

Le projet collaboratif GEOLAB SAM-WT : une étude expérimentale du comportement de pieux d'ancrage sous chargement complexe

The GEOLAB SAM-WT collaborative project: an experimental study of the behaviour of anchor piles under complex loading conditions

Orianne JENCK^{1*}, Christophe DANO¹, Rami CHALHOUB¹, Alexander KOCHNEV², Joaquín LIAUDAT²,
Christelle N. ABADIE³, Fabien SZYMKIEWICZ⁴, Hauke ZACHERT²

1 3SR, Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS, Grenoble, France

2 Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Geotechnik, Darmstadt, Allemagne

3 Université Gustave Eiffel, Département Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la Terre, sites de Nantes (Bouguenais) et Marne-la-Vallée, France

*orianne.jenck@univ-grenoble-alpes.fr

RESUME : SAM-WT est l'acronyme de « *Shared Anchor under Multidirectional cyclic loading for floating Wind Turbines* ». L'objectif du projet est d'étudier le comportement de pieux en interaction avec le massif de sol dans le contexte applicatif des ancrages pour éoliennes flottantes, plus spécifiquement lorsqu'un même pieu est mutualisé entre plusieurs flotteurs, générant ainsi des conditions de chargement particulièrement complexes. Ce projet vise à contribuer au développement de méthodes de prédiction du comportement des pieux, cruciales pour les conceptions futures et pour l'analyse de l'intérêt technico-économique des ancres mutualisées. Ce projet multipartenaires fait partie des lauréats des projets d'accès transnational de GEOLAB, financés par le programme de recherche et d'innovation H2020 de l'Union Européenne. Il est porté par le laboratoire 3SR de Grenoble et hébergé par l'institut de géotechnique de l'Université Technique de Darmstadt, en Allemagne, où les expérimentations ont été développées et ont été réalisées en 2024, dans une fosse d'essai de 5,44 m × 5,00 m × 3,00 m. Trois essais de chargement latéral, réalisés sur un pieu modèle, ont constitué le cœur de la campagne expérimentale. Le pieu modèle, instrumenté de jauges de déformations sur son fût et de capteurs de déplacement en tête, est un tube en acier ouvert de 325 mm de diamètre extérieur, encastré de 2 m dans un massif de sable dense. Il représente un pieu réel à l'échelle 1:5. Deux éléments particulièrement novateurs ont marqué ce travail expérimental : l'application d'un chargement latéral cyclique multidirectionnel, par un système de deux vérins articulés, et la mesure de déformations au cœur du massif de sol via une instrumentation par de la fibre optique noyée dans le massif de sable. Cette communication résume la genèse et les motivations du projet, la conception du programme d'essais et l'important développement expérimental qui a été réalisé. Elle présente enfin quelques résultats significatifs obtenus à l'issue de l'analyse des mesures expérimentales.

ABSTRACT: SAM-WT stands for 'Shared Anchor under Multidirectional cyclic loading for floating Wind Turbines'. The aim of the project is to study the behaviour of piles interacting with the soil mass in the context of anchors for floating wind turbines, more specifically when a single pile is shared between several floating turbines, thus generating particularly complex loading conditions. This project aims to contribute to the development of methods for predicting pile behaviour, which are crucial for future designs and for analysing the technical and economic benefits of shared anchors. This multi-partner project is one of the winners of GEOLAB's transnational access projects, funded by the European Union's H2020 research and innovation programme. It is supported by the 3SR laboratory in Grenoble and hosted by the Institute of Geotechnics at the Technical University of Darmstadt, Germany, where the experiments were developed and carried out in 2024 in a 5.44 m × 5.00 m × 3.00 m test pit. Three lateral loading tests, carried out on a model pile, formed the core of the experimental campaign. The model pile, equipped with strain gauges on its shaft and displacement sensors at the head, is an open steel tube with an outer diameter of 325 mm, embedded 2 m into a dense sand mass. It represents a real pile on a scale of 1:5. Two particularly innovative elements characterised this experimental work: the application of multidirectional lateral cyclic loading using a system of two articulated jacks, and the measurement of deformations at the heart of the soil mass using

fiber optic instrumentation embedded in the sand mass. This paper summarises the genesis and motivations behind the project, the design of the test programme and the significant experimental development that was carried out. It finally presents some significant results obtained from the analysis of the experimental measurements.

Mots-clés : pieu d’ancrage ; modèle physique ; chargement cyclique ; chargement multidirectionnel ; éolienne offshore ; projet collaboratif.

1 INTRODUCTION

Les éoliennes offshore flottantes (Figure 1) sont une solution intéressante pour répondre au besoin sociétal et environnemental de décarbonation de l’énergie. En France, l’essor de ces technologies est encore restreint par des problématiques de coûts importants. Les éoliennes flottantes rendent possible l’exploitation de l’énergie éolienne plus loin des côtes, mais où les profondeurs plus importantes ne permettent pas d’ancrage traditionnel au fond marin par structure fixe, ce qui rend les solutions d’ancrage ou d’amarrage plus difficiles.



Figure 1. Floatgen, la première éolienne flottante française (2MW) installée en 2018 au large du Croisic. Crédit photo : O. Jenck.

Les flotteurs qui supportent la superstructure de l’éolienne sont fixés au fond marin par des lignes caténaires et des fondations, qui peuvent être des ancres, des caissons à succion ou des pieux (CFMS, 2024). Ces fondations sont soumises à des chargements complexes, dus à l’action combinée du vent et de la houle. Ce projet concerne plus spécifiquement les pieux d’ancrage dans un fond marin sableux.

De plus, afin d’optimiser les fondations et donc les coûts, la solution de systèmes de fondations par ancrages mutualisés pour les fermes d’éoliennes flottantes est à l’étude (France Energies Marines, 2019 ; Abadie, 2025). Dans ce cas, les pieux d’ancrage sont connectés, via des câbles, à 2 ou 3 turbines adjacentes, impliquant des chargements déphasés, variables dans le temps, (Figure 2). La prédiction du comportement des ouvrages nécessite ainsi la prise en compte du comportement de ces pieux, en interaction avec le sol

environnant, sous sollicitations cycliques et dont la direction et l’amplitude de chargement varient au cours des cycles, principalement dans la direction horizontale pour le cas des ancres mutualisées (ancrages par lignes caténaires dû à l’éloignement nécessaire entre les turbines).

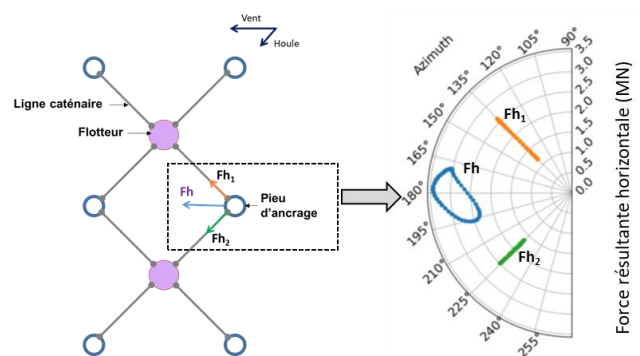


Figure 2. Pieu d’ancrage mutualisé entre deux flotteurs et chargement latéral résultant, cas d’étude France Energies Marines (2019).

A ce jour, des méthodes de dimensionnement et des modèles numériques existent concernant le comportement des pieux lorsqu’ils sont soumis à des charges cycliques latérales ou axiales unidirectionnelles, comme synthétisées et/ou développées lors du projet SOLCYP (Puech et Garnier, 2017). Le comportement sous chargement latéral des fondations d’éolienne offshore de type monopieu a aussi été largement étudié (Burd *et al.*, 2020). Il s’agit à présent de mettre en évidence et de quantifier l’effet de la variation de direction du chargement au cours des cycles, pour des pieux dont la rigidité relative avec le sol est plus faible (plus souple) que pour les monopieux des éoliennes offshore, mais plus importante (plus rigide) que pour les pieux généralement utilisés pour les structures offshore pétrolières, objets des recommandations issues des organismes API ou DNV. La problématique a d’abord été abordée par approche numérique (Jenck *et al.*, 2021 ; Chalhoub *et al.*, 2023), avec comme point de départ un cas d’étude proposé par France Energies Marines (cf. Figure 2). Cependant, l’absence d’études expérimentales existantes sur cette thématique de pieux sous chargement latéral cyclique et multidirectionnel, nécessaire pour développer et valider toute approche de modélisation numérique, nous a amenés à proposer une campagne expérimentale spécialement

conçue pour répondre à ce besoin et, plus généralement, pour contribuer à une meilleure compréhension du comportement du système.

2 LE PROJET GEOLAB SAM-WT

L'infrastructure de recherche GEOLAB fédère 11 installations expérimentales uniques en Europe, dédiées à l'étude du comportement du sous-sol, son interaction avec des éléments d'infrastructures critiques et l'environnement (<https://elgip.org/geolab/>). Le projet GEOLAB, d'une durée de 4 ans (2021-2025), est financé par le programme de recherche et d'innovation H2020 de l'Union Européenne. L'objectif général est de permettre à la communauté géotechnique européenne utilisant ces infrastructures de recherche nationales clés de mener des activités de recherche et d'innovation afin de relever les défis auxquels sont confrontées les infrastructures critiques en Europe.

Une proposition portée par le Laboratoire 3SR de Grenoble, en collaboration avec l'Université Gustave Eiffel et en concertation avec l'institut hôte visé, a ainsi été déposée lors du 2^{ème} appel à projets transnationaux en 2022 (projet SAM-WT, Jenck *et al.*, 2022), afin d'avoir accès aux installations et à l'environnement scientifique et technique de l'Institut de Géotechnique de l'Université Technique de Darmstadt (TUDa), en Allemagne.

Bien que non exempts de biais liés aux effets d'échelle, les essais en laboratoire sous gravité normale (1g) à l'échelle intermédiaire, comme cela est faisable avec les installations de la TUDa, est un bon compromis entre les essais *in situ* et/ou à l'échelle réelle et des essais à l'échelle réduite en centrifugeuse, afin de mener une étude exploratoire pour comprendre les paramètres clés impliqués dans la réponse de la géostructure et pour collecter des données expérimentales pertinentes et fiables, pour développer des approches numériques.

L'institut est équipé d'une fosse dans une halle couverte adaptée et équipée pour la tenue d'essais sur des pieux instrumentés en interaction avec un massif de sol (en particulier dans du sable de Darmstadt, calibré et disponible en grande quantité), à une échelle intermédiaire. De plus, l'institut possédait déjà un pieu instrumenté consistant en un tube ouvert en acier de 325 mm de diamètre extérieur, de 5,25 mm d'épaisseur et de 3 m de longueur. Il peut donc représenter un pieu de 1,6 m de diamètre et jusqu'à 15 m de longueur à l'échelle prototype, en considérant un facteur d'échelle sur les longueurs de 1:5, soit un pieu de caractéristiques et de dimensions très proches de notre cadre d'étude initial et du contexte général recherché.

La réalisation de notre projet a cependant nécessité des développements expérimentaux spécifiques importants pour l'application d'un chargement latéral multidirectionnel (système bi-vérins et connexion au pieu). Il a aussi nécessité de l'instrumentation originale par rapport aux standards habituels, de par la nature du chemin de chargement multidirectionnel (mesures sur le pieu et à sa tête dans plusieurs directions) et la volonté d'obtenir des mesures dans massif de sol lors du chargement (mesure de déformations d'une fibre optique), comme détaillé dans la section suivante.

Le projet SAM-WT (*Shared Anchor under Multi-directional cyclic loading for floating Wind Turbines*) a été sélectionné par le comité d'experts de GEOLAB en 2023, pour la réalisation des essais en 2023-2024. Le cœur de la campagne a consisté en la réalisation de trois essais de chargement latéral du pieu installé dans un massif de sable :

- Un essai sous chargement latéral monotone pour notamment estimer la capacité latérale du pieu (notée H_f), suivi d'une décharge : Test 0,
- Un essai sous chargement latéral cyclique unidirectionnel, qui a comporté un total de 13 000 cycles à une fréquence de 0,125 Hz : Test 1,
- Un essai sous chargement latéral cyclique multidirectionnel, avec les mêmes amplitudes, fréquence de chargement et nombre de cycles que lors du Test 1, mais une orientation de la charge latérale qui varie dans le plan horizontal au cours de chaque cycle : Test 2.

La comparaison des essais Test 1 et Test 2 permet l'évaluation de l'impact d'un chargement de direction variable sur la réponse du système, notamment en termes d'accumulation de déplacement en tête de pieu, un des points d'attention lors du dimensionnement.

La préparation et les développements expérimentaux nécessaires à la réalisation de ces travaux expérimentaux ont nécessité plusieurs mois et ont mobilisé des ressources - scientifiques, techniques, matérielles et humaines - de la part de tous les acteurs du projet. Les essais ont été réalisés avec succès entre mai et juin 2024 et leur analyse détaillée est toujours en cours.

3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET ESSAIS REALISES

3.1 Dispositif dans la fosse de la TUDa

La Figure 3 donne une vue schématique synthétique du dispositif expérimental : le pieu instrumenté est installé dans 2 m de sable de Darmstadt sec et dense, mis en place par couches successives compactées autour du pieu (cf. Figure 4), dans un compartiment de la fosse d'essai de la TUDa. Le sable de Darmstadt est un sable siliceux d'origine fluviatile, sub-angulaire, de

diamètre moyen $d_{50} = 0,48$ mm, de coefficient d'uniformité $C_u \approx 2,4$. Il a par ailleurs fait l'objet d'une caractérisation mécanique détaillée (Liaudat *et al.*, 2024). Les caractéristiques et l'homogénéité du massif en place ont été évaluées par une série de 7 essais CPT effectués préalablement au chargement du Test 0, qui ont montré une très bonne répétabilité, une variabilité liée à la stratification horizontale des couches et une résistance de pointe de 25 MPa à 2 m de profondeur, caractéristique d'un sable dense. Un chargement latéral en tête est appliqué à une distance de 0,58 m au-dessus de la surface du massif. Le protocole expérimental complet est détaillé par Chalhoub *et al.* (2024).

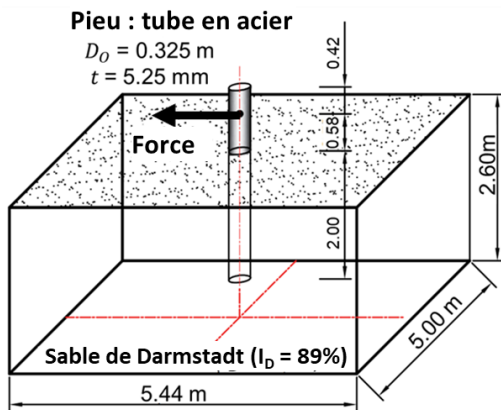


Figure 3. Vue schématique du dispositif expérimental de la TUDa, d'après Kochnev *et al.* (2025).



Figure 4. Photographie d'un essai en cours de préparation : remplissage et compactage du massif de sable autour du pieu.

L'utilisation d'un massif de sable sec, par rapport à un fond marin théoriquement saturé, est justifiée par la fréquence relativement faible du chargement cyclique (0,125 Hz), correspondant à une fréquence de chargement de type houle (pas d'effets dynamiques, ce qui n'est pas prépondérant pour un amarrage *via* des lignes caténaïres). Le comportement du sol sableux autour du pieu est ainsi supposé drainé, piloté par les caractéristiques du squelette solide du sable.

Pour les tests 0 et 1 (chargement unidirectionnel), un vérin de capacité 500 kN est connecté au pieu *via*

une pièce rotulée placée à l'intérieur du pieu et qui s'appuie sur un cadre de réaction sur un des côtés de la fosse. Le chargement est appliqué en traction.

L'essai sous chargement multidirectionnel a nécessité le développement d'un système à deux vérins (500 et 100 kN), placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre et s'appuyant sur des cadres de réaction en bord de fosse *via* une liaison pivot, comme on le voit sur la photographie de la Figure 5. En raison de leur poids, les vérins reposent à mi-longueur sur une plaque horizontale *via* des roulettes. La Figure 6 montre le système articulé placé à l'intérieur du pieu pour fixer les tiges des vérins au pieu. Un tel système a ainsi permis un déplacement libre de la tête du pieu dans le plan horizontal, étant donné qu'un désalignement entre force appliquée et déplacement était prévisible sous chargement multidirectionnel.



Figure 5. Photographie du dispositif expérimental pour la réalisation du Test 2.



Figure 6. Système articulé à l'intérieur du pieu (gauche) pour fixation des deux vérins en tête du pieu (droite) pour le Test 2.

3.2 Chargements appliqués

Une partie importante du travail de préparation de la campagne expérimentale a consisté en la définition du chargement cyclique à appliquer dans les essais (niveaux de chargement et nombre de cycles), d'autant plus que le nombre d'essais de cette campagne était limité. Le premier essai de chargement latéral monotone (Test 0) a permis de déterminer la capacité latérale du pieu dans le massif de sable (H_f), afin de fixer par la suite les valeurs du niveau moyen du chargement cyclique H_m/H_f avec $H_m = (H_{\max} + H_{\min})/2$ et l'amplitude des cycles H_c/H_f avec $H_c = (H_{\max} - H_{\min})/2$. H_f a été fixée comme la force pour un déplacement horizontal de $0,1 D_0$ au niveau du point de chargement. Une valeur de 55 kN a été obtenue lors du Test 0.

Les essais cycliques (Tests 1 et 2) ont consisté en l'application d'un premier paquet de 10 000 cycles à

$H_m = 0,2 H_f$ et $H_c = 0,1 H_f$, suivi d'un deuxième paquet de 3000 cycles d'amplitude plus importante $H_m = 0,5 H_f$ et $H_c = 0,2 H_f$ (Figure 7). L'application d'un paquet 1 puis d'un paquet 2 visait à observer dans un premier temps le comportement du pieu dans un domaine supposé stable (paquet 1), suivi d'un chargement cyclique dans un domaine potentiellement métastable, voire instable, pour lequel une accumulation importante et croissante des déplacements pourrait être obtenue, sans atténuation au cours des cycles (paquet 2). Même sous chargement latéral unidirectionnel, ce type de diagramme d'interaction n'existe pas pour des pieux dans du sable, nous nous sommes donc basés sur le comportement observé et documenté d'un pieu dans de l'argile (Puech et Garnier, 2017) pour ces choix d'amplitudes de chargement et la potentielle frontière entre domaines stable, métastable et instable.

Le chargement cyclique a été appliqué suivant un signal sinusoïdal à une fréquence de 0,125 Hz. En plus de reproduire une fréquence de chargement de type houle, cela a permis l'acquisition de données d'instrumentation au cours de chaque cycle.

Lors de l'essai sous chargement cyclique multidirectionnel (Test 2), la force dans le vérin de capacité 100 kN (H_y) a été maintenue constante ($H_y = 3,76$ kN pour le paquet 1 et $H_y = 12,42$ kN pour le paquet 2), alors qu'un chargement sinusoïdal était appliqué dans le vérin de capacité 500 kN (H_x entre 4,01 et 16,07 kN pour le paquet 1 et H_x entre 10,86 et 36,44 kN pour le paquet 2) (Figure 8), tel que la force latérale résultante H variait d'un angle de 30° dans le plan horizontal (Figure 9), avec les mêmes valeurs de H_{min} et H_{max} que pour le Test 1.

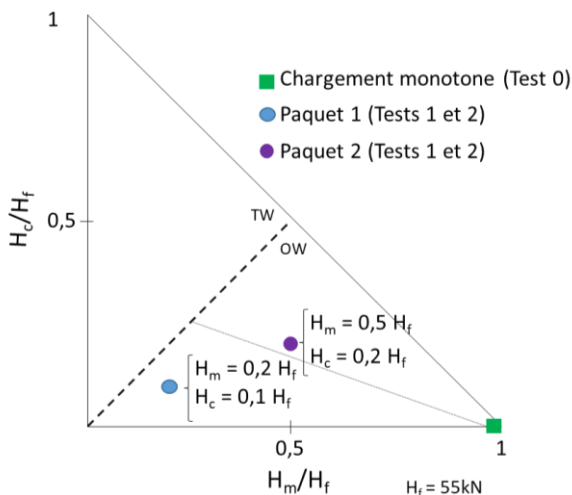


Figure 7. Amplitudes des chargements cycliques dans un diagramme dit « de stabilité ».

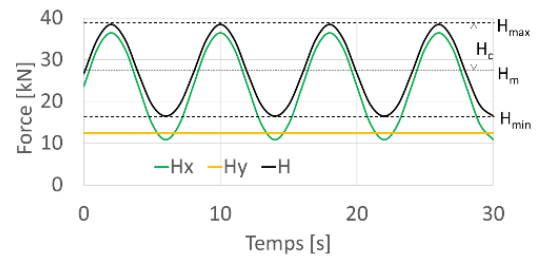


Figure 8. Chargement latéral cyclique multidirectionnel (extrait au cours de 30 s du paquet 2, fréquence 0,125 Hz).

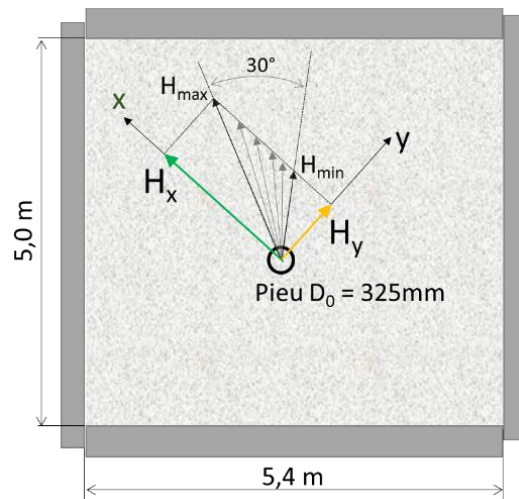


Figure 9. Vue en plan schématique du chargement latéral multidirectionnel appliqué en tête du pieu.

3.3 Instrumentation du dispositif

Le pieu est instrumenté avec des jauges de déformations (32 au total) suivant 4 profils verticaux le long de la surface extérieure du pieu et d'un système de mesure de la cinématique de la tête du pieu (au niveau du point de chargement) afin d'obtenir ses déplacements et rotations dans les trois directions de l'espace (système de mesures qui comprend 9 capteurs de déplacement LVDT) (Figure 10). L'analyse et l'interprétation des données issues de cette instrumentation visent à obtenir la déformée et le déplacement du pieu, la répartition de la pression horizontale et les contraintes sur et dans le pieu, ainsi que leur évolution au cours des cycles.

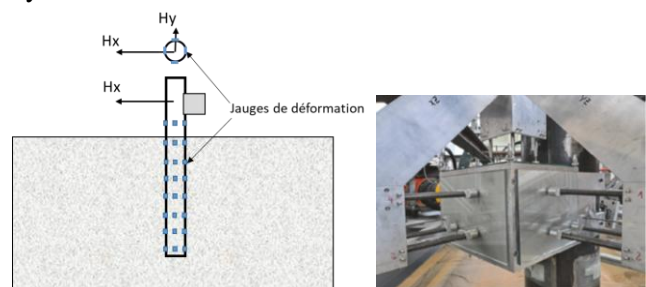


Figure 10. Instrumentation du pieu : jauges de déformations (gauche) et LVDT en tête du pieu (droite).

En complément de l'instrumentation « standard » pour ce type d'essai, une instrumentation par fibre optique continue (technologie Rayleigh) a été mise en œuvre pour obtenir des informations sur le champ de déplacements dans le massif de sol. Ce type de mesure noyée dans le massif de sol n'est pas courant dans les modèles réduits et est une véritable valeur ajoutée à ce projet. En particulier, les résultats pourront être confrontés aux résultats de modélisation, afin de ne pas se limiter aux seules mesures sur le pieu. Afin de l'optimiser, le plan d'implantation de la fibre a fait l'objet d'une étude préalable, supportée par une modélisation numérique simplifiée (Figure 11, Chalhoub *et al.*, 2026) et en fonction des caractéristiques techniques du système de mesure (gamme de mesures de déformation, précision, résolution). Pour chaque essai, une fibre unique de 80 m de longueur a été positionnée sur trois plans à différentes profondeurs, suivant des cercles concentriques à différentes distances du pieu (Figure 11). La fibre a été positionnée à l'aide de gabarits. Les fibres optiques permettent d'obtenir des mesures continues de déformation suivant leur axe (ici des déformations ortho-radiales), qu'il sera nécessaire de traiter afin d'obtenir des informations complémentaires sur le champ de déplacements.

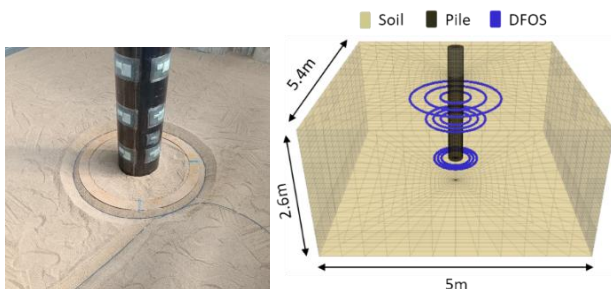


Figure 11. Fibre optique : installation autour du pieu (gauche) et modèle numérique (droite).

4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Cette section vise à illustrer les résultats qui ont été obtenus lors de cette campagne et à mettre en évidence quelques éléments marquants, bien que l'exploitation et l'analyse ne soient pas encore achevées. Par ailleurs, tous les résultats bruts ont été exportés sur la plateforme Zenodo, accompagnés de toute la documentation nécessaire (Chalhoub *et al.*, 2024), comme c'est la règle pour les projets européens. Des premiers résultats analysés ont été publiés et présentés lors de conférences (Kochnev *et al.*, 2025 ; Chalhoub *et al.*, 2025a et b).

La Figure 12 montre l'accumulation des déplacements dans le plan horizontal mesurés en tête du pieu (au point de chargement) lors du paquet 2 de cycles. Elle met en évidence une accumulation des déplace-

ments plus importante pour le chargement multidirectionnel par rapport au cas unidirectionnel, illustrant le caractère plus agressif d'une sollicitation dont la direction change. Cependant, ce paquet 2 de 3 000 cycles n'a pas entraîné un comportement que l'on pourrait qualifier d'instable, dans le sens où l'accumulation des déplacements tend à se stabiliser au cours des cycles, plutôt qu'à augmenter rapidement jusqu'à la rupture.

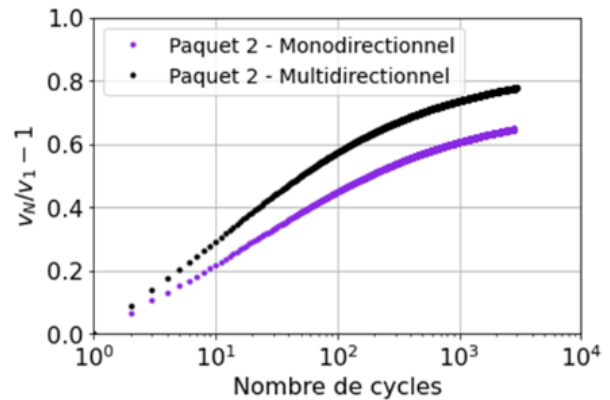


Figure 12. Accumulation des déplacements en tête du pieu lors du paquet 2 de cycles. v_1 est le déplacement horizontal au pic du premier cycle et v_N , au pic du cycle N .

La Figure 13, relative au cas du chargement multidirectionnel (Test 2), montre une accumulation des déplacements horizontaux même dans la direction de la composante de la force qui reste constante (suivant y). Le désalignement entre la direction du chargement et le déplacement du pieu avait déjà été observé pour un chargement latéral multidirectionnel par modélisation analytique dans une roche tendre, sans cycles (Lovera *et al.*, 2021), par modélisation numérique sous chargement cyclique mais avec un modèle de comportement relativement simple pour le sol (Jenck *et al.*, 2021) et plus récemment par des essais en centrifugeuse sous chargement cyclique (Zabatta *et al.*, 2025). Cette Figure 13 montre aussi que l'accumulation des déplacements lors du paquet 1 de cycles est très faible par rapport à celle mesurée lors du paquet 2.

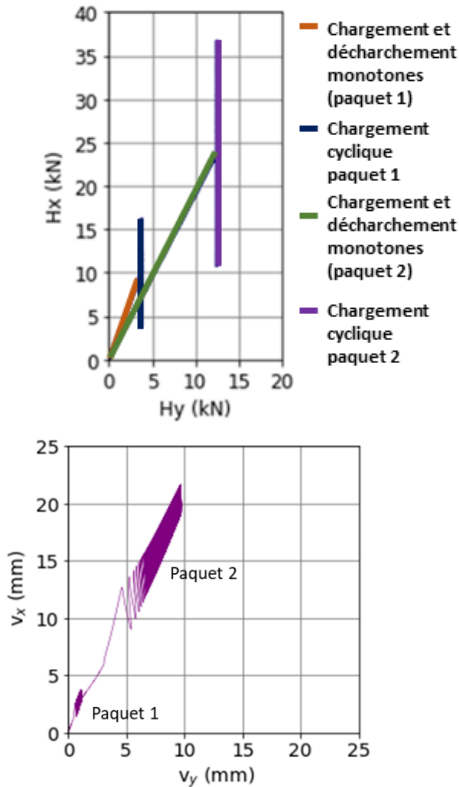


Figure 13. Chargement latéral appliqué en tête du pieu (haut) et déplacements horizontaux mesurés (bas), Test 2.

Concernant les résultats de l'instrumentation par fibre optique noyée dans le sol, à ce jour, seuls les résultats de l'essai sous chargement monotone ont été analysés (Chalhoub *et al.*, 2025b), posant les bases méthodologiques et ouvrant la voie à l'analyse plus complexe à venir sur les chargement cycliques et multidirectionnels. La Figure 14 est un extrait des résultats sous chargement monotone, à deux étapes du chargement (à $0,36 H_f$ et $0,73 H_f$), mesurés dans deux cercles (de diamètre 1,3 m pour le cercle à 0,6 m de profondeur et de diamètre 0,65 m pour le cercle à 1,8 m de profondeur) placés à deux profondeurs différentes. La mise en tension progressive de la fibre à l'avant du pieu à $z = -0,6$ m et à l'arrière du pieu au niveau de son pied ($z = -1,8$ m) reflète un comportement en rotation du pieu, tel qu'illustré sur la figure 14.

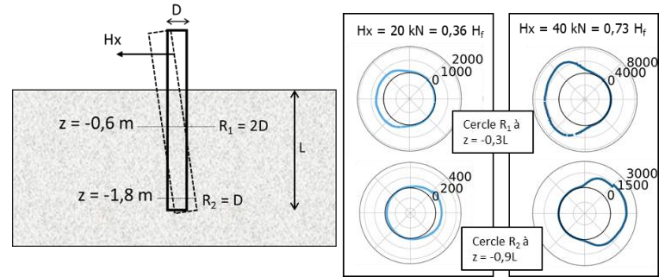


Figure 14. Mesures de déformations dans la fibre [$\mu\text{m/m}$] lors du Test 0, au niveau de 2 cercles à deux profondeurs différentes et à deux étapes de chargement.

5 CONCLUSIONS

Le projet GEOLAB SAM-WT a permis la conception et la réalisation d'une étude expérimentale ambitieuse, sur un modèle réduit (facteur 1:5) de pieu en acier ouvert, installé dans un massif de sable dense, chargé latéralement suivant des chemins de chargement complexes, allant jusqu'à un chargement cyclique multidirectionnel comprenant 13 000 cycles. Cette étude est le fruit d'une coopération réussie entre plusieurs équipes de recherche, en France et en Allemagne.

Au cours de ce projet, deux éléments particulièrement novateurs ont été développés et mis en œuvre avec succès : l'application d'un chargement latéral multidirectionnel, par un système de deux vérins articulés, et la mesure de déformations au cœur du massif de sol *via* une instrumentation par de la fibre optique noyée dans le massif de sable.

Le dispositif expérimental est pleinement opérationnel - même si des ajustements identifiés lors de cette première campagne semblent nécessaires - et des essais complémentaires sont envisagés pour enrichir l'étude paramétrique et approfondir la compréhension du comportement d'une fondation profonde sous chargement complexe.

Les résultats expérimentaux obtenus lors de cette campagne servent de base au développement d'approches par modélisation numérique et alimentent le développement de modèles simplifiés de type macro-modèles (Abadie et Page, 2025), en vue d'un déploiement pour des applications pratiques de dimensionnement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne pour son soutien par le financement du projet "GEOLAB: Science for Enhancing Europe's Critical Infrastructure", Grant Agreement No. 101006512.

La part salariale de la thèse de R. Chalhoub a été financée par un contrat doctoral du Ministère chargé de

l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Es-
pace.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abadie, C.N. (2025). Shared anchor pile response to multi-directional lateral cyclic loading. Bright Spark Lecture. *Proceedings of the 5th Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Nantes, France. doi.org/10.53243/ISFOG2025-654
- Abadie, C.N. and Page, A.M. (2025). CLAP - Simplified Model for Multidirectional Cyclic Loading on Offshore Piles. *Proceedings of the 5th Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Nantes, France. doi.org/10.53243/ISFOG2025-25
- Burd, H.J., Abadie, C.N., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., Martin, C.M., McAdam, R.A., Jardine, R.J., Pedro A.M.G., Potts, D.M., Taborda, D.M.G., Zdravković, L., and Pacheco Andradem, M. (2020). Application of the PISA design model to monopiles embedded in layered soils. *Géotechnique*70:11, 1067-1082, doi.org/10.1680/jgeot.20.PISA.009
- CFMS (2024). Recommendations for planning and designing anchor foundations for floating wind turbines. Version 1.0. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique. 222p.
- Chalhoub, R., Jenck, O., Dano, C., Abadie, C.N., Al Katabi, M.K., Szymkiewicz, F., Minatchy, C., Kochnev, A., Liaudat, J., and Zachert, H. (2026). Distributed fibre optic sensing for monitoring soil deformation around piles: Insights from numerical simulations. *Proceedings of the 21st Int. Conf. of Soil Mech. and Geotech. Engg. (ICSMGE)*. Vienne, Autriche.
- Chalhoub, R., Jenck, O., Kochnev, A., Liaudat, J., Dano, C., Abadie, C.N., Szymkiewicz, F., Al Katabi, M.K. and Zachert, H. (2025a). Floating Wind Turbine Anchor Piles under Lateral Multidirectional Cyclic Loading: Experimental Investigation. *Proceedings of the 5th Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*. Nantes, France. doi.org/10.53243/ISFOG2025-209
- Chalhoub, R., Abadie, C.N., Al Katabi, M.K., Szymkiewicz, F., Minatchy, C., Dano, C., Kochnev, A., Liaudat, J., Zachert, H. and Jenck, O. (2025b). Measurement of soil response to laterally loaded piles using distributed fibre optic sensing. *Proceedings of the 5th Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*. Nantes, France. doi.org/10.53243/ISFOG2025-207
- Chalhoub, R., Jenck, O., Liaudat, J., Kochnev, A., Dano, C., Abadie, C.N., Szymkiewicz, F. and Zachert, H. (2024). GEOLAB - SAM-WT project Zenodo. doi.org/10.5281/zenodo.13619596
- Chalhoub, R., Jenck, O. and Dano, C. (2023). Floating offshore wind turbine piles under horizontal cyclic loading: calibration and performance of advanced soil constitutive models. *Proceedings of the 10th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE)*. Paper n°271, 26-28 June 2023, London, UK. doi.org/10.53243/NUMGE2023-271
- France Energies Marines (2019). Actions R&D sur la mutualisation des ancrages pour l'éolien flottant. Présentation au groupe miroir du TC 209 (Technical Committee Offshore Geotechnics) du CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols), Marne-La-Vallée, France, 26 septembre 2019.
- Jenck, O., Dano, C., Chalhoub, R., Abadie, C.N. (2022). Shared anchor under multidirectional cyclic loading for floating wind turbines (SAM-WT). GEOLAB proposal for transnational access, October 2022, 13 p.
- Jenck, O., Obaei, A., Emeriault, F. and Dano, C. (2021). Effect of horizontal multidirectional cyclic loading on piles in sand: a numerical analysis. *J. Mar. Sci. Eng.*, 9(235). doi.org/10.3390/jmse9020235
- Kochnev, A., Chalhoub, R., Liaudat, J., Jenck, O., Dano, C., Abadie, C.N., Szymkiewicz, F., Al Katabi, M.K., and Zachert, H. (2025). Großmaßstäbliche Versuche an Ankerpfählen für schwimmende Windenergieanlagen unter lateraler, zyklischer, multidirektionaler Belastung. Pfahl-Symposium 2025, TU Braunschweig, 20-21 Feb. 2025. En allemand.
- Liaudat, J., Machaček, J. and Zachert, H. (2024). GEOLAB Blind Prediction Contest – Supporting Documentation, Zenodo. doi.org/10.5281/ZENODO.14186171
- Lovera, A., Ghabezloo, S., Sulem, J., Randolph, M., Kham, M. and Palix, E. (2021). Pile response to multi-directional lateral loading using P–y curves approach, *Géotechnique*, 71(4): 288–298. doi.org/10.1680/jgeot.18.P.297
- Puech, A., Garnier, J. (2017). Recommandations pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques ; Projet national SOLCYP. ISTE Editions. 452p
- Zabatta, R., Abadie, C.N., Blanc, M., and Coquoio, T. (2025). Centrifuge modelling of intermediate piles subjected to multidirectional cyclic lateral loading. *Proceedings of the 5th Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Nantes, France doi.org/10.53243/ISFOG2025-318