

Similitudes et effets d'échelle dans les modèles physiques. Apports de Pierre Habib

Luc Thorel* 

Université Gustave Eiffel, Département GERS, Laboratoire Centrifugeuses Géotechniques GERS-CG, Campus de Nantes, Allée des Ponts et Chaussées, 44344 Bouguenais Cedex, France

Résumé – L'intérêt de Pierre Habib pour l'approche expérimentale sur modèles réduits, notamment en centrifugeuse, est illustré ici et accompagné de résultats récents sur les effets d'échelle.

Mots clés : effet d'échelle / similitude / centrifugeuse / ancrage

Abstract – **Similitudes and scale effects in physical models. Contributions by Pierre Habib.** Pierre Habib's interest in the experimental approach on small-scale models, particularly in a centrifuge, is illustrated here and accompanied by recent results on scale effects.

Keywords: scale effect / similitude / centrifuge / anchor

1 Introduction

Le développement de la modélisation physique en géotechnique en France n'aurait sans doute pas été initié à partir des années 1970 sans l'apport de Pierre Habib. En effet, les premiers essais géotechniques en centrifugeuse, réalisés sur la centrifugeuse du CEA-CESTA, l'ont été à l'initiative des chercheurs du Laboratoire de Mécanique des Solides (Garnier, 2001). L'installation d'une centrifugeuse géotechnique en France a été recommandée dès 1973 par la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique du Ministère de l'Industrie, puis approuvée en 1980 pour une installation sur le Campus de Nantes de l'actuelle Université Gustave Eiffel. Ce chemin a été possible, en particulier, par l'action de Pierre Habib qui présida notamment le Groupe d'Études et de Recherches sur la MODélisation en Centrifugation (GER-MOC), et ce dès 1981. «La construction d'une grande centrifugeuse dédiée aux études géotechniques au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a été l'aboutissement, auprès du Ministère de la Recherche dans les années 1970, de l'intérêt scientifique de cette approche, plaidoyer auquel P.Habib participa avec conviction», nous rappelle Corté (1998) à l'occasion du jubilé scientifique de Pierre Habib.

2 Effet d'échelle

Si l'existence des effets de taille et effets d'échelle est bien connue (e.g. Corté, 1989), l'étude de l'un ou de l'autre peut être illustrée dans un plan d'expérimentations sur modèles réduits centrifugés (Fig. 1). En considérant un même prototype

(ouvrage en vraie grandeur), on peut étudier les éventuels effets d'échelle. En simulant des prototypes de différentes tailles, on pourra aborder les effets de taille.

La terminologie « effet d'échelle » qualifie ainsi tout écart entre les résultats, exprimés sous forme adimensionnelle, entre un modèle réduit et la structure prototype correspondante. L'une des causes est l'utilisation du même sol entre le modèle réduit et le prototype. Cela ne pose pas de problème pour les sols argileux (il y a d'autres difficultés!), mais nécessite une vigilance accrue lors de l'utilisation de sables, denses en particulier, dès lors que l'hypothèse du matériau granulaire se comportant comme un milieu continu devient discutable. C'est un sujet que Pierre Habib (1974, 1985, 1989) a abordé dans plusieurs publications, notamment au sujet du « poinçonnement des sables secs » (Fig. 2) et du développement progressif d'une surface de glissement.

D'autres causes peuvent être à la source des effets d'échelle qui englobent des aspects finalement mal connus : le fait de ne pas pouvoir mettre à l'échelle tous les matériaux (parce qu'ils n'existent pas), ou que les « propriétés mécaniques d'un grand morceau sont différentes d'un petit morceau » (Habib, 1989). Sur l'aspect de comportement des matériaux, les premières observations remontent à Galilée (1638), tant sur les différentes propriétés des os d'animaux de tailles différentes pour assurer la même sécurité, que sur la « solidité et la résistance aux heurts violents ».

Depuis les années 1980, le domaine de la modélisation physique en géotechnique s'est structuré, notamment au travers du comité international TC104 de la société internationale de mécanique des sols et de la géotechnique (ISSMGE, 2021) via l'organisation d'événements réguliers (Thorel et Jenck, 2021) et la création d'un journal international, *International Journal of Physical Modelling in*

* Auteur de correspondance : luc.thorel@univ-eiffel.fr

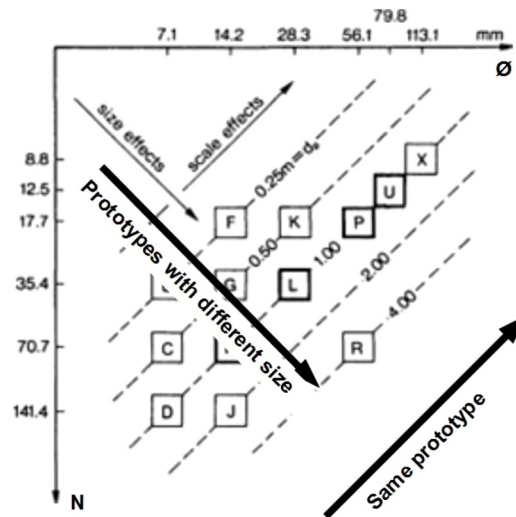


Fig. 1. Plan d'expérience imaginé par Ovesen (1979) pour des expérimentations sur modèles réduits centrifugés de fondations superficielles (modifié par Thorel, 2013).

Fig. 1. Experimental plan devised by Ovesen (1979) for experiments on centrifuged scale models of shallow foundations (modified by Thorel, 2013).

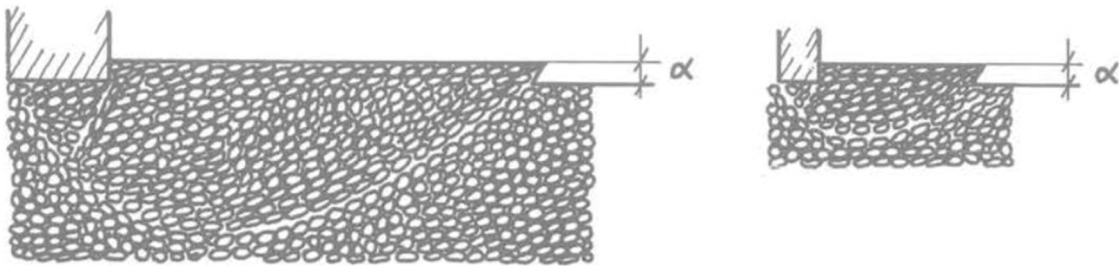


Fig. 2. La dilatance de la surface de glissement à la même amplitude (α) pour deux fondations homothétiques placées sur le même sable (Habib, 1985).

Fig. 2. The dilatancy on the slip line has the same amplitude (α) for two homothetic foundations installed on the same sand (Habib, 1985).

Geotechnics, en 2001 (IJPMG, 2021). En particulier, un catalogue des lois d'échelle et des questions de similitude a été établi (Garnier *et al.*, 2007), dans lequel sont listées les conditions pour lesquelles les effets d'échelle peuvent être évités.

Par exemple, pour une fondation superficielle circulaire de diamètre B , il faut respecter un rapport avec le diamètre des grains d_{50} pour éviter tout effet d'échelle de $B/d_{50} > 35$. Pour le frottement d'interface sur des pieux en traction, les effets sur la résistance ultime sont limités si $B/d_{50} > 50$ ou 100 , selon les auteurs. Ces résultats sont empiriques, s'appuyant sur des programmes expérimentaux réalisés en centrifugeuse en utilisant l'approche de modélisation à différentes échelles ou «modelling of models», forgée par Schofield (1980). Notons que le diamètre moyen d_{50} est un paramètre pratique, mais sans doute insuffisant car il ne renseigne pas sur la densité du sol, laquelle a un effet prépondérant sur le comportement.

Dans le domaine des ancrages (*e.g.* Le Tirant *et al.*, 1977 ; Habib *et al.*, 1980), de récents résultats viennent illustrer la question des effets d'échelle et de la représentativité des essais en centrifugeuse. Cela concerne les ancrages hélicoïdales, constituées d'un fût et d'une hélice soudée sur le fût. Les

effets combinés de mobilisation du frottement le long du fût et au sein du massif, pour lesquels les conditions d'évitement d'effet d'échelle sont différentes, ont fait l'objet d'une étude particulière dans du sable dense (Fig. 3). Quatre modèles réduits d'ancre hélicoïdale simulant le même prototype (diamètre de l'hélice $D=33$ cm, profondeur de l'hélice de $6D$ et diamètre du fût $d=D/3,3$) ont été testés dans trois conteneurs de sable d'Hostun HN38. Dans ce cas, on trouve une valeur moyenne de résistance $QT=61 \pm 6,7$ kN et on conclut, en utilisant le rayon effectif de l'hélice $w=(D-d)/2$, qu'il n'y a pas d'effet d'échelle notable tant que $w/d_{50} > 58$.

3 Conclusions

L'activité expérimentale en géotechnique est un domaine sur lequel j'ai eu des échanges toujours très riches avec Pierre Habib, lorsque je fréquentais le Laboratoire de Mécanique des Solides et le Groupement pour l'Étude des Structures Souterraines de Stockage, mais aussi tout au long de ma carrière. Son analyse pertinente des problématiques, des limites et intérêts des différentes approches à la disposition des géotechniciens pour dimensionner les ouvrages géotechniques,

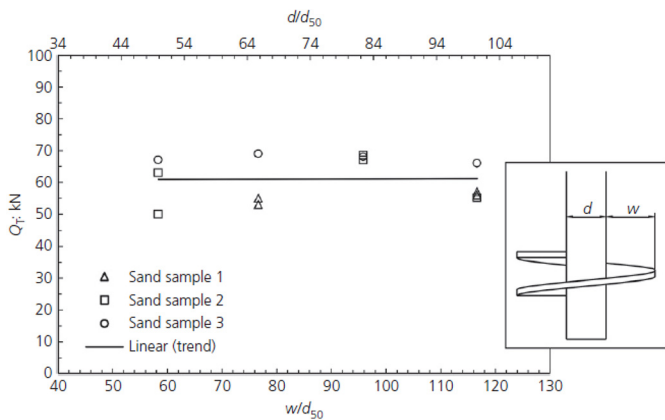


Fig. 3. Résistance ultime en traction (en valeurs prototypes) déduites d'essais sur des modèles réduits d'ancres hélicoïdales de différentes taille (Schiavon *et al.*, 2016).

Fig. 3. Ultimate tension load (in prototype values) of helical anchor models of different size (Schiavon *et al.*, 2016).

est illustrée par ses quelques apports à la modélisation physique en géotechnique.

Les discussions et observations sur les effets d'échelle de l'interaction sol-structure dans les matériaux granulaires s'appuient encore sur des résultats empiriques, et positionnées au regard de la mécanique des milieux continus. Le développement des méthodes de simulation par éléments discrets (*e.g.* Pham *et al.*, 2021) pourrait dans un avenir de moins en moins éloigné, apporter des éléments concrets de compréhension et de quantification des effets d'échelle, à commencer par le cas du « poinçonnement d'une fondation ».

Références

Corté JF. 1989. Essais sur modèles réduits en géotechnique. Rapport général. In: *Session 11. Essais sur modèles. XII ICSMFE, Rio, vol. 4*, pp. 2553–2571. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/33/1989_04_0022.pdf.

Corté JF. 1998. Modélisation de problèmes géotechniques en centrifugeuse. Illustration par quelques applications et questions de similitude. In: *Colloque Mécanique et géotechnique, Jubilé scientifique de Pierre Habib, 19 mai 1998*, Palais du Luxembourg, Paris.

Galilée . 1638. *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*. Éd. Française (1995) Discours concernant deux sciences nouvelles PUF, ISBN: 978-2-13-046854-7.

Garnier J. 2001. Modèles physiques en géotechnique. I : Évolution des techniques expérimentales et des domaines d'application. *Rev Fr Geotech* 97: 3–29. <https://doi.org/10.1051/geotech/2001097003>.

Garnier J, Gaudin C, Springman SM, *et al.* 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *Int J Phys Model Geotech* 7(3): 1–24. ISSN: 1346-213X, <https://doi.org/10.1680/ijpmg.2007.070301>.

Habib P. 1974. Scale effect for shallow footings on dense sand. *ASCE J Geotech Eng Div* 100(GT1): 95–99. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000010>.

Habib P. 1985. Effet d'échelle et surfaces de glissement. *Rev Fr Geotech* 31: 5–10. <https://doi.org/10.1051/geotech/1985031005>.

Habib P. 1989. Similitude et essais sur modèles réduits : validité de la modélisation. *Rev Fr Geotech* 48: 35–41.

Habib P, Le Tirant P, Luong MP. 1980. Ancres marines-ancrages à terre. *Rev Fr Geotech* 11: 17–28. <https://doi.org/10.1051/geotech/1980011017>.

IJPMG. 2021. www.icevirtuallibrary.com/toc/jphmg/current [consulté le 1^{er} juillet 2021].

ISSMGE. 2021. <https://www.issmge.org/committees/technical-committees/fundamentals/physical-modelling> [consulté le 1^{er} juillet 2021].

Le Tirant P, Luong MP, Habib P, Gary G. 1977. Simulation en centrifugeuse de fondations marines. In: *Actes IX^e CIMSTF, Vol. 2*, pp. 277–280. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/36/1977_02_0051.pdf.

Ovesen NK. 1979. The scaling law relationships. In: *Design parameters in geotechnical engineering. 7th ECSMFE, Vol. 4*, Brighton, pp. 319–323.

Pham TA, Tran QA, Villard P, Dias D. 2021. Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments – 3D discrete analyses of the interaction and mobilization mechanisms. *Eng Struct* 242. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112337>.

Schiavon JA, Tsuha CHC, Thorel L. 2016. Scale effect in centrifuge tests of helical anchors in sand. *Int J Phys Model Geotech* 16(4): 185–196. ISSN: 1346-213X, <http://doi.org/10.1680/jphmg.15.00047>.

Schofield AN. 1980. Cambridge geotechnical centrifuge operations. *Géotechnique* 30(3):227–268. <https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.3.227>.

Thorel L. 2013. Centrifuge modelling of foundations subjected to cyclic loading. In: Kotronis AP, Tamagnini C, Grange S, eds. *Alert doctoral school on soil-structure interaction*. ISBN: 978-2-9542517-4-5, pp. 45–76.

Thorel L, Jenck O. 2021. Éditorial. Modélisation physique en géotechnique, 1^{re} partie. *Rev Fr Geotech* 166(1). <https://doi.org/10.1051/geotech/2021002>.

Citation de l'article : Luc Thorel. Similitudes et effets d'échelle dans les modèles physiques. Apports de Pierre Habib. *Rev. Fr. Geotech.* 2021, 169, 10.