

# Capacité portante et comportement des fondations soumises à des chargements cycliques : une étude en 1g

## Bearing capacity and behavior of foundations subjected to cyclic loads: a 1g study

Daoud DIRIR MAHAMOUD<sup>1,2</sup>, Fabien SZYMKIEWICZ<sup>1\*</sup>, Philippe REIFFSTECK<sup>1</sup>, Lamis MAKKI<sup>1</sup>, Axel ASTIER<sup>1</sup>, Alex Ousmane DIOUF<sup>1</sup>, Ombeline DUPONT<sup>1</sup>

*1 Université Gustave Eiffel, GERS-SRO, Champs sur marne, France.*

*2 Université de Djibouti, département IUT-I Génie Civil, Djibouti, Djibouti.*

*\* [fabien.szymkiewicz@univ-eiffel.fr](mailto:fabien.szymkiewicz@univ-eiffel.fr)*

**RESUME** Le dimensionnement des ouvrages géotechniques repose sur l'utilisation de méthodes de dimensionnement (notamment en ce qui concerne les coefficients de sécurité) et sur la mise en application de concepts et de pratiques qui ont un impact direct sur les quantités de matériaux utilisés et donc sur l'empreinte carbone de ces ouvrages, ainsi que sur leurs coûts et délais de construction. L'ensemble de ces pratiques garantit la robustesse et la durabilité des ouvrages géotechniques en limitant les déplacements à des niveaux compatibles avec les exigences de leur bon fonctionnement. Bien que largement éprouvée par l'expérience, la méthode française de dimensionnement des fondations superficielles (ainsi que d'autres méthodes internationales) reste conservatrice, soit par manque de connaissances et de données, soit par un choix assumé de ne pas exploiter toutes les informations issues des études géotechniques et des campagnes d'essais sur les fondations superficielles. Ces lacunes et ces choix constituent des limites qu'il convient de dépasser afin d'améliorer la manière dont sont estimés les déplacements et les charges admissibles des fondations profondes. L'objectif de cette étude est d'étudier la capacité portante et le comportement des fondations superficielles soumises à des charges cycliques, et de corréler ces comportements aux caractéristiques physiques du sol, obtenues soit par des essais de laboratoire, soit par des reconnaissances in situ. Dans cette communication, après avoir clairement énoncé le problème et décrit l'approche expérimentale, les premiers résultats de la campagne expérimentale basée sur des essais réalisés à 1g et à échelle réduite sont présentés en détail. Il a été observé que certaines configurations de charges cycliques n'affectent pas la stabilité des fondations, même après des millions de cycles, et que la stabilité des fondations sous des charges cycliques est due à la fois à la contrainte moyenne appliquée sous la fondation, mais aussi à l'amplitude, de manière concomitante.

**Mots-clés:** Fondations superficielles – Capacité portante – Chargements cycliques – Modélisation physique

**ABSTRACT:** The design of geotechnical structures relies on established design methods, particularly regarding the use of safety factors, and on the application of concepts and practices that directly influence the quantities of materials used, and therefore the carbon footprint, costs, and construction timelines of these structures. Together, these practices ensure the robustness and durability of geotechnical works by limiting displacements to levels compatible with their functional requirements. Although widely validated through experience, the French method for designing shallow foundations (as well as other international approaches) remains conservative, either due to a lack of knowledge and data or by a deliberate choice not to fully exploit information from geotechnical investigations and foundation testing campaigns. These limitations and choices must be addressed to improve the estimation of displacements and allowable loads for deep foundations. The aim of this study is to investigate the bearing capacity and behavior of shallow foundations subjected to cyclic loading, and to correlate these behaviors with the physical characteristics of the soil, obtained either through laboratory testing or in situ investigations. In this paper, after clearly stating the research problem and describing the experimental approach, the initial results of a campaign based on 1g small-scale tests are presented in detail. It was observed that certain configurations of cyclic loading do not compromise the stability of the foundations, even after millions of cycles, and that the stability under cyclic loading is governed by both the mean stress applied beneath the foundation and the amplitude of the loading, acting simultaneously.

**Key words :** Shallow foundations – Bearing capacity – Cyclic loadings – Physical modeling

## 1 INTRODUCTION

Le dimensionnement des ouvrages géotechniques repose sur des approches analytiques et observationnelles destinées à garantir la sécurité, la durabilité et les performances opérationnelles des structures. Dans ce cadre, l'évaluation de la capacité portante des fondations superficielles constitue un paramètre déterminant, influençant directement les quantités de matériaux utilisés, les coûts d'exécution, les délais de construction, ainsi que l'empreinte de carbone associée.

L'optimisation environnementale devient un impératif, l'amélioration des méthodes de calcul apparaît dans ce contexte, essentielle, afin de réduire le recours systématique aux fondations profondes.

L'analyse mécanique du comportement des fondations superficielles a été structurée par les travaux pionniers de Terzaghi (1943), qui a formulé l'expression générale de la capacité portante sous charge vertical centrée.

$$q_{ult} = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0.5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma$$

Où  $c$  est la cohésion,  $\gamma$  le poids volumique du sol,  $B$  la largeur de la fondation, et  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  des coefficients dépendant de l'angle de frottement interne  $\phi$ . Cette formulation a ensuite été étendue par différents auteurs (Meyerhof, 1951; De Beer & Ladanyi, 1961; Giroud et al 1973), afin de prendre en compte l'inclinaison de la charge, l'excentricité et la forme de la fondation.

En parallèle, une approche observationnelle fondée sur l'instrumentation in situ a émergé avec les travaux de Ménard (1963), conduisant à une expression simplifiée de la capacité portante dérivée des essais pressiométriques:

$$q_{ult} = k_p \cdot p_e$$

Cette approche, largement utilisée en France et intégrée dans plusieurs normes et recommandation (AFNOR NF P94-261, 2013), illustre la complémentarité entre les méthodes théorique et celles basés sur la reconnaissance géotechnique.

La présente communication s'appuie sur une série d'essais expérimentaux réalisés en modèle réduit 1g afin d'examiner le comportement de fondations superficielles reposant sur un sol granulaire dans des conditions de chargement statique et cyclique. L'étude s'intéresse d'abord à l'influence de la forme de la fondation sous chargement monotone, à travers une comparaison entre les fondations carrée,

circulaire et rectangulaire. Elle se poursuit par l'analyse du comportement de la fondation soumise à des chargements cycliques, en mettant en évidence le rôle conjoint de la contrainte moyenne appliqué et de l'amplitude de chargement. Les résultats présentés visent à apporter un éclairage expérimental sur des mécanismes souvent simplifiés dans les approches de dimensionnement.

## 2 MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Sols étudiés

Pour cette étude, deux sables propres et relativement uniformes ont été utilisés : le sable n°6 (Japon) et HN32 (France). Ces matériaux ne contiennent aucune fine et présentent une granulométrie contrôlée, avec des distributions très proches (figure 1) et des coefficients d'uniformité  $C_u$  de 1.67 et 1.64 respective, assurant un comportement mécanique homogène.

Les massifs ont été reconstitués avec une densité relative cible de 80 %, correspondant à des sols denses représentatifs des conditions pratiques présentant des angles de frottement au pic de 42° pour le sable n°6 et 39° pour le HN32.

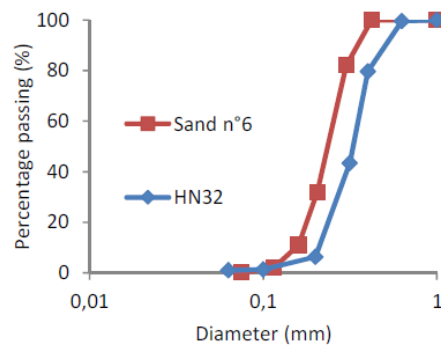


Figure 1. Distributions granulométriques des sables

### 2.2 Reconstitution des massifs

Les massifs de sables ont été reconstitués dans des bacs de dimensions 95\*45\*50 cm (figure 2) afin de réaliser au maximum 3 essais par bac. Chaque massif a été reconstitué en neuf couches successives de 5 cm, compactées individuellement pour atteindre la densité relative cible de 80%. La régularité et l'homogénéité de la densité ont été contrôlées à la construction par un suivi des volumes et à l'aide de mesures ponctuelles pour s'assurer d'un comportement mécanique uniforme sur toute la hauteur du massif. Cette procédure a permis de créer des conditions expérimentales fiables et comparables entre les différents essais.



Figure 2. Bac d'essais de chargement

## 2.3 Dispositifs expérimentaux et fondation

### 2.3.1 Dispositifs expérimentaux

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un dispositif expérimental (figure 2) conçu pour permettre de réaliser de manière contrôlée des chargements monotones et cycliques.

Le dispositif est constitué d'un vérin hydraulique piloté par un contrôleur pression-volume de précision.



Figure 3. Dispositif de chargement

### 2.3.2 Fondations

Les fondations modèles sont des plaques carrées et circulaires en acier inoxydable, de dimension 100\*100 mm (figure 3.a) et circulaire de diamètre 113 mm (figure 3.b), d'une épaisseur de 25 mm sur les deux formes. Ces dimensions sont représentatives de celles des études précédemment réalisées en laboratoire sur le comportement des fondations superficielles.

Une rotule est fixée au centre de la plaque afin d'assurer une transmission parfaitement axiale de l'effort vertical, afin d'éviter tout excentrement de l'effort susceptible de compromettre la fiabilité la réponse obtenue.

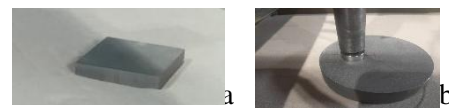


Figure 4. Géométries des fondations 3.a Carrée et 3.b Circulaire

### 2.3.3 Instrumentation

L'instrumentation comprend une centrale d'acquisition où tous les capteurs sont connectés : il s'agit d'un capteur de force 20 kN qui permet de mesurer l'effort appliqué, ainsi que de quatre capteurs de déplacement de type LVDT, disposés aux coins de la plaque.

Cette configuration garantit une mesure robuste du tassement vertical, mais aussi une détection fine d'éventuelles rotations ou inclinaisons de la fondation.

L'acquisition des données est réalisée en continu toutes les deux secondes, permettant de suivre l'évolution de la réponse mécanique pendant toute la durée des essais.



Figure 5. emplacement des capteurs de déplacement

## 2.4 Procédure d'essai

Les essais ont été conduits selon un protocole strict afin de garantir la répétabilité des mesures. Après la mise en place de la fondation, un contrôle d'alignement vertical était systématiquement effectué pour éviter tout excentrement de la charge. La plaque était ensuite mise en contact avec le sol sans préchargement, permettant de stabiliser les capteurs et assurer une référence de tassement fiable.

Les essais monotones, réalisés en premier, consistaient à appliquer un chargement quasi-statique continue, par palier de charge ou jusqu'à l'obtention d'un déplacement supérieur ou égal à  $B/10$ , servant de base pour l'interprétation des réponses cyclique.

Les essais cycliques ont été réalisés en appliquant à la fondation des chargements répétitifs contrôlés, selon différents modes de sollicitation. Le signal imposé est de type sinusoïdal à amplitude constante. Pour chaque configuration, la contrainte moyenne  $\sigma_{cyc,moy}$ , l'amplitude  $\Delta\sigma_{moy}$  et le nombre total de cycle  $N$ , pouvant atteindre  $10^6$ . L'ensemble des cycles était exécuté sous contrôle de pression, de manière à reproduire fidèlement les sollicitations typiques des fondations soumises à des actions cycliques.

Cette stratégie expérimentale a permis de caractériser avec précision les mécanismes de dégradation du massif et la construction de diagrammes de stabilité adaptés aux fondations superficielles soumise à des actions cycliques.

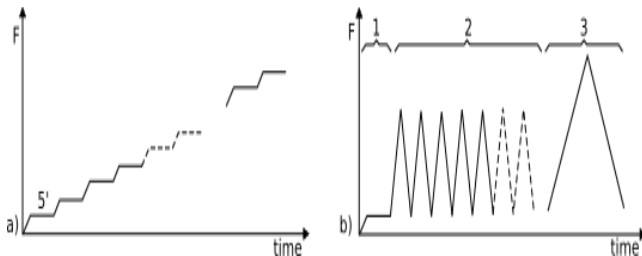


Figure 6. des chemins de chargement des essais (monotone et cyclique)

## 3 RESULTATS

### 3.1 Contrôle de compactage

Evaluer la qualité du compactage et vérifier la répétabilité et la reproductibilité de la mise en place des massifs de sol n'étaient pas seulement une étape technique, mais une condition essentielle pour garantir la fiabilité des résultats expérimentaux qui reflètent fidèlement le comportement du matériau, menée sous la forme d'une étude paramétrique.

Pour atteindre cet objectif, des essais au pénétromètre dynamique (DCPT) ont été réalisés dans chacune des

cuves expérimentales. Cette démarche a permis de tester concrètement l'homogénéité des massifs de sol reconstitués et la constance de la procédure de préparation entre les différentes cuves.

A titre d'exemple les résultats de six essais effectués dans la cuve 10 montrent une bonne reproductibilité, attestant de la maîtrise du protocole de compactage et de la méthode de mis en place (figure.7).

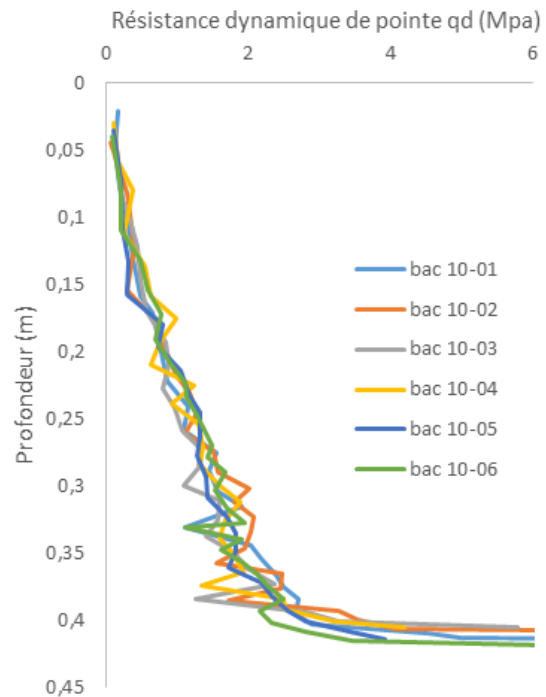


Figure 7. Résultats des essais DCPT dans la cuve 10

Les résultats permettent de conclure à une bonne homogénéité de masse du sol, en particulier dans les 35 premiers centimètres de profondeur.

La figure 8 présente la densité relative moyenne mesurée dans toutes les cuves remplies de HN32.

La densité relative a été déterminée à partir d'une corrélation adaptée des travaux de (Retamales et al., 2022). La valeur cible de 80% de densité relative est atteinte pour des profondeurs inférieures à 25 cm, garantissant ainsi des conditions d'essai conformes aux objectifs de l'étude.

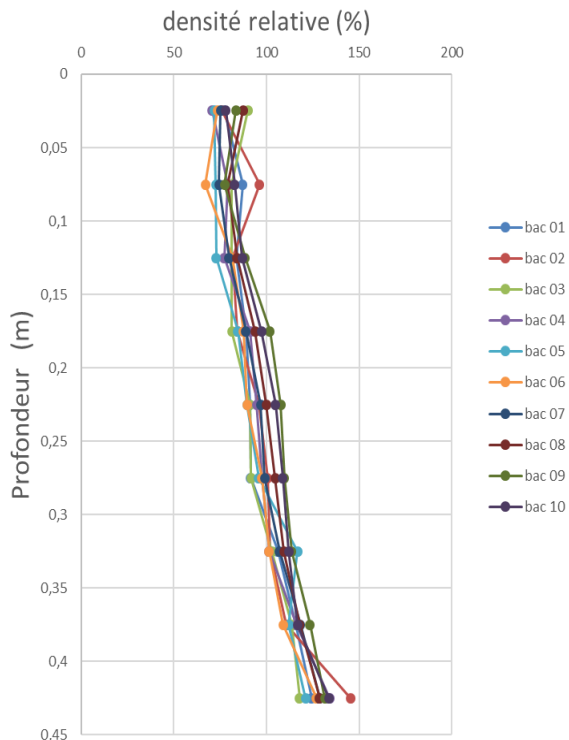


Figure 8. Profils de densité relative des différentes cuves

### 3.2 Effet de forme

Afin de mener une étude paramétrique sur l'influence de l'effet de forme et le comportement de la fondation superficielle, des chargements monotones ont été réalisés afin d'évaluer la capacité portante monotone des fondations de forme carrée, circulaire et rectangulaire ( $L/B = 2$ ) (Figure 9).

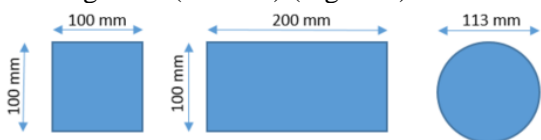


Figure 9. Formes des fondations superficielles étudiées.

La figure 10 illustre les différentes courbes force-déplacement obtenues pour la semelle circulaire de diamètre 113 mm. L'analyse de ces courbes permet d'identifier clairement la charge ultime à partir de l'apparition d'un plateau stable portance, caractérisé par une augmentation significative du tassement pour une variation minimale de la charge appliquée.

La charge ultime est identifiée pour un tassement  $B/10$  de 11,3 mm, au-delà duquel la charge appliquée reste constante. La valeur moyenne de la charge ultime est de l'ordre 1 kN, indiquant une bonne répétabilité des résultats.

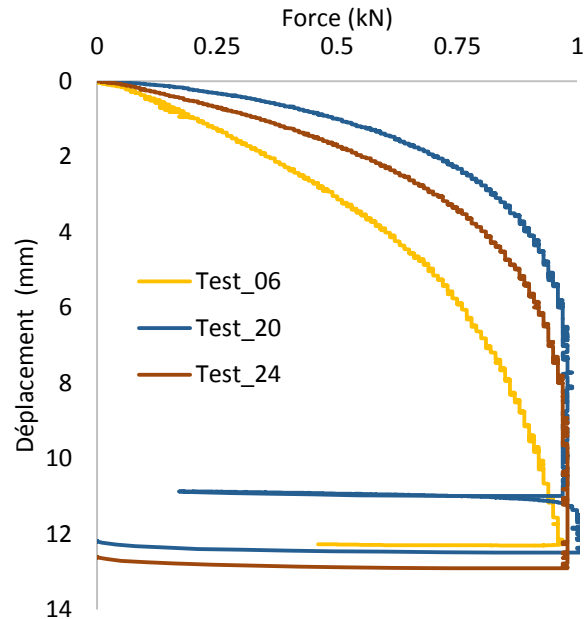


Figure 10. Courbes force-déplacement de la fondation circulaire

La figure 11 présente les courbes force-déplacement obtenues pour les différents essais d'une fondation carrée, mettant en évidence un comportement globalement similaire du système sol-fondation. Une phase initiale relativement rigide est observée, suivie d'une diminution progressive de la rigidité traduisant la mobilisation non linéaire de résistance du sol. Les courbes évoluent ensuite vers un régime où les déplacements augmentent fortement alors que la charge varie peu, cela indique que l'atteinte de l'état limite ultime est proche. La charge maximale ultime converge vers une valeur voisine de 0.96 kN.

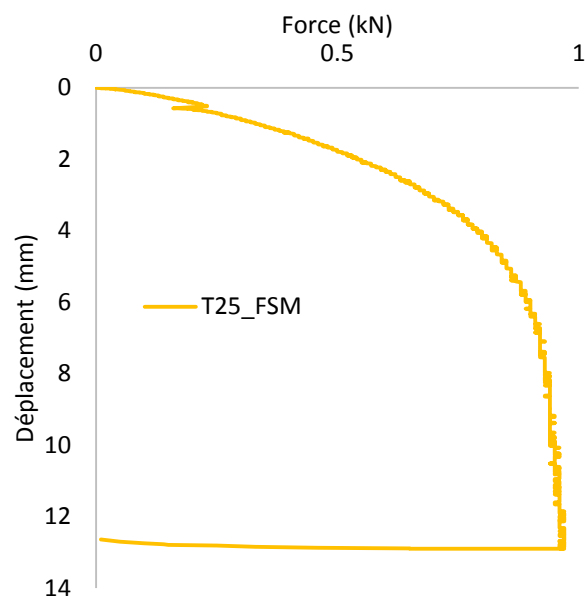


Figure 11. Courbe force-déplacement de la fondation carrée.

La figure 12 présente les courbes force-déplacement obtenue pour deux essais réalisés sur une fondation rectangulaire de section 100x200 mm. Les résultats montrent une bonne reproductibilité du comportement, les deux essais conduisant à une portance ultime du même ordre de grandeur, voisine de 2 kN. La réponse mécanique est marquée par une phase initiale quasi linéaire, suivie d'une non-linéarité, puis par un palier de charge accompagné de déplacements importants, ce palier traduit l'atteinte de la rupture du sol.

Les essais réalisés sur les fondations carrée et circulaire conduisent à des charges de rupture du même ordre de grandeur, proches de 1 kN, ce qui est cohérent avec leurs surfaces portantes similaires. En revanche, la fondation rectangulaire atteint une portance ultime d'environ 2 kN, soit une valeur approximativement deux fois plus élevée. Cette différence s'explique aisément par le fait que la surface de la fondation est elle-même deux fois plus grande, ce qui permet de mobiliser un volume de sol plus important sous la semelle.

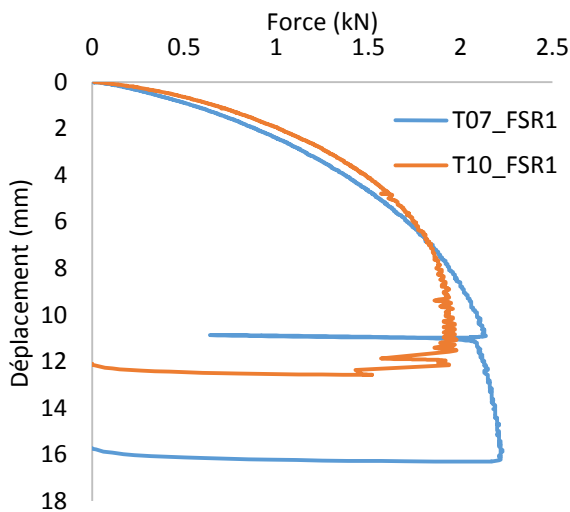


Figure 12. Courbes force-déplacement de la fondation rectangulaire.

La figure 13 présente l'évolution de la contrainte ultime en fonction de la densité relative du sable pour différentes formes de fondations superficielles. Elle montre clairement que, quelle que soit la géométrie considérée, la capacité portante augmente avec la densité relative, traduisant une plus grande résistance au cisaillement dans un sable plus dense. Les contraintes ultimes sont de l'ordre de 100 kPa, pour des densités relatives comprises entre 80 et 85 %. Cependant, il apparaît que les fondations carrées présentent les plus faibles contraintes ultimes, tandis que les plus grandes sont obtenues pour les fondations rectangulaires. On peut expliquer cela par

un phénomène de concentration du mécanisme de rupture pour les fondations carrées, moins observé pour les deux autres formes.

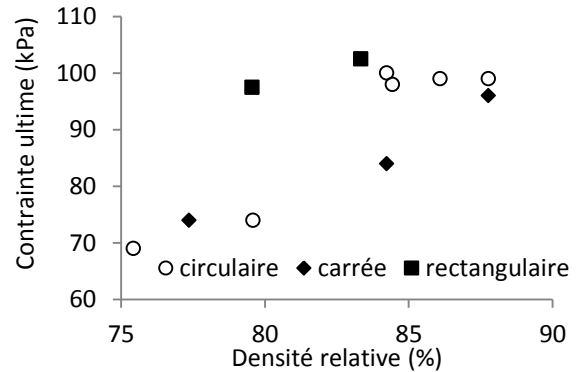


Figure 13. influence de la densité relative sur la capacité portante

En normalisant les contraintes ultimes, afin de comparer des résultats pour une densité relative égale, on remarque que les fondations circulaires et rectangulaires ( $L/B = 2$ ) sont respectivement 14 % et 21 % plus résistantes que la fondation carrée.

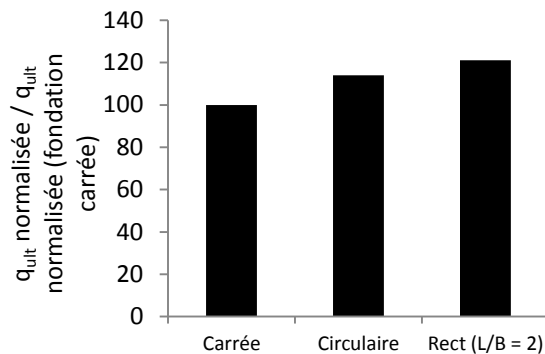


Figure 14. Ratio de contraintes ultimes des fondations par rapport à la fondation carrée

### 3.3 Comportement sous chargement cyclique

Après avoir vérifié la bonne reproductibilité des résultats obtenus en Japon et en France, il a été possible de poursuivre l'étude par une série d'essais de chargement cycliques. Ces essais visent à mieux comprendre la réponse des fondations superficielles rigides soumises à un chargement vertical cyclique, en mettant l'accent sur le rôle de la contrainte cyclique moyenne  $V_{cyc,moy}$  et de la demi-amplitude de chargement  $\Delta V_{cyc}$ .

Les différentes configurations de chargement étudiées sont regroupées dans le diagramme de stabilité présenté en (Figure 15). Les résultats mettent clairement en évidence que le comportement de la fondation dépend de l'interaction entre la contrainte

moyenne, l'amplitude des cycles et le nombre des cycles appliqués jusqu'à la rupture. Autrement dit, ce n'est pas un paramètre isolé qui gouverne la réponse, mais bien leur combinaison.

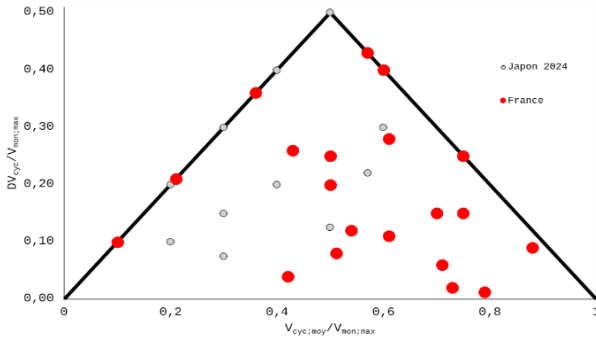


Figure 15. Configurations de chargement cyclique testées et réalisées dans le diagramme de stabilité.

Lorsque le rapport  $\frac{(DV_{cyc}/V_{mon,max})}{(V_{cyc,moy}/V_{mon,max})}$  est maintenu constant et égal à 0,5, une tendance nette apparaît: le nombre de cycles conduisant à la rupture diminue fortement lorsque la contrainte moyenne cyclique augmente (Figure 16), ce qui traduit une dégradation progressive de la capacité portante sous l'effet de sollicitations cycliques de plus en plus sévères. Des essais complémentaires réalisés en France confirment cette observation.

Pour d'autres valeurs de ce rapport, les tendances sont moins marquées. Cette absence de relation claire s'explique en partie par la diversité des situations étudiées. Dans certains cas, les valeurs de la demi-amplitude et de la contrainte moyenne cyclique sont très faibles, ce qui garantit la stabilité de la fondation, quel que soit le nombre de cycles appliqués. A l'inverse, certaines configurations correspondent à un déchargement presque complet de la fondation, un cas extrême qui génère des déplacements plus importants et perturbe la lecture globale des résultats. L'influence de l'amplitude des cycles apparaît plus nettement lorsque la contrainte moyenne est fixée. Pour une valeur de  $V_{cyc; moy}$  donnée, une augmentation de  $\Delta V_{cyc}$  conduit systématiquement à une réduction du nombre de cycles à la rupture. Ce comportement est clairement visible sur (Figure 17) pour deux niveaux distincts de contrainte moyenne, les deux séries présentant des évolutions très proches, ce qui suggère des mécanismes de dégradation similaires.

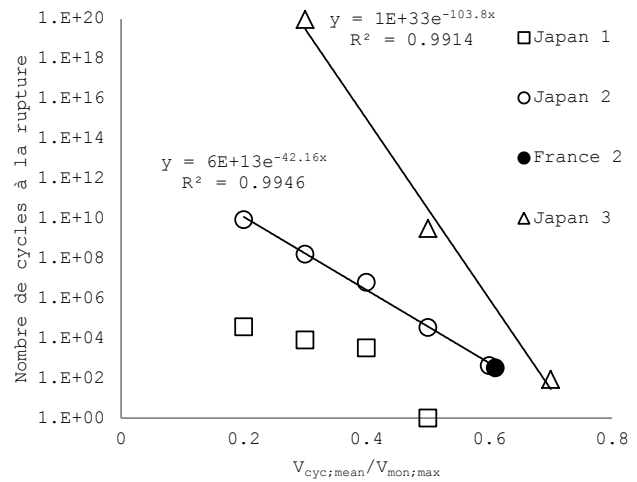


Figure 16: relation entre le nombre de cycles conduisant à la rupture et le rapport  $V_{cyc; moy}/V_{mon; max}$

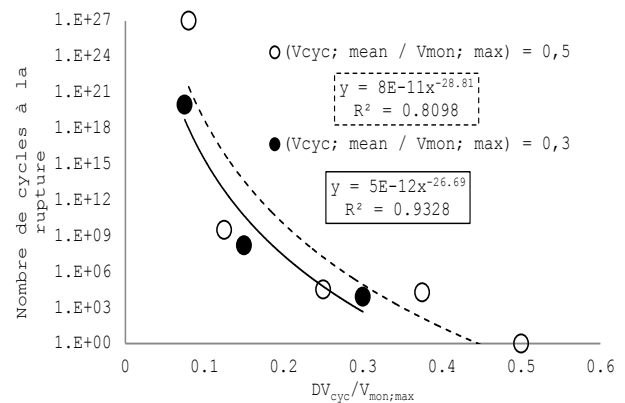


Figure 17: relation entre le nombre de cycles conduisant à la rupture et le rapport  $\Delta V_{cyc}/V_{mon; max}$

Enfin, lorsque la demi-amplitude normalisée  $\Delta V_{cyc}/V_{mon; max}$  est maintenue constante, les résultats indiquent également une influence de la contrainte moyenne sur la durée de vie cyclique de la fondation (Figure 18). Toutefois, la relation observée reste complexe et ne peut pas être décrite par une loi simple. Des essais complémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre l'interaction entre contrainte moyenne et chargement cyclique dans cette plage de sollicitation, ainsi que l'impact d'un déchargement total sur le comportement de la fondation.

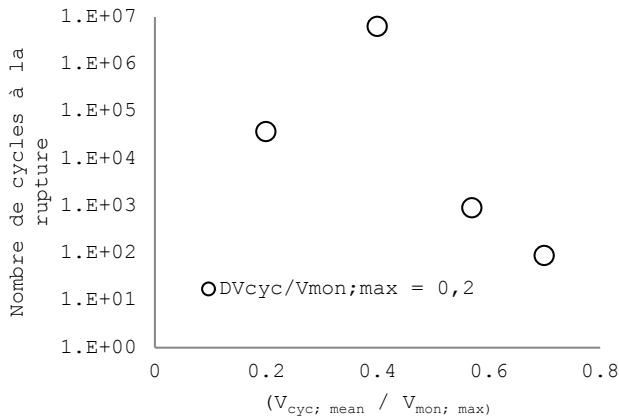


Figure 18: relation entre le nombre de cycles conduisant à la rupture et le rapport  $V_{cyc; moy} / V_{mon; max}$ .

#### 4 CONCLUSION

Cette étude expérimentale en modèle réduit à 1g a permis de mieux comprendre le comportement de fondations superficielles sur sable dense, soumises à des chargement monotones et cyclique. Les résultats montrent clairement que l'augmentation de la densité relative améliore la capacité portante.

Sous chargement monotone, toutes les fondations présentent des contraintes ultimes comparables, cependant, si l'on analyse dans le détail les résultats traduisant des mécanismes de rupture comparables. A l'inverse la fondation rectangulaire développe des charges ultimes nettement plus élevées, ce qui souligne l'existence d'un effet de forme marqué. Sa géométrie allongée favorise en effet la mobilisation d'un volume de sol plus important et améliore le confinement de massif sous la semelle.

Les essais sous chargement cyclique montrent que les sollicitations répétées entraînent une évolution progressive du comportement du système sol-fondation, caractérisée par une accumulation des déformations permanentes et une modification de la capacité portante mobilisable. Ces résultats rappellent l'importance de prendre en compte le caractère cyclique de chargement dans l'analyse de dimensionnement des fondations superficielles, en particulier pour les ouvrages soumis à des sollicitations répétées.

Les travaux à venir porteront sur l'étude de chargements excentrés et combinées, afin de se rapprocher davantage de situations rencontrées en

pratique et d'améliorer la compréhension globale du comportement des fondations superficielles.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ménard L., (1963b) Calcul de la force portante des fondations sur la base des essais pressiométriques – Second part, Sols-Soils, 6, pp. 9-31.
- Briaud J.-L., Gibbens R. (1994) Predicted and measured behaviour of five spread footings on sand. Settlement 94, Texas A&M University, June 16-18, 255 pages. (En anglais)
- Maréchal O. (1999). Portance de fondations superficielles établies à proximité de talus et soumises à des charges inclinées et excentrées. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 357 pages.
- De Beer E.E., Ladanyi B. (1961). Étude expérimentale de la capacité portante du sable sous des fondations circulaires établies en surface. Proc. 5th ICSMGE, Paris, Vol. 1, pp.577-585.
- Giraudet P. (1965). Recherches expérimentales sur les fondations soumises à des efforts inclinés ou excentrés. Annales des Ponts et Chaussées, vol. 3, pp. 167-193.
- Giroud J.P., Tran-W-Nhiem, Obin J.P. (1973). Tables pour le calcul des fondations. Tome 3. Dunod, Paris, 445 pages.
- Andersen K. H. (2009) Bearing capacity under cyclic loading — offshore, along the coast, and on land. (21st Bjerrum Lecture presented in Oslo, 23 November 2007), Can. Geotech. J., volume 46: 513–535. (en Anglais)
- Reiffsteck, P. Mohammad, D.D., Sanagawa, T., Szymkiewicz, F., Minatchy, C. and Makki, L. Small scale pressuremeter for shallow foundation model tests, Proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters, (en Anglais) 2015, 5 pages. (en Anglais)
- Reiffsteck, P., Szymkiewicz, F., Navarrete, M. B., & Luong, T. A. Prediction of bearing capacity and settlement using penetrometer design method for shallow foundation and load transfer curves. In: Cone Penetration Testing 2022. CRC Press, 2022. p. 1058-1064. (en Anglais)
- AFNOR, Geotechnical investigation and testing -- Testing of geotechnical structures -- Part 1: Testing of piles: static compression load testing, European Standard, NF EN ISO 22477-1. (en Anglais)
- Retamales S. L. (2022) Development of a method for evaluation of liquefaction potential of sands based on a dynamic penetrometer, PhD in Geotechnique, ENPC, 233 pages. (en Anglais)