

Modélisation en différences finies des fondations superficielles soumises à des efforts divers – Effets d’inclinaison et excentricité de la charge

Finite difference modelling of shallow foundations subjected to different stresses – Effects of load inclination and eccentricity

Tuan-Anh LUONG^{1,2,*}, Philippe Reiffsteck², Fabien Szymkiewicz², Miguel Angel Benz-Navarrete¹, Quoc-Anh Tran¹, Caroline Forestti Oliveira¹

1 Sol Solution, Riom, France

2 Université Gustave Eiffel, SRO, Champs sur Marne, France

**taluong@sol-solution.com*

RESUME : Le réseau du Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC) a réalisé dans les années 1980 une multitude d’essais de chargement de fondation à taille réelle. En exploitant la base de données de ces mesures, une étude de modélisation numérique a été conduite à l’aide de la méthode des différences finies (FDM) afin de mieux appréhender le comportement des fondations superficielles soumises aux charges inclinées/excentrées. La validation des modèles numériques implique la comparaison entre résultats calculés et mesures expérimentales, en termes de relations charge–tassement et de distributions de contraintes à la base. Deux sites avec sable à Labenne et limon à Jossigny sont principalement considérés. Par ailleurs, cette étude conduit également à optimiser les facteurs de capacité portante utilisés dans la conception des fondations en mettant en évidence les résultats obtenus avec les méthodes existantes, car les calculs actuels de la capacité portante sous de telles charges combinées peuvent être considérés comme conservatrices. Les conclusions de cet article contribuent à l’amélioration de la méthode de calcul des fondations superficielles sous les effets d’inclinaison et d’excentricité de la charge.

ABSTRACT: The French Road and public Works laboratories, LPC (acronym in French for *les Laboratoires des Ponts et Chaussées*) performed in the 80s a multitude of real-scale foundation loading tests. By exploiting the database of these measurements, the study aims to introduce a reliable numerical model using finite-difference method (FDM) to improve understanding of the behavior of shallow foundations submitted to planar inclined/eccentric loadings. The validation of the numerical models involves comparing the computed and measured results based on the load–settlement relationship, as well as the stress distribution at the base of the loaded footing. Two sites covering sandy at Labenne and fine soils at Jossigny are principally considered. Furthermore, this study also intends to optimize the bearing capacity factors used in footing design by highlighting the results obtained with existing methods, as their current design bearing capacities under such combined loadings can be regarded as conservatives. The conclusions from this paper contribute to the improvement of calculation method for the shallow foundations under effects of load inclination and eccentricity.

Mots-clés : fondations superficielles, essais de chargement, modélisation de FDM, charges inclinées/excentrées.

1 INTRODUCTION

Les fondations superficielles sont largement employées en génie civil, constituant la base de nombreux types d’ouvrages, tels que les maisons individuelles, les bâtiments industriels, les ponts ou encore certains ouvrages pétroliers. Cependant, les méthodes de conception de ces structures dans la pratique reposent principalement sur une approche traditionnelle et empirique qui s’avère quelque peu inexacte et inappropriée (Poulos et al., 2001). Par

ailleurs, dans le domaine des charges complexes (excentrées et inclinées) ou leurs combinaisons (tenseur V-H-M), les fondations superficielles ne sont pas toujours clairement estimées (Murff, 2012), ce qui se produit également souvent en raison du glissement ou du recentrage. D’autre part, la méthode des différences finies (FDM) s’élève comme une approches de modélisation géotechnique bien connues implémentée dans le logiciel FLAC développé par Itasca. Il utilise une méthode explicite, analysant le système d’équations différentielles par discrétisation

spatiale et temporelle, puis applique explicitement des algorithmes pour les résoudre (Cundall & Board, 1988). Cette approche permet donc de réduire considérablement le stockage mémoire et le temps de calcul (Masouleh & Fakharian, 2008). De plus, le logiciel offre également la possibilité de travailler en petite ou grande déformation, ce qui est particulièrement adapté à la modélisation de phénomènes géotechniques non linéaires (Ghee & Guo, 2010).

Par conséquent, cet article présente une étude de modélisation numérique à l'aide de l'approche FDM dans FLAC avec sa dernière version 3D, afin de reproduire des essais de chargement de fondations superficielles sur des sols sableux et limoneux. Elle est suivie ensuite d'une simulation des variations des modes de chargement. La comparaison entre les données calculées et expérimentales, concernant de relations charge-tassement et de distributions de contraintes à la base, permet de valider la pertinence des modèles numériques élaborés. Les résultats obtenus dans ce papier contribuent à mieux comprendre le comportement des fondations soumises à des charges excentrées ou inclinées, et d'optimiser la conception des fondations superficielles.

2 MODELISATION DES ESSAIS DE CHARGEMENT

2.1 Données d'entrée et modèle constitutif

Une importante série d'expérimentations de plus d'une centaine d'essais de chargement ont été réalisés en période de 1978 à 1980 par le réseaux de LPC sur des sites en France, présentant différents types de sols et modes de chargement (Canépa & Despresles, 1990a, 1990b). La fondation superficielle utilisée pour des essais consiste en une plaque en acier de 1x1 mètre carré avec une épaisseur modélisée de 8 centimètres. Elle est positionnée sur place sans encastrement et est équipée de plusieurs capteurs de pression sous sa base.

Pour les sols, deux sites expérimentaux sont ensuite présentés dans cette étude. Le premier site se situe à Jossigny vers l'Est de Paris. Le sol du site est identifié en différentes couches avec sol limoneux dans les 3 premiers mètres de profondeur, puis couche argileuse dans les 2 mètres suivants et enfin sol sableux. Le niveau phréatique varie ici entre 1 et 2 mètres de profondeur. En revanche, le deuxième site caractérisé homogènement par sol sableux des dunes est à Labenne vers le Sud-ouest du pays. Le niveau de la nappe phréatique se trouve à une profondeur importante de 40 mètres, ce qui permet donc de la négliger dans la modélisation.

Tableau 1. Données d'entrée du modèle numérique du sol

| Δz (m) | E_y (MPa) | γ (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) | φ (°) | c (MPa) |
|-------------------|----------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------|--------------|
| Labenne | | | | | |
| 0 - 1 | 29,0 | | | | |
| 1 - 3 | 41,4 | 1600 | n/d | 32,5 | 0 |
| 3 - 6 | 37,8 | | | | |
| Jossigny | | | | | |
| 0 - 1 | 14,5 | | | | |
| 1 - 3 | 24,3 | 1950 | 1971 | 21,3 | 12,9 |
| 3 - 5 | 115,0 | 2100 | 2053 | 23,0 | 20,6 |
| 5 - 8 | 64,0 | 1960 | 1984 | 29,4 | 5,8 |

Δz : épaisseur des couches de sol, E_y : module d'Young, γ et γ_s : densité et densité saturée, φ : angle de frottement et c : cohésion

Les données de ces sols (Tableau 1) sont résumées à partir de divers travaux comme (Bakir et al., 1994) et (Amar et al., 1994) et sont utilisés comme données d'entrée du modèle numérique. Ces informations sont en effet obtenues à partir des différents essais de caractérisation, y compris des investigations in situ et des essais en laboratoire. Les valeurs indicatives du module d'élasticité de Young sont délivrées à l'aide de la corrélation normalisée avec la module pressiométrique de Ménard pour calculer des tassements des fondations superficielles dans (AFNOR, 2013). Le modèle constitutif élasto-plastique avec le critère de rupture classique de Mohr-Coulomb reposant sur une fonction d'élasticité en cisaillement et en tension est appliqué pour simuler le comportement du sol.

2.2 Paramètres d'interface

Afin de dissocier les effets propres au comportement du sol et de la fondation de ceux liés à la zone de contact, l'interface est généralement modélisée comme une zone très rigide, dépourvue de déformation volumique, où seuls interviennent des mécanismes locaux tels que le glissement ou l'adhérence mobilisée en traction et en cisaillement. La raideur normale et la raideur tangentielle de l'interface sont évaluées à partir de l'Equation (1) proposée par (Itasca, 2024) :

$$k_n = k_s \geq 10 \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{min}} \quad (1)$$

où k_n et k_s représentent respectivement la raideur normale et la raideur tangentielle de l'interface, ΔZ_{min} désigne la taille de l'élément le plus fin dans la direction normale au milieu adjacent, tandis que K et G correspondent respectivement au module volumique et au module de cisaillement du sol.

Tableau 2. Paramètres de l'interface sol-fondation

| Site | Rigidité normale, k_n (MPa/m) | Rigidité au cisaillement, k_s (MPa/m) | Angle de frottement (°) | Coésion (MPa) |
|----------|---------------------------------|---|-------------------------|---------------|
| Labenne | 5000 | 5000 | 22 | 0 |
| Jossigny | 2700 | 2700 | 14 | 0 |

L'angle de frottement de l'interface est pris égal aux deux tiers de celui du sol, tandis que la cohésion est fixée à une valeur nulle, conformément aux recommandations de la norme NF P94-261 (AFNOR, 2013). Le Tableau 2 ci-dessus présente les valeurs des paramètres pour l'interface sol-fondation.

2.3 Géométrie du modèle numérique

L'objet de la modélisation correspond à un essai à l'échelle réelle réalisé sur un terrain expérimental. Dans ce contexte, le sol à modéliser est considéré comme un milieu continu et semi-infini sans limites dimensionnelles fixées. Par conséquent, la réalisation d'une étude visant à déterminer la géométrie optimale du modèle numérique des fondations superficielles s'avère indispensable.

(Mestat & Berthelon, 2001) ont présenté des travaux numériques consacrés à la modélisation de fondations superficielles carrées de dimensions 1×1 m, sur un sol sableux à Labenne. La dimension du modèle a été fixée à 10 m, soit dix fois la dimension de la fondation, pour assurer l'absence de déplacements verticaux et horizontaux sur les frontières latérales et inférieures du domaine maillé. Par ailleurs, (Salden, 1980) a introduit une relation entre l'angle de frottement interne du sol (φ) et la distance entre le bord de la fondation et la surface de rupture latérale, notée a , normalisée par la largeur de la fondation B . Selon les relations proposées par divers auteurs (Figure 1), la distance a est donc recommandée au moins égale à 3,5 fois la largeur de la fondation, B pour les sols à Labenne et Jossigny. Par conséquent, une étude paramétrique a été réalisée afin de proposer la taille du modèle numérique optimisée (Tableau 3).

Tableau 3. Etude paramétrique sur la géométrie du modèle

| Dimensions du modèle de fondation 1×1 m | Dimension horizontale, H (m) | Dimension verticale, V (m) |
|--|--------------------------------|------------------------------|
| Taille 1 | 10,0 | 9,3 |
| Taille 2 | 5,0 | 7,3 |
| Taille 3 | 3,5 | 6,2 |

D'autre part, les fondations utilisées lors des essais de chargement in situ présentent généralement une géométrie symétrique, telles que les plaques carrées de

1×1 m. Pour la caractéristique symétrique de la géométrie, trois configurations géométriques sont ainsi proposées : le modèle en quart, le modèle en demi et le modèle complet. En effet, (Oliveira, 2022) a également mis en évidence la similitude des résultats numériques obtenus entre un modèle complet et un modèle en quart, en s'appuyant sur la nature axisymétrique de son problème. Ces aspects seront analysés dans la section suivante.

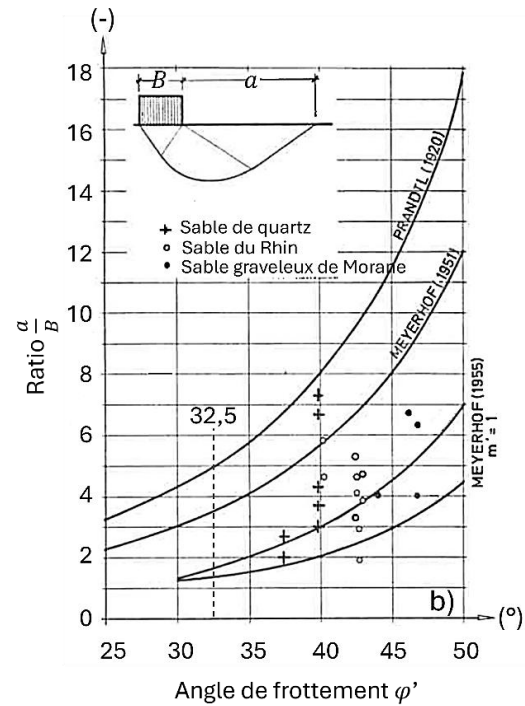


Figure 1 : Relation entre la distance de la surface de glissement normalisée par la largeur de la fondation et l'angle de frottement du sol (Salden, 1980)

2.4 Conditions aux limites et maillages

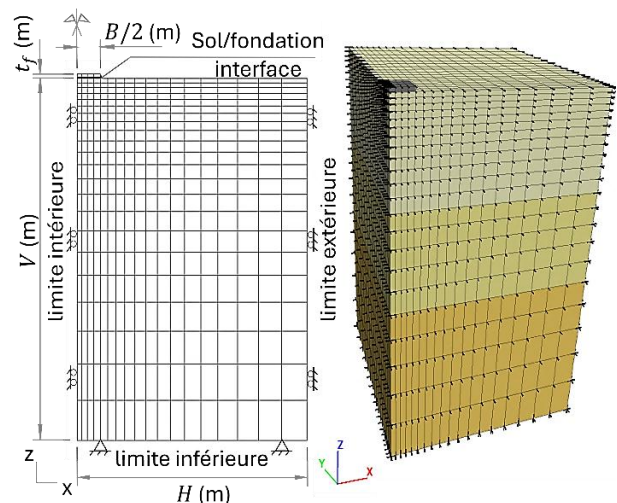


Figure 2 : Coupe transversale du modèle en quart

S'agissant des conditions aux limites, les vecteurs de vitesse associés aux nœuds situés sur les faces latérales

et à la base du modèle sont contraints à une valeur nulle dans la direction normale. Cette condition garantit l'absence de déplacement dans la direction normale aux limites du domaine au fil du temps.

Pour le système de maillages, ils sont conçus de manière à présenter une densité élevée dans la zone entourant la fondation en raison de l'interaction sol-fondation, puis à s'élargir progressivement vers les limites du modèle. De plus, la variation de taille entre les mailles adjacentes doit rester progressive : le rapport de dimension entre deux éléments voisins est généralement compris entre 0,9 et 1,1 (Zhou, 1997). La Figure 2 montre la coupe transversale schématique d'un modèle numérique en quart.

3 EVALUATION DE LA SIMULATION DE CHARGEMENT

3.1 Chargement vertical et centré

Les résultats numériques obtenus à partir de la simulation sous charge simple, issus de l'étude paramétrique portant sur la géométrie, sont comparés aux données expérimentales des essais de chargement effectués par LPC dans les années 1980. L'objectif est de comprendre l'impact des modifications géométriques sur le modèle numérique et identifier la configuration géométrique optimale. Plusieurs modèles FDM de différentes dimensions géométriques et caractéristiques symétriques indiquées dans la section 2.3, sont alors soumis numériquement à ces efforts simples. Les résultats numériques présentés par les courbes charge-tassement sont obtenues en mesurant la valeur moyenne de la contrainte et du déplacement à l'interface sol-fondation.

Les Figures 3a et 3b présentent les courbes de charge-tassement obtenues à partir des modèles FDM, respectivement pour trois tailles proposées (Tableau 3) et pour trois caractéristique symétriques, dans le cas du site à Labenne. Cela illustre que les courbes numériques pour ces différentes configurations géométriques sont très voisines. En outre, en confrontation avec les courbes expérimentales, elles sont également comparables. Les résultats FDM se trouvent toujours dans la plage des données mesurées montrant une bonne concordance et prédiction.

Cette étude paramétrique permet de conclure que les effets de la géométrie du modèle sur les résultats numériques se sont avérés minimes, car les changements ont peu d'influence sur la zone critique autour de la fondation, où se manifeste l'interaction sol-fondation. En plus, la comparaison avec les mesures permet de valider les modèles FDM établis présentant dans un premier temps une bonne

reproductibilité des essais de chargement sous une charge centrée et verticale.

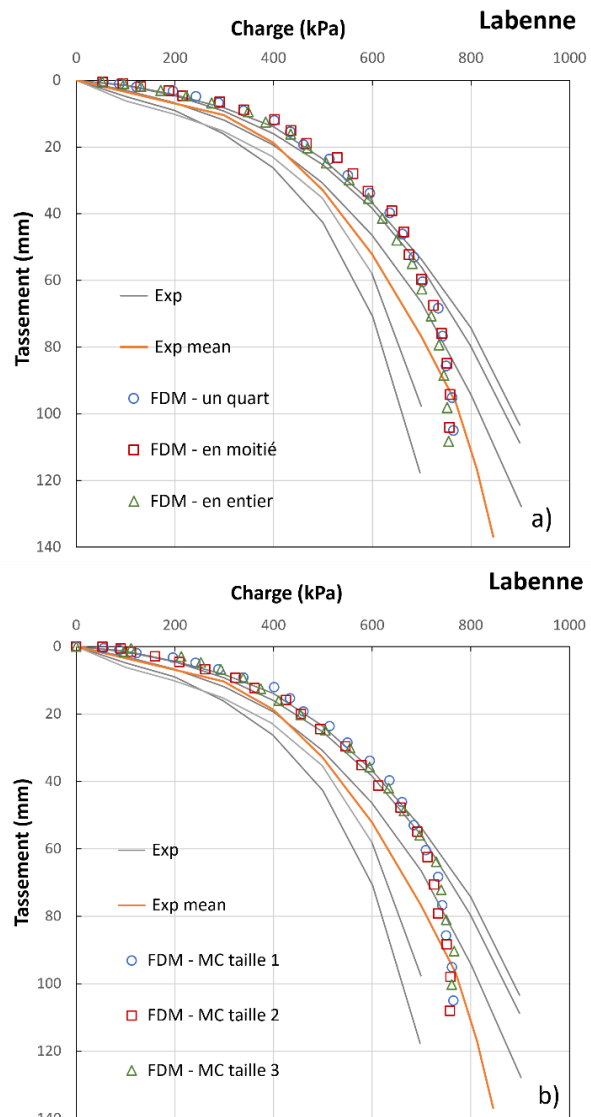


Figure 3 : Effet géométrique a) dimensions et b) caractéristiques symétriques sur courbes charge-tassement

3.2 Chargement vertical et excentré

Pour étudier le comportement des fondations superficielles sous chargement excentré, trois niveaux d'excentricité ($e = 0,1$; $0,2$ et $0,3$) ont été considérés et comparés au cas de chargement centré ($e = 0$). Le modèle en demi avec la taille 2 dont le plan de coupe coïncide avec celui de l'excentricité est appliqué.

Les Figures 4a et 4b présentent les courbes numériques de charge-tassement et de charge-rotation sous l'effet excentrique en comparaison avec les données expérimentales, respectivement pour les sites Labenne et Jossigny. Pour la relation charge-tassement, les résultats expérimentaux et numériques montrent une bonne concordance, en particulier dans la phase élastique initiale. Les courbes montrent une

diminution rapide de la capacité portante lorsque l'excentricité augmente, à l'exception d'une légère hausse observée pour les courbes expérimentales avec $e = 0,1$ et $e = 0,3$ à Jossigny, probablement liée à des imprécisions expérimentales. Concernant la relation charge-rotation, toutes les courbes obtenues à Jossigny présentent une forte concordance entre les résultats des essais expérimentaux et des modélisations numériques. En revanche, à Labenne, seuls les résultats correspondants à $e = 0,3$ sont comparables. En conclusion, pour les sols limoneux et sableux, l'augmentation de l'excentricité entraîne une diminution de la capacité portante et une augmentation de la rotation de la fondation.

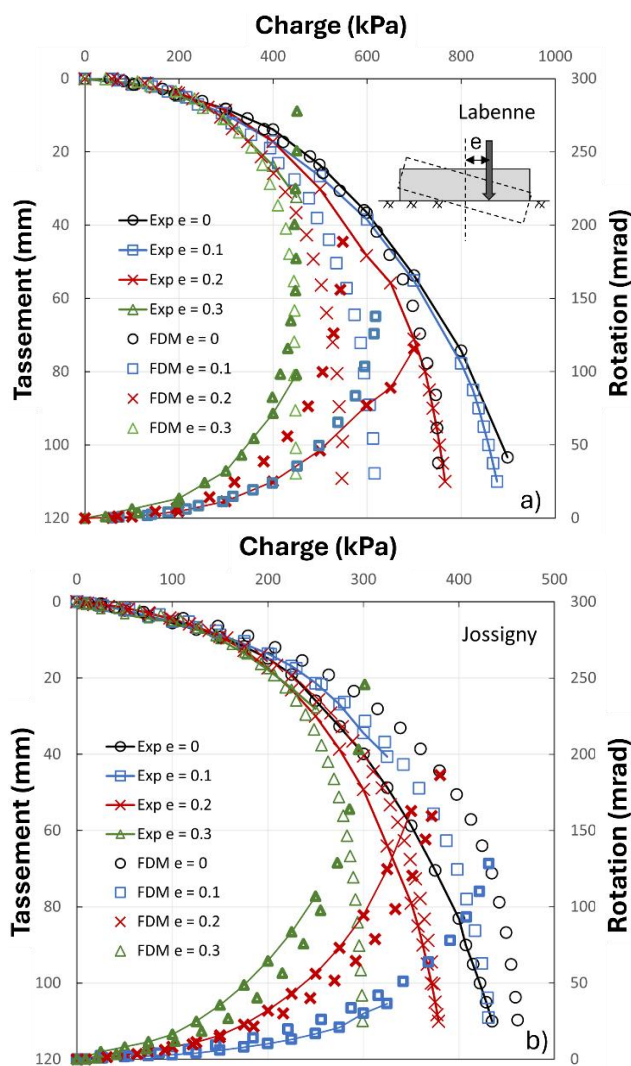


Figure 4 : Courbes charge-tassement et charge-rotation sous effet excentrique sur sites : a) Labenne et b) Jossigny

En outre, les Figures 5a et 5b montrent respectivement la distribution des contraintes de contact sous la base le long de l'axe symétrique et sur les bords de la fondation à Jossigny, mesurées au moment de la rupture conventionnelle ($s = 10\%B$). De manière

générale, la distribution des contraintes est symétrique dans le cas d'un chargement centré, puis devient progressivement asymétrique lorsque le chargement est excentré, évoluant vers une forme trapézoïdale, puis triangulaire. Cette évolution augmente avec l'incrément de l'excentricité de la charge appliquée. Pour le cas $e = 0,3$, les données expérimentales le long de l'axe présentent des variations importantes, probablement liées à un renversement dans les deux directions horizontales pendant l'essai.

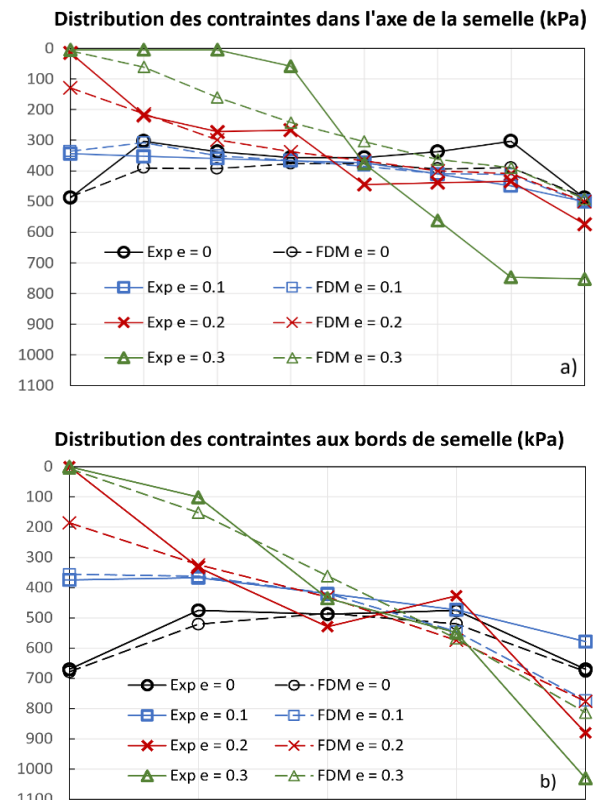


Figure 5 : Distributions de contraintes sous effet excentrique : a) axe de symétrie et b) bords de la semelle

D'ailleurs, on peut trouver, notamment dans le cas de la charge centrée, que la contrainte de contact est minimale au centre de la semelle (environ 350 kPa), s'accroît le long des bords (environ 500 kPa) et atteint un maximum vers les coins (environ 700 kPa). En effet, cette observation est également corroborée par (Cajka, 2003), utilisant la méthode des éléments finis, ou celle de (Nater et al., 2003), appliquant la méthode des différences finies.

3.3 Chargement incliné et centré

Une étude similaire a été menée pour analyser le comportement des fondations superficielles soumises à des charges inclinées, avec des angles d'inclinaison (δ) de 10° , 20° et 30° . Le modèle en demi avec la taille 2 est toujours appliqué.

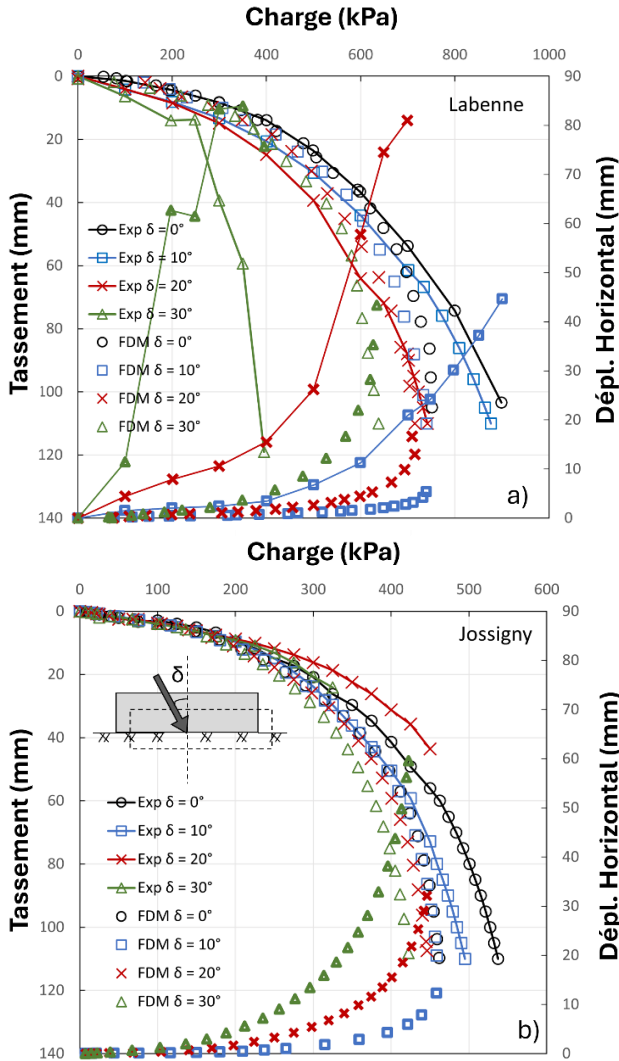


Figure 6 : Courbes charge–tassement et charge–rotation sous effet d’inclinaison sur sites : a) Labenne et b) Jossigny

Figure 6a et 6b présentent les courbes numériques de charge-tassement et de charge-déplacement horizontal sous l’effet d’inclinaison en comparaison avec les données expérimentales, respectivement pour les sites Labenne et Jossigny. Concernant la relation charge-tassement, les résultats montrent une bonne concordance. En général, l’augmentation de l’angle d’inclinaison entraîne une diminution de la capacité portante. Cependant, pour Jossigny, les courbes expérimentales à des inclinaisons de 10° et 20° présentent une légère augmentation, dépassant même le cas de chargement centré. À Labenne, la courbe expérimentale à 30° chute brusquement, probablement en raison d’un glissement de la fondation lors de l’essai. La différence entre les résultats peut s’expliquer par un effet de butée plus marqué dans le cas numérique. D’autre part, pour la relation charge-déplacement horizontal, les résultats numériques surestiment significativement la résistance à Labenne pour les trois niveaux d’inclinaison, tandis qu’aucune donnée expérimentale n’est disponible pour Jossigny.

Pour conclure, les simulations numériques des essais de chargement sous charge simple ou complexe (inclinée ou excentrée) fournissent généralement des résultats acceptables, en termes de la relation charge-déplacement et de la distribution des contraintes, en comparant avec les données expérimentales sur deux sites : Labenne (sable) et Jossigny (limon). Cela permet ainsi de confirmer la pertinence et la fiabilité de la modélisation par la méthode FDM. L’évaluation de la capacité portante des fondations superficielles sous charges combinées sera ensuite réexaminée en comparant avec les autres approches existantes.

4 ANALYSE DE RESULTAT

Le comportement des fondations superficielles sous charge complexe est étudié à travers une analyse paramétrique des facteurs de portance excentrique, i_e , et d’inclinaison, i_δ calculés par l’Equation (2). Les relations entre ces facteurs et l’excentricité ou l’angle d’inclinaison de la charge sont mises en évidence. La charge maximale, ou la capacité portante, d’une fondation est conventionnellement déterminée comme la valeur minimale entre : la charge correspondant à un tassement vertical égal à un dixième de la largeur de la fondation ($s = 10\%B$), et la charge correspondant à un déplacement horizontal égal à un vingtième de la largeur de la fondation ($u = 5\%B$), soit respectivement 100 et 50 mm pour une fondation carrée de 1×1 m.

$$i_{e/\delta} = \frac{q_{e/\delta}}{q_0} \quad (2)$$

où $q_{e/\delta}$ désigne la capacité portante de la fondation superficielle sous effet excentrique ou incliné, et q_0 correspond à la capacité portante sous charge simple.

Tableau 4. Paramètres intrinsèques du sol proposés

| Sols | Angle de frottement, ϕ ($^\circ$) | Cohésion, c (MPa) |
|--------------------|--|---------------------|
| N° 1 (Jossigny) JO | 21,3 | 13 |
| N° 2 (Labenne) LA | 32,5 | 0 |
| N° 3 | 25 | 0 |
| N° 4 | 40 | 0 |
| N° 5 | 32,5 | 21 |

Par ailleurs, la variation des propriétés du sol, caractéristiques intrinsèques, angle de frottement ϕ et cohésion c , (Tableau 4) est réalisée à l’aide de modèles numériques afin de déterminer l’universalité de la méthode. Par conséquent, à partir des modèles numériques établis pour Labenne et Jossigny, plusieurs simulations supplémentaires ont été réalisées en faisant varier les paramètres.

4.1 Effet excentrique

La Figure 7 présente la relation entre le facteur de portance excentrique i_e et le rapport d'excentricité e/B , pour une largeur de fondation donnée. L'excentricité e/B varie dans une plage comprise entre 0 et 0,5, correspondant respectivement au déplacement du point d'application de la charge du centre vers le bord extrême de la semelle.

Comparée aux résultats numériques, l'approche de (Meyerhof, 1953) fournit initialement une estimation satisfaisante, mais tend à sous-estimer de manière significative la capacité portante dès que l'excentricité e dépasse 0,2. De plus, (Michalowski & You, 1998) ont présenté leurs résultats en appliquant l'approche cinématique de l'analyse limite, en considérant différentes hypothèses pour le mécanisme de l'interface sol/fondation. On trouve que les résultats analytiques du modèle d'interface « *no separation* » concordent bien avec ceux numériques obtenus par FDM. Inspiré de ce dernier modèle d'interface, une légère modification est introduite pour estimer le facteur d'excentricité dans cette étude l'Equation (3). Cette relation reproduit au mieux les résultats numériques.

$$i_e = \frac{1}{1+2.5\frac{e}{B}} \quad (3)$$

4.2 Effet d'inclinaison

De la même manière, la Figure 7 b présente la relation entre le facteur de portance d'inclinaison i_δ et l'angle d'inclinaison de la charge appliquée δ . Le rapport de l'angle d'inclinaison $\delta/180^\circ$ est considéré dans la plage de 0 à 0,5, correspondant respectivement à une orientation de la charge purement verticale ($\delta=0^\circ$) à une orientation presque horizontale ($\delta=90^\circ$) appliquée au centre de la semelle.

Les facteurs d'inclinaison sont généralement estimés selon l'approche analytique de (Vesic, 1975), reposant sur trois coefficients principaux $i_{\delta c}$, $i_{\delta q}$ et $i_{\delta \gamma}$, correspondant respectivement aux contributions de la cohésion, de la profondeur et de la surcharge gravitaire, et est standardisés selon l'Eurocode 7 ou la norme française (AFNOR, 2013). Dans la figure, les différentes estimations rapportées présentent des sous-estimations de la capacité portante par rapport à la méthode FDM, car leurs courbes chutent rapidement et se situent en dessous des résultats numériques. Basé sur les résultats numériques, cette étude propose également une formule simple pour estimer le facteur de portance d'inclinaison, i_δ , détaillée dans l'Equation (4). Il convient de noter que cette équation est similaire à celle utilisée dans les méthodes numériques et analytiques de (Van Baars, 2014), pour le cas $\varphi = 0$.

$$i_\delta = \cos^2\left(\pi \frac{\delta}{180^\circ}\right) \quad (4)$$

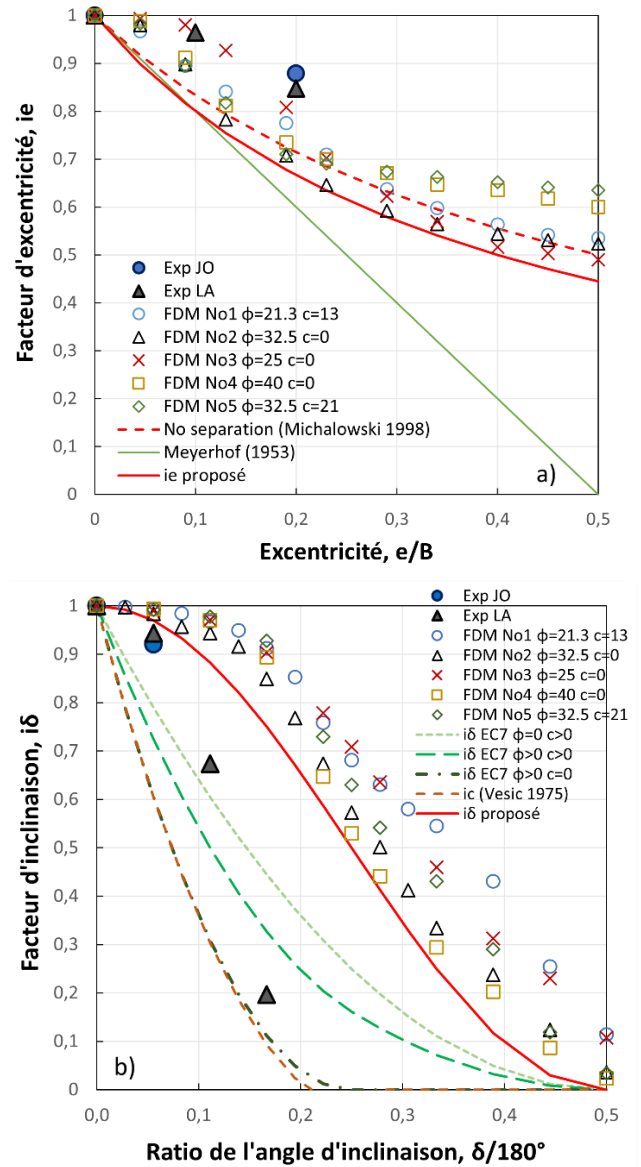


Figure 7 : Relations (a) entre le facteur excentrique et le rapport d'excentricité et (b) entre le facteur d'inclinaison et l'angle d'inclinaison de la charge

5 CONCLUSIONS

La modélisation des essais de chargement à l'aide de la méthode FDM et la simulation sous charges différentes ont été présentés dans cette publication. La comparaison avec les mesures a révélé que les résultats numériques obtenus étaient satisfaisants.

En plus, plusieurs conclusions peuvent alors être remarquées : 1) les contraintes à la base d'une semelle rigide, chargée verticalement sont maximales aux coins de la semelle, diminuent progressivement vers les bords et atteignent un minimum au centre ; 2) par

rapport aux résultats numériques, la méthode basée sur la règle de la surface de contact effective de Meyerhof sous-estime la capacité portante excentrique lorsque $e > 0,2$; 3) pour l'effet d'inclinaison, les méthodes existantes proposent encore des résultats de conception des fondations conservatrices. Par conséquent, deux formules ont été proposées pour améliorer les facteurs de portance excentrique i_e et d'inclinaison i_δ , qui gouvernent le comportement des fondations superficielles. Enfin, les résultats obtenus de cette étude permettent d'avoir une meilleure compréhension du comportement des fondations superficielles soumises à des charges excentrées ou inclinées et d'optimiser leur conception.

REMERCIEMENTS

Cet article a également été réalisé grâce au soutien financier de l'agence de financement ANRT.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- AFNOR. (2013). NF P94-261 - Justification of geotechnical work - National application standards for the implementation of Eurocode 7 - Shallow foundations (p. 160).
- Amar, S., Baguelin, F., Canepa, Y., & Franck, R. (1994). Étude expérimentale du tassement des fondations superficielles. *XII ICSMFE, New Delhi*, 623–626.
- Bakir, N.-E., Garnier, J., & Canepa, Y. (1994). Etude sur modèles centrifuges de la capacité portante de fondations superficielles. *Série Géotechnique GT 59, LCPC*, 391.
- Cajka, R. (2003). Numerical Analysis of Contact Pressure under Shallow Foundation. *International Symposium on Shallow Foundations, FONDSUP 2003, 5.-7. November 2003, Paris, France, ISBN 2-7208-0355-3*.
- Canépa, Y., & Despresles, D. (1990a). Catalogue des essais de chargement de fondations superficielles réalisés sur sites par les LPC (1978-1990). *FAERI.17 020. LREP Melun, Décembre 1990*.
- Canépa, Y., & Despresles, D. (1990b). Fondations superficielles – site expérimental de Jossigny – Mesure des pressions de contact sol-semelle. *Dossier 4035. LREP Melun, Novembre 1990*.
- Cundall, P. A., & Board, M. (1988). A microcomputer program for modelling large-strain plasticity problems. *Proc. Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, 2101–2108*.
- Ghee, E. H., & Guo, W. D. (2010). FLAC3D analysis on soil moving through piles. *Frontiers in Offshore Geotechnics II, May*, 489–494. <https://doi.org/10.1201/b10132-65>
- Itasca. (2024). Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D, version 7.0. *Documentation, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, USA*.
- Masouleh, S. F., & Fakharian, K. (2008). Verification of Signal Matching Analysis of Pile Driving Using a Finite Difference Based Continuum Numerical Method. *International Journal of Civil Engineering*, 6(3), 174–183.
- Mestat, P., & Berthelon, J. P. (2001). Modélisation par éléments finis des essais sur fondations superficielles à Labenne. *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, 234.
- Meyerhof, G. G. (1953). Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads. *Proc. 3rd ICSMFE., Vol. I, Zurich*.
- Michalowski, R. L., & You, L. (1998). Effective width rule in calculations of bearing capacity of shallow footings. *Comput Geotech* 23:237–253. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(98\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(98)00024-X)
- Murff, J. D. (2012). Estimating capacity of offshore foundations. *Paper Presented at the Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies - Present and Future, London, UK*.
- Nater, P., Laue, J., & Springman, S. M. Glanzmann, P. (2003). Stress distribution under a shallow foundation on layered soil: Physical and Numerical Investigations. *FONDSUP 2003, 5.-7. November 2003, Paris, France*, 369–380.
- Oliveira, C. F. (2022). Interpretation de l'essai de chargement dynamique en pointe penetrométrique. *Doctoral Thesis, Clermont Auvergne University*.
- Poulos, H. G., Carter, J. P., & Small, J. C. (2001). Foundations and retaining structures – research and practice. *Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, January*, 80 p.
- Salden, D. (1980). Der einfluss der sohlenform auf die traglast von fundamenten. *Baugrundinstitut, Universität Stuttgart*.
- Van Baars, S. (2014). The inclination and shape factors for the bearing capacity of footings. *Soils and Foundations*, 54(5), 985–992. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.09.004>
- Vesic, A. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. *Winterkorn FS, Fand HY Eds, Foundation Engineering Handbook*, 4. https://doi.org/10.3208/sandf.37.4_77
- Zhou, S. (1997). Caractérisation des sols de surface a l'aide du penetrometre dynamique léger a energie variable type Panda. *Doctoral Thesis, Blaise Pascal University - Clermont II*.