

Essais de fondation superficielle sous charge excentrée et inclinée

Non-centered and inclined loading of footing

Philippe REIFFSTECK^{1*}, Tuan Anh LUONG^{1,2}, Fabien SZYMKIEWICZ¹, Carlos MINATCHY¹, Miguel BENZ NAVARETE²

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

2 Sol Solution, service R&D, F-63200 Riom, France

**philippe.reiffsteck@univ-eiffel.fr*

RESUME : Le dimensionnement de fondations superficielles sous charges excentrées et inclinées est réalisé dans la méthode directe de dimensionnement basée sur les essais en place par des coefficients réducteurs. Le travail présenté ici est expérimental avec la réalisation d'essais quasi vraie grandeur. La conception de la station d'essais sera brièvement rappelée et les modifications apportées pour la réalisation de chargements inclinés et excentrés seront présentées. Les essais avec le système d'essais ont été réalisés sur le site expérimental d'Aulnat constitué de limons homogènes. La communication présente le programme d'essais et les résultats des premiers essais réalisés. Les résultats sont comparés avec les essais de la bibliographie et les essais disponibles dans la base de données d'essais de fondations superficielles de l'université Gustave Eiffel. Une analyse critique des résultats, dans le cadre des prescriptions des normes de dimensionnement, sera également réalisée.

ABSTRACT: The design of shallow foundations under off-center and inclined loads is carried out using the direct design method based on in-situ tests using reduction coefficients. The work presented here is experimental, with quasi-full-scale tests being carried out. The design of the test station will be briefly reviewed and the modifications made to carry out inclined and eccentric loading will be presented. The tests with the test system were carried out at the Aulnat experimental site, which consists of homogeneous silt. The paper presents the test program and the results of the first tests carried out. The results are compared with tests from the literature and tests available in the Gustave Eiffel University's shallow foundation test database. A critical analysis of the results, within the framework of the design standards, will also be carried out.

Mots-clés: Fondation superficielle, essai de chargement, site expérimental

1 INTRODUCTION

Contrairement aux fondations profondes, objet d'une industrie fortement structurée au niveau des pays, les fondations superficielles réalisables de la maison individuelle à la centrale nucléaire ne font pas l'objet d'une norme d'essai en vigueur. Seul un numéro spécial de la revue Française de géotechnique présente un tel document et un projet de norme française (CFMS, 1956 ; CFMS, 1983 ; AFNOR, 2001). Dans le cadre du projet de maintien de la base de données de fondation superficielle de l'UGE, nous avons développé un bâti de chargement d'essais de fondations superficielles dont nous rappelons les grandes lignes ci-dessous. Cette conception tire profits des réflexions rassemblées dans le cahier des charges rédigé pour la station de Nantes (Bourges et Rault, 1978) et la station foraine (Amar, Canépa et Smirr, 1984b).

L'essai de chargement consiste à mesurer les déflexions correspondant à une succession de pressions appliquées au sol par la plaque suivant un programme fixé par le géotechnicien en accord avec le maître d'ouvrage. L'essai est réalisé au moyen d'un dispositif schématisé sur la Figure 1.

La charge maximale que l'on peut appliquer est classiquement de 1000 kN.

Les lois de chargement peuvent être des essais :

- sous charge constante de durées différentes,
- cycliques au voisinage ou non de la charge limite,
- de chargement par paliers (Figure 1).

La déflexion est mesurée à l'aide de comparateurs uniformément répartis autour de la plaque (au minimum 3) et dont les points d'attache sont fixés à un cadre indéformable prenant appui sur le sol en des points devant rester immobiles en cours d'essai.

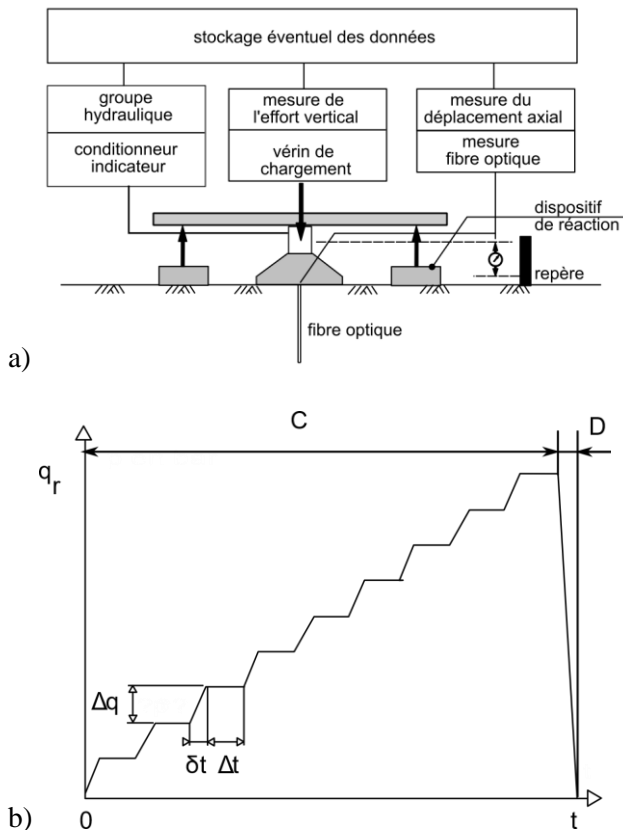


Figure 1. Principe de l'essai de chargement

Chaque palier de chargement est maintenu constant jusqu'à ce que la courbe représentative de la déflexion en fonction du logarithme du temps d'application soit linéaire, ou pendant 30 minutes. L'essai est poursuivi soit jusqu'au poinçonnement du sol défini conventionnellement à $B/10$, soit jusqu'à la limite du dispositif de réaction.

2 LE BATI DE CHARGEMENT DES LPC

En France, la justification par expérimentation des méthodes de dimensionnement des fondations superficielles avait souvent été menée sur des semelles de dimensions très petites, généralement inférieures à 30 cm de côté et très souvent de l'ordre du centimètre (L'Herminier et al, 1961 ; Giraudet, 1965 ; Lebègue, 1972). Cette pratique est bien sûr antérieure à l'usage du pressiomètre à la fin des quatre-vingt. La difficulté à caler les méthodes sur des cas réels a ralenti les développements (Amar, 1977). Cela a justifié un programme de recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées, mené avec une station d'essai sur différents sites représentant un panel de sols en faisant varier forme, encastrement, excentrement, inclinaison de la sollicitation. La conception d'une station d'essai d'abord statique puis

foraine a été la première tâche (Amar et al., 1984a ; 1984b).

Le dispositif expérimental comportait une poutre, un vérin et différentes fondations rigides en béton et en acier et également des capteurs de force, de pression et de déplacement (Figure 2 et 3). Le vérin était relié :

- en tête, à un chariot mobile coulissant sur la poutre au moyen d'un axe transversal à cette poutre, ce qui permettait donc d'incliner la charge,
- en pied, à la semelle par l'intermédiaire d'une rotule, qui pouvait se fixer en plusieurs endroits, ce qui offre donc la possibilité de sollicitations excentrées.

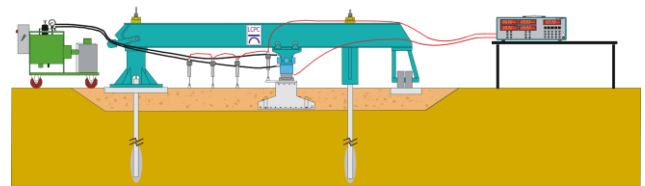


Figure 2 Station foraine d'essais de fondations superficielles des Laboratoires des Ponts et Chaussées



Figure 3 Station foraine en essai sur le site de Chatenay (photographies Canépa)

Certains essais ont été effectués par les LPC en utilisant une semelle en acier carrée de 1 mètre de côté. Elle était équipée de 34 capteurs de pression totale Glötz de 60 mm de diamètre permettant de vérifier la répartition des contraintes sous une semelle rigide (Figure 4).



Figure 4 Semelle carrée instrumentée (photographies Canépa)

Ce type de station a été utilisée lors de différentes campagnes d'essai menées sur le territoire français à Plancoët Jossigny, Lognes, Chatenay, Labenne, Provins, et sont décrites dans Canépa et Depresles (1990) et Amar et al. (1984, 1987, 1994). Un exemple de résultat est présenté sur la Figure 5, avec la courbe charge enfoncement, les paliers de tassement à charge constante et la courbe de fluage (As).

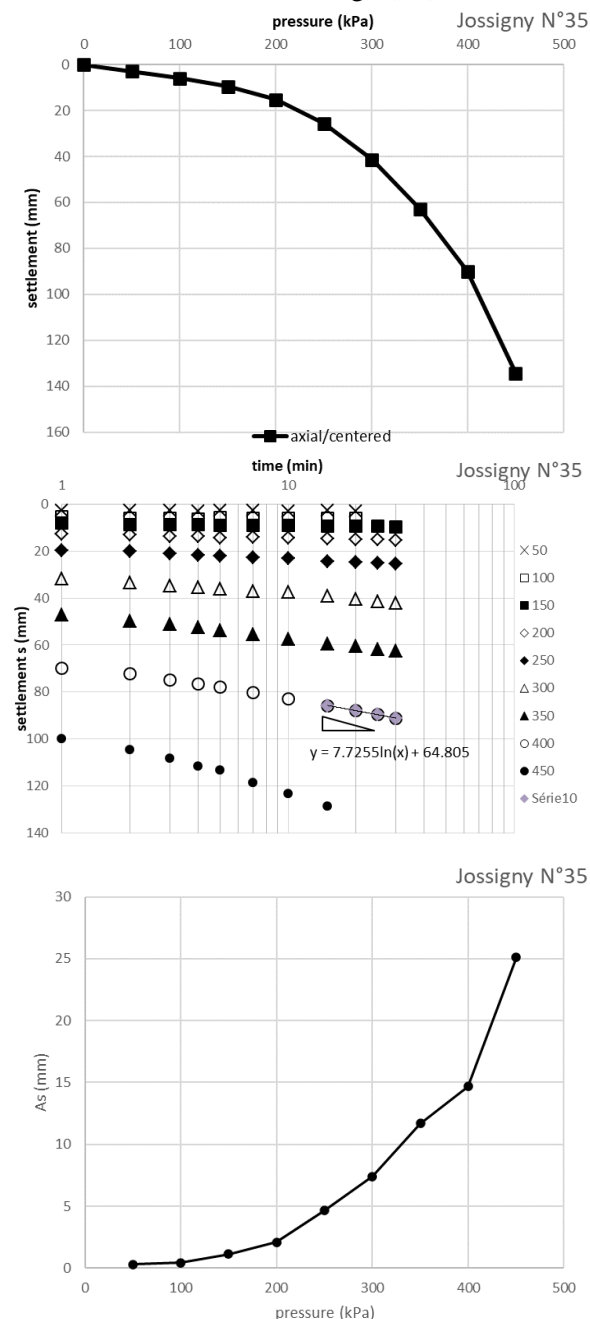


Figure 5 Résultats d'essais de chargement sur le site de Jossigny

Ces essais ont permis de développer la méthode de dimensionnement directe des fondations superficielles sur la base de l'essai au pressiomètre et au pénétromètre (Amar et Morbois, 1985 ; METL, 1992 ; Amar et al., 1994a ; 1994b; Reiffsteck et al.,

2025). Elles ont lancé les bases des essais excentrés (Amar et al., 1987a), long terme (Amar et al., 1985) ou cycliques (Amar et al., 1987b ; 1998) pour la méthode directe. Des systèmes similaires ont été utilisés à l'étranger. Les principaux défauts de cette station d'essais furent sa lourdeur et sa vétusté. Elle a été retirée du service au début des années 2000.

3 LE NOUVEAU BATI

Dans le cadre du projet Emerg3R, un besoin de compléter la base de données des LPC maintenue par l'UGE a été identifié. La disparition de l'ancienne station a nécessité la conception d'une nouvelle. L'objectif a été de développer une structure mobile permettant de réaliser sur différents massifs de sols à une taille quasi-réelle des essais de fondations. Les fonctions principales de l'appareillage qui devait être conçu étaient de pouvoir :

- Réaliser des essais avec des plaques de diamètre 60 cm, jusqu'à 600 kN,
- S'ancrer dans différents sols,
- Être mobile et adapté au réseau routier,
- Ne pas dépasser la masse tractable par les véhicules de l'IFSTAR soit 2,5 tonnes.

Une plaque spécifique de chargement a été réalisée pour charger le massif de sol qui sera instrumenté pour mesurer le tassement en surface et à faible profondeur sous la plaque.

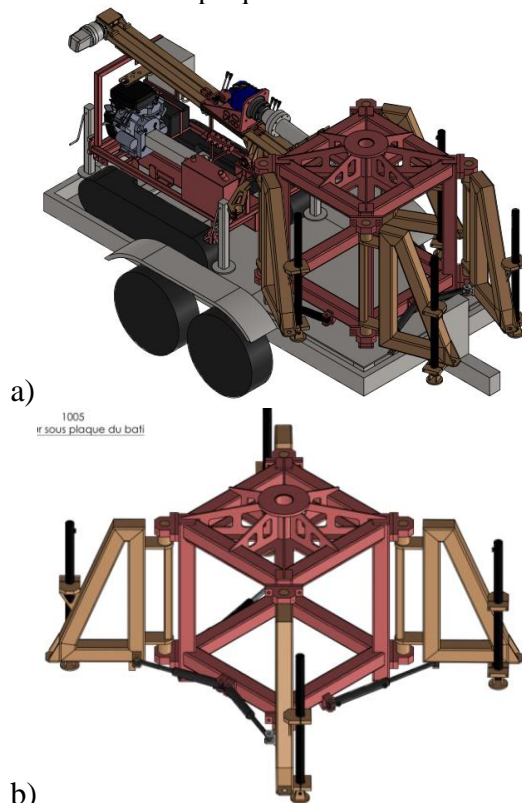


Figure 6. Dimensionnement finalisé du bâti de chargement (crédits SOMAC)

En collaboration avec C. Palika de la société SOMAC, il a donc été choisi de concevoir un bâti compact avec des « ailes » déployables (Figure 6). Il peut prendre place pour le transport sur une remorque. Elle est construite autour d'un « cube » de 90 cm de côté.

La Figure 7 donne une vue d'ensemble du bâti à la sortie de l'usine.



Figure 7. Images du matériel fini (crédits SOMAC)

3.1 Procédure d'essais

La procédure de mise en œuvre du bâti sur site, démarre par la préparation de la zone de positionnement de la plaque par un terrassement à l'encastrement visé. Cette zone est nivelée avec soin puis recouverte d'une fine couche de sable destinée à améliorer le contact. Ensuite un forage de petit diamètre est réalisé au centre de la zone, par exemple, avec un essai au Panda et une fibre optique est noyée dans le sondage avec coulis ciment-kaolinite (Figure 1).

La mini sondeuse utilisée pour placer les ancrages est descendue de la remorque, les bras du bâti sont déployés, les vérins sortis et la remorque peut s'effacer. Le bâti est posé sur la zone d'essais, les ancrages mis en place puis fixés (Figure 8).

Le dispositif de chargement est alors attaché au bâti dans la position voulue : chargement centré ou autre, la poutre aluminium servant de support au capteur est placée en travers du bâti, l'ensemble des

capteurs de force et de déplacement sont fixés, testés et mis à zéro (Figure 10, Figure 15).

Le programme de chargement décrit dans l'introduction peut alors démarrer. La charge finale est définie sur la base d'une estimation réalisée à partir de la méthode directe pressiométrique ou tout autre méthode.

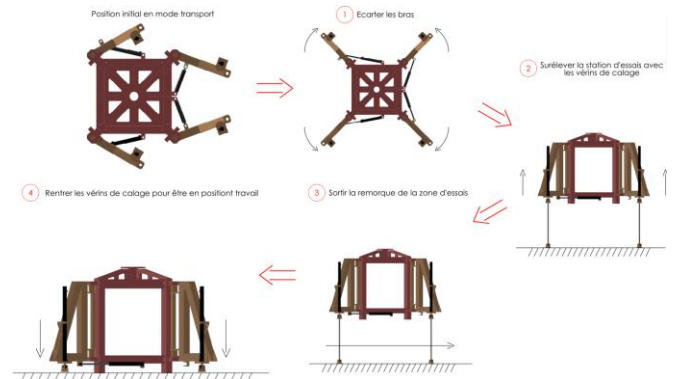


Figure 8. procédure de mise en place du bâti de chargement (crédits SOMAC)

3.2 Modification du matériel d'essais

Afin d'entamer les études sur les charges inclinées et/ou excentrées, une modification du bâti a été réalisée. La Figure 9 donne une vision de la plaque et de la rotule spécifique inspirée du matériel du LREP.

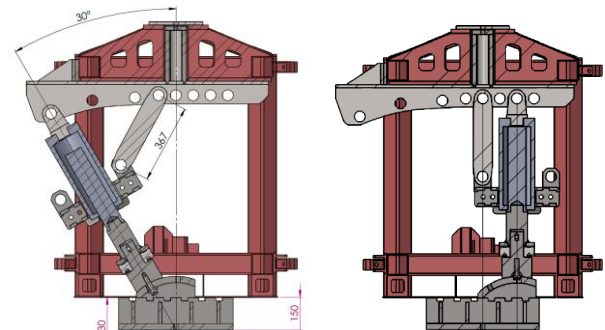


Figure 9. Système pour charge inclinée (crédits SOMAC)

L'excentrement limite défini par la norme NF P94-261 à l'ELU pour une fondation circulaire par $1 - \frac{2 \cdot e}{B} \geq \frac{3}{40}$ soit 0,27 m est compris dans la plage de variation de l'excentrement. Les plaques sont circulaires de diamètre 600 mm et carrées de côté 530 mm.

4 EXEMPLE D'ESSAIS

Plusieurs sessions d'essais ont été réalisées avec la nouvelle station d'essais (Reiffsteck et al., 2022 ; Luong et al., 2024)

4.1 Essai sous charge verticale centrée à Montfavet

Le site de Montfavet est la propriété du département du Vaucluse (84). Il a fait l'objet de campagnes de reconnaissance antérieures complètes par Fondasol.

D'après la carte géologique de Châteaurenard au 1/50000, les terrains sont constitués d'alluvions généralement composées d'un mélange de sables, limons, argiles et graviers et galets en profondeur. On a observé :

- Des limons sablo-argileux jusqu'à une profondeur de 2,0 m au droit de nos sondages ;
- Des graviers et galets compacts, présentant quelques poches de plus faible compacité localement ;
- Une nappe, qui a été rencontrée vers 1 m de profondeur.



Figure 10. Vue générale de l'essai sur le site de Montfavet (22/06/2022)

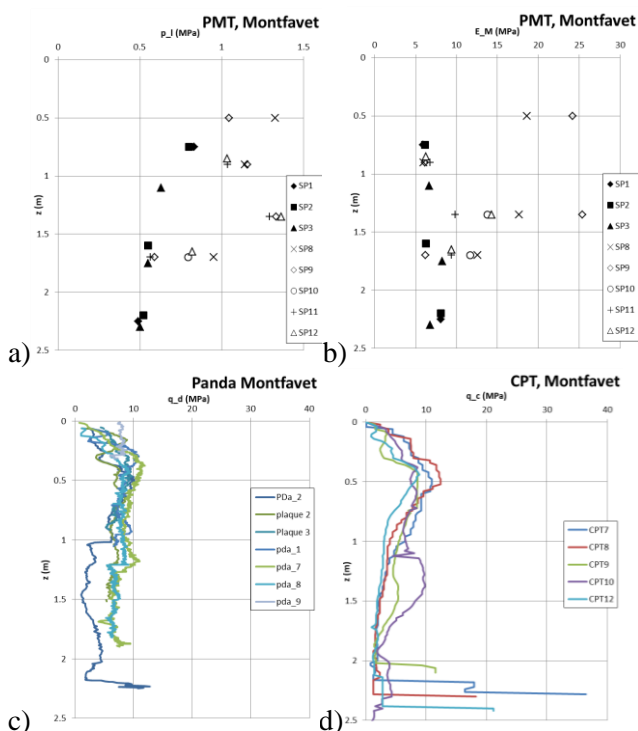


Figure 11. Profils des essais en place (Montfavet)

Lors des essais, le temps a été très sec avec une pluviométrie quasi nulle depuis plusieurs mois. Le sol est fissuré et cela entraîne pour les résultats d'essais pressiométriques une élévation des pressions limites mais aussi une plus forte dispersion.

La plaque a été positionnée à un encastrement $D=0,3$ m. Les trois essais n'ont pu être menés à la rupture conventionnelle (Figure 12), les ancrages rompant vers 6 tonnes. Ils montrent une bonne reproductibilité de l'essai.

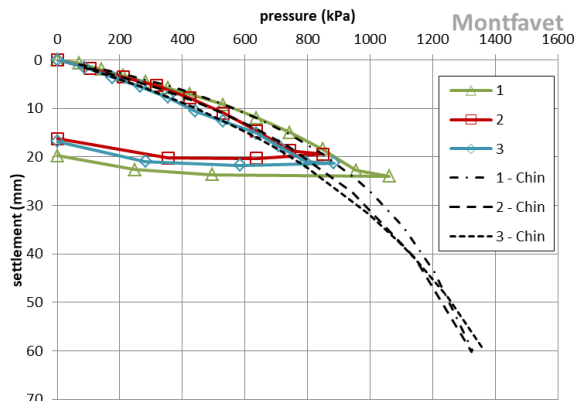


Figure 12. Résultats des essais de Montfavet – campagnes de juin 2022

L'extrapolation des résultats avec la méthode de Chin donne des valeurs de la capacité portante conventionnelles du premier essai (courbe bleu), du deuxième essai (courbe rouge) et du troisième essai (courbe verte) respectivement égales à 37,4 ; 37,4 et 38,3 tonnes (Chin, 1970).

Sur le site de Montfavet, un type de câble optique faiblement gainé a été mis en place dans les trous laissés par les essais de pénétration au Panda réalisés au centre de la plaque de chargement. La Figure 13 présente l'évolution du signal le long de la fibre optique pour tous les paliers de chargement.

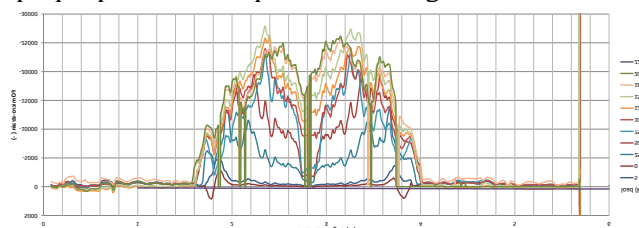


Figure 13. Résultats des essais de Montfavet – campagnes de juin 2022 – mesures brutes de fibre optique

Les microdéformations de la Figure 13 ont été moyennées en prenant comme référence la boucle basse (Figure 14a), puis déduites des déformations mesurées en surface et normalisées (Figure 14b). Un recalage est aussi nécessaire entre les deux dernières étapes car la fibre a "mémorisé" les déformations imposées par le petit cycle de mise en place de 5 kN.

L'interprétation présentée sur la Figure 14 donne des résultats en accord avec les mesures de la bibliographie avec toutefois un approfondissement sans doute lié à la nature très surconsolidée du massif. Ce qui correspond à un profil de module n'évoluant quasiment pas avec la profondeur selon les courbes données par Burland et Burbridge (1985).

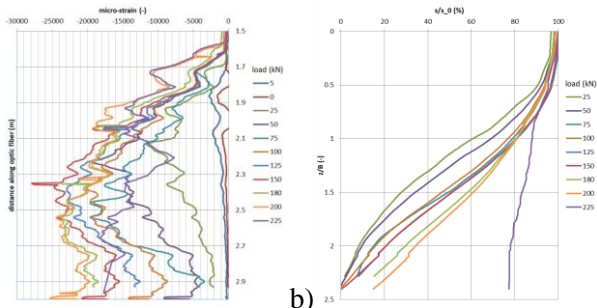


Figure 14. Résultats des essais de Montfavet – campagnes de juin 2022 – mesures interprétées de fibre optique

Pour les plus fortes charges, les pertes du signal optique deviennent importantes et ne permettent plus d'avoir l'ensemble des déformations réparties le long des fibres. La courbe ne converge alors plus vers un tassement nul vers 1,5 m de profondeur.

On note que dans le cadre de nos expériences, les déformations mesurées dans le massif permettent de remonter aux tassements alors que jusqu'à présent ceux-ci étaient obtenus à partir de tassomètres positionnés à différentes profondeurs.

4.2 Essais sous charge verticale centrée, excentrée et inclinée à Aulnat

Le site d'Aulnat a fait l'objet de campagnes de reconnaissance antérieures complètes par Sol Solution. Le site se situe dans la plaine de la Limagne, à une altitude de 325m NGF, dans un bassin sédimentaire, site présentant majoritairement des colluvions et alluvions. La stratigraphie est composée de trois couches dans les dix premiers mètres. Sous une couche de 70 cm de limon argileux noir appelé terre de Limagne, se trouve un limon gris beige vert sur un mètre, reposant sur des marnes très compétentes. En l'absence de rallonges, les essais ont été réalisés sur la première couche de limon. Il serait intéressant dans un deuxième temps de faire aussi les essais à 1 m de profondeur.



Figure 15. Vue générale de l'essai sur le site d'Aulnat (22/03/2022)

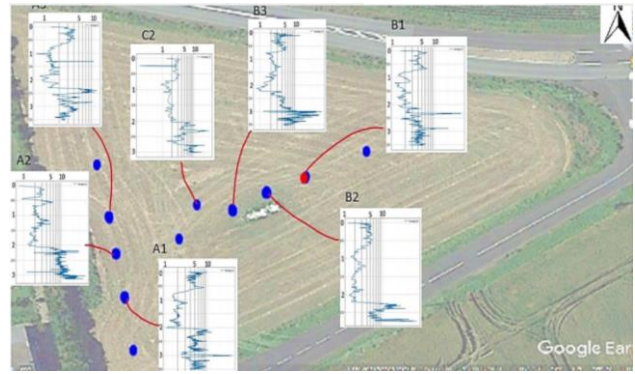


Figure 16. Homogénéité du site

Les essais ont été réalisés à 20-25 cm de profondeur sur des limons organiques. La Figure 17 donne les courbes moyennes des profils pressiométriques réalisés à proximité par Sol Solution ainsi que les CPT Lankelma et les six profils Grizzly. Ces derniers ont été réalisés au droit des ancrages. Les trois Panda ont été réalisés au centre de la plaque pour placer la fibre optique.

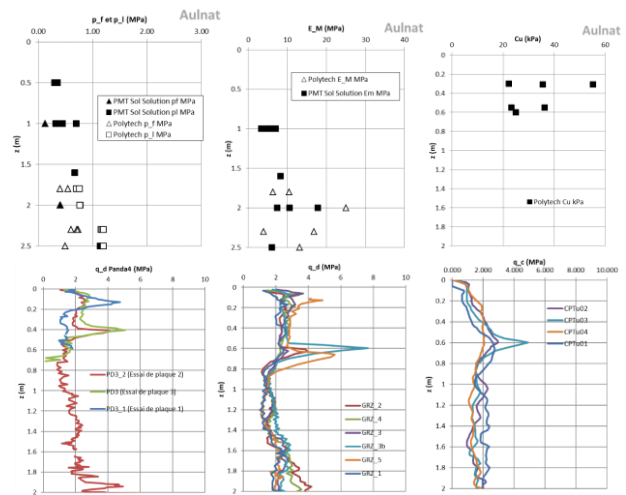


Figure 17. Profils des essais en place (Aulnat)

Le bâti a pu être ancré avec quatre vis Krinner. Trois essais ont été menés à la rupture conventionnelle (Figure 18). Ils montrent une bonne reproductibilité de l'essai.

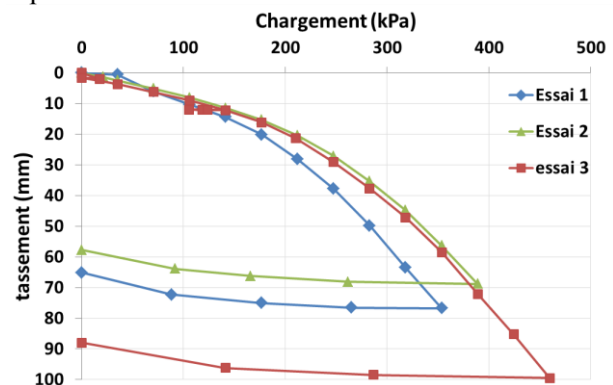


Figure 18. Résultats des essais d'Aulnat – campagne de mars 2022

Une petite boucle a été réalisée au niveau des premiers paliers pour minimiser les effets de contact.

En 2025, la station, modifiée pour réaliser des essais inclinés ou excentrés, a été testée sur le même site pour voir la faisabilité des essais. La figure 19 présente la géométrie de la rotule et de la plaque ainsi que le dispositif de tirant pour reprendre les efforts latéraux apparaissant lors du chargement.



Figure 19. Vue de la rotule et du vérin appliquant une charge inclinée et vue latérale avec le tirant

L'excentrement est obtenu par décalage de la rotule dans les crans de la fondation (voir figure 9 et figure 20).



Figure 20. Positionnement du vérin pour charge excentrée

Le matériel a fonctionné comme attendu et des chargements avec les angles de 20 et 30° et des excentrement relatifs e/B de 0,2 et 0,3 ont pu être réalisés. Les résultats sont en accord avec les observations faites lors des essais réalisés par Canépa et Despresles à Jossigny sur les limons des plateaux (1990).

Du fait d'un retard de production par le constructeur, nous n'avons pu faire les essais aux mêmes dates. Le printemps et l'été ayant été très secs, les résultats ne peuvent être comparés (voir figures 18 et 21).

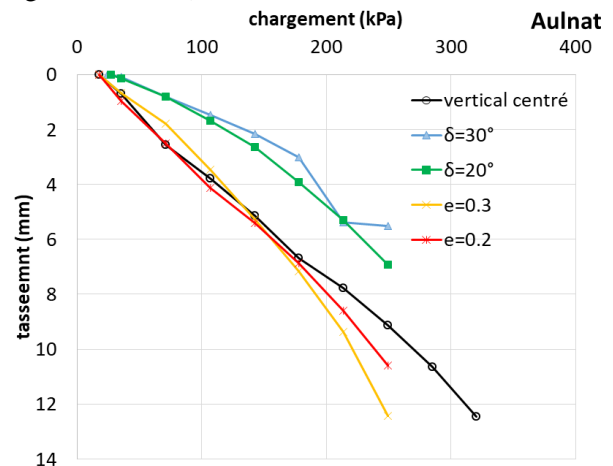


Figure 21. Résultats des essais d'Aulnat - campagne d'août 2025

Avec les portances accrues et les configurations asymétriques, la capacité du bâti a été dépassée et les enfoncements ou déplacements horizontaux n'ont pu être atteints.

5 CONCLUSIONS

L'université G. Eiffel a conçu et fait fabriquer un bâti de chargement de fondations superficielles. Après une série d'essais verticaux centrés de qualité avec l'apport de mesure par fibre optique, il a été décidé d'apporter des modifications pour réaliser des essais inclinés et excentrés. Ces modifications ont pu être validées lors d'essais sur le site d'Aulnat. Quelques améliorations restent à apporter à la structure du bâti pour améliorer l'ergonomie et la capacité de reprendre des charges plus élevées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'organisme de financement BPI pour le financement du projet FUI Emerg3R et la société Sol Solution pour son soutien financier.

Les auteurs remercient également leurs prédécesseurs : Samuel Amar et Yves Canépa pour le travail réalisés et les discussions fructueuses à l'origine de ces recherches.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR (2001) Sols : reconnaissance et essais, Fondation superficielle, Essai de chargement statique d'une semelle horizontale sous un effort vertical centré, XP P 94-155, 20 pages
- Amar S., (1977) Résultats expérimentaux concernant le comportement des fondations superficielles, Symposium international essais en place, Ponts formations conseils, 34 pages
- Amar S., Baguelin F., Canepa Y. (1984a) Étude expérimentale du comportement des fondations superficielles, Annales de l'I.T.B.T.P. , septembre 1984
- Amar S., Canepa Y., Smirr J.L. (1984b) Projet de station foraine de fondations superficielles, Notes du GSC05, LCPC, 19 pages
- Amar S., Morbois A., (1985), Contribution au dimensionnement des fondations superficielles à l'aide de l'essai au pénétromètre statique, BLPC 141, pp.37-43
- Amar S., Baguelin F., Canepa Y., Franck R. (1985) Comportement à long terme de fondations superficielles - Prévisions et observations, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco), 8-C-2 pp. 2155-2158
- Amar S., Baguelin F., Canepa Y. (1987a) Comportement des fondations superficielles sous différents cas de chargement, Actes du colloque interactions sols structures, Paris, Presses de l'ENPC, pp. 15-22
- Amar S ; Baguelin, F. ; Canepa, Y., (1987b), Comportement des fondations superficielles sous charges cycliques, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°149, pp 23-28
- Amar S., Baguelin F., Canepa Y., Franck R. (1994a) Étude expérimentale du tassement des fondations superficielles, XII ICSMFE, New Dehli, pp. 623-626
- Amar S., Baguelin, F., Canepa, Y., and Frank, R. (1994b). Experimental study of the settlement of shallow foundations. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Vol. 2, GSP No. 40, ASCE, Reston, pp. 1602-1610.
- Amar S., Baguelin, F., and Canepa, Y. (1998). Shallow foundations – experimental study under cyclic loading. Proceedings of Geotechnical Hazards, Rotterdam, pp. 477-483.
- Bourges F., Rault G. (1978) Station d'essais de fondations superficielles, conception générale, Notes provisoire du LCPC, dept Sols et Fondations, Cell. Soutènements et Travaux maritimes, 13 pages
- Canépa Y., Depresles D. (1990) Catalogue des essais de chargement de fondations superficielles réalisés sur sites par les LPC (1978-1990). FAER 1.17 020. LREP Melun, décembre 1990.
- CFMS (1956) Projets de méthodes d'essais des sols et des fondations – Essais statiques de chargement, AIBTP, 101:370-376
- CFMS (1983) Les essais de plaque, RFG, Numéro spécial Reconnaissance et Etudes géotechniques, 22:69-83
- Chin, F. K. (1970). Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure. In Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 81–90.
- Giraudet P (1965) Recherches expérimentale sur les fondations soumis à des efforts inclinés ou excentrés. Ann Ponts Chaussees 3:167–193
- Lebègue Y. (1972) Pouvoir portant du sol sous une charge incline, AIBTP, 292(88)3-43
- L'Herminier R., Habib P., Tcheng Y., Bernede J. (1961) Fondations superficielles 5^{ème} ICSMGE Paris, 3A/26 :713-717
- MELT (1992) Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil, cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, fascicule n° 62 - titre V, Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, 189 pages
- Luong, T.-A., Reiffsteck, P., Benz Navarrete, M., & Szymkiewicz, F. (2024). In-situ experimental tests for shallow foundation design using dynamic penetration testing method. Proc. of the 7th ISC, Barcelone Barcelona, June, 18–21. <https://doi.org/10.23967/isc.2024.047>
- Reiffsteck, P., Luong, T. A., Szymkiewicz, F., & Benz-Navarrete, M. (2025). Direct design methods of shallow foundation: DCPT and SPT application. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 1–29. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2568978>
- Reiffsteck, P., Luong, T.-A., Szymkiewicz, F., Benz, M. A., & Solution, S. (2022). Essais sur fondations superficielles et dimensionnement au pénétromètre dynamique. 11emes JNGG – Lyon, 1–8.