivé. L'effondrement des piles a résulté de l'instabilité latérale des pieux dégarnis sur une certaine hauteur sous le platelage (Gounon, 1981).

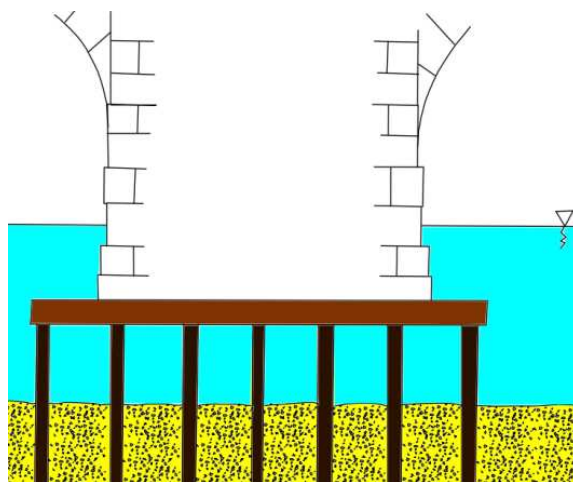


Figure 75. Phénomène d'affouillement général observé sous les piles du pont Wilson à Tours (modifié d'après Grattesat, 1980)

2.1.3 Actions du cours d'eau localisée au voisinage de l'ouvrage

L'action localisée au voisinage de l'ouvrage se traduit principalement par le phénomène d'affouillement local, différent de l'affouillement général. Il résulte de mouvements tourbillonnaires des eaux au niveau des piles du pont et consiste en la formation d'entonnoirs à la base des piles (Figure 76).

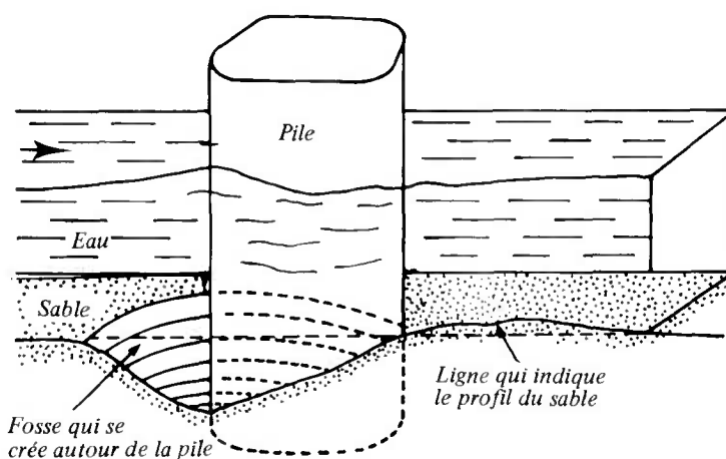


Figure 76. Affouillement local d'une pile dans le sol (Ministère des Transports, 1980)

L'affouillement local entraîne un dégarnissage partiel des têtes des pieux. L'ouvrage est alors fragilisé, mais sa ruine n'est pas systématique. A titre d'exemple, ce type d'affouillement a été

découvert sous les fondations du pont Georges V construit sur la Loire ou du pont Saint Nicolas édifié sur le Loiret au 13^{ème} siècle (Tableau 18).

2.1.4 Origines des désordres observés sur les ouvrages fondés sur pieux bois

Selon le [Ministère des Transports, \(1980\)](#), les désordres observés sur les ouvrages peuvent résulter de :

- la désorganisation des massifs d'enrochement qui s'affaissent suite à l'affouillement du lit du cours d'eau en pied de talus. Des vides liés à l'affaissement des enrochements au niveau des fondations du pont de Libourne ont entraîné la formation de circulations d'eau (Tableau 18) ;
- la détérioration des batardeaux et des rideaux de protection suite à leur dégradation fongique ou par des insectes (Partie I, § 1.5.1). Ainsi, le rideau de vannage du pont de Thouaré (Tableau 18) sur la Loire a localement disparu ;
- la formation de cavité et le dégarnissage des pieux (détaillés dans la Partie II, § 2.1.2 et § 2.1.3). Par exemple, des vides de 30 cm de hauteur entre les pieux et le platelage ont été découverts sous les fondations du pont de Nay sur le Gave de Pau (Tableau 18). Ce dégarnissage entraîne une diminution de leur portance limite et de leur résistance aux efforts latéraux ;
- la dissolution de la chaux des mortiers par l'eau douce. Ce phénomène a été observé sous les fondations du pont de Beaugency et du pont de Saint-Florent-sur-Cher où des joints en béton de chaux étaient friables, voire même délavés (Tableau 18) ;
- la dégradation du grillage, du platelage et des pieux de fondation qui fragilise la structure de l'ouvrage.

Il existe également d'autres causes de désordres, principalement liées aux insuffisances d'origines, aux faits de guerre, aux aléas naturels et à l'absence d'entretien :

- Les portances limites des pieux évaluées à partir des formules de battage peuvent être surestimées. Cette surestimation conduit alors à des tassements importants des ouvrages. Par exemple, la pile culée du pont Eiffel à Cubzac-les-Ponts située en rive droite a tassé de plus d'un mètre entre 1839 et 1990 (Tableau 18) ;
- L'absence d'entretien et la mauvaise qualité des matériaux constitutifs des piles ont conduit à la dégradation et la dislocation de la maçonnerie. Le pont de Saint-Florent-sur-Cher et le pont de Beaugency en sont deux exemples ;
- Les faits de guerre ont également été responsables de la ruine de nombreux ouvrages. Le pont de Pont Sainte-Maxence sur l'Oise, détruit au cours de la première guerre mondiale et le pont de Trilport sur la Marne, détruit en 1815, en sont quelques exemples. Suite au développement des villes, certains ponts ont été volontairement détruits afin d'être élargis ou déplacés, puis reconstruits ;
- Enfin, les aléas naturels, comme les embâcles survenus au cours des siècles derniers ont été à l'origine de nombreuses destructions de ponts, qu'ils soient ou non fondés sur des pieux en bois. En 1789, l'embâcle de la Loire a conduit à la ruine de quatre arches du pont de Tours situées à proximité de la rive droite.

2.2 Méthodes de renforcement des fondations des ouvrages sur pieux bois

Les désordres relevés sur les ouvrages construits sur des pieux en bois nécessitent divers travaux de renforcement des fondations. Ces travaux consistent principalement en la reprise en sous œuvre du massif de fondation par micropieux ou par injection de coulis (Tableau 26 en Annexe B) :

- La reprise en sous-œuvre des fondations par micropieux est effectuée dès lors qu'un défaut de portance est avéré. Il se traduit généralement par le tassement (ou même le déversement) des piles ou des culées. L'augmentation des charges de trafic sur l'ouvrage en est généralement la principale cause.

En 1995, l'effondrement du talus au voisinage d'une des piles du pont de pierre à Bordeaux a entraîné un dégarnissage de la première rangée de pieux sur toute leur hauteur et sur le tiers de la face aval du massif de fondation. Les tassements des piles du pont ont été stabilisés en exécutant des travaux de reprise en sous-œuvre par micropieux. Cette méthode a été adoptée dans la mesure où elle permettait de minimiser les perturbations au niveau de la structure existante. Le nombre de micropieux a été limité à 16 par piles (deux files de huit micropieux). Chaque micropieu reprenait une charge de 1,5 MN et possédait une longueur d'encastrement de 9 m dans les marnes calcaires. Une protection partielle de l'ouvrage contre les affouillements a également été mise en place en reconstituant un talus entre le massif en maçonnerie et le fond de la fosse, profilé avec des enrochements et un matelas de gabions (Bustamante et al., 1999).

Les tassements du pont Eiffel sur la Dordogne ont été également stabilisés en renforçant l'assise de la culée par des micropieux ;

- La reprise du massif de fondation par injection est réalisée lorsque des vides se forment entre le sol et les éléments en bois de la fondation. Par exemple, les piles du pont de Beaugency ont été perforées à partir du tablier. Les vides situés sous le platelage ont été comblés par injection quasi-gravitaire d'un mortier. Des enrochements avaient été préalablement coffrés avec du béton coulé (Figure 77) (Waschkowski, 1979).

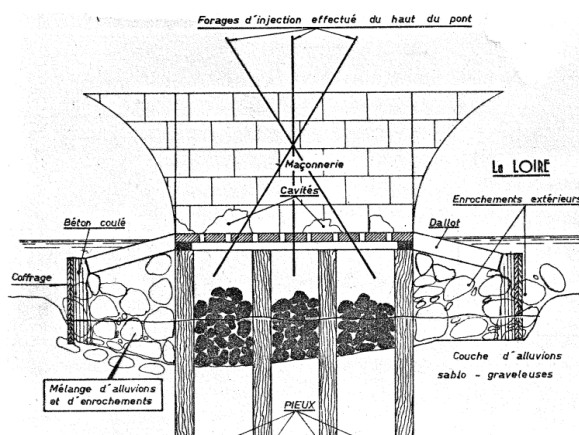


Figure 77. Perforation d'une pile du pont de Beaugency à partir du tablier pour remplissage des cavités (Waschkowski, 1979)

Cette méthode de renforcement a été également mise en œuvre pour combler les vides entre le platelage et les têtes des pieux sous les piles du pont de Saumur, ou entre les alluvions et la maçonnerie des piles du pont de l'Arnon (Tableau 26 en Annexe B).

Enfin, une partie du platelage des fondations des piles du pont Georges V sur la Loire, détruite au cours de la seconde guerre mondiale, a été remplacée par une semelle en béton armé. Du coulis de béton a été injecté au niveau des pieux en bois affouillés afin de combler les vides et de solidariser les têtes des pieux à la maçonnerie.

Le coût élevé des méthodes de renforcement des fondations (installation de chantier, reconnaissance par plongée subaquatique, perforation de la maçonnerie, instrumentation et suivi des mesures à long terme) ont conduit certains maîtres d'ouvrage à remplacer les pieux en bois par des pieux en béton. Ainsi, au cours des dernières années, lors de la reconstruction des barrages fluviaux sur l'Yonne, les pieux en bois de fondation ont été substitués à des pieux en béton. Le Grand Port Maritime de Rouen a également remplacé les pieux en hêtre présentant un état de dégradation avancé et situés sous les quais (Partie I, § 1.3.2.2) par des pieux en béton.

Conclusion

La filière bois française, malgré un fort potentiel d'exploitation forestière, est peu valorisée. L'emploi des pieux en bois dans les constructions d'ouvrages d'art et de bâtiments a disparu en France au cours du 19^{ème} siècle et a été remplacé par d'autres technologies de pieux. L'absence d'un cadre réglementaire français relatif aux pieux en bois, ainsi que le scepticisme et les préjugés des acteurs de la construction sur les propriétés de résistance du bois justifient l'absence de ce type de pieux dans la pratique actuelle en France.

Le bois présente néanmoins de forts atouts environnementaux par rapport aux autres matériaux de construction comme le béton et l'acier. Le stockage du dioxyde de carbone et la réduction des émissions carbone établie à partir de la base carbone de l'ADEME en attestent. Dans la société actuelle où le concept de développement durable est ancré au cœur des actions de l'Etat, les pieux en bois constituent une solution alternative aux pieux en béton et en acier. L'emploi des pieux en bois nécessite néanmoins quelques précautions : la durabilité du matériau bois présentée dans la première partie a permis de mettre en évidence que le bois non traité pouvait être soumis à des dégradations fongiques endogènes aux zones de marnage. La pérennité des pieux en bois est assurée dès lors qu'ils sont intégralement et constamment immergés.

Les dimensions des pieux en bois étaient limitées par celles des arbres. Les dispositifs d'enture des pieux permettaient néanmoins d'augmenter leur longueur. Leur géométrie variait également en fonction de leur usage : les pieux de fondation étaient circulaires, tandis que les pieux employés dans les constructions des batardeaux étaient équarris.

Les pieux en bois étaient fichés dans le sol à l'aide de machines de battage. L'énergie de la masse frappante était transmise au pieu par l'intermédiaire d'une onde de choc se propageant dans le fût du pieu. Le pieu était protégé en tête et en pointe par des armatures métalliques afin de limiter les risques de fissuration ou de fracturation.

Aux Pays-Bas, la protection de la tête des pieux avec un dé en béton, renforcé par la suite par des armatures métalliques, fait également office de connexion entre les fondations et la partie supérieure de l'ouvrage.

L'étude des méthodes de construction des fondations sur pieux bois des ouvrages d'art routiers en France a permis de montrer qu'elles avaient évolué au cours des siècles :

- De nombreux ponts fondés sur des pieux en bois ont été datés de l'époque romaine. L'époque du Moyen-Âge a été marquée par une disparition progressive des savoirs et des méthodes de construction acquis pendant près de sept siècles ;
- Les méthodes de construction des fondations à l'époque de la Renaissance étaient principalement empiriques ;
- Les traités rédigés à l'époque moderne ont défini des critères relatifs au choix des types de fondations (profondes ou superficielles) en fonction de la nature des terrains. A cette époque, les fondations profondes étaient principalement constituées de pieux en bois, sous-jacents à un grillage et à un platelage. Les caissons immergés étaient également utilisés lorsque la hauteur d'eau était importante ;

- Enfin, les premières utilisations du béton dans les fondations sont datées de l'époque industrielle. Le grillage, puis le platelage ont été successivement remplacés par ce matériau. Cette époque a également été marquée par un déclin progressif de l'emploi des pieux en bois et l'émergence de nouveaux types de pieux, principalement les pieux métalliques et les pieux en béton.

Cet état de l'art, qui s'est intéressé uniquement au patrimoine routier, a permis d'identifier une centaine de ponts construits sur des pieux en bois entre le Moyen-Âge et l'époque industrielle. Ces ponts sont principalement situés dans les bassins versants des fleuves. Peu d'ouvrages antérieurs à l'époque moderne sont parvenus jusqu'à nous. 47 ouvrages routiers bâtis sur des pieux en bois sont actuellement en service, 27 ont été détruits. Le manque d'information n'a pas permis d'identifier l'état actuel de 14 ponts routiers.

Les causes à l'origine de la destruction de ces ponts sont multiples : embâcles, faits de guerre, affouillement des fondations, etc.

La liste des ouvrages étudiés est loin d'être exhaustive. Il en existe probablement des dizaines supplémentaires sur le territoire, mais le manque d'information, la multiplicité des gestionnaires et l'absence de base de données nationale n'ont pas permis de les identifier.

Les désordres observés sur les ponts fondés sur des pieux en bois résultent, d'une part, de la modification et de l'évolution du profil en long des cours d'eau suite au creusement intensif de leur fond et d'autre part des phénomènes d'affouillement général ou localisé des fondations.

La désorganisation des massifs d'enrochements, la détérioration du platelage et le dégarnissage des pieux sont les principales pathologies observées sur ce type d'ouvrages.

Les méthodes de renforcement des fondations sur pieux bois consistent en la reprise du massif de fondation par injection, principalement mise en œuvre pour combler les vides sous les fondations, ou bien en la reprise des fondations en sous-œuvre par micropieux afin de limiter les tassements suite à un défaut de portance.

Références bibliographiques et sitographiques

Almeida G., (2006), Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées, Thèse, Université Laval, Québec, 216 p

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

Armstrong R.M., (1979), Structural properties of timber piles, ASTM special technical publication, No. 670, pp. 118-139

ASTM D 25, (1991), Standard Specification for Round Timber Piles, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D 2899, (1995), Standard Practice for Establishing Design Stresses for Round Timber Piles, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D 2555, (1998), Standard Test Method for Establishing Clear Wood Strength Values, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

Barbe C., Keller R., (1996), Les rayons ligneux et le matériau bois, Revue Forestière Française, Vol. 8, No. 1, pp. 63-68

Bellidor, (1765), La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile, dédiée au Roy, Ed. Pierre Gosse Junior, 642 p

Blanchet R., Garneau R., Tavenas F., (1980), Behaviour of friction piles in soft sensitive clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 2, pp. 203-224

Bustamante M., Gianceselli L., Ledoux J-L., (1999), Appraisal of the foundations and underpinning of a Napoleonian masonry bridge, Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings VI, pp. 779-788

Chaix J., (1890), Traité des ponts, ponts en maçonnerie et tunnels, Tome II, 843 p

Charron S., Jourez B., Marchal M., Hébert J., (2003), Etude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*Larix Kaempferi* (Lambert) Carr.) et de leur hybride (*Larix x eurolips* Henry), Journal of Biotechnology, Agronomy, Society and Environment, Vol. 7, No. 1, pp. 5-16

Centre Technique du Bois et de l'Ammeublement, (2007), Bois massifs structuraux, 5 p

Chui Y.H., (1991), Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters, *Wood Sciences Technology*, Vol. 25, pp. 125-13

Croizette-Desnoyers P., (1885), *Cours de construction des ponts*, Vol. 1, Ed. Dunod, pp. 296-321

Darche O., (1986), *Les ponts de Paris*, Projet de Fin d'études, ENPC, pp. 1-15

Davidian Z., (1969), *Pieux et fondations sur pieux*, Ed. Eyrolles, pp. 15-32

De la Cruz Sanchez C.M., (2006), *Mesure des constantes élastiques du bois d'épinette noire dans des conditions d'équilibre du séchage à basse température*, Thèse, Université de Laval, Québec

Dean M., (2006), *Timber Piles : A brief Overview*, *Pile Driver*, pp. 12-20

Degrad E., Résal J., (1888), *Ponts en maçonnerie*, *Encyclopédie des travaux publics*, Vol. 2, Paris, 666 p

De Leeuw E., (1985), *Foundations of Structures*, *The Netherlands Commemorative Volume*, *Comptes rendus du 11ème Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, San Francisco, pp. 130-134

Dewar J., Watson M., (2007), *Development of UK Grown Timber for Industrial Applications*, BRE, 17 p

DFP-Foundation-Product., (1993), *Timber Piles points*, 2 p

Dinckal C., (2011), *Analysis of Elastic Anisotropy of Wood Material for Engineering Applications*, *Journal of Innovative Research in Engineering and Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 67-80

Dinh A-T., (2011), *Comportement élastique linéaire et non linéaire du bois en relation avec sa structure*, Thèse, AgroParisTech, Nancy, 162 p

Dinwoodie J.M., (2004), *Timber : Its nature and behaviour*, BRE, Ed. Taylor and Francis e-Library, Second Edition, 270 p

Dumont A., (2010), *Que nous apprennent les vestiges des (très) vieux ponts de Loire ?* *Géosciences*, No. 12, pp. 34-41

Dumont A., (2011), *Comment Rome a franchi les rivières ? Gués, ponts en bois et ponts mixtes*, *Bibracte*, No. 21, pp. 49-60

Dupraz P-A., Mooser M., Pflug D., (2009), Dimensionnement des structures en bois – aide au calcul basé sur la SIA 265 « Construction en bois », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 245 p

El Naggar M.H., Wei J.Q., (1999), Axial capacity of tapered piles established from model tests, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, pp 1185-1194

Forest Products Laboratory, (2010), Wood handbook—Wood as an engineering material, General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p

Forêt Cellulose Bois-construction Ammeublement, (2011), Perspectives de valorisation de la ressource de bois d'œuvre feuillus en France, 83 p

Gayarre F.L, Gonzalez-Nicieza C., Alvarez-Fernandez M.I., Alvarez-Vigil A.E., (2009), Forensic analysis of a pile foundation failure, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, pp. 486-497

Gounon J., (1981), Archives et réalités, Colloque international sur la gestion des ouvrages d'art – Surveillance, entretiens et réparations des ponts routiers et ferroviaires, Vol. 2, pp. 649-657

Graham P.E, James S., (1996), Design of Timber Foundation Piling for Highway Bridges and Other Structures, National conference on wood transportation structures, pp. 301-312

Grattesat G., (1980), Causes et enseignements de l'effondrement partiel du pont Wilson, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No. 109, pp. 57-68

Guitard D., (1987), Mécanique du matériau bois et composites, Ed. Cépaduès, Toulouse, 238 p

Guyon M., (2000), Les fondations des ponts en France, Sabots métalliques des pieux de fondation, de l'Antiquité à l'époque moderne, Ed. monique Mergoil, 253 p

Hussein M., Rausche F., (1991), Determination of driving induced pile damage, Fondations profondes, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 455-462

Institut National de l'Information Géographique et Forestière, (2012), La forêt en chiffres et en cartes, 32 p

Janbu N., (1952), Une analyse énergétique du battage des pieux à l'aide de paramètres sans dimension, Annales de l'Institut Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, 6^{ème} année, No. 63-64, pp. 352-360

Katzenbach R., Ramm H., (2006), Reuse of historical foundations, Reuse of Foundations for Urban Sites : proceedings of International Conference, Watford, UK, pp. 395-403

Khokhar A.M., (2011), The evaluation of shear properties of timber beams using torsion test method, Thèse, Université d'Edimbourg, 178 p

Kollmann F., Côté W., (1968), Principles of wood science and technology, Vol. 1, Solid wood. Ed. Springer-Verlag, New York

Kruta V., (2000), Les Celtes. Histoire et dictionnaire, des origines à la romanisation et au christianisme, Paris, Ed. Laffont, Coll. « Bouquins », 1005 p

Leonards G. A., (1968), Les fondations, Ed. Dunod, pp. 774-777

Levillain J-P., (1980), Fondations courantes des ouvrages d'Art Anciens, Fondaconcept, 54 p

Maillard J-C., (2006), Les fondations sur pilots de bois des ponts d'Emiland Gauthey en Bresse Bourgogne, 119 p

Meaden M., Williams J., Simm J., Allègre P., Igigabel M., (2012), Les essences de bois alternatives pour la construction maritime et fluviale, Programme de Recherche et Développement sur les Risques d'Inondation et d'Érosion Côtière, 25 p

Mesqui J., (1986), Le pont en France avant le temps des ingénieurs, Ed. Picard, 303 p

Ministère des Transports, Direction Générale des Transports Intérieurs, (1980), Fondations de ponts en site aquatique en état précaire, Guide pour la surveillance et le confortement, 167 p

Moutee M., (2006), Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage, Thèse, Université de Laval, Québec

Nanninga N., (1953), The problem of pile driving, Comptes rendus du 3ème Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Suisse, Vol. 2, pp 71-74

Natterer J., Sandoz J-L., Rey M., (2004), Construction en bois – Matériau, technologie et dimensionnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2^{ème} Edition, Vol. 13, 541 p

Navi P., Heger F., (2005), Comportement thermo-hydromécanique du bois – Applications technologiques et dans les structures, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1^{ère} Edition, 298 p

Norme NF B 51-004, (1985), AFNOR, Bois - Détermination de l'humidité, 3 p

- Norme NF EN 338, (2009), AFNOR, Bois de structure - Classes de résistance, 14 p
- Norme NF EN 335-2, (2007), AFNOR, Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois, partie 2 : application au bois massif, 16 p
- Norme NF EN 350-2, (1994), AFNOR, Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Partie 2 : guide de la durabilité naturelle du bois et de l'imprégnabilité d'essences de bois choisies pour leur importance en Europe, 42 p
- Olsson A., Källsner B., (2012), Evaluation of shear modulus of structural timber utilizing dynamic excitation and FE analysis, Internantional Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures, 13 p
- Paik K., Lee J., Kim D., (2009), Axial response and bearing capacity of tapered piles in sandy soil, Geotechnical Testing Journal, Vol. 34, No. 2, pp. 1-9
- Reiffsteck P., (2009), Cours Fondations des ouvrages, 80 p
- Reynolds T., Bates P., (2009), The potential for timber piling in the UK, Ground Engineering, pp. 31-34
- Spencer N., (2009), Koppers Timber Piling Guide, Koppers, 80 p
- Stichting_Platform_Fundering_Nederland., (2007), Funderingsherstelmethode, 15 p
- Stichting_Platform_Fundering_Nederland, (2005), Paalrot door lekke drainerende riolen, 5 p
- Tavenas F.A., (1971), Load Tests Results on Friction piles in Sand, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 7-22
- Terzaghi K., (1916), Procédés généraux de construction, Comité National Turc de la Mécanique des Sols et des Fondations, pp. 152-163
- Tomlinson M.J., (1969), Foundation design and construction, Ed. Pitman
- Van Impe W.F., (2004), Two decades of full scale research on screw piles
- Waschkowski E., (1979), Note technique sur le confortement du pont sur la Loire, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Laboratoire Régional de Blois, 20 p.

- [1] : MAAF, <http://agriculture.gouv.fr/panorama>, consulté en avril 2013
- [2] : INRA, <http://www.lille.inra.fr>, consulté en avril 2013
- [3] : ONF, <http://www.onf.fr>, consulté en avril 2013
- [4] : FAO, <http://www.fao.org>, consulté en avril 2013
- [5] : MOBOA, <http://www.moboa.fr/les-bois-de-structure.htm>, consulté en avril 2013
- [6] : MEDDEE, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bois,13394.html>, consulté en avril 2013
- [7] : ADEME, <http://www.basecarbone.fr>, consulté en avril 2013
- [8] : GULF COAST PILING, <http://www.gulfcoastpiling.com/wood-pilings.htm>, consulté en avril 2013
- [9] : AU PAYS DE L'OURS, <http://locavac-luchon-cure-ski.over-blog.com/article-l-ecole-d-autrefois-souvenez-vous-64392512.html>, consulté en avril 2013
- [10] : CIRAD, <http://www.cirad.fr/en>, consulté en mai 2013
- [11] : MINISTERE DE LA CULTURE, <http://www.culture.gouv.fr/culture/arcnat/chalain/fr/index2.html>, consulté en mai 2013
- [12] : <http://www.art-et-histoire.com/>, consulté en mai 2013

Annexes

Annexe A : Caractéristiques des fondations en bois des ponts routiers

Tableau 19. Caractéristiques des ponts datés de l'époque romaine

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Datation	Caractéristiques
1	Pont de Saint-Martin-de-la-Place	Saint-Martin-de-la-Place	Loire	30-40 ap JC (datation dendrochronologique)	
2	Pont de Candès-Saint-Martin	Candès-Saint-Martin	Loire	14 av JC (datation dendrochronologique)	Pont à travées simples. Conservation de l'aubier sur les pieux.
3	Pont de Fondettes	Fondettes	Loire	Fin 1 ^{er} siècle - Début 2 ^{ème} siècle ap JC (datation dendrochronologique)	Piles probablement constituées de caissons en madriers de bois horizontaux assemblés et maintenus en place par des pieux verticaux. Mise en place de pierres non taillées entre les têtes des pieux.
4	Pont de Tours, île Saint-Jacques	Tours	Loire	Vers 80 ap JC De 114 à 120 ap JC (datation dendrochronologique)	Piles reposant sur 3 rangées de pieux en amont et en aval.
5	Pont de Tours, île Aucard	Tours	Loire	335-540 ap JC	
6	Pont de Blois	Blois	Loire	145 ap JC (datation dendrochronologique)	
7	Pont de Boulleret/Cosne-Cours-sur-Loire	Boulleret/Cosne-Cours-sur-Loire	Loire	1 av JC - 33 ap JC 60 - 72 ap JC 154 - 175 ap JC (datation dendrochronologique)	Piles reposant sur 3 rangées de pieux en amont et en aval.
8	Pont de bois de Saint-Satur	Saint-Satur	Loire	110 - 120 ap JC (datation dendrochronologique)	Piles reposant sur 3 rangées de pieux en amont et en aval. Piles espacées d'une distance comprise entre 16 et 23 m. Largeur du tablier égale à 9 m
9	Pont mixte de Saint-Satur	Saint-Satur	Loire	160 - 170 ap JC (datation dendrochronologique)	Piles munies d'un avant- bec triangulaire.
10	Pont de Chassenard	Chassenard	Loire	Milieu 1 ^{er} siècle av JC - Début 3 ^{ème} siècle ap JC (datation dendrochronologique)	Piles en caissons de bois remplis de blocs de pierre et de remblai.
11	Pont ? et aménagement de berge d'Avrilly	Avrilly	Loire	53 av JC	
12	Pont de Varennes-sur-Allier	Varennes-sur-Allier	Allier	227 ap JC (datation dendrochronologique)	
13	Pont de Vichy	Vichy	Allier	180 - 220 ap JC	
14	Pont d'Amiens	Amiens	Somme	10 av JC - 80 ap JC (datation dendrochronologique)	3 ponts construits : un premier vers -10 av JC, un deuxième vers 50 ap JC et un troisième vers 80 ap JC.
15	Pont de Melun	Pont Leclerc	Seine	1 ^{er} siècle av JC - 2 ^{ème} siècle ap JC	
16	Pont sur l'Yonne	Bonnard-Bassou	Yonne	140 - 156 ap JC (datation dendrochronologique)	
17	Pont de Visseiche	Visseiche	Seiche	Milieu du 1 ^{er} siècle av JC (datation dendrochronologique)	
18	Pont de Rannée	Rannée	Ardenne	Début 1 ^{er} siècle ap JC (datation dendrochronologique)	

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Datation	Caractéristiques
19	Pont de Naintré	Naintré	Clain	105 - 130 ap JC	
20	Pont de Sainte-Soline	Sainte-Soline	Dive	Tout début de notre ère (datation dendrochronologique)	
21	Pont de la Gourgue	Gourgue	Lac de Sanguinet	35 av JC (datation dendrochronologique)	
22	Pont du Bazacle	Bazacle	Garonne	1 ^{er} siècle ap JC	Pointe des pieux protégées avec des sabots métalliques.
23	Pont d'Etival	Etival	Meurthe	56 av JC - 6 ap JC (datation dendrochronologique)	
24	Pont de Benfeld	Benfeld	Ill	185 ap JC (datation dendrochronologique)	
25	Pont de Brognard	Brognard	Allain	62 ap JC - 203 ap JC (datation dendrochronologique)	Une première construction entre 62 et 78 ap. JC, réparée jusqu'en 117. Une deuxième construction entre 118 et 135, réparée à partir de 143 ap. JC durant 60 ans. Piles constituées de deux à trois rangées de pieux.
26	Pont de Pontoux	Pontoux	Doubs	Fin 2 ^{ème} siècle ap JC - Début 5 ^{ème} siècle ap JC	Piles probablement constituées de caissons en madriers de bois horizontaux assemblés et maintenus en place par des pieux verticaux. Mise en place de pierres non taillées entre les têtes des pieux.
27	Pont de la Guyotte	Guyotte	Guyotte	110-120 ap JC (datation dendrochronologique)	
28	Pont de Chalons-sur-Saône	Chalons-sur-Saône	Saône	1 ^{er} pont en bois en 14 av JC 2 ^{ème} pont en bois en 95-98 ap JC Pont mixte au début du 3 ^{ème} s (datation dendrochronologique)	Pieux en chêne. Pont constitué d'un tablier en bois reposant sur des piles en maçonnerie. Pieux d'anciens ponts partiellement réutilisés pour la construction des piles. Largeur du tablier égale à 9 m.
29	Pont de Thyez	Thyez	Arve	90-125 ap JC	
30	Pont romain de Vienne	Vienne	Rhône	1 ^{er} siècle ap JC - Début du 3 ^{ème} siècle ap JC (datation dendrochronologique)	
31	Pont de la Bièvre	Aoste	Bièvre	Epoque augustéenne (de 63 av JC à 14 ap JC) (datation dendrochronologique)	Un seul pieu en bois découvert.
32	Pont de Villeneuve-le-Roi	Villeneuve le Roi	Suerette	2 ^{ème} siècle av JC - milieu du 1 ^{er} siècle ap JC	
33	Pont de Trèves	Trèves	Moselle	1 ^{er} siècle ap JC	Plusieurs ponts construits. Pieux de 2,65 m de long.
34	Pont de Mayence	Mayence	Rhin	Tout début de notre ère	Pieux de 8 m de long. Têtes des pieux fixées à des caissons en madriers.
35	Pont de Genève	Genève	Rhone	1 ^{er} siècle avant JC	
36	Pont d'Ambroix	Ambroix	Vidourle	1 ^{er} siècle ap JC	Longueur du pont supérieure à 100 m. Pont à 9 travées.
37	Pont d'Avignon	Avignon	Rhone	290-530 ap. JC.	Ouvrage en pierre, avec des arches en plein cintre.

Tableau 20. Caractéristiques des ponts datés de l'époque du Moyen-Âge

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Date de construction / Constructeur	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batardeaux	Caractéristique du battage	Etat du pont
1	Pont de Beaugency	Beaugency	Loire	11 ^{ème} - 15 ^{ème} siècle	Alluvions sablo-graveleux (0-3) Calcaire (3-14)	Emplacement de pieux anarchique découvert sous la pile n°9. Têtes des pieux fixées à des traverses et un platelage sous la pile n°8.		En service
2	Pont de Lyon	Lyon	Rhône	1418	Alluvions (0-8)	Longueur des pieux comprises entre 3,9 et 5,85 m.		?
3	Pont de Macon	Macon	Saône	1404	Limon argileux (0-5,6) Sable gravier (5,6-10,5) Calcaire (>10,5)	Bec d'une pile fondé sur des pieux d'aune de 5,8 m de longueur. Pointe des pieux durcie au feu.	Utilisation de sonnettes à tiraudes (mouton en bois de chêne et de noyer), de sonnettes à roues et manivelles.	?
4	Pont de Nevers	Nevers	Nièvre	1468-1469	Alluvions Loire (0-9,6) Marne (>9,6)	Pile fondée sur 300 pieux d'aune de 3,9 m de longueur.		?
5	Pont d'Orléans	Orléans	Loire	1389-1449	Argile et sable (0-8) Marne (>8)	3 pieux de courte longueur fichés dans la craie sous la pile n°7. Intervalle entre les pieux situés sous la pile n°10 remplis avec des moellons.	Utilisation de hie en 1389, requérant 16 hommes. Utilisation de sonnettes à tiraudes en 1449 (moutons en cuir).	En service
6	Pont de Roman	Roman-sur-Isère	Isère	1389	Alluvions (0-20)	Fondation d'une pile constituée de 30 pieux en pins de 17,5 m de longueur.		?
7	Pont de Tours	Tours	Loire	1464	Alluvions (0-8) Craie (8-15,5)	Battage des pieux en bois à l'extérieur des fondations des piles en maçonnerie. Battage de pieux en bois de plus petits diamètres sous les fondations des piles. Intervalle entre les têtes des pieux remplis avec un béton de sable, chaux et gravier.	Utilisation de hie pour battre les pieux	Détruit
8	Pont Saint-Nicolas	Saint-Hilaire-Saint-Mesmin	Loiret	13 ^{ème} siècle	Alluvions sableux (0-2,2) Calcaire (>2,2)	Piles n°1, 3, 4, 7 datées du Moyen-Âge. Pile n°2 et n°6 reconstruites sur des pieux en bois. Pile n°2 fondée sur 43 pieux de 30 cm de diamètre, de 6 à 8 m de longueur, fichés sur 3 m de hauteur dans le calcaire. Pile n°5 fondée sur 21 pieux, de 35 cm de diamètre, de 18 m de longueur, fichés sur 5 m de hauteur dans le calcaire.		En service
9	Pont Saint Benezet	Avignon	Rhone	1177	Alluvions sableuses et gravier (0-14) Marne (>14)	Pont de 915 m de longueur comportant 22 arches. Pieux en chêne de 3 m de longueur et 44 cm de diamètre, armés en pointe. Réutilisation des piles du pont romain pour y asséoir un tablier en bois. Piles munies d'éperons triangulaires en amont et en aval.		Détruction partielle en 1226
10	Pont de la Daurade	Toulouse	Garonne	1139	Alluvions (0-6) Marne (>6)	Piles du pont probablement fondées sur des pieux en bois		Détruit en 1638

Tableau 21. Caractéristiques des ponts datés de l'époque de la Renaissance

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batardeaux	Caractéristique du battage	Nature des fondations	Etat du pont
1	Pont de Gère	Vienne	Isère	1547		Limons sableux (0-5) Gros gravier (>5)	Piles fondées sur des pieux recépés à 1,5 m sous l'étage. Intervalle entre les pieux remplis avec un béton de chaux et des moellons. Têtes des pieux fixées à un platelage.	Battage des pieux à l'aide de maillets en fer de 8 kg et d'une dizaine de "masses" en noyer avec des manches en chatagnier.	Pieux + platelage	
2	Pont de Nantes	Nantes	Loire	1570-1588		Alluvions, gravier (0-8,5) Gneiss (>8,5)		Utilisation de la hie en 1588. Utilisation de sonnettes à tirades avec moulin en cuivre en 1571, en bronze en 1588. Utilisation de sonnettes à roue en 1570.		
3	Pont Notre Dame	Paris	Seine	1500-1507	Nbre de travées : 6 Ouverture des travées : 13,7-17,3m Epaisseur piles : 5 m Piles munies d'avants et d'arrière becs	Alluvions (0-4) Calcaire (>4)	Fondations constituées d'un grand nombre de pieux. Mise en place d'enrochements entre les têtes des pieux. Batardeaux épaissés par des manèges mus par des chevaux. Fondations reutilisées lors de la reconstruction du pont en 1853.			En service
4	Pont Neuf	Toulouse	Garonne	1542-1632	Nbre de travées : 7 Longueur : 220 m Epaisseur des 2 piles (rive droite) : 10 m Matériaux de construction : briques et pierre de taille.	Alluvions (0-6) Marne (>6)	4 ^{ème} pile fondée dans sa partie centrale sur des pieux en bois. 5 ^{ème} pile (construite en 1579 et ruinée en 1583) sur fondations superficielles et profondes. 6 ^{ème} pile fondée sur des pieux en bois.			En service
5	Pont de Vierzon	Vierzon	Cher / Arnon	1503		Alluvions (0-8) Argile (8-9) Marne (>9)	Pile fondée sur plus de 500 pieux de 2,60 à 2,91 m de longueur. Pieux renforcés en pointe par des sabots métalliques.	Utilisation de la hie		
6	Pont de Moulins	Moulins	Allier	1533-1534		Sable et gravier (0-6,8) Marne (>6,8)	Batardeaux construits avec des pieux dont les pointes étaient renforcées avec des sabots métalliques. Longueur des pieux fixée par le refus du moulin.	Battage des pieux avec une hie.		Détruit
7	Pont Neuf	Paris	Seine	1578-1607	Nbre de travées : 7 + 5 Ouverture des travées : 9 - 16,4 m Longueur : 232 m Largeur : 22 m	Alluvions (0-6) Calcaire, marne (>6)	Fixation de madriers horizontaux en tête des pieux (grillage), puis d'un platelage sur les madriers. Maçonnerie montée sur le platelage.		Pieux + grillage + platelage	En service

Tableau 22. Caractéristiques des ponts construits par Perronet

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batardeaux	Caractéristique du battage	Nature des fondations	Etat du pont
1	Pont Georges V	Orléans	Loire	1751-1760 / Huppeau - Perronet	Nbre de travées : 9 Ouverture max des travées : 32,50 m Longueur pont : 325 m Largeur pont : 14 m Epaisseur piles : 5 m Largeur piles : 23 m	Calcaire tendre (0-9) Marne dure (>9)	Piles et culées fondées sur 256 pieux en bois, de 30 cm de diamètre, espacés de 1 m. Grillage et platelage en charpente de 30 cm d'épaisseur. Longueur des pieux comprise entre 2,6 et 18,5 m selon les appuis. Pieux rattachés à 2 m sous l'étiage. Renforcement de la file extérieure des pieux par des palplanches en bois pour protéger le massif de fondations. Battage de deux files de pieux avec au centre des moellons faisant office de protections contre les affouillements.	Pieux battus jusqu'à des profondeurs variables. Battage des pieux effectués à l'aide d'un mouton de 272 kg élevé à 1,3 m de hauteur. Retus des pieux situés pour un enfoncement de 9 mm par volée de 30 coups.	Pieux + grillage + platelage	En service
2	Pont de Mantes	Mantes-la-Jolie	Seine	1757-1765 / Perronet	Nbre de travées : 13-3 Ouverture max des travées : 39 m Longueur pont : 123 m Largeur pont : 10 m. Epaisseur piles 7,3 m	Sable et galets (0-7,8) Sable et grès (7,8-12) Sable et silex (>12)	Piles et culées fondées sur des pieux en bois battus au retus. Fixation d'un grillage et d'un platelage en charpente aux têtes des pieux.		Pieux + grillage + platelage	Détruit en 1870
3	Pont de Château-Thierry	Château-Thierry	Marne	1765-1786 / Perronet	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 14,5-17,5 Epaisseur piles : 4 m	Remblai (0-6,5) Alluvions (6,5-11) Marne (>11)	Piles et culées fondées sur des pieux en chênes espacés de 3 m (longitudinalement et transversalement). Grillage et platelage de charpente fixés aux têtes des pieux.		Pieux + grillage + platelage	Détruit en 1814
4	Saint Edme	Nogent sur Seine	Seine	1766-1769 / Perronet	Nbre de travées : 1 Ouverture des travées : 29 m Hauteur du pont : 27 m Matériaux de construction : grès dur	Argile-tourbe (0-8,5) Grès molaire (8,5-12)	Piles et culées fondées sur pieux, grillage et platelage en charpente, à 1,2 m de profondeur sous l'étiage. Présence de sédiments terreux en fond de rivière empêchant les infiltrations dans les batardeaux.		Pieux + grillage + platelage	Détruit
5	Les Fontaines	Chantilly	La Nonette	1760 / Perronet	Nombre de travées : 3 Ouverture max des travées : 5,2 m Pont en pierre Epaisseur piles : 1,5 m Largeur pont : 7,3 m	Alluvions (0-5) Calcaire (5-6,5) Sable/Calcaire (6,5-9)	Piles et culées fondées sur pieux, grillage et platelage en charpente.		Pieux + grillage + platelage	En service
6	Pont de Neuilly	Paris	Seine	1768-1774 / Perronet	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 39 m Epaisseur piles : 4,2 m Largeur pont : 14,6 m. Matériau de construction : Pierres de taille	Alluvions (0-6) Calcaire (>6)	Diamètre des pieux : 32,5 cm. Pieux fichés sur une hauteur de 3,40 m. Longueur moyenne des pieux : 57 m. Construction et épousement des batardeaux, puis réception des pieux à 2,3 m sous l'étiage.	Retus des pieux atteints pour un enfoncement de 34,5 mm par volée de 25 coups d'une sonnette de mouton de 600 kg.	Pieux + grillage + platelage	En service
7	Pont de la Concorde	Paris	Seine	1787-1791 / Perronet	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 25,6 - 31,2 m Epaisseur piles : 3 m Largeur du pont : 14,5 m	Alluvions (0-1,2) Calcaire (>1,2)	260 pieux battus sous chaque pile. Les culées reposent sur 324 pieux disposés en quinconce et espacés de 1 m longitudinalement. Piles et culées fondées sur pieux, grillage et platelage en charpente.		Pieux + grillage + platelage	En service
8	Nemours	Nemours	Loing	1771-1804 / Perronet - Boisind	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 15,2 m Epaisseur piles : 2,1 m	Remblai (0-2) Alluvions argileuse (2-6) Calcaire (6-9)	Piles et culées fondées sur des pieux en bois.		Pieux + grillage + platelage	En service
9	Pont de Rozay-en-Brie	Rozay-en-brie	Yerres	1786 / Perronet	Nbre de travées : 2 Ouverture des travées : 7,3 m Epaisseur piles : 5,6 m Epaisseur piles : 1,8 m	Calcaire friable (0-2) Chaux dur (2-10)	Piles et culées fondées sur des pieux, grillage et platelage en charpente.		Pieux + grillage + platelage	En service
10	Pont de Rosoy	Rosoy	Yonne	1786 / Perronet	Nbre de travées : 2 Ouverture des travées : 7,3 m Epaisseur culées : 3,7 m	Argile (0-4) Sable (4-5) Argile (>5)	Piles et culées fondées sur pieux, grillage et platelage en charpente.		Pieux + grillage + platelage	En service
11	Pont aux Fruits	Melnin	Seine	1772 / Perronet	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 9 - 4,5 m Largeur pont : 12 m	Remblai (0-3) Alluvions (3-9) Calcaire (>9)	Piles et culées fondées sur pieux, grillage et platelage en charpente.		Pieux + grillage + platelage	Détruit

Tableau 23. Caractéristiques des ponts construits par Gauthey

Cours d'eau franchit	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batardeaux	Caractéristique du battage	Nature des fondation	Etat du pont
Seille	1782-1787 / Gauthey	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 16,30m Largeur pont : 7,8m	Remblai (0-3) Limons sableux (3-6) Argile (>6)	Diamètre pieux : 32,5 cm Longueur pieux : 4,87 - 7,15 m Pilots de remplage fichés à 2 - 2,3 m 55 pieux battus par pile	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	Détruit en 1789
Seille	1782-1785 / Gauthey	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées 11,7m Largeur pont : 8m	Argile (0-3) Gravier (3-5) Marne (5-7) Sable (>7)	Diamètre pieux : 32,5 cm Pilots de remplage remplacés par palplanches (fiche 1,60 m) 32 pieux battus par pile	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	En service
Solnan	1782-1789 / Gauthey	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées 13,8m Largeur pont : 8m	Argile (0-3) Gravier (3-5) Marne (5-7) Sable (>7)	Diamètre pieux : 32,5 cm Pilots de remplage remplacés par palplanches (fiche 1,60 m) 32 pieux battus par pile	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	Détruit en 1789
Doubs	1782-1790 / Gauthey	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées 23,7m Largeur pont : 9,8m	Alluvions limons-argile (0-4) Alluvions sable-gravier (4-15)	Diamètre pieux : 32,5 cm Longueur pieux : 5,85 - 6,17 m 78 pieux battus par pile	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	En service
Brenne	1783-1787 / Gauthey	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées 8,8m Largeur pont : 7,9m	Argile (0-5) Limons (5-10) Marne (10-15)	Diamètre pieux : 32,5 cm Longueur pieux : 5,85 m Fiche des pilots de remplage : 2 m 27 pieux battus par pile	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	En service
Soône	1785-1789 / Gauthey	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées 10,2-19,5m Largeur pont : 9,7m	Alluvions (0-6,5) Marne (>6,5)	Diamètre pieux : 32,5 cm Longueur pieux : 4,87 - 5,85 m Fiche des pilots de remplage : 1,95 m	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	Détruit
Guyotte	1786-1789 / Gauthey	Nbre de travées : 1 Ouverture des travées 12,7m Largeur pont : 7,8m	Alluvions limons-argile (0-1,5) Alluvions sableux (1,5-3,5) Sable (3,5-7) Limons (>7)	Diamètre pieux : 32,5 cm Longueur pieux : 7,15 m	Battage des pieux avec une sonnette à tiraudes, rebattage des pieux avec une sonnette à déclic	Pieux + grillage + béton	En service

Tableau 24. Caractéristiques des ponts datés de l'époque moderne

Número du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batareux	Caractéristique du battage	Nature des fondations	Etat du pont
1	Pont de Bois	Bois	Loire	1715-1720 / Pitrou		Alluvions argilo-sableuses (0-8) Calcaire (5-8)	Pointes des pieux protégées avec des sabots métalliques à 4 languettes. 3 à 5 pieux battus par m ² . Longueur des pieux fixés avec le refus du moulin. Grillage fixé sur les têtes des pieux. Plateau fixé au grillage. Maçonnerie montée sur le plateau. Epaisseur des batareux : 3 m. Hauteur des batareux : 1,2 à 1,5 m.	Utilisation de sommets à tirades. Masse frappante de 300 à 400 livres. Cercelage de la tête des pieux.	Pieux + Grillage + Plateau	En service
2	Pont des Chavannes	Chalon	Saône	1698		Argile-sable (0-9) Gravier (5-9)				Détruit
3	Pont au Change	Paris	Seine	1639-1647	Nbre de travées : 7 Ouverture des travées : 10,7 - 15,7 m Largeur pont : 32,6 m.	Alluvions argilo-marneuses (0-6,5) Calcaire (>6,5)	Piles fondées sur 200 pieux. Têtes des pieux solidarisés au plateau.		Pieux + plateau	Détruit en 1850
4	Pont de Dôle	Dôle	Doubs	1760-1764 / Querret	Nbre de travées : 7 Ouverture des travées : 15,9 - 14,9 m Epaisseur piles : 3,3 - 3,5 m.	Argile sableuse (0-3) Graviers + galets (3-7)	Piles fondées à 2,3 m sous l'étage et reposant sur des pieux d'environ 4 m de longueur.			En service
5	Pont Ingersheim	Ingersheim	Fecht	1773 / Clinchamp	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 15,3 - 18,3 m	Gravier argileux	Pont fondé sur des pieux recepés à 2 m sous l'étage.			
6	Pont de Lyon	Lyon	Rhône	1718 / Jacques V Gabriel		Alluvions (0-8)	Ancien pont construit en 1418 et fondé sur des pieux de 3,9 à 5,85 m de longueur	Sommets à tirades. Masse frappante de 800 livres.		
7	Pont de Moulins	Moulins	Allier	1700-1704		Sable et gravier (0-6,8) Même (5-6,8)	Pointes des pieux protégées avec des sabots métalliques à 4 languettes. 3 à 5 pieux battus par m ² . Longueur des pieux fixés avec le refus du moulin. Grillage fixé sur les têtes des pieux. Plateau fixé au grillage. Maçonnerie montée sur le plateau.	Utilisation de sommets à tirades. Masse frappante de 800 livres.	Pieux + Grillage + Plateau	Détruit
8	Pont du Pape	Saint-Laurent-du-Pape	Erieux	1756 / Pitot	Nbre de travées : 7 Ouverture des travées : 14,8 m Matériau de construction : Pierre de taille	Alluvions sable-graveleuses (0-15)	Construction d'un radier général en pierre suite à l'affaiblissement du pont fondé sur des pieux en bois (à cause des affouillements).		Radier général en pierre	En service
9	Pont Royal	Paris	Seine	1684-1689 / Frère Romain	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 20,5 - 23,5 m Epaisseur piles : 4,5 m. Largeur pont : 17 m.	Alluvions sable tourbe (0-15)	Cutées fondées sur le rocher, mais piles construites sur des pieux en bois. Pointes des pieux protégées avec des sabots métalliques à 4 languettes. 3 à 5 pieux battus par m ² . Pieux battus au refus. Longueur des pieux égale à 4,3 m. Grillage fixé sur les têtes des pieux. Plateau fixé au grillage. Maçonnerie montée sur le plateau.	Utilisation de sommets à tirades pour battre les pieux.	Pieux + Grillage + Plateau	En service

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchi	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batareux	Caractéristique du battage	Nature de la fondation	Etat du pont
10	Pont de Pont Sainte Maxence	Pont Sainte Maxence	Oise	1773-1784 / Dusse et Dumoussier (sur les plans de Perronet)	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 22m Largeur pont : 12m Hauteur piles : 5,5m	Alluvions limono graveleuses (0-8) Argile (>8)	Piles et culées fondées sur pieux grillage et platelage en charpente. Construction de batareux autour des piles. Machines pour élever les batareux identiques. Battage des pieux avec des scelles utilisées lors de la construction du pont de Neuilly. Masses frappantes de 1200 à 1800 livres. Plateage situé à 2,6 m sous l'étiage	Utilisation de la force du courant pour le battage des pieux.	Pieux + grillage + platelage	Détruit (1ère guerre mondiale)
11	Pont Saint Michel	Paris	Seine	1606-1618	Nbre de travées : 4 Ouverture des travées : 9,7 - 13,7 m Largeur pont : 34,1 m.	Alluvions (0-2) Marne (2-7) Calcaire (>7)	Longueur des pieux égaux à 2,91 m. 4 à 5 pieux battus par m ² . Nombre de pieux par pile égal à 650. Pieux fixés à un platelage de 10 à 13 cm d'épaisseur. Intervalles entre les pieux remplis de meulons.		Pieux + plateforme	Détruit en 1856
12	Pont de Saumur	Saumur	Loire	1756-1770 / Cessant	Nbre de travées : 12 Ouverture des travées : 19,5 m Épaisseur piles : 3,9 m.	Alluvions argileuses (0-5) Craie marneuse (5-17) Marne compacte (>17)	Longueur des pieux comprise entre 9 et 10 m. Pieux reçepés à 3 et 5,5 m de profondeur sous l'étiage à l'aide d'une scie. Mise en place d'un caisson immergé étouvé sur les têtes des pieux.	Utilisation de sonnette à défilet mues par une roue	Pieux + caisson immergé	En service
13	Pont de Tarbes	Tarbes	Adour	1740	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 18 - 32 m	Alluvions sableuses (0-3) Argile (>3)	Fondations constituées de pieux très courts. Têtes des pieux noyées dans le béton.		Pieux + béton immergé	Détruit en 1875
14	Pont de Tours (pont Wilson)	Tours	Loire	1765-1779 / Bayeux	Nbre de travées : 15 Ouverture des travées : 25m Longueur pont : 437m Épaisseur piles : 5 m Largeur pont : 14,6 m	Alluvions sablo-graveleuses (0-8) Calcaire (>8)	Piles fondées sur 122 pieux en chêne reçepés à 2,35 m sous l'étiage. Diamètre et longueur des pieux égaux à 27 cm et 7,80 m. Pieux espacés de 1,2 m. Pointes des pieux encastées dans le substratum sur 38 cm de hauteur. Grillage fixé sur les têtes des pieux. Platelage de 32 cm d'épaisseur fixé au grillage.		Pieux + grillage + platelage Pieux + caisson immergé	Détruit en 1978
15	Pont de la Trésorerie	Grenoble	Isère	1999-1622			Construction de batareux au niveau des piles n°1, 13 et 14. Piles n°8 à 12 fondées sur des pieux sous-jacents à un caisson immergé. Mise en place d'encrochements autour des fondations pour limiter les phénomènes d'affouillement.		Pieux + grillage + platelage	Détruit
16	Pont de Triport	Triport	Marne	1756-1760	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 24m Épaisseur piles : 2,5 m. Largeur du pont de 9,75 m.	Alluvions (0-10,6) Sable graveleux limoneux (>10,6)	Longueur des pieux comprises entre 3,9 à 4,9 m. 500 pieux battus sous chaque pile. Têtes des pieux fixées à un grillage et un platelage. Maçonnerie montée sur le platelage.	Utilisation de sonnettes à défilet mues par une roue terminées en 1599	Pieux + grillage + platelage	Détruit en 1815
17	Pont de Vieille-Brouade	Vieille Brouade	Allier	1750	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 21,4-23,4m Épaisseur piles : 4,20 m.	Gravier compact	Mise en place d'encrochements de béton autour des fondations pour limiter les phénomènes d'affouillement.	Difficulté d'enfoncer les pieux dans le gravier compact	Pieux + grillage + platelage	Détruit
18	Pont de Beaugency	Beaugency	Loire	Terminé au 18 ^{ème} siècle	Nbre de travées : 28 Longueur pont : 460m Largeur pont : 10m Pont en maçonnerie	Alluvions sablo-graveleuses (0-2) Calcaire dur (>2)	Diamètre pieux : 20-30 cm. Pieux espacés de 0,9 à 1,2 m. Longueur pieux : 3 m. Têtes des pieux encastées dans la maçonnerie. Épaisseur du platelage : 16 cm. Vides sous le platelage comblés avec des encrochements.		Pieux + grillage + platelage	En service
19	Pont sur l'Arnon	A proximité de Vierzon	Arnon	Mis en service en 1763	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 11,7m Longueur pont : 76m Largeur pont : 13m	Alluvions sablo-graveleuses (0-2,7) Argile tendre-marne raide (>2,7)	Piles fondées sur 44 pieux de 30 cm de diamètre de 3,5 m de longueur (pieux fichés dans la maçonnerie sur 1 m de hauteur). Pieux espacés de 90 cm longitudinalement et transversalement. Épaisseur du platelage : 20 cm. Mise en place d'encrochements pour limiter les phénomènes d'affouillement.		Pieux + grillage + platelage	En service

Tableau 25. Caractéristiques des ponts datés de l'époque industrielle

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchi	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batareux	Caractéristique du battage	Nature de la fondation	Etat du pont
1	Pont de l'Alme	Paris	Seine	1854-1856 / Gariel	Nbre de travées : 3 Longueur pont : 120 m Pont maçonné	Alluvions (0-3) Vase (0-8-7) Argile (3-10)	Piles fondées sur 8 rangées de 30 pieux espacés de 90 cm. Distance entre deux rangées de pieux égale à 1 mètre. Pieux reçepés à 2 m sous l'étiage. Mise en place de caisson immergé au dessus de la tête des pieux.		Pieux + caisson immergé	En service
2	Pont sur le Bas-Brivet	Ponchâteau	Bas-Brivet	19ème (aménagement canal Nantes-Brest)	Nbre de travées : 1	Tourbe (0-0-8) Vase (0-8-7) Rocher (>7)	Construction d'un remblai avant battage des pieux. Profondeur des fondations égale à 7 m. Pieux de 30 cm de diamètre et 4,9 m de longueur. Pieux espacés longitudinalement de 90 cm et transversalement d'un mètre. Plancher constitué de madriers fixés à des longrines, elles-mêmes solidarisées aux têtes des pieux.		Pieux + grillage + plâlage	En service
3	Pont de Belle-Croix	Nantes	Loire	1861 / Lechalas	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 14,3 - 15,4 m	Argile et sable (0-20) Rocher (>20)	Pieux de 20 m de long, constitués de 2 pieux de 10 m de long et entourés d'un anneau de béton. Pieux armés de fer. Pieux remplis avec du béton. Évidant d'un caisson immergé sur les têtes des pieux.	Utilisation de sonnettes à l'origine du battage avec un rendement maximal de 150 coups/h.	Pieux + béton immergé + caisson immergé	Détruit
4	Pont de pierre	Bordeaux	Garonne	1820-1821 / Deschamps	Nbre de travées : 17 Ouverture des travées : 28,8 - 26,5 m Épaisseur piles : 4,2 m Longueur pont : 15 m	Sable vaseux (0-12) Sable et gravier (12-20) Masse calcaire (>20)	L'arc des fondations : 12 m. Pour chaque pile, 250 pieux en pin battus, de 25-30 cm de diamètre, de 8 à 10 m de longueur, reçepés à la scie circulaire à 3,75 m sous l'étiage. Pieux armés de sabots de fonte munis au centre d'une tige bubblée. Épaisseur du plâlage comprise entre 15 et 50 cm. Encochements déposés en fond de cours d'eau après le battage des pieux. Fixation de caissons immergés de 23 m de longueur et 7 m de hauteur en tête de pieux.		Pieux + caisson immergé	En service
5	Pont du petit Anjou	Bouchemaine (Pomeroy)	Maine	1880-1904	Nbre de travées : 3 Longueur pont : 150 m Hauteur piles : 10 m	Vase (0-9) Rocher (>9)	Recépage des têtes des pieux à 1,5 m sous l'étiage. Têtes des pieux liaisonnées entre elles avec des madriers. Caissons immergés remplis avec du béton échoués en têtes des pieux. Mise en place d'encochements pour éviter leur déversement.		Pieux + caisson immergé	En service
6	Pont Bouicéaut	Verjux	Saône	1888	Matériaux de construction : calcaire, pierre de taille	Alluvions subo-argileuses (0-10)	Fondations sur pieux (grillage supprimé) sous-jacents à un caisson immergé dans lequel a été coulé du béton.		Pieux + béton immergé (dans caisson)	?
7	Pont sur l'Elorn	Landerneau	Elorn	19ème (aménagement canal Nantes-Brest)		Vase (0-3) Argile (3-10)	Pieux flottants dans l'argile de 7 m de long. Têtes des pieux fixées à un grillage. Suppression du plâlage. Têtes de pieux et grillage noyés dans un massif en béton de 2,3 m d'épaisseur.		Pieux + béton immergé	?
8	Pont d'Iéna	Paris	Seine	1808-1814 / Lamarck	Nbre de travées : 5 Ouverture des travées : 28 m Longueur piles : 3 m Longueur pont : 14 m	Alluvions (0-15)	Pieux reçepés à 1,65 m sous l'étiage. Battage de deux encintes de palplanches autour de la fondation. Mise en place de blocs de pierre autour des encintes. Intervalles entre les têtes des pieux remplis de béton. Mise en place d'encochements autour de la fondation. Caissons immergés échoués en têtes des pieux. Enlèvements des encintes de palplanches une fois la maçonnerie montée.		Pieux + béton immergé + caisson immergé	En service
9	Pont des Invalides	Paris	Seine	1823		Alluvions (0-9) Argile (>9)	Pieux sous-jacents à un grillage et à un plâlage. Reconstruction de certaines arches et piles du pont entre 1879 et 1880.			En service
10	Pont d'Ivry	Paris	Seine	1817-1829 / Ennemy	Nbre de travées : 5 Ouverture maximale : 23,8 m Longueur pont : 119m	Alluvions (0-12)	Pieux de 36 cm de diamètre, de 6 m de longueur et espacés de 90 cm. Pieux reçepés à 80 cm au dessous de l'étiage. 66 pieux battus sous chaque pile du pont. Chaque pieu supporte une charge limite de 1,57 MPa. Grillage constitué de longrines et de traverses fixés aux têtes des pieux. Caissons immergés échoués et fixés aux têtes des pieux. Mise en place d'encochements autour des fondations.	Reclus des pieux atteint pour un enfoncement de 27,5 mm par volée de 10 coups de mouton de 300 kg tombant d'une hauteur de 3 m. Pieux enfoncés avec une sonnette à déclin.		En service
11	Pont de Libourne	Libourne	Dordogne	1820-1824 / Deschamps	Nbre de travées : 9 Ouverture des travées : 20 m Longueur piles : 198m Longueur pont : 16m Épaisseur piles : 3,85 m	Argile molle (0-5) Sable-gravier (5-8) Même (5-8)	180 pieux en bois battus sous chaque pile, de 30 cm de diamètre, 13 m de long et espacés longitudinalement de 85 cm et transversalement de 5,4 m de hauteur. Pieux remplis avec du béton. Etant le fond est constitué de deux palplanches jointées en madriers. Protection des pointes des pieux par des sabots coniques en fonte.		Pieux + caisson immergé	En service

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchi	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Batardeaux	Caractéristique du battage	Nature de la fondation	Etat du pont
12	Pont sur la Loire	Entre Romorantin et Blois	Loire	1884		Argile sable (0-20) Marne (>20)	Piles fondées sur 98 pieux de 30 à 35 cm de diamètre. Chaque pile supporte une charge maximale de 1800 tonnes. Battage des pieux et des palplanches autour de la fondation. Pieux battus à l'intérieur de l'échante. Têtes de pieux noyées dans un massif en béton situé à 30 cm en dessous de l'étiage.	Refus des pieux atteint pour un enfoncement de 50 mm par volée de 25 coups de mouton de 700 kg tombant d'une hauteur de 1 m.	Pieux + béton immergé	?
13	Pont de Mauves	Mauves	Loire	Fin 19 ^{ème} siècle		Alluvions (0-9) Rocher (>9)	Espacement pieux : 1,3 m. Têtes des pieux noyées dans un massif en béton coulé à l'intérieur d'une enceinte de palplanches en bois jointées.		Pieux + béton immergé	En service
14	Pont Mirabeau	Paris	Seine	1893-1896 / Réaumur et Alby	Nbre de travées : 3 Longueur pont : 173 m Largeur pont : 20 m	Alluvions (0-14)	Têtes des pieux des culées noyées dans un massif en béton coulé à l'intérieur d'une enceinte de palplanches.		Pieux + béton immergé	En service
15	Pont de la Monnaie	Nantes	Sèvres	1880-1881		Alluvions argilo-sables (0-15) Graville (>15)	Pieux en pin de 19 à 22 m de longueur, recepis à 80 cm sous l'étiage. Grillage composé de longrines et traverses solidarisés aux têtes des pieux. Mise en place d'un caisson sans fond en têtes des pieux, contenant un massif de béton de chaux hydraulique de 5/7 m d'épaisseur.		Pieux + béton immergé (dans caisson sans fond)	En service
16	Pont d'Oust	Peillac	L'Oust	19 ^{ème} (aménagement canal Nantes-Brest)	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 15-18 m	Vase compacte (0-2) Vase molle (2-10) Tourbe (10-12) Rocher (>12)	Profondeur des fondations : 11,5 m Têtes des pieux tassonnées entre elles par deux grillages situés l'un en dessous de l'autre et distants de 1,5 m. Béton coulé entre les têtes des pieux et les deux grillages.		Pieux + béton immergé + grillage	En service
17	Pont de Pirnil	Nantes	Sèvres	1861 (reconstruction de la partie rive droite)	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 18-22 m	Alluvions sablo-argileuses (0-20) Grès (>20)	Reconstruction de deux piles, d'une pile-culée et d'une culée située en partie rive droite de la Sèvre. Pointes des pieux protégées avec des sabots de type Camuzat. Pieux recepis à 9,50 m de profondeur sous l'étiage. Pile-culée reposant sur un caisson sans fond. Mise en place de béton entre les têtes des pieux et dans les interstices du grillage. Deux piles fondées sur des caissons sans fond. Béton coulé entre les têtes des pieux. Grillage fixé en tête des pieux.	Utilisation de sommets et tirades suivie des sommets à défile vertes caisson sans fond	Pieux + béton immergé + grillage / Pieux + béton immergé + caisson sans fond	En service
18	Pont de la Prairie Saint Nicolas	Redon	Vilaine	19 ^{ème} (aménagement canal Nantes-Brest)	Pont constitué de 2 culées et d'1 travée de 15 m d'ouverture	Vase compacte (0-2) Vase molle (2-10) Tourbe (10-12) Rocher (>12)	Mise en place d'un remblai avant le battage des pieux pour consolider le sol. Profondeur des fondations : 11,3 m Pieux de 30 cm de diamètre et 8,5 m de longueur Espacement des pieux : 90 cm (transversalement) et 1 m (longitudinalement) Têtes de pieux fixées à des longrines de 35 cm de largeur et 24 cm de hauteur.		Pieux + grillage + platelage	?
19	Pont Cornelle	Rouen	Seine	1810-1829 / Lamandé	2 parties égales considérées comme 2 ponts distincts Chaque pont formé de 3 travées (ouverture travée centrale : 31 m, ouverture travée latérale : 26 m). Epaisseur pile : 3,2 m	Alluvions (>10)	Longueur des pieux : 12 m Espacement entre les pieux : 1,3 m Pieux recepis à 5 m sous l'étiage et noyées dans le béton immergé. Pieux fondés sur des caissons échoués en tête de pieux.	Refus des pieux atteint pour un enfoncement de 10 mm par volée de 10 coups de mouton de 600 kg tombant d'une hauteur de 3,5 m.	Pieux + béton immergé + caisson immergé	Déruit
20	Pont Rousseau	Nantes	Loire	1840-1841	Nbre de travées : 3 Ouverture des travées : 21 m	Alluvions argileuses (0-15) Grès (>15)	Pieux recepis à 60 cm sous l'étiage. Battage de palplanches à l'extérieur de la première file de pieux. Grillage en pin fixé aux têtes des pieux avec de longues chevilles barbelées. Béton coulé entre les têtes des pieux et dans les interstices du grillage. Élévation du massif de béton par couche successives de 30 cm d'épaisseur. Première assise de maçonnerie réalisée à l'étiage		Pieux + béton immergé + grillage	En service
21	Pont Saint Esprit	Bayonne	Adour	1848-1849	Nbre de travées : 8 Ouverture des travées : 24-30 m Matériaux de construction : pierres	Alluvions tourbeuses (0-3,5) Alluvions sableuses (3,5-18)	Pointes des pieux situées à 1,5 m sous le niveau d'eau. Pieux recepis à 3,8 m sous l'étiage. Caisson d'anche constitué d'un platelage de 50 cm d'épaisseur (en chêne et en pin) rempli de maçonnerie et fixé en tête de pieux. Mise en place d'encrochements entre les files des pieux.		Pieux + caisson immergé	En service
22	Pont de Sèvres	Paris	Seine	Terminé en 1820 / Vigoureux	Nbre de travées : 9 + 2 Ouverture des travées : 18 m + 5 m	Alluvions gravelo-sableuses (0-7) Marne (7-8,5) Crête (>8,5)	Pieux en bois espacés de 1,2 m et supportant chacun une charge maximale égale à 53 kg. Pieux caissons avec des caissons immergés. Epaisseur des traverses du fond du caisson égales à 22 cm. Mise en place d'encrochements entre les têtes des pieux.		Pieux + caisson immergé	En service

Numéro du site	Nom	Ville	Cours d'eau franchit	Date de construction / Constructeur	Caractéristiques géométriques du pont	Géologie du terrain	Caractéristiques des fondations / Bâtières	Caractéristique du battage	Nature de la fondation	Etat du pont
23	Pont Sully	Paris	Seine	1876	Grand bras de la Seine (au Sud) : 3 travées, 2 piles et 2 culées. Petit bras de la Seine (au Nord) : 3 travées, 2 piles et 2 culées.	Alluvions gravelo-sablonneuses (0-7) Calcaire (>7)	Trois types de fondations pour le pont sur le Grand Bras : Culée, rives gauche repose sur du sable grossier, deux piles comprises sur un massif en béton coulé dans des caissons sans fond, culée rive droite fondée sur des pieux en bois. Grillage fixé aux têtes des pieux. Mise en place d'un plateiage sur les grillages.		Pieux + grillage + plateiage	En service
24	Pont de Tonny-Charente	Tonny-Charente	Charente	1841-1842	Ouverture max des travées : 90 m Longueur pont : 625 m Largeur pont : 4,5 m	Argile (0-16) Calcaire (>16)	Pont fondé sur pieux battus dans un terrain vaseux.			En service
25	Pont de Thouaré	Thouaré-sur-Loire	Loire	1879-1881	Pont divisé en 2 points. Nbre de travées pont (bras nord) : 7 Ouverture des travées : 38,5-48 m Longueur : 392 Nbre de travées pont (bras sud) : 5 Ouverture des travées : 38,5-48 m Longueur : 212	Alluvions sablonneuses (0-20) Substratum (>20)	Piles fondées sur 41 pieux en pin de 17-18 m de longueur (avant recépage), de 30 cm de diamètre. Fondations encastrées de 7 mètres de 5 pieux et 6 pieux aux extrémités. Pieux recépés à 40 cm sous l'étiage. Charge moyenne supportée par un pieu : 200 kN Têtes des pieux noyées dans un massif de béton de chaux hydrauliques. Mise en place d'un massif d'encastrement à l'extérieur du rideau de vannage.	Battage des pieux avec une sonnette dont le mouton avait une masse de 960 kg et une hauteur de chute de 1,3-1,4 m	Pieux + béton immergé + plateiage	En service
26	Viaduc de Conelle	Coye-la-Forêt	Thèves	Terminé en 1858	Nbre de travées : 15 Ouverture des travées : 19 m Travées situées à 38 m au dessus de l'eau	Tourbe (0-6) Alluvions (6-7) Crête (>7)	Fondation sur pieux en bois. Têtes des pieux noyées dans un massif en béton, situé sous l'étiage.			Détruit
27	Pont vallée de Viosne	Ligue Paris et Dieppe (entre Gisors et Gournay)	Trosnes	1864-1868		Tourbe (0-16) Calcaire (>16)	Pieux de 15 m de longueur, 20 cm de diamètre et espacés de 1 m longitudinalement et transversalement 300 pieux battus avec une machine à vapeur installée au bord de la Troisne. Pointe des pieux encastree dans le substratum. Massif en béton de 70 cm d'épaisseur entre les têtes des pieux. Têtes des pieux liaisons entre elles avec des madriers constituant le plateiage.	Retis des pieux atteints pour un encastrement de 30 mm par volée de 10 pieux + béton + plateiage Pieux de 750 kg tombant d'une hauteur de 3 m.	Pieux + béton + plateiage	?
28	Pont Eiffel	Cubzac-les-ports	Dordogne	Mis en service en 1839	2 viaducs dièdres. Longueur : 252 m Partie centrale. Longueur : 546 m Pont en maçonnerie	Remblai (0-3/8) Alluvions argilo-limoneux (3/8-20m) Marne (>20)	Pile-culée rive droite fondée sur 632 pieux en bois, de 15 m de longueur, de 30 cm de diamètre. Plateiage situé à 4,5 m de profondeur sous le niveau d'eau. Pile-culée rive gauche fondée sur 420 pieux de 30 cm de diamètre. Pieux fondés sur 26 pieux. Diamètre des pieux : 30 cm. Longueur des pieux : 2,8 m. Pointes des pieux encastrees dans le calcaire sur 50 cm de hauteur. Pieux sous-jacents à un grillage et à un plateiage en bois de 40 cm d'épaisseur. Blocs de calcaire ont servi d'encastrement et de blocage aux pieux en terre substratum.		Pieux + grillage + plateiage	En service
29	Pont de Saint-Florent-sur-Cher	Saint-Florent-sur-Cher	Cher	Mis en service en 1832	Nbre de travées : 7 Ouverture des travées : 14m Pont en maçonnerie	Sable 2,3 Calcaire (>2,3)			Pieux + grillage + plateiage	En service
30	Pont de Noy	Noy	Gave de Pau	1850-1855	Nbre de travées : 6 Longueur pont : 110 Largeur pile : 12,6m Pont en maçonnerie	Sable Argile	Fondations constituées de 3 rangées de pieux équarris, de côtés 27 cm x 27 cm, espacés de 1,2 m longitudinalement et de 87 cm transversalement. Têtes des pieux fixées à un grillage et à un plateiage assemblés à mi-bois		Pieux + grillage + plateiage	En service
31	Pont des hospices de Lyon	Lyon	Saône	1811-1815 / Kernegon	Ouverture des travées : 20,80 m Pont en bois	Alluvions (0-8 m)	Pieux recépés à 3 m sous l'étiage. Fondations sur caissons immergés.		Pieux + Caisson immergé	Détruit en 1968
32	Pont Saint Pierre	Toulouse	Garonne	1849-1852 / Maurel	Nbre de piles : 2 Largeur : 6,90 m Piles en pierre et briques, renforcé par des câbles métalliques. Pont en bois	Alluvions (0-6) Marne (>6)				Détruit
33	Pont d'Avignon	Avignon	Rhone	1806-1812 / Duvivier	Nbre de travées : 15 + 30 Longueur : 889 m	Alluvions (0-6) Marne (>6)				Détruit
34	Viaduc des 100 arches	Palme d'Arveyres	Terrains marécageux	1846-1850	Pont en maçonnerie Nbre de travées : 100 Longueur : 1000 m Largeur piles : 8 m	Terres végétales (0-1,6) Vase (1,6-4,5) Sable (4,5-5,75) Gravier (5,75-15)	Pieux fondés sur 4 rangées de 11 pieux, de 30 cm de diamètre et de 5,20 m de longueur. Pieux espacés longitudinalement de 80 cm et transversalement de 1,1 m. Têtes des pieux fixées au grillage et à un plateiage. Epaisseur du grillage : 25 cm. Largeur des longrines et des traverses : 30 cm. Plateiage en bois de 8 cm d'épaisseur situé à 2 m sous le terrain naturel de l'époque.		Pieux + grillage + plateiage	En service

Annexe B : Travaux de confortement des fondations en bois des ouvrages routiers

Tableau 26. Travaux de confortement des fondations suite aux désordres observés

Nom Construction Cours d'eau	Désordres	Travaux réalisés
Pont de Beaugency (18 ^{ème} siècle) Loire	Dégradation de la maçonnerie, de la tête des pieux	Reprise de la totalité des fondations anciennes par encagement des massifs dans un batardeau en palplanches métalliques et injections jusqu'au massif.
	Joint altérés Mauvais état des piles et des voûtes.	Perforations de la pile à partir du tablier et remplissage des vides par injection quasi-gravitaire d'un mortier sous le platelage Réalisation de fondations dites récentes en 1948-1950 qui comprend un massif béton ancré dans le massif marneux.
Pont Wilson (18 ^{ème} siècle) Loire	Vides de 15 cm retrouvés sous le platelage d'une des piles (rôle minime dans l'effondrement)	La destruction du pont Wilson a conduit à la reconstruction d'un nouveau pont
	Instabilité latérale des pieux dégarnis sur une certaine profondeur sous le platelage Approfondissement du lit de la rivière et augmentation de la vitesse de l'eau	
Pont Georges 5 (18 ^{ème} siècle) Loire	Tassement d'une des piles en 1758 lors de la construction de voûtes	Surcharge de la pile présentant des tassements en 1758, afin d'enfoncer la fondation sur une hauteur de 50 cm
	Mauvaise qualité et dégradation du blocage situé entre le sol de fondation et le platelage Erosion par circulation d'eau	En 1761, afin de protéger l'ouvrage contre les affouillements, une estacade constituée de 2 files de pieux. Stabilisation des travées par des radiers en enrochements ou même en pierre de taille. Remplacement d'une partie du platelage par une semelle en béton armé lors de leur reconstruction. En 1985, mise en œuvre d'un rideau de palplanche autour des appuis et solidarisation aux maçonneries à l'aide de béton, injection de coulis autour et sous les pieux en bois. Prévision de travaux confortatifs pour soustraire les matériaux aux affouillements, pour éviter que l'érosion n'affecte le sol sous-jacent au massif et pour étancher la base des appuis et diminuer les circulations d'eau. Prévision d'une protection pour chaque appui par des rideaux périphériques en palplanches ou un radier général avec deux barrages de palplanches et d'une campagne d'injection avant battage de palplanches pour combler les vides sous les fondations.
Pont de Thouare (19 ^{ème} siècle) Loire	Disparition locale du rideau de vannage et du béton cyclopéen	Transformation de l'ensemble pieux en bois – béton cyclopéen – platelage – maçonnerie de la fondation – en un bloc monolithique enfermé dans une enceinte en palplanches métalliques Coulage d'un béton destiné à combler les vides entre le rideau de vannage et les palplanches en bois Injection des sols afin de bloquer les divers éléments entre eux
	Disparition progressive des enrochements	Entretien des enrochements
Pont de Saumur (18 ^{ème} siècle) Loire	Affaissement de la pile n°5 en 1968, en quelques heures (24 cm en aval et de 32 cm à l'amont), puis poursuite du mouvement pendant les cinq semaines suivantes pour atteindre 32 cm à l'aval et 35 cm à l'amont	Injections pour remplir les vides entre le platelage et les têtes des pieux
	Vides sous le platelage de la pile n°5 Rupture du platelage à la périphérie de la pile et cassure de certains pieux (pile n°5)	Injections pour consolider le sable de Loire et le resserrer autour des pieux Injections pour conférer au « massif » ainsi constitué une certaine pérennité en lui permettant de résister aux affouillements
Pont sur l'Arnon (18 ^{ème} siècle) Arnon	Mauvais état des parois avec la friabilité de béton de chaux	Injection de stabilisation immédiate afin de garantir un contact entre la maçonnerie et les alluvions
	Dégarnissage des têtes des pieux Faibles caractéristiques mécaniques de la maçonnerie Altération ou rupture du platelage sur l'une des piles	Comblement des principaux affouillements Protection contre les affouillements par des batardeaux individuels en palplanches et bétonnage des vides entre les rideaux de palplanches et l'appui Amélioration de l'écoulement des eaux de l'Arnon par un dégagement des bancs sableux sous deux arches
Saint Florent sur le Cher (19 ^{ème} siècle) Cher	Maçonnerie de mauvaise qualité Joints en béton de chaux friables et même parfois délavés	Exécution d'une semelle en béton armée entre le platelage et le substratum, avec injection des soubassements en maçonnerie Ou : exécution d'un caisson de palplanches autour de chaque appui puis une consolidation par injection des terrains situés entre les pieux
	Altération du platelage et de la tête des pieux	
Pont Saint-Nicolas (13 ^{ème} siècle) Loiret	Affaissement des appuis	Coffrage du pourtour de la base des appuis datés du Moyen-Âge et injection gravitaire afin de combler les vides
	Affouillement sous la maçonnerie Erosion du sol support Dégarnissage des pieux	Protection contre les affouillements et les sources avec mise en place d'un rideau de palplanches Traitement par injection du substratum contre les évolutions karstiques
Pont de pierre (19 ^{ème} siècle) Garonne	En 1995, effondrement du talus au voisinage de la pile 7, avec dégarnissage de la première rangée de pieux sur toute la hauteur et sur le tiers de la face aval du massif de fondations	Stabilisation des tassements des piles 1 à 6 grâce à l'exécution de travaux de reprise en sous-œuvre par micropieux (16 par piles)
	Tassement des piles 1 à 6	Reconstitution du talus entre le massif en maçonnerie et le fond de la fosse. Appui du talus sur une butée. Mise en place d'enrochements et de matelas de gabions.
Pont Eiffel (19 ^{ème} siècle) Dordogne	Tassement de la pile culée rive droite l'été, stabilisation l'hiver	En 1879, reconstruction de 2 piliers reliés par un arc plein cintre d'ouverture réduite de 10m à 8m avec entre ces 2 piliers, un massif reposant sur 193 pieux bois. Ajout de tirants en fer afin de rendre solidaires ces deux fondations
	Dislocation de la maçonnerie	En 1879, recul du pilier de rive de 3m et renforcement de ce pilier par 2 massifs contreforts fondés sur 2 fois 16 pieux. En 1879, arasement des anciens massifs à 6m au dessus de l'étiage En 2004, mise en place de micropieux afin de renforcer l'assise de cette pile culée.
Pont de Nay (19 ^{ème} siècle) Gave de Pau	Vides sous le platelage (poche d'air atteignant 30cm de hauteur)	En 1909, mise en protection par des fortes dalles de pierre des fondations des piles
	En 1971, mise à nu de la partie supérieure des pieux jusqu'au platelage	Confortement des piles à l'abri d'un coffrage métallique formé de palfeuillets par remplissage des vides après nettoyage de l'excavation En 1971, entablement du socle des piles en coulant un massif de béton armé d'un treillis
Pont de Libourne (19 ^{ème} siècle) Dordogne	En 1968, nombreuses fissures et fractures sur le fût des pieux	Injections des fissures et des fractures
	Vide relatif lié aux enrochements dans lequel des circulations d'eau ont pu être mises en évidence	Cerclage de la tête des pieux à l'aide de câbles de précontrainte Comblement des vides sous le platelage par injection afin d'améliorer la tenue du blocage des pieux et de resserrer les alluvions et les enrochements calcaires