

Journée technique du CFMS – Paris (8 décembre 2010)

Modèles physiques en géotechnique

Similitude et effets d'échelle

J. Garnier (LCPC)

Décembre 1985 – Décembre 2010

17 décembre 1985 Inauguration de la centrifugeuse géotechnique du
LCPC par H. Curien (Ministre de la Recherche et
de la Technologie)

25 ans de modélisation physique en géotechnique !

8 décembre 2010 Journée CFMS sur les Modèles physiques en
géotechnique

Un peu d'histoire.....

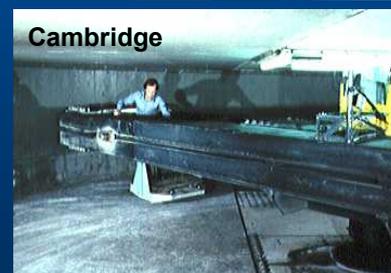
Les pionniers européens (1965 à 1975)

1966 à 1971 Premiers essais à l'Université de Cambridge (Avgherinos, Schofield) sur une très petite machine ($R=0,3m$) puis sur la centrifugeuse de Lucas Aerospace
Conception d'une centrifugeuse géotechnique à UMIST (Univ. de Manchester) par A. Schofield



1971 Grande centrifugeuse de P. Rowe et W. Craig → au SEL (Université de Manchester)

1975 Nouvelle centrifugeuse d'A. Schofield → (Université de Cambridge)



Traduction par le BRE des deux ouvrages de Pokrovsky et Fedorov de 1969

W.H. Craig et al (1988)

Les premiers essais en France 1974 - 1980

1869 Publication E. Phillips à l'Académie des Sciences « De l'équilibre des solides élastiques »



1964 Mise en service d'une très grande centrifugeuse au CEA sur le centre du CESTA



1975 Rapport bibliographique de G. Pilot « Centrifugation de modèles réduits d'ouvrages en terre et de fondations »

1975 – 1980 Premiers essais géotechniques (réalisés au CESTA)
- LMS-X (Habib, 1974; Mandel et al, 1975; Zelikson, 1979)
- IFP (Nauroy et al, 1977; Le Tirant et al, 1978; Masson, 1979)
- LCPC (Pincent et al, 1977)

G. Pilot (1975), J.F. Corté (1985), J.F. Corté & J. Garnier (1986)

- 1973** Recommandation de la DGRST (Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique) du Ministère de l'Industrie pour l'installation d'une centrifugeuse géotechnique en France
- 1976** Avis défavorable de la DATAR et de la DGRST du projet d'implantation en région parisienne (projet porté par le CEBTP, le LMS-X et le LCPC)
- 1980** Approbation de la DGRST pour l'installation d'une centrifugeuse géotechnique sur le centre de Nantes du LCPC et pour l'inscription au budget 1981
- 1981** Création du GERMOC (Groupe d'études et de recherches sur la modélisation en centrifugation) réunissant LMS-X, CEA, CEBTP et LCPC et présidé par P. Habib (LMS-X)

J.F. Corté & J. Garnier (1986)

1981	1982	1983	1984	1985
------	------	------	------	------

Préparation du dossier DCE

Appel de candidature européen – Sélection des offres

Appel d'offre restreint

Examen des propositions – Marché négocié

Notification marché Acutronic – Etudes mécaniques

Etudes Bâtiment

Construction de la centrifugeuse

Construction du bâtiment

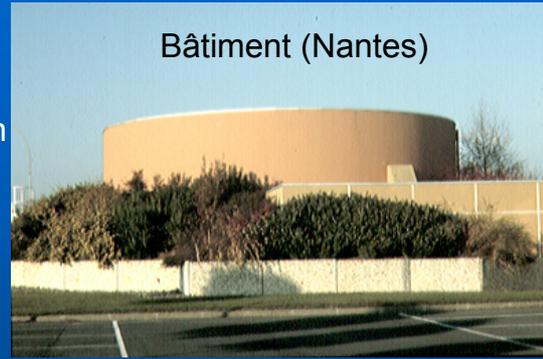
Installation
Essais de réception





La centrifugeuse géotechnique du LCPC

Fréquence d'utilisation : 200 à 220 jours/an



Bâtiment (Nantes)



Rayon : 5.5m

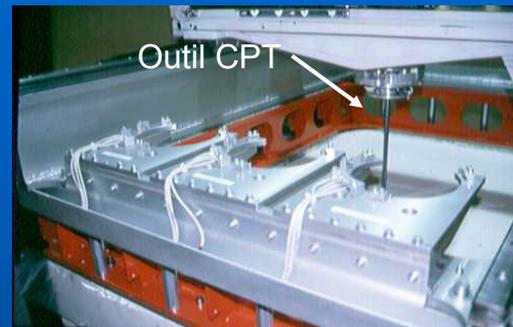
Masse modèle (max.) : 2 tonnes

Accélération (max.) : 200g

Conception : Acutronic/Actidyn - LCPC



Le robot embarqué



Outil CPT

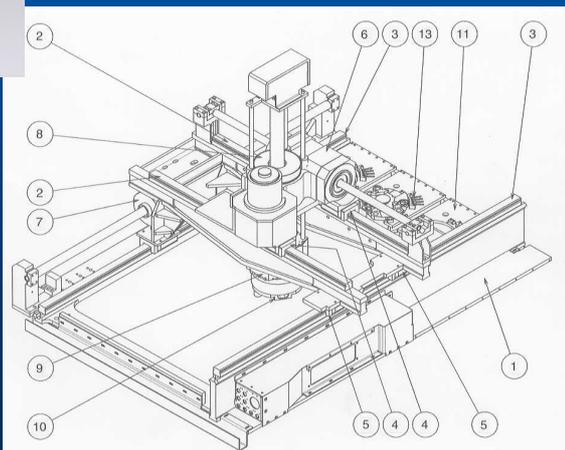
Performances

Fonctionne sous 100 g

Quatre axes (X, Y, Z, θ_z)

Modes manuel et automatique

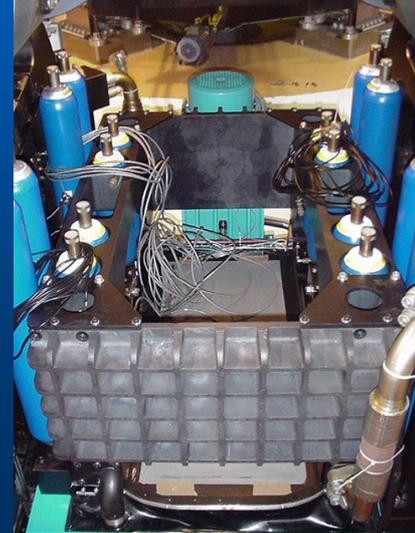
Mise en œuvre de plusieurs outils



Conception: Acutronic - Rol/Cybernetix - LCPC

Le simulateur de séismes

- ◆ Dimension du modèle : L=1m, w=0.5m, h=0.6m
- ◆ Plage d'accélération centrifuge : 20g à 80g
- ◆ Accélération maximale à pleine charge : 40g
- ◆ Domaine de fréquences (séismes) : 20 à 250 Hz
- ◆ Domaine de fréquences (sinus) : 20 à 200 Hz
- ◆ Masse du modèle : 400kg
- ◆ Force maximale : 220 kN
- ◆ Déplacement au pic : 5mm
- ◆ Vitesse au pic : 1 m/s



Conception: Actidyn

Programmes coopératifs & Congrès

Programmes européens

Stimulation 1986-1988 (Centrifuge modelling of shallow foundations)

LCPC

Science 1992-1995 (Improvement of centrifuge modelling techniques)

LCPC

Necer 1996-2001 (Network of European Centrifuges for Environmental Geotechnics Research)

LCPC

Quaker 2003-2006 (Fault-Rupture and Strong Shaking Effects on the Safety of Composite Foundations and Pipeline Systems)

Univ. Dundee

Series 2010-2013 (Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies)

Univ. Patras

Congrès internationaux

Centrifuge 1988 (Paris), 1991 (Boulder), 1994 (Singapore), 1998 (Tokyo)

ICPMG 2002 (St John's), 2006 (Hong-Kong), 2010 (Zurich), 2014 (Perth)

ICPMG 2010 (Actes Balkema) : 1500 pages, 240 articles, 6 conférences spéciales

Congrès européens

Eurofuge 2008 (London), 2012 (Delft)

Congrès internationaux organisés en France

Centrifuge 1988 (Paris), Science 1995 (Nantes), Necer 2000 (La Baule)

TC2 (puis TC104) - Physical modelling in geotechnics

Création en avril 1982 (Président ISSMFE, V.F.B. de Mello)

	Président	Secrétaire	Membres français
1982-1985	A. Schofield (UK)		A. Zelikson, B. Pincet puis J.F. Corté
1985-1988	M.P. Luong (FR)	J.F. Corté (FR)	A. Zelikson
1988-1994	H.Y. Ko (USA)	B.L. Kutter (USA)	J.F. Corté, M.P. Luong
1994-1998	T. Kimura (JP)	O. Kusakabe (JP)	J.F. Corté, M.P. Luong
1998-2002	R. Phillips (CA)	C. Leung (SG)	J. Garnier, M.P. Luong
2002-2006	C.F. Leung (SG)	C. Ng (HK)	J. Garnier, J.F. Semblat
2006-2010	S. Springman (CH)	D. White (UK & AU)	P. Foray, J. Garnier
2010-2014	C. Gaudin (AU)		J. Garnier, L. Thorel

International Journal of Physical Modelling in Geotechnics

Revue internationale créée en 2001 par le Comité Technique TC2

Quatre numéros par an

Editeur : D. Muir Wood (Univ. Dundee)

Publiée depuis 2010 par Thomas Telford et ICE (institution of Civil Engineers)

<http://www.icevirtuallibrary.com/content/serial/ijpmg>

International Journal of Physical Modelling in
Geotechnics

ISSN: 1346-213X, E-ISSN: 2042-6550

The International Journal of Physical Modelling in Geotechnics contains the latest research and analysis in all areas of physical modelling at any scale, including modelling at single gravity and at multiple gravities on a centrifuge, shaking table and pressure chamber testing and geoenvironmental experiments.



The journal is free until 2012 for all subscribers. To gain access, email subscriptions@icepublishing.com with your request.

Technical Committee TC104 (Physical modelling in geotechnics)

IJPMG - International Journal of Physical Modelling in Geotechnics (2007), Vol.7, N°3 pp. 01-23

**CATALOGUE OF SCALING LAWS AND SIMILITUDE QUESTIONS
IN GEOTECHNICAL CENTRIFUGE MODELLING**

*J. GARNIER, C. GAUDIN, S.M. SPRINGMAN, P.J. CULLIGAN, D. GOODINGS,
D. KONIG, B. KUTTER, R. PHILLIPS, M.F. RANDOLPH, L. THOREL*

A-Fundamental laws of statics, time and rate scaling factors <i>(C. Gaudin, J. Garnier)</i>	B-Grain size effects on soil-structure interaction <i>(D. König, J. Garnier)</i>	C-Grain size effects on interfaces and shear band patterns <i>(B. Kutter, D. König,)</i>	D-Size effects derived from continuous media mechanics <i>(C. Gaudin, J. Garnier)</i>	E-Density and stress distribution in centrifuge models <i>(J. Garnier)</i>
F-In-flight in-situ tests <i>(M.F. Randolph, J. Garnier)</i>	G-Fluid flow in saturated centrifuge samples <i>(D. Goodings)</i>	H-Unsaturated conditions <i>(D. König, J. Garnier)</i>	I-Dynamic conditions <i>(B. Kutter, S.M. Springman)</i>	J-Aqueous phase transport in saturated soils <i>(P.J. Culligan)</i>
K-Non aqueous phase transport in soils and fractures <i>(P.J. Culligan)</i>	L-Heat transfer <i>(P.J. Culligan)</i> Frost, Ice <i>(R. Phillips)</i>	M-Erosion, sedimentation <i>(D. Goodings)</i>	N-Current propagation, electro-osmosis <i>(L. Thorel)</i>	Other topics to come ?

Catalogue of scaling laws – Detail of the treated topics

A-Fundamental laws of dynamics, time and rate scaling factors A1-Scaling laws derived from equations of statics A2-Creep time A3-Rate effect on undrained shear strength	B-Grain size effects on soil-structure interaction B1-Footing B2-Pile (lateral loading) B3-Anchor B4-Tunnel (face stability) B5-Pipeline uplift B6-Wall B7-Geogrid	C-Grain size effects on interfaces and shear band patterns C1-Frictional interface C2-Roughness modelling C3-Shear band patterns	D-Size effects derived from continuous media mechanics D1-Normal stiffness in soil-pile interface	E-Density and stress distribution in centrifuge models E1-Vertical stress with depth E2-“Silo” effect on stress E3- K_v values E4-Distribution of void ratio
F-In-flight in-situ tests F1-CPT: distance to the wall F2-CPT: diameter of the container F3-Vane: effect of centrifuge acceleration on shear strength	G-Fluid flow in saturated centrifuge samples G1-Laminar flow (Darcy) G2-Flow rate limit G3-Turbulent flow G4-Self-weight consolidation	H-Unsaturated conditions H1-Capillary rise H2-Water content distribution	I-Dynamic conditions I1-Boundary effects I2-Wave propagation I3-Coupled consolidation and dynamic phenomena I4-Cratering I5-Pile driving I6-Rockfall I7-Explosion	J-Aqueous phase transport in saturated soils J1-Advection J2-Diffusion J3-Mechanical dispersion J4-Sinks or sources at aqueous fluid-solid boundaries J5-Sinks or sources within aqueous phase
K-Non-aqueous phase transport in soils and fractures K1-Capillary pressure K2-Entry pressure K3-Residual saturation K4-Unstable gravity driven flow K5-Finger properties in uniform soil	L-Heat transfer in saturated soils L1&2-Conductive heat transfer L3-Convective heat transfer L4-Frozen soil L5-Thaw processes L6-Ice	M-Erosion, sedimentation M1-Cohesionless soil	N-Current propagation, electro-osmosis N1-Electro-osmosis	Other topics to come?

Facteurs d'échelle pour un modèle réduit à l'échelle 1/N testé sous nG
(même sol dans le modèle et dans le prototype)

H Unsaturated conditions	H1 Capillary rise in soils	Theoretical scaling factors have been verified experimentally in Congleton sand ($d_{10}/d_{50}=0.1/0.15$ mm) H_c being the capillary rise, scale factors are: $H_c^* = 1/n$ $t^* = 1/n^2$	Both the capillary rise and rate scaling factors have been verified experimentally in sands at accelerations up to 32g.	Lord (1999) Rezzoug et al. (2000 a&b, 2004)
	H2 Water content distribution in unsaturated soils	$h^* = 1/n$ $w^* = 1$	Successful modelling of model tests in the range 1g-100g. More experimental data are needed to conclude (limit of validity at very high suction). Residual saturation at very high suction is sensitive to g^* .	Crançon et al. (2000) Esposito (2000) Knight et al. (2000) Garnier (2002)

Travaux réalisés pour l'essentiel dans le cadre du programme NECER

- Approches théoriques sur l'ascension capillaire (Rezzoug *et al.*, 2000)

Hauteur finale d'ascension

$$H_c = \frac{2T \cos \delta}{\rho g r}$$

(loi de Jurin et récents travaux de Lord, 1999)

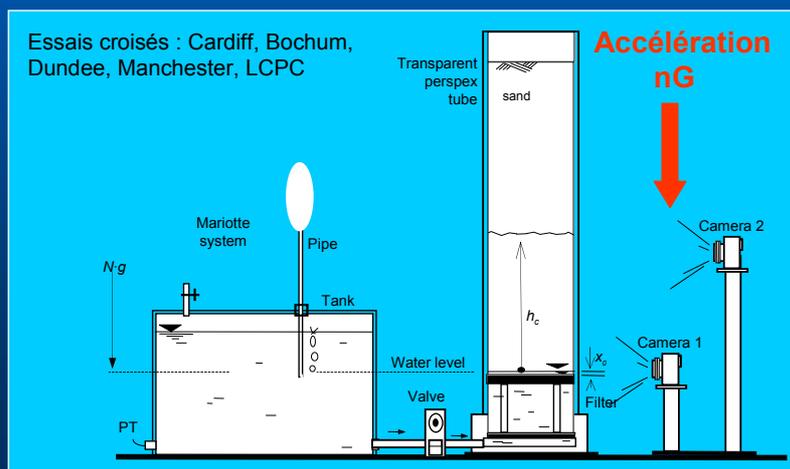
Evolution en fonction du temps

$$\ddot{h}_c(t) = \frac{1}{h_c(t)} \left[\frac{2T \cos \delta}{\rho r} - \frac{8\eta}{\rho r^2} \dot{h}_c(t) h_c(t) - \frac{1}{2} \dot{h}_c^2(t) - g h_c(t) \right]$$

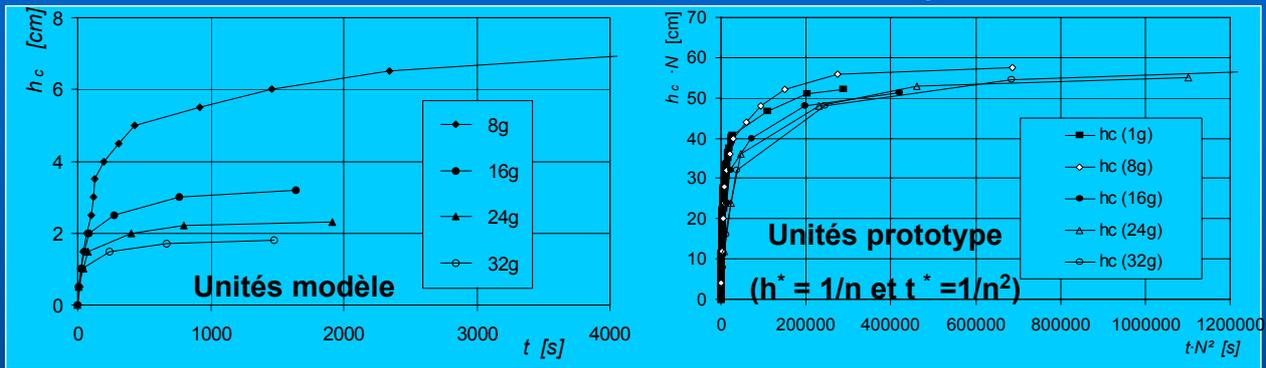
- Vérifications expérimentales : Modelling of models (Programme NECER)



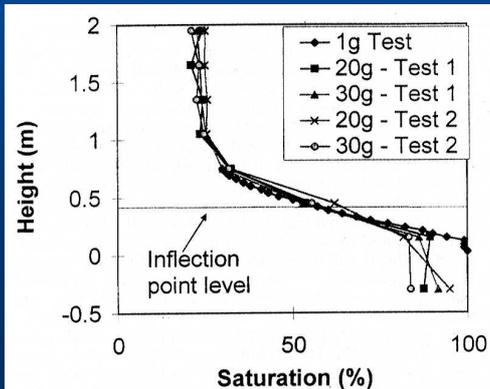
Burkhart et al. (2000)
Thorel et al. (2000)
Depoutis et al. (2000)



Hauteur d'ascension en fonction du temps



Essais à 1g, 8g, 16g, 24g et 32g de Rezzoug et al. (2000)



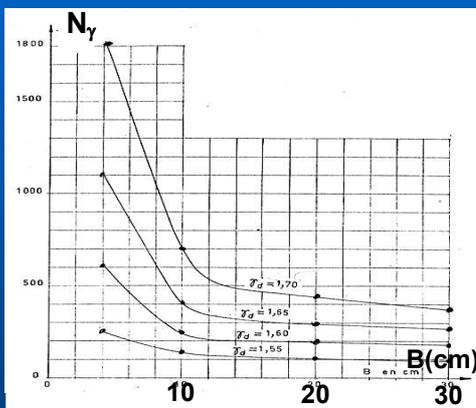
Profils des teneurs en eau en unités prototype ($h^* = 1/n$ et $w^*=1$)

Essais à 1g, 20g et 30g de Esposito (2000)

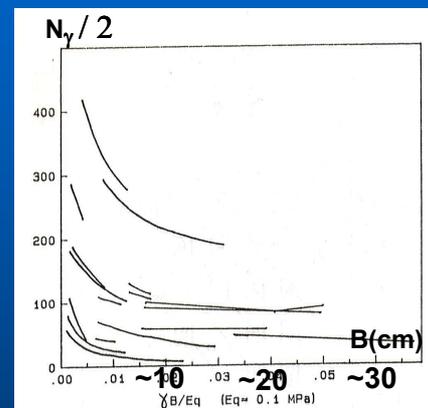
Autres données hors NECER : Essais de Knight et al. (2000) à 50g et 100g

Un cas d'école : effet de la taille de la fondation

Quelques évidences expérimentales de l'effet de la taille de la fondation sur le facteur de portance (sable dense)



Tcheng & Iseux (1966)



De Beer cité par Corté (1989)



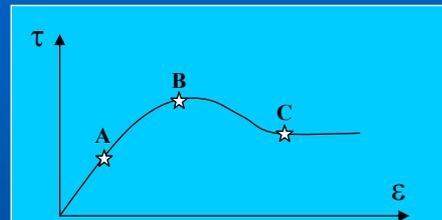
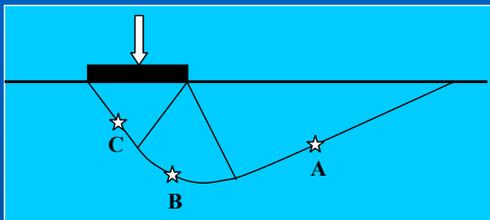
- Effet de la taille la fondation très marqué pour les fondations de largeur B inférieure à 15 ou 20 cm
- Pour les plus petites fondations (quelques cm), le facteur de portance N_γ peut être multiplié par 5 ou plus

Cet effet de taille pose deux questions capitales pour la modélisation physique :

- 1 – Quelles sont les explications physiques à l'effet de taille observé sur N_γ pour les petites fondations (quelques centimètres de côté) ?
- 2 – Les modèles réduits testés sous macrogravité sont-ils aussi affectés par cet effet ?

(1) - Rupture progressive

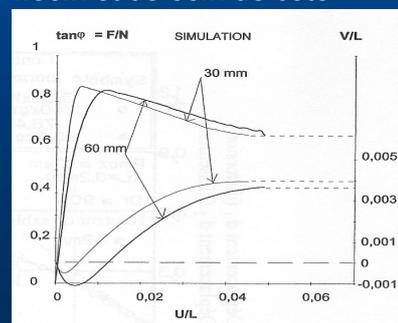
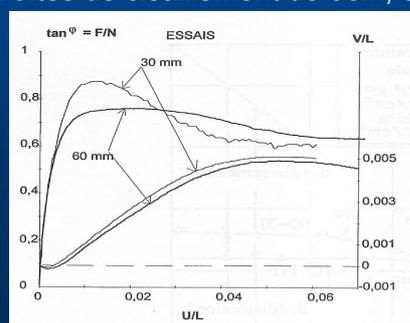
De Beer (1965), Vesic (1973), Yamaguchi (1976), Kimura (1985), Habib (1985 et 1989)



- Hypothèse proposée aussi pour les murs, les ancrages, les essais trap-door...
- Ne se manifesterait que dans un matériau présentant un radoucissement

Tentative de modélisation théorique et numérique (Dubreucq, 1999)

Boîtes de cisaillement de 3cm, de 4.5cm et de 6cm de côté



(2) - Effet de la contrainte moyenne sur l'angle de frottement interne

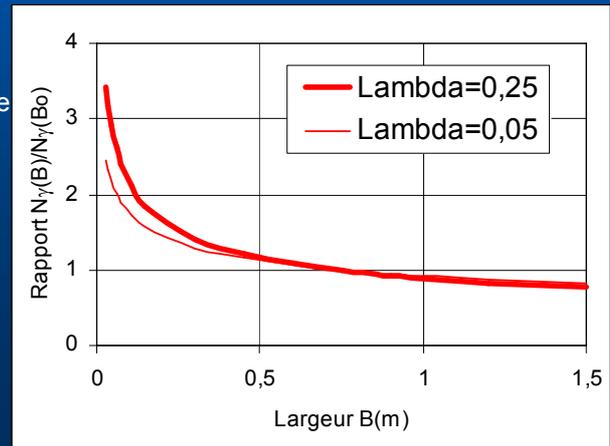
Taylor (1948), De Beer (1965), Tcheng & Iseux (1966), Vesic (1973)

$$\varphi(^{\circ}) = \varphi_0(^{\circ}) - A \cdot \log(\sigma_m / \sigma_0)$$

A entre 1,7 et 5,7 selon les sables (Kusakabe, 1991)

Prise en compte de la variation de φ avec σ_m dans le calcul de la capacité portante des fondations

- Equations de Kotter (Yamaguchi, 1976; Kimura, 1985)
- Méthode des caractéristiques (Graham, 1986)
- Valeur moyenne équivalente (Hettler, 1988)
- Modèle rigide-plastique de Cox (Bolton, 1989; Kusakabe)
- Modèle EF (Simonini, 1993)



Effet de taille : Etude de Graham (1986)

Lambda : Compressibilité du sol, $B_0 = 0,75m$

(3) - Effet de la non prise en compte de la cohésion

De Beer & Ladanyi (1956), L'Herminier, Habib, Tcheng (1961), Garnier (1997 & 2003)

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} + c N_c$$

Sol purement cohérent homogène (argile saturée non drainée)

$$N_{\gamma} = 0 \quad q_u = (\pi+2)c \quad \longrightarrow \quad q_u \text{ est indépendant de } B$$

Sol purement frottant homogène (sable parfaitement sec ?)

$$c = 0 \quad q_u = \gamma B N_{\gamma} / 2 \quad \longrightarrow \quad q_u \text{ est proportionnel à } B$$



L'influence de la taille de la fondation sur q_u dépend du poids relatif des termes de cohésion et de frottement

« The test results determine values of N_γ significantly greater than the theoretical values »
Hansen (1956)

« Le coefficient N_γ décroît quand B augmente...et plusieurs raisons sont plausibles:
a) le modèle réduit ne serait pas valable;
b) quand les semelles sont larges, les contraintes sont élevées ce qui entraîne une diminution de l'angle de frottement...»
Tcheng & Iseux (1966)

« La cohésion du sable a été négligée...On constate que les portances expérimentales dépassent plus ou moins fortement les valeurs théoriques »
De Beer & Ladanyi (1956)

« Le terme de surface $\gamma BN_\gamma / 2$ est pratiquement impossible à isoler du point de vue expérimental ...car la cohésion d'un sable n'est jamais nulle »
L'Herminier, Habib et Tcheng (1961)



Hauteur limite d'un talus H_l

$$H_l = \frac{2c}{\gamma_d} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$



Cohésion apparente

C entre 1kPa et 1,5 kPa

Les origines de cette cohésion apparente sont encore incertaines:

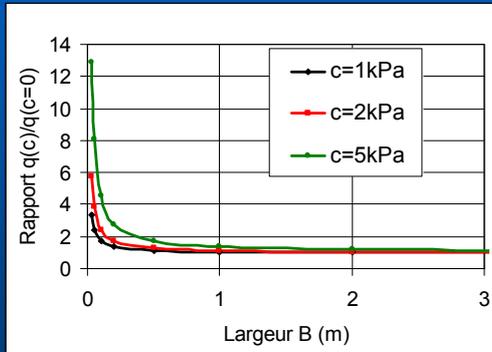
- Forces électrostatiques
- Succion
- Imbrication des grains et dilatance (Schofield, 2003)

Evaluation théorique de l'effet de la cohésion sur la portance

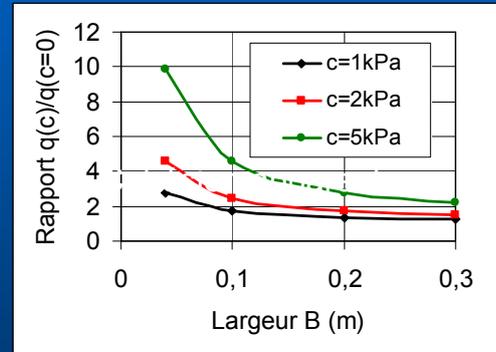
Eurocode 7-1: $N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$, $N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi$ et $N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi$

Encastrement D = 0

$$\frac{q_r(c)}{q_r(c=0)} = 1 + \frac{c}{\gamma B \tan^2 \varphi}$$



B entre 0,02m et 3m



B entre 0,04m et 0,3m

Lors d'un essai réalisé en pesanteur terrestre sur une fondation de largeur $B = 5\text{cm}$, négliger une cohésion de 2 kPa surestime d'un rapport 4 le facteur de portance N_γ !

Cas des essais sur modèles centrifugés

Simulation d'une fondation en vraie grandeur de largeur B :
Modèles à l'échelle 1/N (largeur B/n) testés sous une accélération nG

$$\frac{q_r(c)}{q_r(c=0)} = 1 + \frac{c}{(n\gamma)(B/n)\tan^2 \varphi} = 1 + \frac{c}{\gamma B \tan^2 \varphi}$$

- Le rapport $c/\gamma B \tan^2 \varphi$ est inchangé par rapport à la vraie grandeur et l'effet de la cohésion est correctement reproduit
- L'état de contraintes est inchangé et l'effet éventuel de la contrainte moyenne sur l'angle φ est donc reproduit

Exemple des essais réalisés par Canépa et Depresles (1990).

Fondations réelles de diamètre B allant de 0,75 m à 5,2 m simulées par des modèles réduits de 56,6mm et 80mm de diamètre testés sous des accélérations allant de 13.2G à 65.6G

(Massifs de sable de Fontainebleau sec, $\gamma_d = 16.1 \text{ kN/m}^3$ et $\varphi = 42^\circ$)

- Formule de Combarieu (1999) déduite de la portance pressiométrique

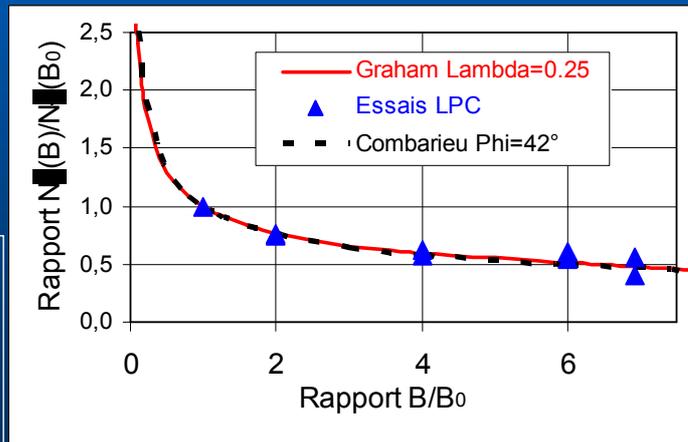


$$\frac{N_\gamma(B)}{N_\gamma(B_0)} = \left(\frac{B_0}{B}\right)^{\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi}}$$

- Calculs de Graham (effet de la contrainte sur l'angle ϕ)

- Essais sur modèles réduits centrifugés ($B = 56,6$ et 80mm) de Canépa & Depresle (1990)

Pour les fondations courantes (B entre $0,5\text{m}$ et 3 ou 4m) le facteur N_γ peut varier de $\pm 50\%$ selon la largeur

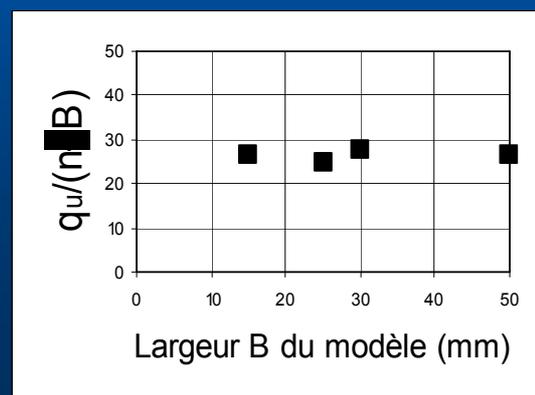


Rapport $N_\gamma(B)/N_\gamma(B_0)$ pour $B_0=0,75\text{m}$

- Pour les essais en pesanteur terrestre, le facteur N_γ peut être multiplié par 4 ou 5 pour les plus petits modèles. Cet effet peut s'expliquer par :
 - la variation de l'angle de frottement avec la contrainte moyenne
 - la non prise en compte de la cohésion apparente du sable sec.
- Ces phénomènes parasites n'affectent pas les modèles réduits en macrogravité

Essais en centrifugeuse de chargement de fondations de différentes tailles simulant toutes une fondation de 1.5 m de largeur (Portugal, 1998)

- La portance mesurée par modèles centrifugés est représentative si $B/d_{50} > 35$ (Catalogue of scaling laws, 2007)



Merci

