



HAL
open science

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

Luc Thorel

► **To cite this version:**

Luc Thorel. Similitudes et effets d'échelle dans les modèles physiques. Apports de Pierre Habib. Revue française de Géotechnique, 2021, 169, 7p. 10.1051/geotech/2021024 . hal-04252480

HAL Id: hal-04252480

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04252480v1>

Submitted on 23 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

3

4 **Luc Thorel** – luc.thorel@univ-eiffel.fr – Université Gustave Eiffel, Département GERS,
5 Laboratoire Centrifugeuses Géotechniques GERS-CG, Campus de Nantes- Allée des Ponts et
6 Chaussées 44344 Bouguenais Cedex

7

8 **Résumés**

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

11

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

14 **Mots-clefs**

15 Effet d'échelle, similitude, centrifugeuse, ancrage

16 *Scale effect, similitude, centrifuge, anchor*

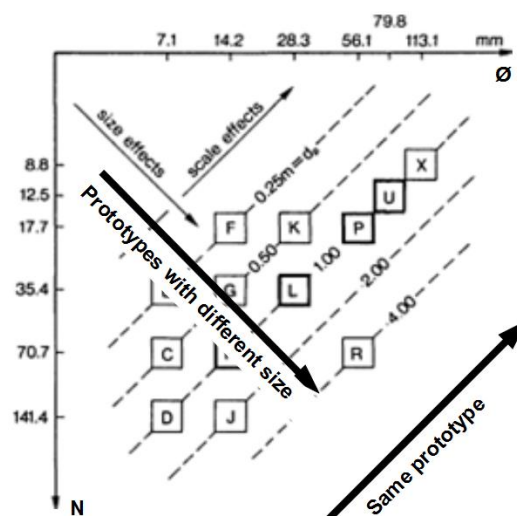
17

18 **Introduction**

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

33 **Effet d'échelle**

34 Si l'existence des effets de taille et effets d'échelle est bien connue (e.g. Corté 1989), l'étude de
35 l'un ou de l'autre peut être illustré dans un plan d'expérimentations sur modèles réduits
36 centrifugés (Figure 1). En considérant un même prototype (ouvrage en vraie grandeur), on peut
37 étudier les éventuels effets d'échelle. En simulant des prototypes de différentes tailles, on pourra
38 aborder les effets de taille.

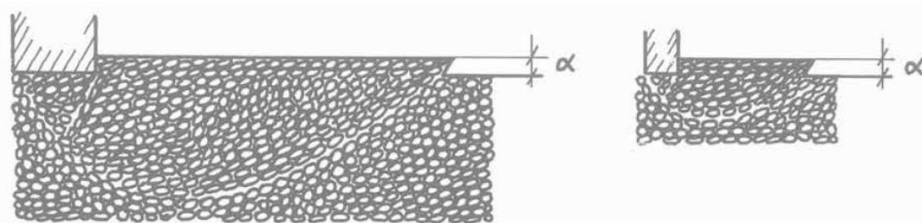


39
40 Figure 1. Plan d'expérience imaginé par Ovesen (1979) pour des expérimentations sur modèles réduits centrifugés de
41 fondations superficielles (modifié par Thorel, 2013).

42
43

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

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



53

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

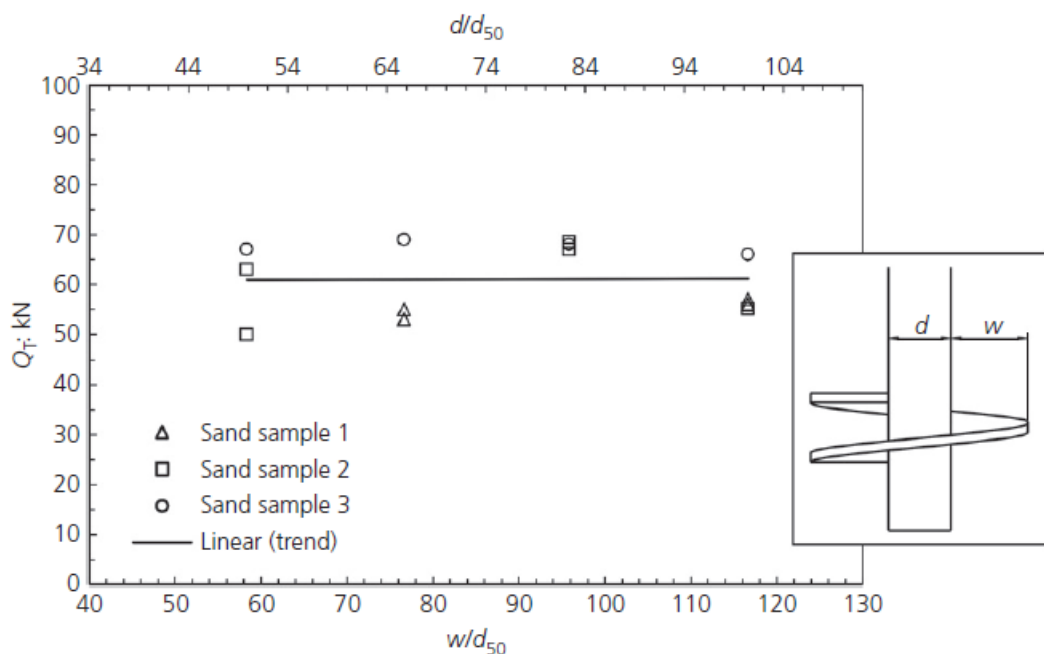
56 *The dilatancy on the slip line has the same amplitude (α) for 2 homothetic foundations installed on the same sand*
57 *(Habib, 1985)*

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

64 Depuis les années 1980, le domaine de la modélisation physique en géotechnique s'est structuré,
65 notamment au travers du comité international TC104 de la société internationale de mécanique des
66 sols et de la géotechnique (ISSMGE, 2021) via l'organisation d'événements réguliers (Thorel et Jenck,
67 2021) et la création d'un Journal International en 2001 (IJPMG, 2021). En particulier, un catalogue des
68 lois d'échelle et des questions de similitude a été établi (Garnier et al., 2007), dans lequel sont listées
69 les conditions pour lesquelles les effets d'échelle peuvent être évités.

70 Par exemple, pour une fondation superficielle circulaire de diamètre B, il faut respecter un rapport
 71 avec le diamètre des grains d_{50} pour éviter tout effet d'échelle de $B/d_{50} > 35$. Pour le frottement
 72 d'interface sur des pieux en traction, les effets sur la résistance ultime sont limités si $B/d_{50} > 50$ ou
 73 100, selon les auteurs. Ces résultats sont empiriques, s'appuyant sur des programmes expérimentaux
 74 réalisés en centrifugeuse en utilisant l'approche de modélisation à différentes échelles ou « modelling
 75 of models », forgée par Schofield (1980). Notons que le diamètre moyen d_{50} est un paramètre
 76 pratique, mais sans doute insuffisant car il ne renseigne pas sur la densité du sol, laquelle a un effet
 77 prépondérant sur le comportement.

78 Dans le domaine des ancrages (e.g. Le Tirant et al., 1977, Habib et al., 1980), de récents résultats
 79 viennent illustrer la question des effets d'échelle et de la représentativité des essais en centrifugeuse.
 80 Cela concerne les ancrages hélicoïdaux, constitués d'un fût et d'une hélice soudée sur le fût. Les effets
 81 combinés de mobilisation du frottement le long du fût et au sein du massif, pour lesquels les conditions
 82 d'évitement d'effet d'échelle sont différentes, ont fait l'objet d'une étude particulière dans du sable
 83 dense (Figure 3). Quatre modèles réduits d'ancrage hélicoïdal simulant le même prototype (diamètre
 84 de l'hélice $D=33\text{cm}$, profondeur de l'hélice de $6D$ et diamètre du fût $d=D/3,3$) ont été testés dans trois
 85 conteneurs de sable d'Hostun HN38. Dans ce cas on trouve une valeur moyenne de résistance $Q_T=61$
 86 $\pm 6,7\text{kN}$ 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
 87 notable tant que $w/d_{50} > 58$.



88

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

92 **Conclusions**

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

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

105 **Références**

- 106 Corté JF, 1989. Essais sur modèles réduits en géotechnique. Rapport général. Session 11. Essais sur modèles. XII
 107 ICSMFE, Rio, vol.4, 2553-2571. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/33/1989_04_0022.pdf
- 108 Corté JF, 1998. Modélisation de problèmes géotechniques en centrifugeuse. Illustration par quelques
 109 applications et questions de similitude. Colloque Mécanique et géotechnique, Jubilé scientifique de
 110 Pierre Habib, 19 mai 1998, Palais du Luxembourg, Paris.
- 111 Galilée, 1638. Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze. Ed. Française PUF ISBNv978-
 112 2-13-046854-7.
- 113 Garnier J, 2001. Modèles physiques en géotechnique. I-Evolution des techniques expérimentales et des
 114 domaines d'application. *Revue Française de Géotechnique* n°97, pp3-29.
 115 <https://doi.org/10.1051/geotech/2001097003>
- 116 Garnier J., Gaudin C., Springman S.M., Culligan P.J., Goodings D., König D., Kutter B., Phillips R., Randolph M.F.,
 117 Thorel L. 2007 Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling.
 118 *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics* ISSN 1346-213X, vol7, n°3, pp 1-24.
 119 doi.org/10.1680/ijpimg.2007.070301
- 120 Habib P, 1974. Scale effect for shallow footings on dense sand. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering*
 121 *Division* 100, GT1, 95-99. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000010>
- 122 Habib P, 1985. Effet d'échelle et surfaces de glissement. *Revue Française de Géotechnique* n° 31, 5-10.
 123 <https://doi.org/10.1051/geotech/1985031005>
- 124 Habib P, 1989. Similitude et essais sur modèles réduits : validité de la modélisation. *Revue Française de*
 125 *Géotechnique* n°48, 35-41.
- 126 Habib P, Le Tirant P, Luong MP, 1980. Ancres marines-ancrages à terre. *Revue Française de Géotechnique* n°11,
 127 17-28, <https://doi.org/10.1051/geotech/1980011017>.

- 128 IJPMG, 2021. www.icevirtuallibrary.com/toc/jphmg/current. Consulté le 1er juillet 2021.
- 129 ISSMGE, 2021. <https://www.issmge.org/committees/technical-committees/fundamentals/physical-modelling>,
130 consulté le 1^{er} juillet 2021.
- 131 Le Tirant P, Luong MP, Habib P, Gary G, 1977. Simulation en centrifugeuse de fondations marines. Actes IXème
132 CIMSTF, 2, 277-280. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/36/1977_02_0051.pdf
- 133 Ovesen NK, 1979. The scaling law relationships, Design parameters in geotechnical engineering, 7th ECSMFE,
134 Brighton, 4, 319–323.
- 135 Pham TA, Tran QA, Villard P, Dias D, 2021. Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments – 3D
136 discrete analyses of the interaction and mobilization mechanisms. *Engineering structures* 242.
137 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112337>
- 138 Schiavon J.A., Tsuha C.H.C., Thorel L. 2016. Scale effect in centrifuge tests of helical anchors in sand Int. J.
139 Physical Modelling in Geotechnics ISSN 1346-213X , vol.16(4), 185-196,
140 <http://doi.org/10.1680/jphmg.15.00047>
- 141 Schofield AN, 1980. Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations. *Géotechnique* vol.30, 3 227-268.
142 <https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.3.227>
- 143 Thorel L, 2013. Centrifuge Modelling of foundations subjected to cyclic loading. Alert doctoral school on soil-
144 structure interaction. Aussois. P. Kotronis, C. Tamagnini, S. Grange (eds.) ISBN 978-2-9542517-4-5, pp.
145 45-76.
- 146 Thorel L., Jenck O., 2021. Editorial. Modélisation physique en géotechnique, 1re partie. *Revue Française de*
147 *Géotechnique* n°166, 1 <https://doi.org/10.1051/geotech/2021002>