SIMULATION NUMERIQUE D'ESSAIS DE CHARGEMENT DE SEMELLES FILANTES EN CENTRIFUGEUSE

Farid KAOUA
Ingénieur Génie Civil ENP, Docteur d'Etat
Maître Assistant IGC, USTHB Alger
Ramdane BAHAR
Ingénieur ENTP, Docteur d'Etat
Maître Assistant Université de Tizi-Ouzou

Résumé

Avant l'application industrielle d'un modèle, il importe de vérifier sa validité sur des problèmes aux limites. Cette étape est le point crucial du processus de validation. En effet, il s'agit donc dans un premier temps de réaliser ou de collecter des expérimentations, le plus souvent sur des modèles réduits. Or ces derniers ne reflètent pas fidèlement les conditions expérimentales réelles, d'où le recours aux modèles centrifugés.

Après un exposé de l'intérêt et du principe de ces essais, des exemples d'essais de chargement de fondations superficielles en centrifugeuse seront présentés ainsi que leurs simulations numériques avec le modèle hyperbolique de DUNCAN.

Mots clés : modèle réduit • centrifugeuse • fondation • sable.

1 INTRODUCTION

Le recours aux modèles réduits est une pratique courante et ancienne en géotechnique. Les résultats obtenus servent à la résolution d'innombrables problèmes. Si les développements des méthodes numériques et la puissance des ordinateurs ont fait que le calcul a supplanté les modèles physiques analogiques, les modèles réduits conservent un intérêt indéniable lorsque :

- la capacité de calcul disponible s'avère insuffisante en raison de la complexité de la géométrie du problème traité ou de la loi de comportement des matériaux entrant en jeu ;
- le comportement des matériaux ne peut être correctement décrit.

Les études sur ouvrages en grandeur réelle ne fournissent pas non plus la voie expérimentale incontestable. Outre l'aspect coût, différents facteurs viennent souvent tempérer l'intérêt ou la portée des observations faites sur ouvrages réels.

Sans chercher à dresser une longue liste d'arguments à l'appui de cette opinion, notons que :

- lorsqu'il ne s'agit pas d'ouvrages expérimentaux proprement dits, leur destination finale ne permet pas de les conduire jusqu'à la ruine ; le comportement n'est alors observable que dans un domaine où les déformations sont limitées ;
- les conditions géotechniques sont fréquemment hétérogènes et les caractéristiques des sols ne sont qu'incomplètement et imparfaitement évaluées à partir de quelques essais en place ou de laboratoire ;
- les conditions aux limites, sont souvent imprécises.

Les modèles réduits fournissent, eux, des corps d'épreuve beaucoup moins onéreux, dont les caractéristiques tant géométriques que mécaniques peuvent être mieux contrôlées par l'expérimentateur.

Ils se prêtent de ce fait en particulier aux études paramétriques, ce qui n'est guère envisageable sur ouvrage réel. A contrario, la maquette ne permet pas la représentation de tous ces détails ; elle ne permet pas toujours l'emploi de matériaux identiques à ceux du problème réel, et la validité de l'extrapolation des résultats aux ouvrages en vraie grandeur est limitée par la qualité de la similitude qui peut être obtenue. La raison conduit à considérer que les essais sur modèles réduits sont une voie de recherche complémentaire des analyses théoriques et numériques, des études rhéologiques et des expérimentations sur ouvrages réels en vraie grandeur.

Cependant, ces essais ont la plupart du temps été réalisés en laboratoire sous gravité normale, ce qui ne permet pas de satisfaire aux conditions de similitude de la mécanique comme nous le verrons plus loin. La validité de la transposition à des ouvrages des résultats ainsi obtenus a souvent été mise en défaut lorsque l'on disposait de résultats en vraie grandeur.

L'existence de moyens permettant de satisfaire aux lois de similitude, en l'occurence de grandes centrifugeuses, devraient désormais permettre de dissiper le sentiment de suspicion qui s'était instauré à l'égard des essais sur modèle réduit en géotechnique, et de rendre à cette approche expérimentale une place semblable à celle qu'elle occupe dans d'autre disciplines.

Pour observer les mêmes phénomènes sur un ouvrage en grandeur réelle et sur son modèle en échelle réduite, il et nécessaire de respecter, entre les différentes grandeurs physiques qui interviennent, certaines relations dites conditions de similitude.

Ces conditions se présentent sous la forme de relations auquelles doivent satisfaire les échelles, notées f*, c'est-à-dire les facteurs définis comme le rapport de la grandeur physique de la maquette , fm, à la grandeur homologue du prototype, fp.

La recherche de conditions de similitudes peut s'effectuer à partir d'équations et de conditions aux limites, en traduisant leur invariance dans un changement d'unités.

Pour les milieux continus, les équations indéfinies

$$\frac{\partial \sigma ij}{\partial xj} + \rho \left[gi - \frac{d^2 xi}{dt^2} \right] = 0 \qquad (1)$$

- xj désignant les coordonnées
- σij les composants du tenseur des contraintes
- xi déplacements
- gi forces de masse
- ρ masse volumique
- t temps

d'équilibre de la mécanique sont :

Si l'on modifie les unités, on obtient :

$$\sigma^* \, l^{*-1} \frac{\partial \sigma' ij}{\partial x' j} + \rho^* \, \rho \left[g^* g' - x^* t^{*-2} \frac{d^2 x' i}{dt'^2} \right] = 0 \quad (2)$$

l* étant l'échelle de réduction des longueurs.

L'équation restera formellement vérifiée si les échelles satisfont aux deux conditions :

$$\sigma^* = \rho^* \; g^* \; I^* \qquad (3)$$
$$x^* = g^* \; I^{*2} \qquad (4)$$

En mécanique des fluides, les expériences sont faites souvent dans les conditions ambiantes (pesanteur terrestre : g* = 1) tandis que les matériaux du problème prototype sont remplacés dans le modèle réduit par d'autres matériaux (fluides de densité et de viscosité différentes par exemple) dont les caractéristiques mécaniques sont choisies pour satisfaire aux conditions de similitude (3).

Dans la majorité des problèmes rencontrés en géotechnique, les efforts pondéraux tiennent un rôle essentiel dans les équilibres en jeu. Dès lors, il est nécessaire de chercher à satisfaire au mieux la condition de similitude.

Pour recréer le même état de contrainte, σ* = 1, sur le modèle réduit (l* ≤ 1), la condition (3) peut être satisfaite en augmentant soit la masse volumique ρ*, soit l'intensité des forces de masses g*. Dans le premier cas, il s'agit de trouver des matériaux de substitution plus denses.

En l'absence de matériau de substitution de masse volumique plus élevée, la solution restante est d'accroître les forces de masse appliquées au modèle selon la relation :

$$g^* \, l^* = 1 \qquad (5)$$

Ce résultat peut être obtenu en pratique par centrifugation du modèle, où l'accélération centrifuge crée par une mise en rotation du modèle à vitesse constante permet d'accroître la pesanteur qui s'applique à la maquette.

Ainsi un modèle réduit à l'échelle de 1/100 devra être soumis à cent fois l'accélération de la pesanteur pour obtenir le même champ de contraintes que dans le prototype.

2 BUT DE L'ETUDE

Dans le cadre du Gréco-Géomatériaux, trois campagnes expérimentales sur des fondations superficielles ont été réalisées par le LCPC de Nantes (Fargeix 1988) tout en faisant jouer de nombreux paramètres : densité du sable (dense et moyennement dense), interface semelle-sol (rugueuse et lisse) forme de l'embase (circulaire et filante) et nature du chargement (centré et excentré).

On s'intéressera dans ce travail aux essais de chargement de fondations superficielles filantes tout en étudiant l'influence de l'excentricité de la charge.

On se propose donc d'étudier :

1- l'influence du chargement : centré et excentré ;
2- l'influence de la valeur de l'excentrement : 7.5 % et 15%.

3 PRESENTATION DES ESSAIS

3.1 Prototype

Les essais visent à reproduire le comportement de semelles filantes de largeur Bp = 3.60m. Ces semelles

reposent sur un même massif de sable d'Hostun sec, de 20m d'épaisseur dans un état moyennement dense : $\gamma d = 15.5$ kN/m^3.

3.2 Modèles

Il s'agit de semelles de 40 mm de largeur en alliage d'aluminium. Les faces inférieures sont encollées d'une couche de sable d'Hostun pour les rendre rugueuses.

Compte tenu des dimensions de l'ouvrage prototype Bp = 3.60m et de la largeur de modèle Bm = 40 mm, l'échelle de réduction est de 90. Les essais sont donc effectués sous une accélération centrifuge égale à 90g.

Rappelons, qu'en centrifugeuse, il est possible de réaliser simultanément ces essais.

3.3 Résultats des essais

Ils sont systématiquement présentés en coordonnées réduites à savoir :

- la charge réduite ($Q/\gamma B$) où Q est la contrainte moyenne appliquée ;
- les déplacements réduits qui sont les déplacements par rapport à B.

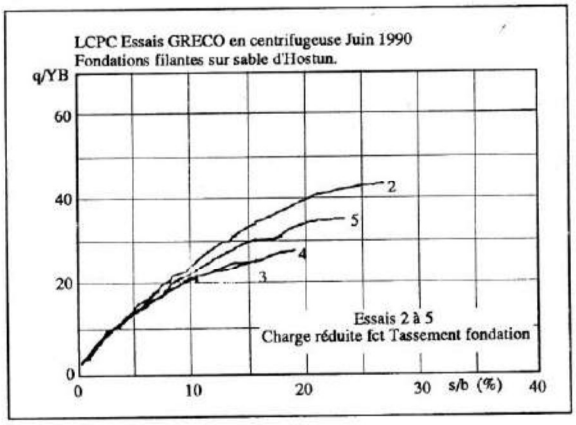


Figure 1 : Courbes de tassement des fondations.

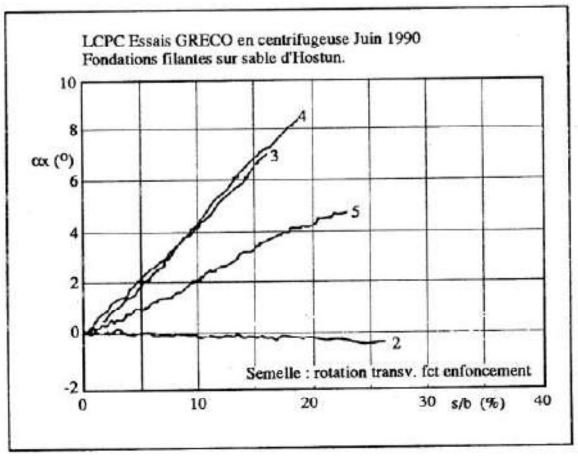


Figure 2 : Rotations transversales des fondations.

On présente sur les figures 1 et 2 les courbes de tassement expérimental des fondations ainsi que leurs rotations respectives.

On voit à travers ces essais l'influence de l'excentricité de la charge de rupture qui est d'autant plus faible que l'excentrement est élevé.

4 TRAVAUX DE VALIDATION

4.1 Caractéristiques des modélisations

Le but principal de l'étude est la prédiction des essais de chargement monotone centré et excentrés de semelles filantes en centrifugeuse. Les excentrements sont 7.5% et de 15%.

Il s'agit d'essais bidimensionnels, donc de problèmes en déformation plane. Les modélisations seront faites dans les conditions prototypes, largeur B = 3.60m. Ainsi la fondation superficielle a été modélisée au moyen de 176 éléments quadrilatères à 4 nœuds et 204 nœuds (Figure 3).

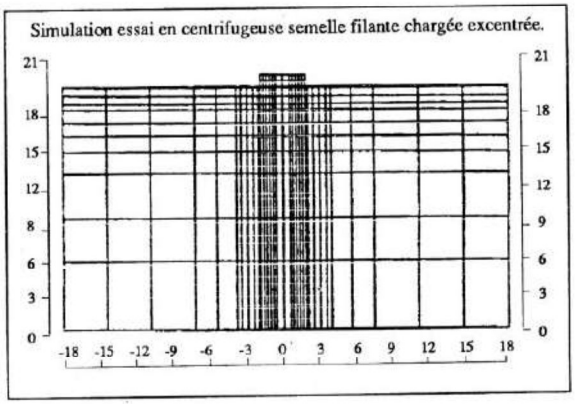


Figure 3 : Maillage utilisé.

4.2 Détermination des paramètres rhéologiques du modèle

Les paramètres du modèle de DUNCAN ont pu être déterminés par optimisation sur les essais triaxiaux drainés à 100, 300 et 600 kPa, fournis par E. Flavigny de l'Institut de Mécanique de Grenoble sur des échantillons de sable d'Hostun de densité voisine de celle du sable dans le conteneur de la centrifugeuse.

Ces trois essais triaxiaux et leur représentation rhéologique sont présentés sur la figure 4.

4.3 Simulations réalisées

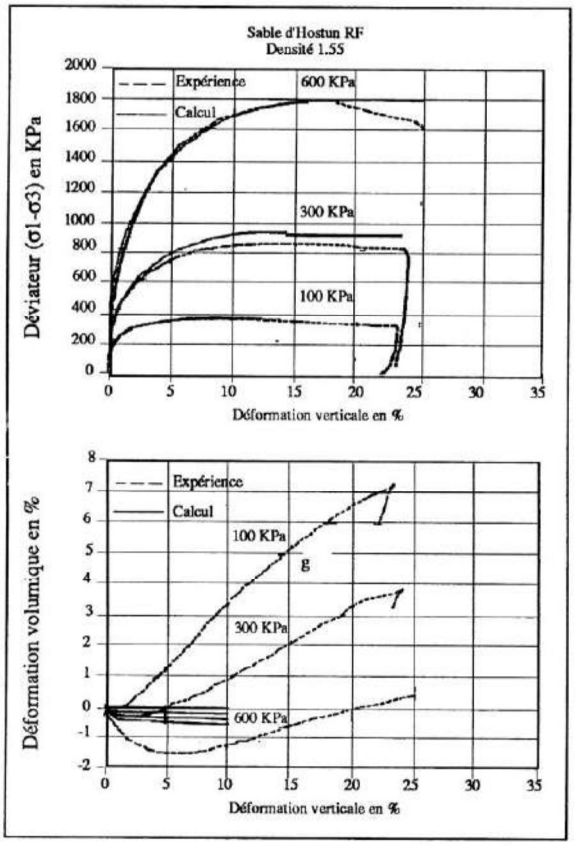
4.3.1 Conditions initiales du massif de fondation

L'état initial du massif a été simulé de manière oedométrique :

$$\sigma y = \gamma z$$
$$\sigma x = K_{\emptyset}\, \sigma y$$

avec :

$$\gamma = 15.5\ kN/m^3 et\ K_{\varnothing} = 0.5$$



K	n	Rf	Kb	m	Ø0	ΔØ
530	0.45	0.92	530	0.18	39.2°	3.11

Figure 4 : Essais triaxiaux et hyperboles de DUNCAN.

4.3.2 Conditions aux limites

La semelle rigide est modélisée en imposant un même déplacement vertical aux nœuds se trouvant à sa base, et sa rugosité est modélisée en empêchant le déplacement horizontal de ces mêmes nœuds.

4.3.3 Résultats obtenus

Les courbes charges-tassements obtenues, confrontées aux courbes expérimentales son illustrées sur la figure 5.

Les simulations réalisées montrent :

- une bonne modélisation du comportement non linéaire de la courbe charge-tassement ;
- la charge de rupture est d'autant plus faible que l'excentricité est élevée ;
- les écarts constatés sur les courbes dûs à l'excentrement de la charge sont du même ordre dans l'exprimentation et dans la simulation ;
- Une sous-estimation par le modèle, pour l'ensemble des simulations réalisées des charges de ruptures expérimentales.

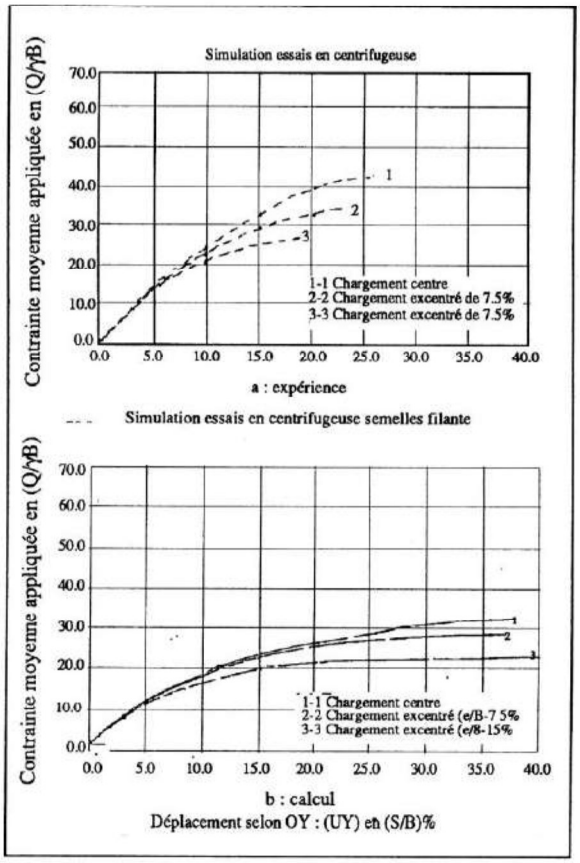


Figure 5 : Tassements des semelles
Haut : expérience
Bas : prédiction.

5 CONCLUSION

Nous avons montré lors de ce travail que qualitativement le modèle de DUNCAN reproduit assez bien le comportement non linéaire du sol.

D'après les résultats comparatifs (expérience-calcul), nous avons constaté une sous-estimation de charge de rupture des semelles. Cette constatation, nous a conduit à réfléchir sur la validité d'utilisation des paramètres du modèle de DUNCAN déterminés à partir des essais triaxiaux : essais axisymétriques, pour une étude de comportement d'un ouvrage bidimensionnel : en déformation plane.

Donc à priori, seuls des essais d'identification des paramètres réalisés en déformation plane pourraient répondre à notre question.

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.F CORTE et J. GARNIER : "*Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique*". Bulletin de liaisons des laboratoires des Ponts et Chaussées N°1986, N° 146, p. 5-28, Nov. Déc. 1986.

[2] J.M DUNCAN and C.Y CHANG : "*No linear analysis of stress and strain in soils*". Journal of the soil Mecahnics and Foundations Divisions, Vol 96, N° SM5, p. 1629-1653, 1970.

[3] D. FARGEIX : "*Modélisation par centrifugation. Rapport scientifique du GRECO "rhéologie des géomatériaux"*. Edité par J.M. Reynouard Institut des Sciences Appliquées de Lyon : GRECO, p. 389-392. 1988.

[4] D. FARGEIX : "*Essais de référence sur modèles réduits centrifugés. Rapport scientifique du GRECO "rhéologie des géomatériaux"*". Edité par J.M. Reynouard. Institut des Sciences Appliquées de Lyon : GRECO, p. 420-424, 1989.

POUR VOS PLACARDS PUBLICITAIRES

ETABLISSEMENTS, ORGANISMES,

BUREAUX D'ETUDES,

LABORATOIRES, ENTREPRISES

LA GARANTIE DU TARIF LE PLUS BAS !

1 Page : 2000.00 DA
1/2 Page : 1000.00 DA

◆ **Mode de règlement à la commande**

☐ ✔ Par virement au CCP N°19 348/92 Alger
☐ ✔ Par Chèque à l'Ordre de l'Agent Comptable ENTP

Publicités adresser à :

Monsieur le Directeur de la Rédaction
Algérie EQUIPEMENT ENTP Rue Sidi-Garidi 16051
- Kouba (Alger) -

CONSULTEZ-NOUS