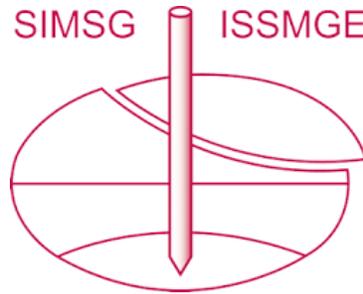


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Centrifugation: Vérification Experimentale de la Similitude

## Centrifugation: Experimental Verification of Similitude Laws

B. PINCENT  
F. TCHOCOTHE

Ingénieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France  
Docteur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

RESUME : Les lois de similitude de la modélisation par centrifugation résultent du calcul et n'ont fait l'objet que de quelques vérifications expérimentales. La consolidation de deux sols fins argileux, l'un reconstitué, l'autre intact, a été étudiée à l'aide d'une quarantaine de modèles représentant tous le même ouvrage : une couche d'argile de 6 m d'épaisseur drainée à la base, et chargée, en cours de centrifugation, par une contrainte de 50 kPa. Les accélérations utilisées ont été de 45, 65, 80, 100 fois et pour certains modèles de 200 et 450 fois l'accélération de la pesanteur.

### INTRODUCTION

#### La similitude en modélisation par centrifugation: des lois tirées de l'analyse

La modélisation par centrifugation repose sur des lois de similitude très simples calculées à partir des équations de la dynamique. La création à l'aide d'une centrifugeuse, d'un champ de contraintes tridimensionnel, identique en module à celui qui existe dans l'ouvrage réel, associée à l'hypothèse d'une conservation de la loi de comportement effort-déformation du sol, permettent de modéliser presque parfaitement le comportement d'ouvrages en Mécanique des Sols et les essais effectués sont encourageants (voir par exemple Pilot, 1975, Pincet et al, 1977).

#### Une hypothèse dont la validité a été peu vérifiée expérimentalement

L'hypothèse fondamentale de la conservation de la loi de comportement du sol n'a fait l'objet, à notre connaissance, que de vérifications partielles, quelquefois indirectes. Citons les travaux de Mikasa et Takada (1973) concernant la consolidation sous son propre poids d'un sol fin reconstitué et ceux de Mikasa, Isono (1966), et de Krebs Ovesen (1974, 1979) concernant la capacité portante du sable. Il nous a de ce fait, paru nécessaire de vérifier expérimentalement qu'un sol cohérent conservait ses caractéristiques mécaniques sous accélération. Nous avons ainsi procédé à des expériences de consolidation unidimensionnelle de sols fins saturés (sol reconstitué et sol intact) qui sont rapportés ici et qui ont fait l'objet d'une thèse de doctorat (Tchocothé, 1980).

### VERIFICATION EXPERIMENTALE DES LOIS DE CONSOLIDATION DES SOLS FINS

Chaque modèle a été taillé en fonction de l'accélération de façon à représenter toujours la même épaisseur de sol (6m) drainé à sa base.

La charge a été adaptée pour appliquer une contrainte verticale de 50 kPa, simulant un remblai d'environ 2,5 m de hauteur. Quatre échelles d'accélération 45, 65, 80, 100 G ( $G = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) ont été utilisées pour modéliser la consolidation du sol sous son propre poids, puis sous chargement

(fig. 1). Des accélérations de 200 et 450 G ont été atteintes dans une petite centrifugeuse (rayon : 0,25 m) pour compléter certaines courbes expérimentales.

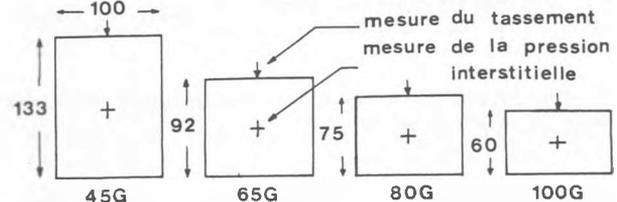


Fig. 1 - Les modèles représentent une même épaisseur de sol (6m). Pour des raisons techniques, seule la hauteur varie (dimensions en mm).

#### Une centrifugeuse et des modèles de petite taille

La centrifugeuse (1 m de rayon), qui appartient au Commissariat à l'Energie Atomique (centre de Bruyères le Chatel) est une machine, sans nacelle pivotante, embarquant 50 kg à 100 G. Les différentes éprouvettes de sol, équipées de capteurs, ont été placées dans un conteneur cylindrique de 10 cm de diamètre. Elles étaient alimentées par un dispositif imposant à leur base, une pression d'eau de 60 kPa correspondant à la nappe au terrain naturel (fig. 2).

La charge, placée sur le sol en cours d'accélération, est constituée d'un disque métallique maintenu en place grâce à une dépression créée par une pompe à vide (fig. 2), s'exerçant entre le disque-charge et le support fixé au couvercle du conteneur.

La charge placée au départ près du sol (1 mm) est lâchée électriquement. Malgré la présence d'un amortisseur en carton, le chargement est assez brutal, particulièrement aux fortes accélérations (80, 100 G). Il fait naître alors une surpression interstitielle "dynamique" pouvant atteindre l'amplitude de celle créée par la charge appliquée et s'y ajoutant. Une seconde centrifugeuse

geuse de laboratoire de 0,25 m de rayon a permis de consolider des éprouvettes sous 200 et 450 G. Les modèles ne sont pas, dans ce cas, équipés de capteurs et la charge est mise en place au départ (sable).

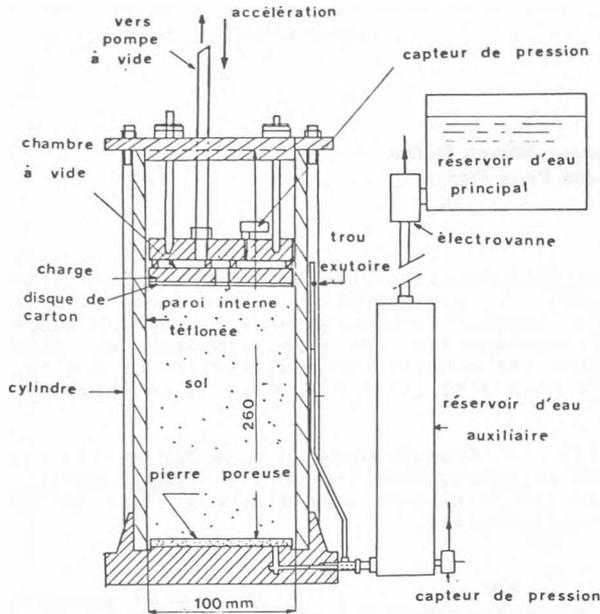


Fig. 2 - Coupe du conteneur et du dispositif de chargement (dimensions en mm).

#### Tassement du sol et dissipation des pressions interstitielles : argile reconstituée et argile intacte

Les modèles ont été fabriqués à partir de blocs de sol reconstitué (kaolin) et de sol intact (argile de Cubzac) dont les caractéristiques moyennes sont indiquées dans le tableau I. Le sol reconstitué a été fabriqué à l'aide de kaolin naturel malaxé sous vide avec 60 % d'eau, puis consolidé dans une grande cellule triaxiale sous une contrainte isotrope de 50 kPa.

#### kaolin

w%	$\gamma$ KN/m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ KN/m <sup>3</sup>	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	e <sub>o</sub>	C <sub>v</sub> cm <sup>2</sup> /s	C <sub>c</sub>	$\sigma'_{c^*}$ kPa	k <sub>v</sub> cm/s
40	18	13	52	36	16	1	3.10 <sup>-3</sup>	0,25	30	2,5 10 <sup>-7</sup>

Argile de Cubzac (profondeur de prélèvement : 6m)  
(Magnan et al, 1978).

80	15	8	80	48	32	2	3 10 <sup>-2</sup>	1,18	41	1,2 10 <sup>-7</sup>
----	----	---	----	----	----	---	--------------------	------	----	----------------------

Tableau I \* déduit des essais oedométriques.

Le tassement vertical de la surface du sol et la pression interstitielle en milieu de couche ont été mesurés à l'aide de capteurs électriques. L'erreur de mesure de la chaîne, appréciée au cours des expériences, est respectivement de

$\pm 0,1$  mm et de + 5 kPa, en raison essentiellement de la dérive thermique.

Ces deux quantités ont été mesurées systématiquement au cours des expériences qui comportaient chacune deux étapes :

- la consolidation du sol sous son propre poids, à la fin de laquelle le modèle se trouve alors dans un état de contraintes effectives, semblable à celui du sol réel non chargé.
- la consolidation du sol chargé, le chargement du sol s'effectuant en cours de centrifugation.

Les résultats de mesure sont rapportés à l'ouvrage réel en appliquant :

- sur les tassements, la loi sur les longueurs  $l^* = g^{*-1}$
- sur la pression interstitielle, la loi sur les contraintes  $\sigma^* = l$
- sur le temps, la loi de similitude propre à la consolidation des sols fins  $t^* = g^{*-2}$ .

Les figures 3 à 6 indiquent les mesures des tassements et pressions interstitielles, rapportés au temps de l'ouvrage réel. Elles ne concernent que la consolidation du sol chargé. Celles de l'étape de consolidation du sol sous son propre poids (phénomène propre à la centrifugation) ne sont pas rapportées ici. Notons toutefois que les conclusions tirées de l'une ou l'autre étape sont identiques.

Au cours des expériences, un échauffement du modèle de 10 °C environ en 150 minutes, provoqué par la dissipation d'énergie mécanique dans l'enceinte de la centrifugeuse a été observé. L'incidence de ce phénomène a été étudiée en laboratoire à l'aide d'un oedomètre chauffant, sur l'argile de Cubzac. Les résultats confirment les conclusions de Philipponat (1977) : une augmentation de température  $\Delta\theta$  fait décroître le temps de consolidation  $t$  ( $\Delta t/t = -0,12$  avec  $\Delta\theta = 10$  °C à partir de 21 °C), mais reste sans effet significatif sur le tassement.

#### Les résultats : des limites d'application aux lois de similitude

Tout d'abord, il faut noter que pour une accélération donnée, dans des conditions d'expérience identiques, il existe des écarts par rapport à la "courbe moyenne" variables suivant les essais (tableau II). Pour les pressions interstitielles, ces écarts sont particulièrement importants en début de consolidation, principalement à cause de l'effet dynamique du chargement indiqué plus haut.

Le tassement et la durée de la période de consolidation, jusqu'à l'équilibre des pressions interstitielles, varient avec l'accélération.

Ainsi, avec le kaolin, le tassement rapporté à l'ouvrage réel augmente de 1,1 à 1,5 quand on passe de 45 à 100 G, et le temps d'équilibre rapporté à l'ouvrage réel évolue de 5.10<sup>5</sup> à 7.10<sup>5</sup> minutes, soit dans le rapport de 1 à 1.4.

Pour l'argile de Cubzac, le temps d'équilibre de la nappe, rapporté à l'ouvrage réel évolue aussi avec l'échelle d'accélération passant de 4.10<sup>5</sup> minutes à 45 G, à 8.10<sup>5</sup> minutes à 100 G, soit du simple au double. Le tassement de l'éprouvette de sol croît, quant à lui, de 11 à 20 cm, soit dans le rapport de 1 à 1,8.

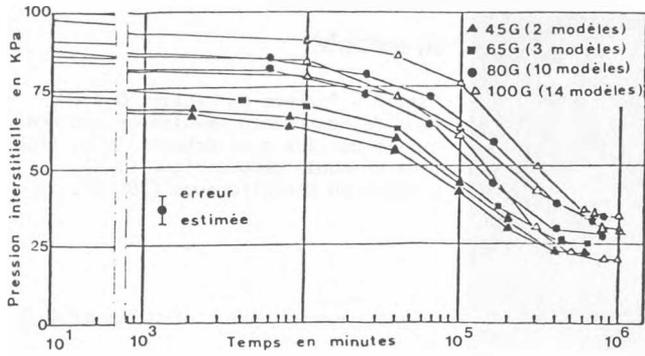


Fig. 3 - Kaolin : courbes enveloppes des pressions interstitielles fonction du temps rapporté à l'ouvrage réel.

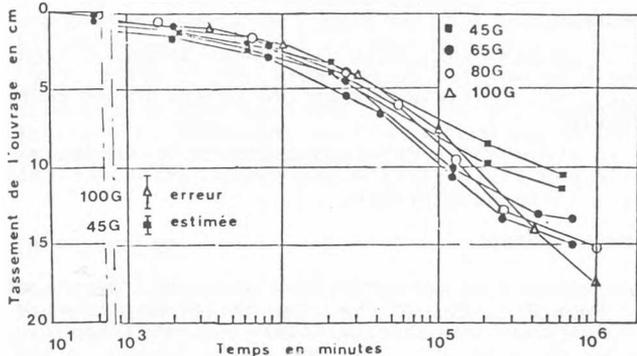


Fig. 4 - Kaolin : courbes enveloppes des tassements rapportés à l'ouvrage réel.

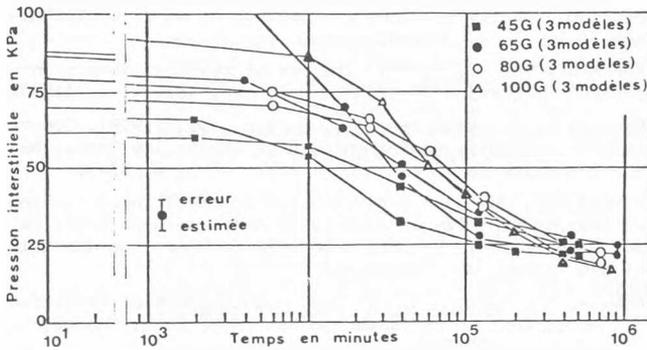


Fig. 5 - Argile de Cubzac : courbes enveloppes des pressions interstitielles.

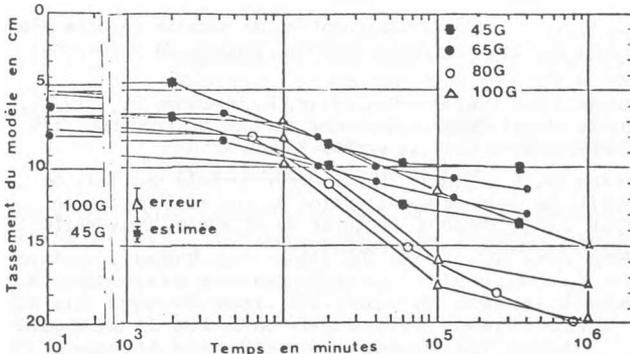


Fig. 6 - Argile de Cubzac : courbes enveloppes des tassements.

pression interstitielle	45 G	65 G	80 G	100 G	
Kaolin (max.)	+ 3	+ 1	+ 8	+ 7	kPa
Argile de Cubzac (max.)	+ 6	+ 13	+ 3	+ 1	kPa
Tassement (max.)					
Kaolin (max.)	+ 11	+ 10	+ 24	+ 25	mm
Argile de Cubzac (max.)	+ 34	+ 26	+ 12	+ 35	mm

Tableau II - Ecartés par rapport à la courbe moyenne.

## TEXTURE DES SOLS FINS ET ACCELERATION

### Cohésion et texture

La mesure de la cohésion à court terme du sol dans son conteneur, après arrêt de la centrifugeuse, met en évidence des variations importantes de  $C_u$  avec l'accélération (fig. 7). Le comportement de l'argile de Cubzac (cohésion croissante puis décroissante avec l'accélération) est différent de celui du kaolin (cohésion croissante vers une valeur limite). La teneur en eau des échantillons de kaolin, après centrifugation, présente une variation non significative autour de 40 %, qui ne peut expliquer les variations de  $C_u$  observées. De même, la dispersion des teneurs en eau de l'argile de Cubzac, liée à l'hétérogénéité du sol, ne permet pas de conclure.

L'analyse au microscope à balayage du sol centrifugé confirme l'évolution de sa texture avec l'accélération dans les conditions de l'expérience (champ de contraintes effectives constant) (fig.8).

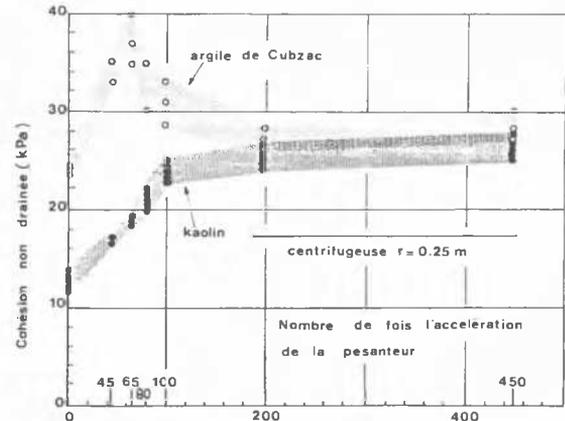


Fig. 7 - Cohésion à court terme mesurée après centrifugation à l'aide d'un scissomètre de laboratoire. Les courbes devraient être horizontales.

### Mécanique des sols centrifugés

Ces derniers résultats semblent montrer qu'il existe un comportement particulier, propre aux sols fins, cohérents, compressibles, saturés, lorsqu'ils sont soumis à de fortes accélérations. Entre autres hypothèses, nous pouvons imaginer que :

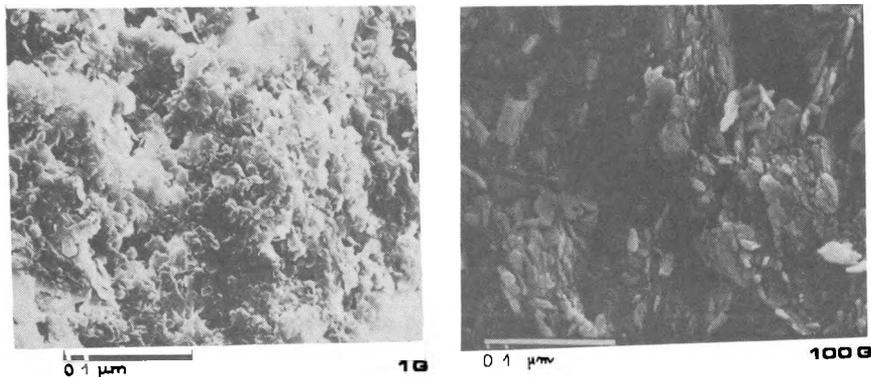


Fig. 8 - Texture du kaolin. Des chemins de contrainte semblables ont été suivis par les deux échantillons, l'un dans un moule oedométrique (1 G), l'autre en centrifugeuse (100 G).

- dans cette modélisation, la similitude des longueurs ne s'étend pas aux éléments constituant le sol. Il se peut alors que les particules argileuses polarisées, dont le poids varie avec l'accélération, tendent à se réorienter à la suite d'un changement du champ des interactions (eau-solide par exemple).

- l'hétérogénéité de la taille des grains du sol peut créer des variations locales du champ global des contraintes effectives. On peut penser que les grains les plus lourds perturbent ainsi la texture du sol alentour, de façon croissante avec l'accélération.

Dans ces deux hypothèses, la texture du sol est modifiée.

#### CONCLUSION

Dans la modélisation par centrifugation, les mesures de pression interstitielle et de déplacement sont très délicates, en raison de l'environnement très sévère imposé par l'accélération et de la miniaturisation des capteurs. De plus, la courbure du champ d'accélération, l'évolution de la température du modèle en cours de centrifugation et l'hétérogénéité des sols augmentent la dispersion des résultats.

Nous constatons cependant que dans les conditions des expériences décrites ici, pour le kaolin et l'argile de Cubzac, il se dégage des mesures des tassements, des temps de consolidation et surtout de celles de la cohésion à court terme des argiles, une disparité des résultats indiquant un effet d'échelle important. L'observation au microscope de la texture de ces argiles corrobore cette tendance.

La cause de cet effet d'échelle, se produisant à champ de contraintes effectives global constant n'a, par contre, pas été mise en évidence. Toutefois, ces observations montrent que l'application directe des lois de similitude fondamentales, peut mener à des conclusions différentes suivant l'accélération appliquée.

D'un point de vue pratique, ceci nous amène à appuyer la suggestion de Krebs Ovesen (1979), selon laquelle il est indispensable de vérifier expérimentalement, avant toute modélisation quantitative par centrifugation, les limites de l'application directe des lois de similitude au modèle envisagé.

D'un point de vue plus général, il y a lieu de préciser les bases de la mécanique des sols

centrifugés

- en déterminant, dans un premier temps, d'éventuels paramètres correcteurs, analogues à ceux que l'on utilise en bassin de carène et en soufflerie.
- en cherchant à déterminer l'origine fondamentale des particularités de comportement des sols sous forte accélération.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mlle Cador, MM. Berche et Le Roux du LCPC, le CEA, MM. Peyrat et Le Gallo du CEA pour leur très efficace collaboration.

#### BIBLIOGRAPHIE

- Krebs Ovesen, N., (1975), Centrifugal testing applied to bearing capacity problems of footings on sand. *Geotechnique* 25, n° 2, p. 394-401.
- Krebs Ovesen, N., (1979), The use of physical models in design, Discussion 7<sup>e</sup> ECSMFE, Brighton, vol. 4, p. 319-323.
- Magnan, J.-P., Mieussens, C., Queyroi, D., (1978), Comportement du remblai expérimental B de Cubzac les Ponts, *Revue Française de Géotechnique*, nov., n° 5, p. 23-36.
- Mikasa, M., Isono, A., (1966), Experimental investigation on bearing capacity of sand by centrifugal apparatus, CR ler Congrès de la Société Japonaise de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation.
- Mikasa, M., Takada, N., (1973), Significance of centrifugal model test in soils mechanics, CR 8<sup>e</sup> CIMS, Moscou, vol. 1.2, p. 273-278.
- Philipponat, G., (1977), Mesure de la compressibilité des sols par un essai oedométrique accéléré, CEBTP, Suppl. au n° 347.
- Pilot, G., (1975), Centrifugation de modèles réduits d'ouvrages en terre et de fondations, Rapport de Recherche LCPC n° 48.
- Pincent, B., Queyroi, D., Pilot, G., Baroux, R., (1977), Modèle réduit centrifugé d'une rupture de tranchée, IX<sup>e</sup> ICSMFE, Tokyo, vol. 1, p. 251-254.
- Tchocothé, F., (1980), Etude expérimentale des lois de similitude dans la modélisation par centrifugation en Génie Civil, Thèse de Doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.