

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.

Interpolation du pénétromètre à partir des vitesses sismiques en offshore Penetrometer interpolation using seismic data for offshore application

F. Elmi

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

J.-L. Favre

LMSSMat - CNRS UMR 8579, Ecole Centrale Paris, Châtenay-Malabry, France

RÉSUMÉ

La simulation de l'essai au pénétromètre statique nécessite une loi «fine», élastoplastique avec écrouissage. Cette communication rappelle sommairement le modèle utilisé et l'identification de ses paramètres, la simulation du pénétromètre basée sur la modélisation de l'expansion de cavité et la méthode de Salgado avec validation sur des essais en chambre de calibration. La méthode est ensuite validée sur un site terrestre (Merville) à défaut de mesures en grands fonds non encore disponibles dans le projet. La bonne concordance des simulations avec les mesures pénétrométriques est confirmée par les corrélations tirées de la littérature.

ABSTRACT

The simulation of the penetrometer requires a delicate elasto-plastic constitutive model with hardening. The paper recalls briefly the model considered and the identification of its parameters, presents the simulation of the penetrometer based on the cavity expansion modeling and the method of Salgado with calibration chamber tests validation. The method is validated on an onshore site (Merville), as measurements in ocean floor were not yet available in this project. The good agreement of simulations with measured values is confirmed by the correlation obtained from literature.

1 INTRODUCTION

L'ingénierie offshore est devant un défi : installer à moindre frais des ouvrages par grands fonds. Ce défi concerne tout particulièrement la reconnaissance. Le Fonds de Soutien aux Hydrocarbures a soutenu le projet d'«intégration totale des données de reconnaissance» dirigé par Fugro-France et visant à utiliser de façon intégrée données géologiques, sédimentologiques, géophysiques et géotechniques.

On présente ici les résultats du couplage des méthodes sismique et du pénétromètre. Ce couplage, paradoxal puisque concernant les domaines extrêmes du comportement, a fait depuis longtemps l'objet de constatations statistiques mais n'avait jamais fait l'objet d'une simulation (Mayne et al., 1993). La reconnaissance géophysique utilise la technique Gambas (Fugro) pour conjuguer la réflexion, la réfraction et les ondes de surface ; ces trois données sont inversées pour connaître en continu, l'épaisseur des couches, jusqu'à 30 m, et les deux paramètres de l'élasticité « vraie : $\varepsilon < 10^{-5}$ » de chacune. L'inversion, sous contrainte, a une solution unique qui va être utilisée pour la simulation de la résistance de pointe (Elmi, 2003).

2 MODÈLE DE COMPORTEMENT DU SOL

2.1 Modèle de « Hujoux »

Le comportement du sol doit être modélisé par une loi valable des petites aux grandes déformations. Ce type de loi est forcément complexe avec beaucoup de paramètres. On a utilisé la loi élasto-plastique multi-mécanisme avec écrouissage (Aubry et al., 1982 ; Hujoux, 1985) appelée loi ECP, communément le modèle de « Hujoux ». Il est basé sur la théorie de la plasticité avec écrouissage et sur le concept d'état critique. Il est dérivé du modèle de Cam-Clay original. Il se décompose en trois mécanismes de déformation plane dans trois plans orthogonaux i, j et k et un mécanisme purement volumique. La difficulté majeure est l'identification des paramètres.

La partie élastique est non linéaire ; le module de compressibilité K et le module de cisaillement G sont fonction de la contrainte effective moyenne p' et sont donnés par les équations (1) et (2) où K_{ref} et G_{ref} sont les modules de compressibilité et de cisaillement à la contrainte effective moyenne de référence p_{ref} et n_e est un exposant qui représente la nature du matériau. Pour $n_e = 0$, ces relations sont celles de l'élasticité linéaire.

$$K = K_{ref} \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^{n_e} \quad (1)$$

$$G = G_{ref} \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^{n_e} \quad (2)$$

Avec la convention de signe de la mécanique des sols (compression positive), la surface de charge déviatorique dans le plan k est donnée par les équations (3) à (5) où ϕ'_{pp} est l'angle de frottement interne à l'état critique.

$$f_k(\sigma, \varepsilon_v^p, r_k) = q_k + p'_k \cdot \sin \phi'_{pp} \cdot F_k \cdot r_k \quad (3)$$

$$F_k = 1 - b \ln(p'_k / p_c) \quad (4)$$

$$p_c = p_{co} \exp(-\beta \varepsilon_v^p) \quad (5)$$

Le paramètre b contrôle la forme de la surface d'écoulement dans le plan (p', q) et varie de 0 (surface de type Coulomb) à 1 (surface de type Cam-Clay). β est l'indice de compression plastique et p_{co} représente la contrainte à l'état critique correspondant à l'indice des vides initial. Une variable interne r_k , appelée degré de mobilisation du frottement, est associée à la déformation plastique déviatorique. Elle introduit l'effet de l'écrouissage de cisaillement et décompose le comportement suivant les domaines pseudo-élastique, hystérétique et mobilisé.

2.2 Identification des paramètres du modèle ECP

Plusieurs travaux antérieurs ont donné différents ensembles de paramètres pour le modèle ECP ou des modèles similaires mais ces ensembles ont été obtenus soit pour un matériau particulier, soit pour un essai de laboratoire particulier. Sur la base de données expérimentales et de corrélations, une méthodologie d'identification et de calibration des paramètres du modèle de « Hujeux » a été récemment présentée (Lopez-Caballero, 2003).

Avec cette nouvelle calibration, le modèle est utilisable pour toute la gamme des déformations sur différents chemins de contraintes et pour différentes conditions initiales. En particulier, il peut reproduire tous les comportements en laboratoire (triaxial et cisaillement monotone et cyclique, drainé et non drainé, normalement et sur-consolidé) et en place (pressiomètre) avec le même jeu de paramètres. Ainsi, le jeu de paramètres est objectif, intrinsèque au matériau et permet de simuler le comportement sur des chemins différents que ceux utilisés pour la calibration.

Les paramètres sont de quatre types et sont classés en deux catégories (Tableau 1) : les paramètres mesurés et les paramètres estimés par calage.

Tableau 1 : Paramètres du modèle « Hujeux »

	mesurés	estimés par calage
Elasticité	K_{ref}, G_{ref} n_e, p_{ref}	
Etat critique et plasticité	ϕ'_{pp}, β p_{co}, d	b
Loi d'écoulement et écoulement isotrope	ψ	a_1, a_2, α_ψ m, c
Seuils des domaines		r^{ela}, r^{phys} r^{mob}, r^{iso}

Les paramètres mesurés le sont aisément sur les essais de laboratoire ou sur les essais en place. Le paramètre p_{co} est directement lié à l'état initial et joue le rôle le plus important (Lopez-Caballero et al., 2003). Les paramètres estimés par calage le sont avec une procédure d'optimisation.

Les paramètres mesurés et estimés par calage peuvent aussi être obtenus par des corrélations et des abaques (Favre et al., 2002 ; Lopez-Caballero, 2003) à partir de la nature des grains (paramètres d'identification). L'arrangement des grains (densité relative ou indice de plasticité) donne directement p_{co} .

C'est cette deuxième procédure qui est utilisée pour la simulation du pénétromètre, les seules données nécessaires étant pour une argile de grande profondeur (Elmi, 2003), les données sismiques, la limite de liquidité et l'indice des vides initial, mesurable par résistivité électrique.

3 SIMULATION DE LA RÉSISTANCE DE POINTE q_c

3.1 Mécanisme de pénétration

L'analogie entre l'expansion d'une cavité et la pénétration d'un cône a été soulignée par Bishop dans le cas du poinçonnement des métaux après avoir constaté que la pression nécessaire à la production d'un trou profond dans un milieu élastique-plastique était proportionnelle à celle nécessaire pour expandre une cavité dans les mêmes conditions. Cette analogie a été utilisée avec succès par différents auteurs et pour différents matériaux, par exemple Gibson pour les argiles, Skempton pour les sables et Ladanyi pour les sables, les argiles sensibles et les roches (Ladanyi et Johnston, 1974).

Quand le pénétromètre est enfoncé dans le sol, il crée et développe une cavité cylindrique. Le champ des déplacements, immédiatement sous le pénétromètre, à l'intérieur et le long du cône est vertical (Fig. 1). Il y a une rotation du champ des déplacements de la verticale sous le cône à l'horizontale derrière la ligne de glissement. Ce champ horizontal de déplacements est

compatible avec l'expansion d'une cavité cylindrique. La simulation du pressiomètre avec la loi de « Hujeux » étant bien développée au LMSSMat, il a été choisi de simuler la pression limite p_L puis de passer de p_L à q_c par un schéma explicite. On garde ainsi le comportement du sol dans les très petites déformations.

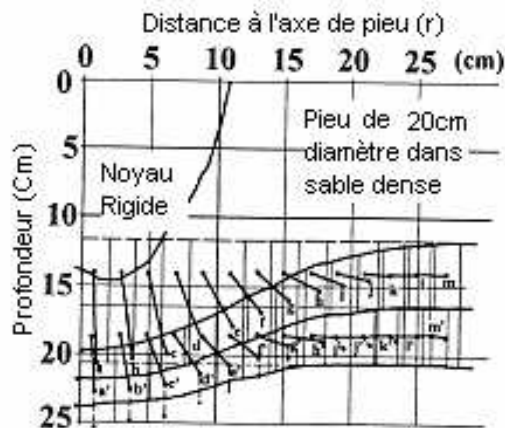


Figure 1. Champ des déplacements sous la base (d'après BCP 1971)

3.2 Schéma explicite de calcul de q_c à partir de p_L

Récemment, Salgado et al. (1997) ont proposé le schéma de rupture de la figure 2.

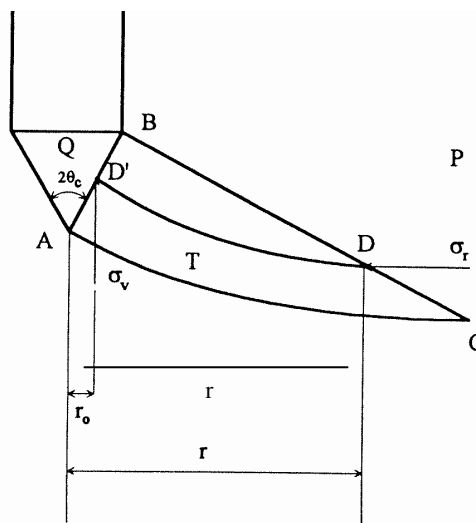


Figure 2. Mode de glissement sous le cône (Salgado et al., 1997)

Les contraintes principales sont verticales dans la zone Q et horizontales dans la zone P si l'angle ABC est droit. Alors, la résistance de pointe q_c (σ_r sur la figure 2) est donnée en fonction de la pression limite p_L (σ_r sur la figure 2) par :

$$q_c = 2p_L e^{\pi \tan \phi} \frac{(1+C)^{1+\beta} - (1+\beta)C - 1}{C^2 \beta (1+\beta)} \quad (6)$$

avec :

$$C = e^{(\pi/2) \tan \psi} \cot \theta_c, \quad \beta = 1 - \frac{N-1}{N}$$

$$\text{et } N = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

3.3 Simulation de la pression limite par éléments finis

La simulation de l'expansion de cavité a été validée sur huit essais en chambre d'étalonnage exécutés au laboratoire 3S de Grenoble (Mokrani, 1991) sur le sable d'Hostun fin « RF » à quatre densités relatives différentes et deux contraintes verticales pour chacune ($\sigma'_v = 100$ et 200 kPa pour $D_r = 40$ et 88% et $\sigma'_v = 400$ et 500 kPa pour $D_r = 54$ et 83%). Les essais sont de type « pressiomètre auto-foreur ». Le problème est traité en axisymétrie avec 224 éléments quadrilatères à 4 nœuds (Fig. 3). Le maillage respecte les dimensions et les conditions aux limites de la chambre d'étalonnage. Le code de calcul utilisé est GEFDYN du LMSSMat (Aubry et al., 1986). L'analyse 2D apporte moins de 10% de surestimation des pressions par rapport à l'analyse 3D tant pour le sable lâche que pour le sable dense (Elmi et Favre, 2002). Aussi l'analyse 2D a été adoptée vu les gains de temps qu'elle procure.

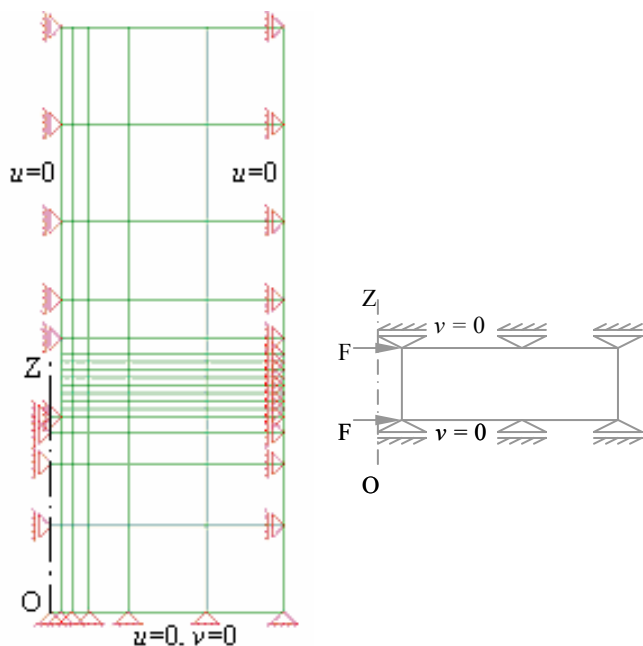


Figure 3. Maillage de la chambre d'étalonnage du laboratoire 3S, Grenoble

La nouvelle méthode d'identification sur essais triaxiaux permet de retrouver le chemin pressiométrique alors que les anciennes méthodes ne le permettaient pas (Fig. 4). Le même jeu de paramètre permet de retrouver l'ensemble des essais de la chambre d'étalonnage. La pression limite est prise conventionnellement à 20% d'expansion de la sonde.

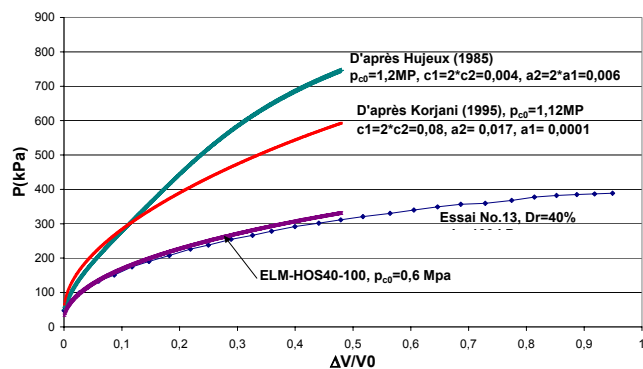


Figure 4. Simulation du pressiomètre avec les anciennes et la nouvelle méthode d'identification des paramètres

4 VALIDATION SUR SITE

4.1 Choix des valeurs des paramètres

Les campagnes d'essais sismiques et pénétrométriques prévues dans le projet ayant dû être différées, la méthode a été testée sur un site onshore, le site de Merville dans l'argile des Flandres. Ce site expérimental argileux des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LCPC) se trouve dans la région du Nord de la France (Canépa et al., 2002)

Les mesures sismiques ont été exécutées par Fugro-France et les essais d'ondes de surface ont été dépouillés par la méthode SASW (Elmi, 2003) fournissant les valeurs de G_{ref} et K_{ref} (tableau 2). Les autres paramètres ont été estimés à partir de la limite de liquidité de l'argile des Flandres $w_L = 92\%$ et de sa contrainte de consolidation $\sigma'_c = 150$ kPa (Canépa et al., 2002 ; Borel, 2000). Les renvois aux abaques et corrélations du tableau 2 correspondent à une partie du travail de Elmi (2003).

Les calculs ont été menés pour une contrainte effective initiale de 150 kPa (environ 8 m de profondeur), soit $OCR = 1$, un rayon initial $r_0 = 2,2$ cm, correspondant à celui de l'essai CMPT (l'essai au pressio-pénétrmètre) et un rayon total $r = 150 r_0$ pour satisfaire les conditions à l'infini. On se place en axisymétrie autour de l'axe OZ et en « déformation plane » suivant OXY (cf. la partie droite de la figure 3).

Tableau 2 : Paramètres du modèle « Hujeux » de l'argile des Flandres

	Paramètres	Valeurs	Relations
Propriétés du sol	w_L (%)	92	$Ip = 0,73 (w_L - 13) = 58$
	C_c	0,36	Essai œdométrique
	C_s	0,15	Essai œdométrique
	e	0,95	Calculé
	ρ (kg/m ³)	1900	Mesuré
	σ'_0	150 kPa	$\rho \cdot z$
	σ'_c	150 kPa	Essai œdométrique
	n	0,487	$n = e/(1+e)$
	k_0	0,61	$k_0 = 1 - \sin \phi_{pp}$
	Elasticité	G_{ref} (MPa)	161
K_{ref} (MPa)		350	$\nu = 0,33$ mesuré $K = 2G(1+\nu)/3(1-2\nu)$
p_{ref}		1 MPa	
n_e		0,8	Estimé
Etat critique et plasticité	ϕ'_{pp}	23	Estimé: $\phi'_{pp} = -8,38 \ln(w_L) + 60,6$
	β	12	$\beta = 2,3(1+e)/C_c$
	p_{co} (MPa)	0,6	graphe de l'arrangement relatif (Favre et al., 2002)
	d	2,0	$d = \exp(\Delta e/\lambda)$
	b	1	Estimé
	Loi d'écoulement et écoulement isotrope	ψ_c	23
α_w		1	Estimé
a_1		1e-4	Estimé
a_2		5e-3	Estimé
c_1		0,18	Estimé
c_2		0,09	$c_2 = 0,5c_1$
Comportement du domaine	r^{ela}	0,025	Estimé
	r^{hys}	0,1	Estimé
	r^{mob}	0,5	Estimé
	r^{ela}_{iso}	1e-4	Estimé

4.2 Résultats

Une très bonne concordance a été trouvée entre la simulation et les mesures pénétrométriques (Fig. 5). On a aussi comparé les résistances de pointe et la vitesse des ondes S mesurées au pénétromètre sismique. Sur la figure 6 qui donne la statistique rassemblée par Mayne et Rix (1993), on voit que le site de Merville se place plutôt dans les argiles fissurées, ce qui est le cas.

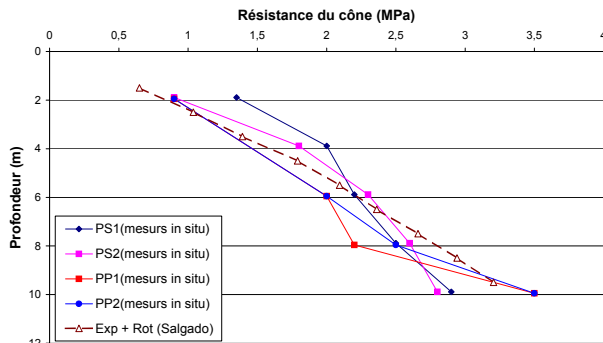


Figure 5 : Comparaison des mesures et de la simulation du pénétromètre

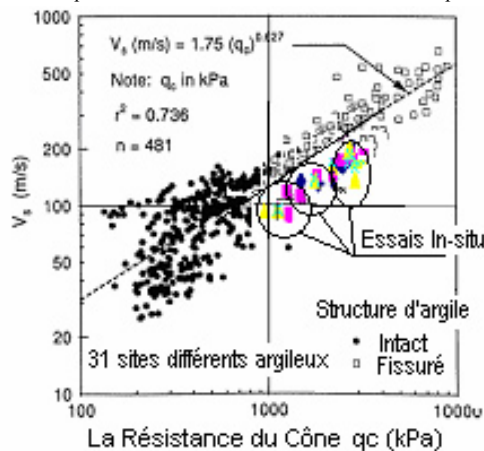


Figure 6 : Place du site de Merville dans la corrélation de Mayne et Rix

Enfin, la figure 7 rassemble les trois résultats dans le plan (q_c / V_s) : les mesures du site de Merville, la simulation du site de Merville et les corrélations (tendances moyennes) de Mayne et Rix et de Jaime et Romo (1988). Celle de Mayne et Rix s'ajuste parfaitement pour le matériau étudié moyennant un changement du coefficient de 1,75 en 1,35.

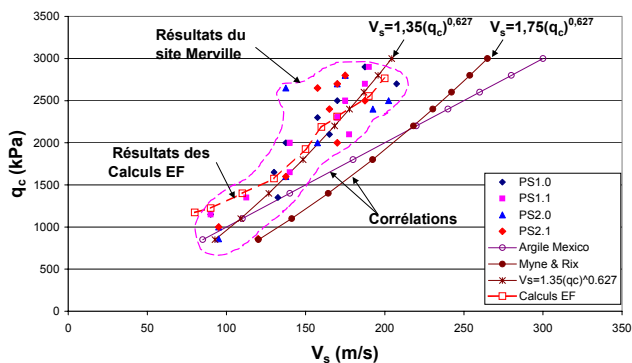


Figure 7. Corrélations, simulations et mesures de la résistance de pointe du pénétromètre à partir de la vitesse des ondes S.

5 CONCLUSION

Une nouvelle procédure a été présentée pour simuler la résistance de pointe du pénétromètre à partir de mesures sismiques et

seulement d'identification du sédiment marin. La procédure couple la solution en plasticité parfaite de Salgado concernant le passage du pressiomètre auto-foreur au pénétromètre et la simulation du pressiomètre auto-foreur par éléments finis avec la loi élasto-plastique multimécanisme à écrouissage de l'ECP, modèle de Hujeux. La difficulté majeure d'identification des paramètres de ce modèle a été levée. De plus, cette identification peut être remplacée par une estimation à partir de la nature des grains, de leur arrangement et de l'OCR grâce à des abaques et corrélations. Néanmoins, une validation plus étendue sur des sédiments marins à grande profondeur reste nécessaire ainsi qu'une analyse de sensibilité et d'incertitudes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société Fugro-France qui a dirigé ce projet, le LCPC pour les données de Merville ainsi que les professeurs A. Modaressi et J. Biarez et le Docteur F. Lopez-Caballero pour tous les échanges durant ce travail.

RÉFÉRENCES

- Aubry, D., Hujeux, J.C., Lassoudiere, F. et Meimon, Y. 1982. A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviors, *International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich.*, vol. 1, 3-13.
- Aubry, D., Chouvet, D., Modaressi, A. et Modaressi, H. 1986. GEF-DYN : Logiciel d'analyse de comportement mécanique des sols par éléments finis avec prise en compte du couplage sol-eau-air, *Manuel scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat.*
- BCP Committee 1971. Field tests on piles in sand, *Soil and Foundation*, Tokyo, Japan, Vol. 11, No. 2 : 29-49.
- Borel S. 2000. *Caractéristiques géotechniques du site de MERVILLE (Nord)*, Rapport 1.21.04.9, LCPC.
- Canépa Y., Borel S. ET Deconinck J. (2002). Détermination de la courbe d'évolution du module de cisaillement d'un sol en fonction de sa déformation à partir d'essais en place, *Numerical methode in geotechnical engineering (NUMGE)*, Mestat (ed.):25-32.
- Elmi, F. 2003. *Détermination des propriétés des sols marins par reconnaissance géophysique et géotechnique*. PhD thesis, Ecole Centrale Paris, France.
- Elmi, F. et Favre, J.L. 2002. Analogy between analyse of pile and penetrometer tip resistance by cavity expansion method, *Ninth International Conference on Piling and Deep Foundation, DF12002, Nice*
- Favre, J.-L., Biarez, J. et Mekkaoui, S. 2002. Modèles de comportement en grandes déformations des sables et des argiles remaniées à l'œdomètre et triaxial, *Symposium international de l'identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques (PARAM02)*, Presses de l'ENPC, 369-384
- FUGRO 2001. Reconnaissance géotechnique : Essais au cône sismique et pressio-pénétromètre, Site expérimental de MERVILLE, Rapport Factuel, Report No. FR.00.Rg.Te.0085_a/rev.1.
- Hujeux, J.-C. 1985. Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols, *Génie Parasismique, V. Davidovici, Presses ENPC, France* : 278-302.
- Jaime A. et Romo M.P. 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985-Correlations between dynamic and static properties of Mexico City Clay, *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 4 : 787-804.
- Ladanyi, B. et Johnston, G.H. 1974. Behavior of circular footing and plate anchors embedded in permafrost, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11 : 531-552.
- Lopez-Caballero, F. 2003. *Influence du comportement non linéaire du sol sur les mouvements sismiques induits dans des géo-structures*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.
- Lopez-Caballero, F., Modaressi, A. et Elmi, F. 2003. Identification of an elastoplastic model parameters using laboratory and in-situ tests. *Third International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS Lyon 03)*, Lyon (France), Septembre 22-24.
- Mayne P.W. et Rix G.J. 1993. Correlation between shear wave velocity and con tip resistance in natural clays, *Soils and Foundation*, Vol. 35, No. 2 : 107-110.
- Mokrani L., 1991, *Simulation physique du comportement des pieux à grande profondeur en chambre de calibraion*. Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

Salgado, R., Mitchell, J.K. et Jamiolkowski, M. 1997. Cavity Expansion and Penetration Resistance in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 4, ASCE.

