

Modélisation numérique de la dégradation des fondations sur pieux bois

Numerical modelling of wood piles foundations degradation

Thibault BADINIER^{1,*}, Sarah JUE², Philippe Reiffsteck¹, Chi-Wei CHEN³

1 Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne-la-Vallée, France

2 Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, Polytech Clermont, F-63000 Clermont-Ferrand, France

3 EXP-PFS, Département des Ouvrages d'Art, DTII, DG IGM, SNCF Réseau, La Plaine Saint Denis, France

** thibault.badinier@univ-eiffel.fr*

RESUME : Les fondations sur pieux en bois sont des méthodes historiques de fondations profondes permettant la construction d'ouvrages et de bâtiments dans des zones humides et sur des sols de faible portance. Ces fondations rentrent dans le cadre des fondations mixtes et sont constituées d'un réseau de pieux en bois surmontés d'un chevron supportant la base de la maçonnerie de l'ouvrage ou du bâtiment qu'elle porte. Les pieux sont le plus souvent mis en place par battage jusqu'au refus de façon à atteindre des couches porteuses. Puisque généralement implantés dans des sols saturés (rivières, zones marécageuses), le bois constituant ces pieux est naturellement protégé contre la dégradation et les attaques extérieures tant qu'il reste dans un environnement saturé. Les effets du changement climatique ou les interventions anthropiques (imperméabilisation, canalisation des cours d'eau, etc.) peuvent alors perturber l'état hydrique des sols, entraînant un abaissement du niveau des nappes. Il en résulte alors des conditions favorables aux attaques extérieures sur le bois et cela provoque alors une dégradation du matériau et, par conséquent, une altération de la fondation.

Dans cette étude, nous proposons d'utiliser le logiciel de modélisation par éléments finis CESAR-LCPC pour simuler le comportement d'une fondation exemple représentative de ce type de technique, composée d'une semelle en maçonnerie et d'un réseau de pieux en bois, ici modélisés par des éléments 1D. La dégradation du système est ensuite modélisée en dégradant les propriétés des pieux. Différentes hypothèses de dégradation sont testées et comparées selon leur impact sur le comportement global du système. Les résultats permettent d'observer que la variation de rigidité du bois en particulier montre un effet très notable sur le comportement du système. Dans le même temps, les résultats montrent qu'une dégradation de rigidité très importante est tout de même nécessaire pour observer un tassement supplémentaire significatif.

ABSTRACT: Wooden pile foundations are historical methods of deep foundation that enable the construction of bridges and buildings in wet areas and on soils with low bearing capacity. These foundations fall under the category of mixed foundations and consist of a network of wooden piles supporting the base of the masonry of the bridge or building they carry. The piles are typically driven into the ground to reach load-bearing layers. Since they are usually installed in saturated soil (rivers, wetland areas), the wood used for these piles is naturally protected against degradation and external attacks as long as it remains in a saturated environment. However, the effects of climate change or human interventions (waterproofing, channelling rivers, etc.) can disrupt the soil's hydric state, leading to a drop in the water table level. This creates favourable conditions for external attacks on the wood, resulting in material degradation and, consequently, a deterioration of the foundation.

In this study, we propose using the finite element modelling software CESAR-LCPC to simulate the behaviour of an example foundation representative of this technique, composed of a masonry footing and a network of wooden piles, modelled here as 1D elements. The degradation of the system is then simulated by reducing the properties of the piles. Various degradation hypotheses are tested and compared based on their impact on the overall behaviour of the system. The results show that changes in the stiffness of the wood, in particular, have a very noticeable effect on the system's behaviour. At the same time, the results indicate that a significant reduction in stiffness is still required to observe a substantial additional settlement.

Mots-clés: Pieux bois ; dégradation ; éléments finis ; modélisations numérique

1 INSTRUCTIONS

Les systèmes de fondation sur pieux en bois sont des techniques historiques de construction de

fondations. Ces techniques ont permis la construction d'ouvrages imposants dans des conditions géotechniques défavorables, notamment sur sol de portance médiocre. En France, les fondations sur

pieux en bois ont été utilisées depuis l'époque romaine et jusqu'à l'ère moderne, en particulier pour la réalisation d'ouvrages d'art permettant de traverser fleuves et rivières. Encore aujourd'hui, un certain nombre d'ouvrages d'art historiques appartenant au réseau routier comme aux réseaux ferrés ont été construits sur des fondations sur pieux en bois. Bien que historiques, ces méthodes ont regagné un certain intérêt dans les deux dernières décennies, permettant la réalisation de fondations écologiques sans béton, mais également dans le but d'étudier leur durabilité et leur résilience, en particulier pour faire face au changement climatique. On notera notamment le travail de thèse de Jérôme Christin (2013) qui a permis de produire une base de données d'essais de pieux sur des pieux bois dans différentes configurations et pour plusieurs types de bois (Reiffsteck et al., 2024).

Par construction, ce type d'ouvrage se rapproche d'une fondation mixte au sens moderne. Le plus souvent, celles-ci sont composées d'un ensemble de pieux en bois, enfoncés par moutonnage jusqu'au refus. Ceux-ci traversent alors les couches de sol superficielles molles pour atteindre une couche inférieure de meilleure capacité portante (Ulitskii 1995). Le groupe de pieux est ensuite relié par un platelage servant de support et de jonction avec la maçonnerie de la pile (Mesqui 1986). Un exemple d'une telle fondation historique est illustré sur la Figure 1.

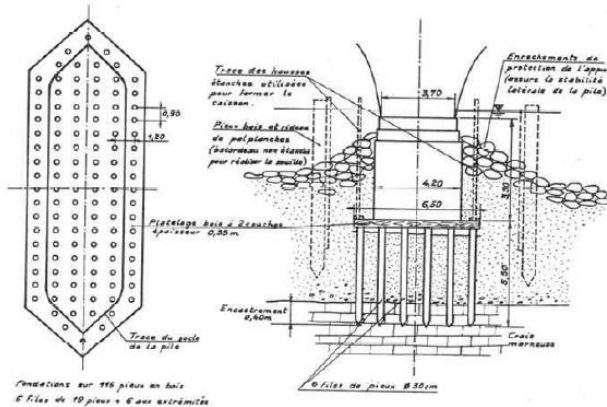


Figure 1: Exemple de fondation sur pieux bois, pont de Saumur

Contrairement à une idée préconçue que l'on pourrait se faire de la durabilité des pieux en bois, celle-ci est en réalité très bonne, comme le montre la longévité de nombreux bâtiments et ponts historiques (Klaassen and Creemers, 2012). Cela est dû aux propriétés du bois dont la dégradation, principalement due aux attaques bactériennes et aux attaques de champignons, n'apparaît qu'en présence d'oxygène (Björdal and Elam, 2021, Elam and Björdal, 2022). Les fondations recourant aux pieux en bois étant normalement installées dans des sols mous saturés,

ceux-ci sont préservés de la dégradation. Cependant, ces fondations sont donc sensibles au changement hydraulique des sols dans lesquels elles sont installées. Ces changements pouvant être dus à des événements climatiques extrêmes ou à des travaux modifiant la situation hydrostatique des sols (Elam and Björdal, 2022).

La dégradation des pieux conduit dans la plupart des cas à l'apparition de tassements lents pouvant affecter la stabilité des ouvrages très longtemps après leur réalisation. Dans la plupart des cas observés, la dégradation des pieux affecte principalement leurs parties supérieures plus exposées aux variations de niveau d'eau (Grinda, 1997, Klaassen and Creemers, 2012, Macchioni and al., 2016).

De rares études se sont intéressées à la modélisation numérique du comportement de ces ouvrages dégradés dans le temps (Ceccato and al., 2014). La méthodologie de ces études reste peu claire, le nombre de cas étudiés très limité.

Le but de cette étude est de reproduire un exemple de ce type de fondations mixtes grâce au logiciel de modélisation par éléments finis CESAR-LCPC pour en étudier le comportement. Par la suite, plusieurs hypothèses de dégradations sont proposées et leur influence sur le comportement global de la fondation.

2 MODELE ET PROCESSUS

Le processus de modélisation utilise le logiciel de modélisation CESAR-LCPC dans sa version pilote CESAR. Cette version permet d'utiliser le solveur d'éléments finis CESAR LCPC avec des scripts Python. Le script Python permet alors de contrôler l'ensemble du calcul, de décrire la géométrie, les paramètres des matériaux, les charges, etc. De même, il est possible d'extraire automatiquement certains résultats directement, le reste des résultats étant toujours conservé dans les fichiers de résultats du calcul. CESAR Pilote est alors particulièrement adapté aux études paramétriques tant en terme de paramètre qu'en terme de géométrie.

Le modèle produit ici utilise un script générique mis au point par l'équipe SRO de l'Université Gustave Eiffel. Il permet de produire des cas d'étude de type fondation mixte sur pieux en bois, avec dégradation de propriété des pieux en bois. Il construit automatiquement la géométrie, l'ensemble des pieux, l'interaction entre les éléments, le maillage, les chargements, les affectations de propriété, etc. Les paramètres clés utilisés par le script sont : la taille de la semelle, la distance entre les pieux, la description géométrique des différentes couches géologiques. Le modèle tire parti des possibilités de modélisation de CESAR-LCPC pour représenter les pieux comme des

éléments unidimensionnels, grâce aux éléments de barres flottantes.

2.1 Géométrie du modèle

Le modèle utilisé dans cette étude correspond à un cas d'étude et une géométrie fictive. Celle-ci est imaginée pour représenter un système de semelle sur pieux suffisamment grand pour être représentatif d'un fonctionnement de groupe, mais suffisamment petit pour limiter la complexité du calcul.

Le modèle comprend un groupe de 25 pieux en bois déposés selon un maillage carré de 5×5 pieux. L'entre-axe entre deux pieux est choisi de 0,8 m. Le groupe de pieux est surmonté d'une semelle rigide représentant un radier de fondation ou la partie inférieure d'un ouvrage, par exemple. La semelle est dessinée carrée de 4m de côté et de 1 m d'épaisseur. Ces dimensions et le choix du matériau assurent la rigidité de la semelle, une rigidité par rapport au reste du complexe géotechnique.

Le modèle géotechnique est supposé être composé de deux couches de sol homogène. La première couche correspond à un sol superficiel mou et la seconde à un sol plus rigide servant d'ancrage, ou de couche de refus au pieu en bois. L'épaisseur de la première couche est de 7m et de 8m pour la seconde, correspondant à une profondeur totale du modèle de 15m. Le modèle est dessiné sans tenir compte des symétries. La semelle est placée au centre et le modèle de sol représenté est de 12m de côté.

Bien que construit avec des éléments de type barres 1D, le comportement des pieux tient compte de leur diamètre de 0,4m. Chaque pieu est supposé faire 8m de long, ce qui représente une distance de 1 m encrée dans la couche porteuse. La géométrie du modèle présentée en Figure 2 tient compte de cette distance, découpant artificiellement la couche porteuse de façon à garantir l'intégration de l'extrémité des pieux dans une surface du maillage. Enfin les pieux sont découpés en sections d'environ 0,4m correspondant au diamètre d'un pieu. Ce découpage doit être cohérent avec le découpage géométrique des différentes couches de sol de façon à ce que chaque surface de changement de sol intersecte les pieux au niveau d'une section. Le but de décrire des sections de pieux est de pouvoir décrire des comportements différents tout au long du pieu. En particulier dans le cadre d'une étude sur la dégradation du comportement des pieux en bois, cela peut permettre de localiser la dégradation des pieux dans la section de tête.

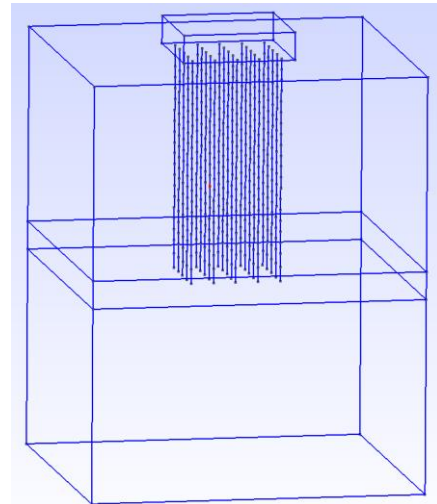


Figure 2: Géométrie 3D du modèle

2.2 Chargement et conditions aux limites.

Le modèle est chargé en surface supérieure de la semelle par une pression uniforme de 1MPa, suffisante pour atteindre la rupture du système conventionnellement définie à un tassement de 0,1D.

Enfin le modèle est construit avec des conditions aux limites de déplacement normal nul aux frontières extérieures du modèle, y compris en sous-face, en laissant les surfaces supérieures non chargées libres.

Dans la catégorie de conditions aux limites, il convient de noter que le déplacement relatif pieu-sol est imposé comme nul au niveau du point du pieu correspondant à la tête de chaque pieu. Cela permet de représenter le contact entre tête de pieux et semelle et d'éviter une interpénétration des deux objets.

2.3 Comportement des matériaux

Par simplicité, la semelle est supposée répondre à un comportement élastique linéaire isotrope, avec un module de Young de $E = 35 \text{ GPa}$, et un coefficient de Poisson de $\nu = 0.2$.

Les pieux en eux-mêmes sont également supposés répondre à un comportement élastique avec un module de 10 GPa correspondant à la rigidité moyenne d'un bois sec et sain. Le coefficient de Poisson n'a pas d'influence sur le comportement des pieux du fait du choix de modélisation barre 1D.

La loi de contact sol-pieu linéaire est supposée homogène tout le long du pieu par simplification. Elle répond à un coefficient d'interaction linéaire traduisant la rigidité de l'interface : $CI = 5 \text{ MN/m/m}$ et une force linéique maximale d'interaction de $IMAX = 100 \text{ kN/m}$. La rigidité CI choisie correspond à un sol mou d'un module de Menard $E_m = 0.7$. Celle-ci est cohérente avec la règle de calcul de rigidité de l'interface de Frank et Zhao (Frank 1985)

rapportée au périmètre du pieu. De même, la limite d'interaction sol-pieux $IMAX$ correspond à une résistance d'interface sol-pieu de $q_s = 80kPa$ rapportée au périmètre du pieu.

Le comportement des sols est représenté par un modèle de comportement H1 (El-Arja and al. 2013). Ce modèle se caractérise par un comportement plastique déviatorique et un écrouissage isotrope. Il a la particularité d'adopter une élasticité linéaire et un large domaine plastique permettant de reproduire fidèlement le comportement du sol. Les paramètres pour les deux de sols sont sélectionnés pour correspondre à un comportement de sol mou et un comportement de sol relativement raide :

Sol1 :

- Module de Young $E = 2.5MPa$
- Coefficient de poisson $\nu = 0.3$
- Coefficient de terre au repos $K_0 = 0.5$
- Cohésion $C = 15kPa$
- Angle de frottement critique $\varphi_c = 17^\circ$
- Angle de frottement ultime $\varphi_c = 22^\circ$
- Coefficient de la loi d'écrouissage $b = 0.005$
- Coefficient de la loi d'écoulement $\alpha_0 = 1$

Sol2 :

- Module de Young $E = 50MPa$
- Coefficient de poisson $\nu = 0.3$
- Coefficient de terre au repos $K_0 = 0.5$
- Cohésion $C = 50kPa$
- Angle de frottement critique $\varphi_c = 27^\circ$
- Angle de frottement ultime $\varphi_c = 30^\circ$
- Coefficient de la loi d'écrouissage $b = 0.005$
- Coefficient de la loi d'écoulement $\alpha_0 = 1$

2.4 Modélisation de la dégradation des pieux

Deux hypothèses ont été formulées pour modéliser la dégradation de pieux en bois. D'une part la dégradation des conditions d'interface. D'autre part la dégradation des propriétés mécaniques des pieux. Pour la première hypothèse, le coefficient d'interaction est réduit à 0, traduisant la dégradation périphérique du bois et donc une perte de contact mécanique entre le sol et le pieu. Dans la seconde hypothèse, la rigidité linéique de l'élément 1D est affectée. Celle-ci peut être définie comme le produit de la section du pieu par la rigidité du matériau. L'expérience a montré que dégrader le paramètre correspondant à la rigidité du matériau ou à la section conduisait aux mêmes résultats. Dans la pratique, un coefficient α est appliqué sur le paramètre de rigidité. Cette hypothèse correspond à une dégradation du pieu dans la masse (ramollissement du bois) ou à une réduction de sa section

(ou une dégradation conjointe de ces deux paramètres).

En application, la dégradation du système est testée en comparant le comportement du système sain et du système dégradé. Pour un certain niveau de dégradations, un modèle de base avec les propriétés initiales est chargé jusqu'à la charge maximale définie. Un second modèle est créé avec les paramètres dégradés et également chargé jusqu'à la charge maximale. Les différents états peuvent alors être comparés.

3 RESULTATS DE LA MODELISATION

3.1 Comportement de la fondation mixte

Le comportement de la fondation mixte dans son état non-dégradé est cohérent avec la construction du modèle. La courbe charge-tassement (Figure 3) montre un tassement quasi linéaire entre 0 et 0.4 MPa puis un comportement pseudo-plastique. On peut déterminer une charge de rupture à une pression de 0.93 MPa pour un tassement conventionnel de 0.1B.

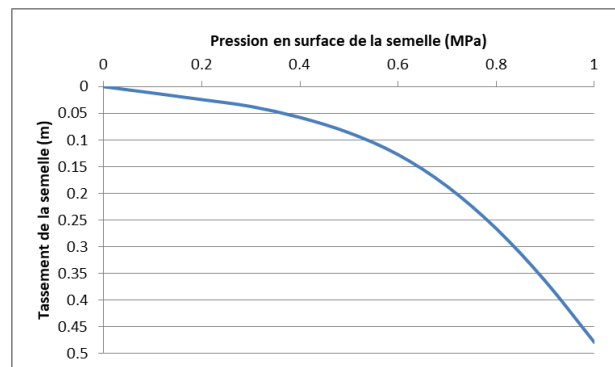


Figure 3: Courbe de tassement de la semelle

L'observation des contraintes sous la semelle montre clairement que les forces sont essentiellement concentrées vers les têtes de pieux. Le contraste de rigidité étant largement en faveur de ceux-ci, la quasi-intégralité des forces appliquées en surface sont reprises par les pieux.

A mi-charge (pression 0.5 MPa sur la semelle), on observe la répartition de charge dans les pieux en fonction de la profondeur comme représentée en (Figure 4). Ce graphique montre clairement un fonctionnement en pointe des pieux. Les efforts repris par les pieux diminuent principalement dans la section basse de ceux-ci. Ce phénomène était prévisible vu la géologie représentée. On observe également une différence de comportement entre les pieux centraux et les pieux en bordure du groupe de pieux. Ceux en bordure reprenant davantage de charge que les pieux

centraux à cause du comportement rigide de la semelle.

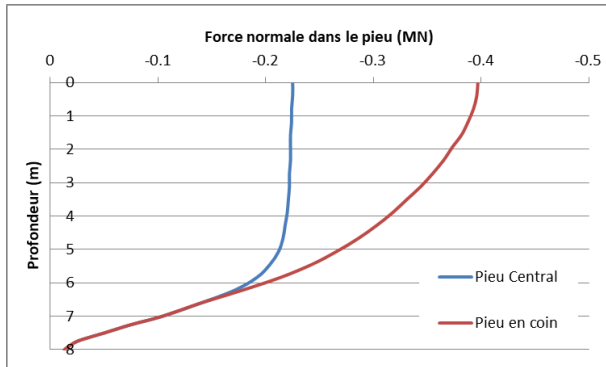


Figure 4: Force dans les pieux en fonction de la profondeur

3.2 Dégradation des propriétés interface

On choisit de tester dans cette section la dégradation de propriété d'interface. On compare alors cinq dégradés à un cas sain. Dans les cas dégradés, le coefficient d'interaction pieux-sol est réduit à 0, pour la section supérieure, puis pour deux sections, et cela jusqu'à cinq sections.

La différence de comportement entre un cas sain et un des cas dégradés est imperceptible. Dans le cas à 5 sections dégradées, la différence de tassement est de 2 mm pour la charge maximale appliquée de 1MPa.

La dégradation est perceptible sur les courbes de force dans le pieu en fonction de la profondeur (Figure 5). Ce type de dégradation contribue à réduire légèrement la part de la charge totale reprise par les pieux, en particulier sur les pieux en bordure.

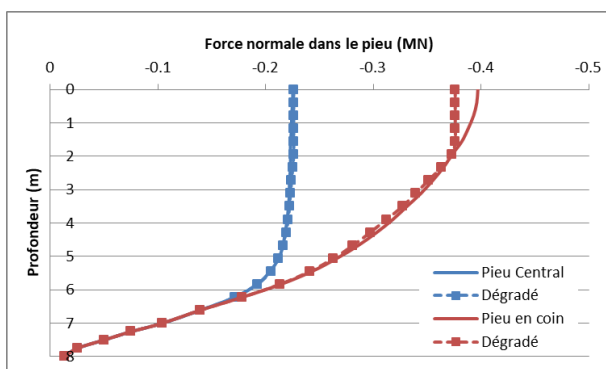


Figure 5: Comparaisons des cas sains et dégradés de la force normale dans les pieux

On peut expliquer le comportement quasi identique du système dégradé par rapport au système sain par le fonctionnement en pointe des pieux du groupe. La réduction de la charge transmise au sol sur les cinq premières sections n'est donc pas un facteur déterminant du comportement de la fondation.

3.3 Dégradation de la rigidité de la tête

Dans ce second cas, on s'intéresse à la dégradation de la rigidité de la première section du pieux, soit environ 40 cm de la tête de pieux. Différents taux de dégradation de 90% à 100% sont appliqués. Les courbes de charge-déplacement pour l'ensemble des modèles sont présentées sur la Figure 6.

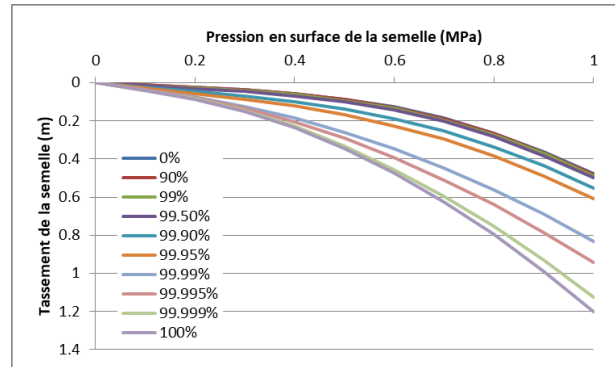


Figure 6: Courbe charge-déplacement pour différent taux de dégradation

Il convient de noter avant l'analyse que les déplacements calculés sont très importants, à forte charge et forte dégradation, et peuvent ne pas être représentatifs d'un comportement observable puisqu'ils sont largement au-delà de la ruine de l'ouvrage. Néanmoins les tendances de comportements calculés peuvent renseigner sur les grandes tendances de comportement de ce type de système.

Ces courbes montrent que la dégradation de la tête des pieux permet de mettre en évidence un changement de comportement sensible, mais seulement pour des taux de dégradations très élevés. Pour un taux de dégradations de 90%, la variation de tassement à 1 MPa n'est que de 1mm, et 1 cm pour une dégradation de 99%. Le tassement advient à doubler pour une dégradation de 99,99 %.

Il est également intéressant de noter que l'augmentation de tassement dépend largement du niveau de contrainte appliqué au système. La Figure 7 montre la variation du tassement en fonction du ratio entre la rigidité initiale et la rigidité résiduelle. La même courbe est tracée pour différents niveaux de chargement par rapport au niveau de charge de rupture déterminé en section 3.1. Plus la charge initiale est importante, plus la variation de tassement est importante, passant de +10 cm à +39 cm entre des charges correspondant à 30% et 70% de la charge de rupture. Cependant, ces valeurs correspondent respectivement à des ratios de 4,0 et de 3,5 par rapport au tassement initial au même niveau de charge. Proportionnellement, l'effet de la dégradation est le plus fort pour une charge de 30% de la charge de rupture.

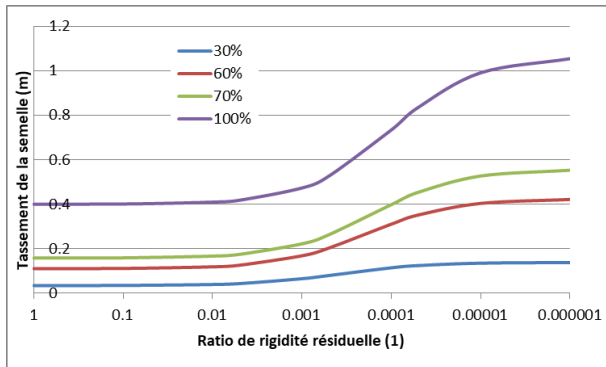


Figure 7: Variation du tassement selon de ratio de rigidité

On note que toutes les courbes montrent une tendance similaire. Une faible variation du comportement en dessous de 99% de dégradation, puis un comportement qui tend vers une asymptote lorsque la rigidité résiduelle tend vers 0 %. Il est intéressant de noter que la majeure partie du changement du comportement se produit lorsque le taux de dégradation est compris entre 99,9% et 99,995% et donc lorsque la rigidité résiduelle du bois est comprise entre 10 MPa et 0.5 MPa, soit dans le même ordre de grandeur que la rigidité du sol.

Enfin ces courbes permettent de déterminer des taux de dégradations critiques à différents niveaux de chargement. Par exemple, pour 30% de chargement, le tassement plafonne à 13,7 cm soit largement en dessous du tassement de 0,1B définissant conventionnellement la rupture de la fondation. De même, pour des charges de 60% et 70% de la charge de rupture initiale, le tassement de rupture est atteint pour des dégradations de 99,999% et 99,99% respectivement.

En ce qui concerne les forces normales dans les pieux. Celles-ci sont également largement affectées par le niveau de dégradation. Les Figure 8 et Figure 9 montrent la force normale dans le pieu central et dans un pieu en coin, respectivement, en fonction de la profondeur et en fonction du niveau de dégradation. On constate que, comme pour le tassement, l'effet de la dégradation n'est sensible qu'à partir d'un niveau de très important. Dès que l'effet est sensible, on constate que la force transmise aux pieux au niveau de leurs têtes réduit nettement, ce qui traduit un changement de répartition de charge entre les pieux et le sol.

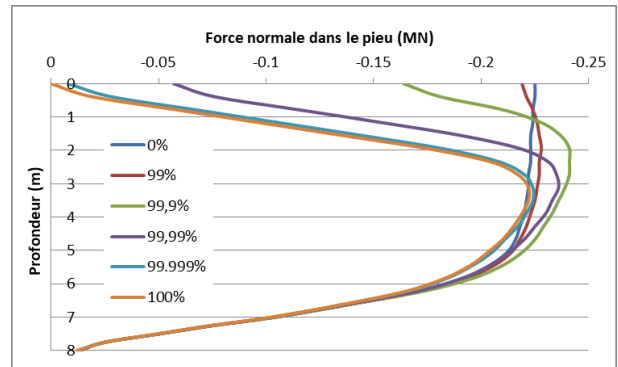


Figure 8: Force normale dans le pieu central en fonction du niveau de dégradation

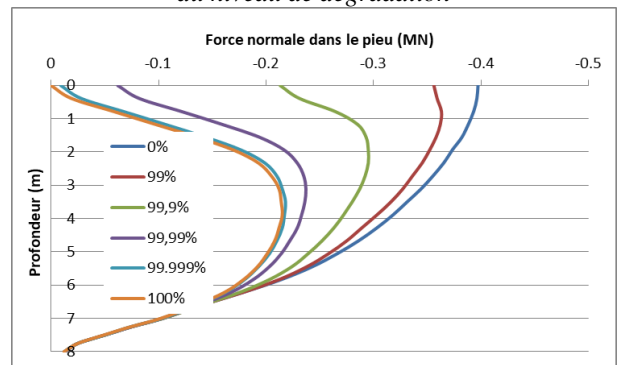


Figure 9: Force normale dans le pieu en coin en fonction du niveau de dégradation

Les courbes montrent également une inversion de pente en partie supérieure, ce qui traduit un fonctionnement en frottement négatif. Ce phénomène est logique vis-à-vis de la modification du mécanisme de transmission des charges entre les pieux et la semelle. L'augmentation de la part de charge directement transmise au sol conduit à un tassement du sol entre les pieux, notamment dans la partie restée saine, et provoque donc le frottement négatif. Ce phénomène conduit à une augmentation de la force normale maximale dans les pieux centraux pour certains niveaux de dégradation. Cela compense partiellement la diminution de charge dans les pieux extérieurs. Il est également intéressant de noter qu'aux plus hauts niveaux de dégradation, le niveau de charge est homogène dans l'ensemble des pieux. On peut expliquer ce phénomène car l'apparition d'une couche meuble entre pieux et semelle crée un matelas de répartition des charges. On peut donc rapprocher ce type de fonctionnement d'un système d'inclusion rigide (ASIRI, 2012).

3.4 Autres cas de dégradation

On s'intéresse à un troisième cas de dégradation où la rigidité du bois est dégradée sur 3 ou 5 sections afin d'observer la dépendance du comportement à la longueur de pieux affectés par la dégradation. Les courbes charge-déplacement présentées sur la Figure

10. Les courbes obtenues montrent que la variation de tassement est également influencée par la part des pieux qui est affectée par la dégradation dans un ordre de grandeur similaire à celle déjà observée pour une section. Cependant, la variation de tassement entre l'état sain et l'état dégradé n'est pas proportionnelle à la longueur de pieux qui est affectée.

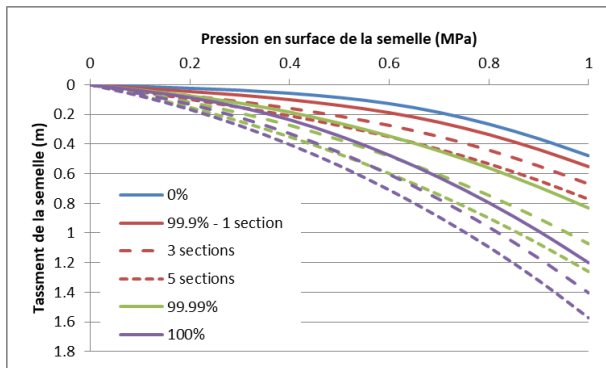


Figure 10: Courbes charge-déplacement en fonction du nombre de sections affectée par la dégradation

Les résultats de ces modélisations ne montrent pas de variation de la typologie du comportement par rapport aux cas étudiés en section 3.3.

En ce qui concerne la variation de tassement entre l'état sain et l'état dégradé, les observations effectuées sur la Figure 7 sont également valables pour les cas modélisés ici, seule l'amplitude de la variation change, passant de 4,0 à 5,9 et 7,3 pour les cas où 3 et 5 sections sont affectées.

En ce qui concerne la répartition des forces dans les pieux, les courbes obtenues montrent (comme pour les Figure 8 et Figure 9) le développement d'un fonctionnement type inclusion rigide et de phénomènes de frottement négatif.

Un dernier cas étudié correspond au cas d'une double dégradation, où la dégradation des pieux affecte simultanément la rigidité de l'interface sol-pieu et la rigidité du pieu. La Figure 11 montre la comparaison de ce cas au cas de la section 3.3 pour différents niveaux de dégradation.

Dans ce cas et comme pour les cas étudiés en section 3.2, l'effet de la dégradation de l'interface est minime. L'augmentation de tassement maximum par rapport au cas où la rigidité seule est dégradée est de 4,2 cm pour le cas d'une dégradation de rigidité de 99,999% et pour la charge maximale, soit 3,8% d'augmentation. L'augmentation relative maximale atteint 10,1%. Elle est calculée pour une charge de 30% et une dégradation de rigidité du bois de 99,999%. Il est intéressant de noter que pour une dégradation de rigidité de 100%, la dégradation de la rigidité de l'interface n'a aucune influence sur le tassement.

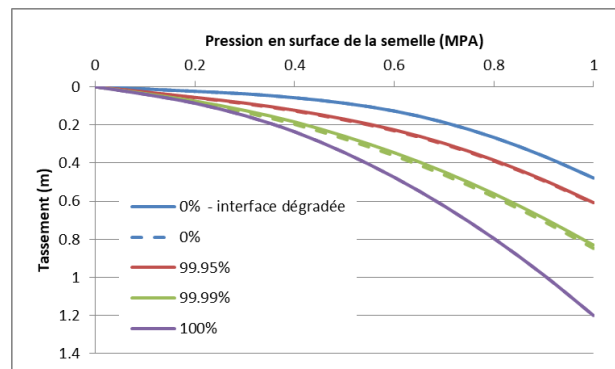


Figure 11: Comparaison de tassement des cas « rigidité dégradé » et « double dégradation »

4 CONCLUSION

Les fondations sur pieux en bois sont des méthodes de fondation historiques sur lesquelles repose une part importante du patrimoine historique bâti, dont des ponts historiques du réseau ferré et routier français. Bien que faisant preuve d'une grande longévité, ces fondations sont menacées par la dégradation du bois permise par les changements de condition hydrique des sols dus aux épisodes climatiques extrêmes de plus en plus fréquents ou à l'eutrophisation de leur environnement.

L'étude présentée ici a pour but de comprendre comment représenter cette dégradation dans un modèle numérique par éléments finis, et de comprendre comment cette dégradation affecte le comportement de ces fondations. Dans ce but, le modèle d'un cas type a été réalisé par éléments finis grâce au logiciel CESAR-LCPC dans sa version CESAR pilote afin de faciliter les études paramétriques. Sur la base de ce modèle, différentes hypothèses de dégradation ont été testées, d'une part la dégradation du coefficient d'interface sol-pieu, et d'autre part la dégradation de la rigidité linéique du pieu, et ce sur la tête du pieu ou sur des zones plus étendues en profondeur. Les résultats des différents cas ont été comparés selon les hypothèses et selon le niveau de dégradation imposé au modèle.

Cette étude a permis de montrer que la dégradation de l'interface sol-pieux n'avait pas un apport très important sur la modélisation de la dégradation. Cette hypothèse peut être écartée. La dégradation de la rigidité des pieux, qu'elle soit limitée à la tête du pieu ou plus étendue, permet en revanche d'obtenir de larges changements de comportement. D'une part cela entraîne une forte augmentation du tassement, d'autre part cela modifie le comportement du système et la répartition des contraintes entre sol et pieux et tout au long du pieu. Une dégradation suffisante de la tête du pieu permet l'apparition d'un tassement diffé-

rentiel entre sol et pieux et provoque l'apparition de frottement négatif. Cette modification du comportement peut se rapprocher du comportement d'un système d'inclusion rigide. La dégradation de la tête des pieux conduit à l'apparition d'une couche de sol non renforcée entre la semelle et le groupe de pieux, homogénéisant le transfert des forces vers le pieu à l'instar d'une plateforme de transfert de charge.

Enfin, les modélisations ont permis d'observer que la modification du comportement du système n'apparaît que pour des niveaux de dégradation très importants, au-delà de 99% de diminution de rigidité. Cela peut être interprété en observant la rigidité relative des pieux vis-à-vis du sol. En effet, l'expérience montre que les variations sensibles de comportement et de tassement apparaissent lorsque la rigidité résiduelle des pieux se rapproche de la rigidité du sol. Il doit être noté que les valeurs données ici sont dépendantes du modèle choisi et ne peuvent être généralisées sans une étude systématique de différents cas.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient SNCF Réseau pour son soutien financier aux actions de recherche sur les fondations sur pieux en bois.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASIRI, P. (2012). Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides. *Presses des Ponts*.
- Björdal, C. G., & Elam, J. (2021). Bacterial degradation of nine wooden foundation piles from Gothenburg historic city center and correlation to wood quality, environment, and time in service. *International biodeterioration & biodegradation*, 164, 105288.
- Ceccato, F., Simonini, P., Koppl, C., Schweiger, H. F., & Tschuchnigg, F. (2014). FE Analysis of degradation effects on the wooden foundations in Venice. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 2(2), 27-37.
- Christin, J. (2013). *Système de fondation sur pieux bois: une technique millénaire pour demain* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Elam, J., & Björdal, C. (2020). A review and case studies of factors affecting the stability of wooden foundation piles in urban environments exposed to construction work. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 148, 104913.
- Elam, J., & Björdal, C. G. (2022). Long-term study on wood degradation in urban soil-water systems-implications for service life of historic foundation piles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 167, 105356.
- El-Arja, H., Burlon, S., & Bourgeois, E. (2023). An elastoplastic constitutive model for assessing ground settlements induced by deep excavations. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 45(3).
- Frank, R. (1985). "Recent developments in the prediction of pile behaviour from pressure-meter tests." *From theory to practice on deep foundations*, UFRGS, Porto Alegre, Brazil
- Grinda, M. (1997). Some experiences with attack of microorganisms on wooden constructions supporting foundations of houses and bridges. *Document the International Research Group on Wood Preservation (Sweden)*, (97-10232).
- Klaassen, R. K., & Creemers, J. G. (2012). Wooden foundation piles and its underestimated relevance for cultural heritage. *Journal of cultural heritage*, 13(3), S123-S128.
- Macchioni, N., Pizzo, B., & Capretti, C. (2016). An investigation into preservation of wood from Venice foundations. *Construction and Building Materials*, 111, 652-661.
- Mesqui, J. (1986). *Le pont en France avant le temps des ingénieurs*.
- Ulitskii, V. M. (1995). History of pile foundation engineering. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 32(3), 110-114.
- Reiffsteck, P., Christin, J., Le Kouby, A., & Benoît, J. (2024). Evaluation of timber pile bearing capacity for transportation structures and cultural heritage building foundation retrofitting. *Revue Française de Géotechnique*, (181), 3.