

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.

Effet de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique de pieux modèle en chambre d'étalonnage

The effect of loading rate on the mechanical behaviour of model piles in calibration chamber

V. De Gennaro – CERMES (ENPC-LCPC), Paris, France

R. Frank – CERMES (ENPC-LCPC), Paris, France

G. Bosco – DIMS, Università degli Studi di Trento, Italie

J. Canou – CERMES (ENPC-LCPC), Paris, France

RÉSUMÉ: Le recours à des expériences sur modèles réduits pour l'analyse du comportement mécanique des fondations profondes, s'avère souvent très utile. La chambre d'étalonnage est un outil expérimental fréquemment utilisé pour ce type d'application. Les résultats présentés dans cette communication sont relatifs au programme expérimental développé pour étudier le comportement mécanique d'un pieu modèle isolé, installé dans un massif de sable de Fontainebleau, et soumis ensuite à chargement statique. Il est montré que la vitesse de chargement a une influence assez nette sur les valeurs du frottement enregistrées à l'interface sol-pieu modèle. Les mesures de résistance unitaire en pointe sont, à l'inverse, presque insensibles aux variations de la vitesse de chargement de l'inclusion.

ABSTRACT: The use of small models and large scale testing apparatuses to analyse the mechanical response for deep foundations to the applied loads is often very useful from a practical and a theoretical standpoint. In this respect the calibration chamber offers a useful tool to understand the response of model piles. In this paper the results of an experimental program aimed at studying the mechanical behaviour of a single model pile installed into a sand sample are presented and discussed. It is shown that the loading rate can have a significant effect on the measured resistance at the soil-pile interface, while the tip resistance seems rather unaffected by the load application procedure.

1 INTRODUCTION

L'utilisation de la chambre d'étalonnage est de plus en plus répandue dans les études concernant les fondations profondes (Boulon et al. 1979, Boulon & Foray 1986, Parkin et al. 1990, Kulhawy 1991, Francis 1997, Foray et al. 1998).

Le principe de base de la chambre d'étalonnage est de pouvoir reconstituer des massifs de sol (en général granulaire) de dimensions importantes (diamètre et hauteur) avec un contrôle des conditions aux limites en contrainte et/ou en déformation (Bellotti et al. 1982, Sweeney & Clough 1990, Francis 1997, Foray et al. 1998). L'objectif est d'essayer de reproduire le plus fidèlement possible les conditions correspondant à un massif semi infini.

Les premières applications de ce dispositif ont surtout concerné l'étalonnage de la réponse de sondes de reconnaissance en place (pénétromètres, pressiomètres, piézocônes, etc). Des nombreux travaux sont disponibles dans la littérature technique à ce sujet (Schnaid & Houlsby 1992, Penomadu & Chameau 1998, Yu & Mitchell 1998).

Ghionna & Jamiolkowski (1991), ainsi que Foray (1991), ont présenté un aperçu des problématiques et des limitations de la chambre d'étalonnage. On peut les résumer ainsi:

1. Influence de la géométrie du dispositif;
2. Effet d'échelle (dimensions des modèles);
3. Représentativité des essais.

Concernant le dernier point, en effet, il faut souligner que les essais en chambre d'étalonnage, dans la plupart des cas, sont réalisés sur des sols sableux uniformes, avec des caractéristiques granulométriques contrôlées en laboratoire. Il s'avère assez difficile de pouvoir analyser des massifs de sol de structure plus complexe, et donc plus proche de la réalité. Par conséquent, les résultats obtenus pour un certain sol peuvent difficilement être généralisés à un autre (Yu & Mitchell 1998).

Les résultats présentés dans cette communication sont relatifs au programme expérimental développé pour étudier le comportement mécanique d'un pieu modèle isolé, installé dans un massif de sable de Fontainebleau, et soumis ensuite à chargement statique (De Gennaro 1999). Parmi les principaux facteurs qui contrôlent la réponse mécanique du pieu modèle en phase de char-

gement, l'effet du mode d'installation doit être étudié. Pour ce faire, deux différentes procédures d'installation du modèle ont été considérées: une installation par fonçage à vitesse de déplacement constante et une installation par mise en place du sable autour du pieu. Les résultats d'essais de pieux foncés sont ici analysés pour mettre en évidence l'effet de la vitesse sur la réponse mécanique du pieu modèle.

2 LA CHAMBRE D'ETALONNAGE

La chambre d'étalonnage développée au CERMES (Dupla 1995, Francis 1997) a été utilisée pour l'étalonnage de la réponse de sondes de reconnaissance en place, l'étude de l'interaction sol-structure et des mécanismes d'interaction entre pieux modèle. Le principe du dispositif est montré sur la Figure 1.

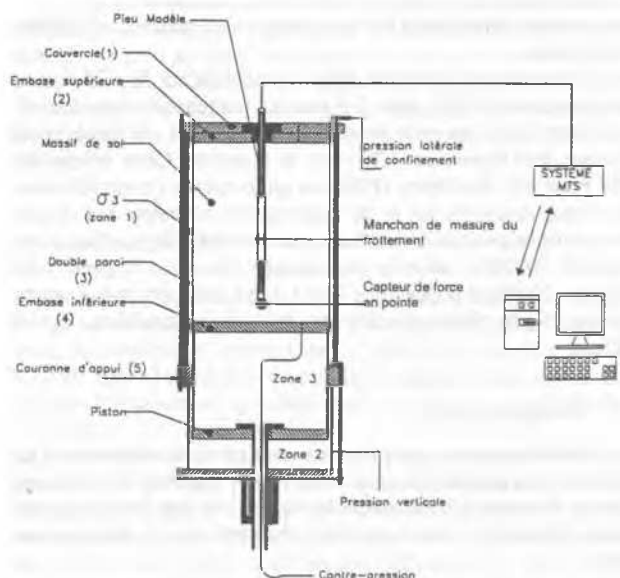


Figure 1. Schéma du dispositif d'essai en chambre d'étalonnage.

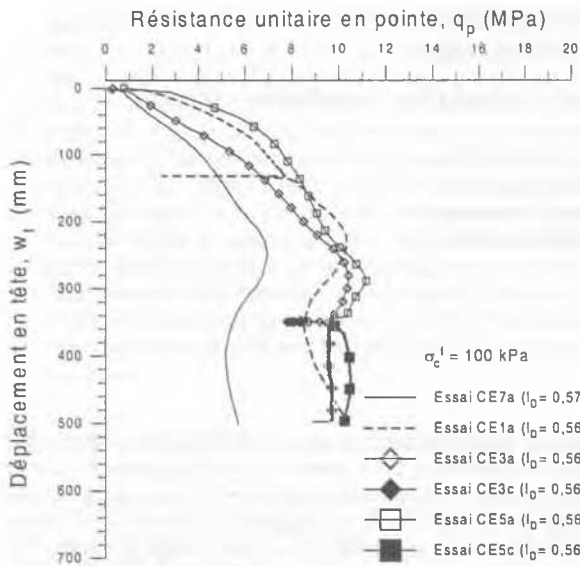


Figure 2. Fonçage : courbes d'évolution de la résistance unitaire en pointe.

2.1 Description du dispositif d'essai

Le dispositif d'essai est composée de trois parties principales: la chambre d'étalonnage proprement dite, le bâti d'installation et de chargement des pieux modèles et le pieu modèle.

Le massif de sol reproduit (sable de Fontainebleau dans cette étude) a un diamètre de 524 mm et une hauteur de 680 mm. Le sol est mis en place par pluviation à l'intérieur d'une membrane en néoprène, à l'aide d'un moule de maintien. Il est placé entre deux embases (supérieure et inférieure). Une double enceinte latérale et un couvercle supérieur permettent la consolidation du massif (soit isotrope, soit de type "K₀"). Celle-ci est réalisée, par l'intermédiaire d'une membrane, avec une pression d'eau latérale (zone 1, Fig. 1) et une pression verticale (zone 2, Fig. 1).

Le dispositif d'installation et de chargement des inclusions est composé d'un premier vérin d'une capacité de 100 kN en compression et de 70 kN en traction. Ce vérin est utilisé pour la mise en place du pieu modèle par fonçage. Le chargement des modèles est réalisé à l'aide d'un servovérin MTS d'une capacité de ± 100 kN, couplé à un système électronique d'asservissement.

En ce qui concerne le pieu modèle utilisé, il s'agit d'une sonde de type pénétrométrique, entièrement instrumentée, permettant des mesures simultanées de la résistance en pointe et du frottement latéral.

Le pieu modèle, à pointe plate, a un diamètre $B = 20$ mm et une longueur de 735 mm. Le bas du manchon de mesure du frottement, que l'on peut le voir sur la Figure 1, est situé à une distance de 6 diamètres (120 mm) de la pointe. Cette précaution a été prise afin de réduire l'effet des phénomènes de modification du champ de contrainte et de déformation en pointe sur la mesure du frottement mobilisé. La surface latérale du modèle a une rugosité contrôlée, obtenue par usinage direct. La rugosité normalisée (Yoshimi & Kishida 1981) a été fixée égale à 1, ayant comme D_{50} de référence celui du sable de Fontainebleau, égal à 0.2 mm.

2.2 Procédure d'essai

Le déroulement des opérations nécessaires à la réalisation d'un essai de chargement du pieu modèle en chambre d'étalonnage dépend du mode d'installation de l'inclusion que l'on choisit de réaliser (fonçage ou mise en place du sable autour du pieu modèle).

Dans le cas d'un pieu modèle installé par fonçage, les phases peuvent être résumées ainsi:

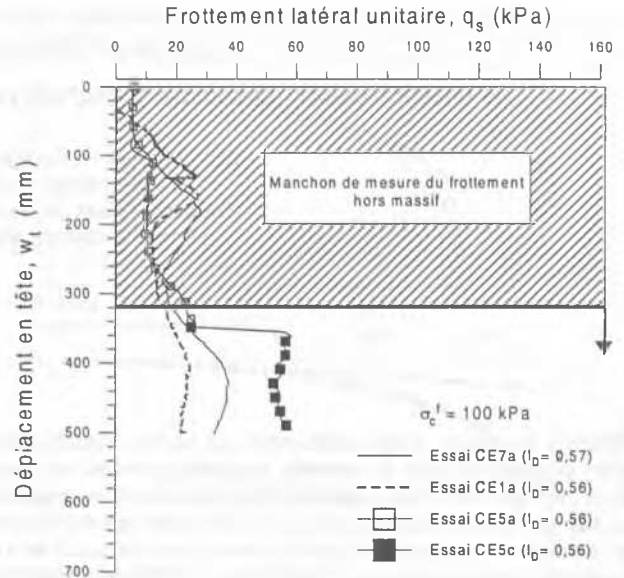


Figure 3. Fonçage : courbes d'évolution du frottement latéral unitaire.

- Phase 1: mise en place du moule de formage du massif et du dispositif de pluviation;
- Phase 2: déposition du sable à la densité voulue;
- Phase 3: démoulage et mise sous contrainte du massif;
- Phase 4: installation du pieu modèle (fonçage);
- Phase 5: réalisation de l'essai de chargement.

Cette procédure est légèrement modifiée dans le cas du "moulage". En effet, dans ce cas le pieu modèle est mis en place avant la déposition du sable et la phase 4 n'existe plus.

3 PROGRAMME D'ESSAI ET RESULTATS

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats des essais de fonçage et de chargement monotones en compression sur des pieux modèles isolés, fonçés dans un massif de sable de Fontainebleau ($\gamma_{\text{dmin}} = 13.9$ kN/m³, $\gamma_{\text{dmax}} = 17.2$ kN/m³, $\gamma_s = 26.5$ kN/m³, $e_{\text{max}} = 0.94$, $e_{\text{min}} = 0.54$, $D_{50} = 0.2$, $C_u = 1.4$). L'ensemble des essais a été réalisé sur des massifs de sol ayant un indice de densité $I_D \approx 0.56$ ($e \approx 0.716$, $\gamma_d = 15.5$ kN/m³), soumis à une contrainte de confinement isotrope ($\sigma_c = \sigma_h = K_0 \sigma_v$ et $K_0 = 1$) égale à 100 kPa ou 200 kPa.

La démarche adoptée pour la réalisation des essais sur les modèles foncés consiste à enfoncer à vitesse v_f constante le pieu modèle dans le massif de sable soumis à une contrainte de confinement isotrope σ_c^f et, une fois atteinte la profondeur voulue, à procéder à la réalisation de l'essai de chargement monotone en compression à déplacement contrôlé et à vitesse v_c constante, sans modifier la valeur de la contrainte de confinement (σ_c^f). L'effet de la vitesse sur la réponse mécanique du modèle a été analysé en réalisant une procédure de fonçage en deux phases. Dans la première phase, le fonçage a été conduit jusqu'à l'obtention d'un élancement du modèle $D/B = 17.25$ ($D = 345$ mm), avec une vitesse $v_f = 60$ mm/min. Dans la deuxième phase, le fonçage a été poursuivi jusqu'à atteindre un élancement final du modèle $D/B = 25$ ($D = 500$ mm), avec une vitesse $v_f = 1$ mm/min.

La vitesse de chargement considérée a été fixée égale à 0.1 mm/min.

3.1 Analyse des courbes de fonçage

L'évolution de la résistance unitaire en pointe (q_p) et du frottement latéral unitaire (q_s) au cours du processus de fonçage est présentée sur les Figures 2 et 3. Les allures des courbes de fonçage, relatives à l'évolution de la résistance unitaire en pointe

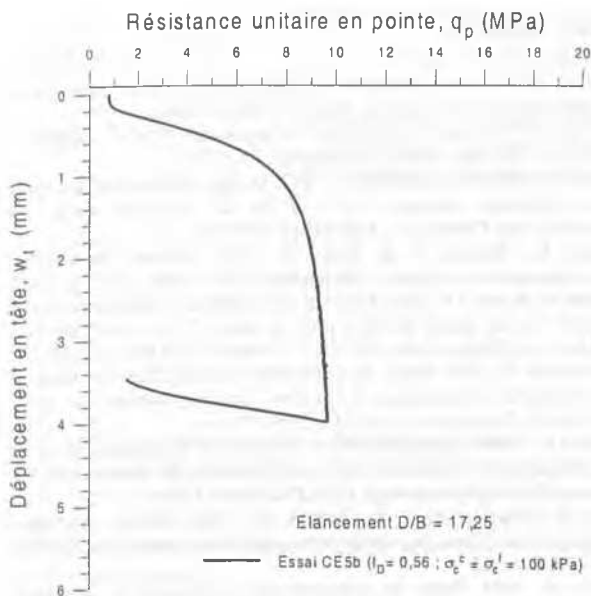


Figure 4. Courbes de mobilisation de la résistance unitaire en pointe, en fonction du déplacement en tête, pendant la phase de chargement.

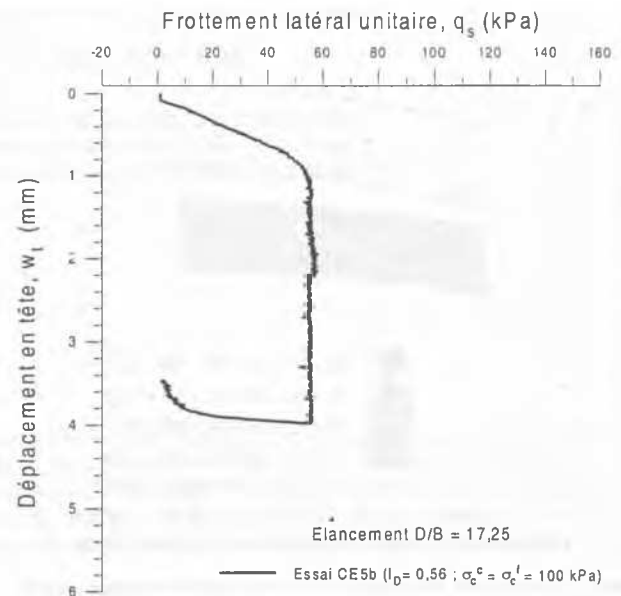


Figure 5. Courbes de mobilisation du frottement latéral, en fonction du déplacement en tête, pendant la phase de chargement.

(Fig. 2), permettent de vérifier, d'une part l'homogénéité du massif et, d'autre part, la répétabilité du processus de pluviation adopté pour la reconstitution des massifs de sable.

Pour les essais CE3a et CE5a, à partir d'un enfoncement de 345 mm, la vitesse de fonçage (v_f) du modèle a été réduite, passant de la valeur initiale de 60 mm/min à une valeur de 1 mm/min (essais CE3c et CE5c). Comme on peut le voir, cette variation de la vitesse ne semble pas modifier les valeurs de résistance unitaire en pointe. Par contre la réduction de v_f influence de manière significative la valeur de q_s , comme le montre la courbe relative à l'essai CE5 (a et c) (Fig. 3). Les mesures du frottement latéral unitaire passent d'une valeur de 26.2 kPa, obtenue avec une vitesse de fonçage de 60 mm/min, à une valeur de 58.1 kPa correspondant à une vitesse de fonçage de 1 mm/min. Un problème d'acquisition des mesures de q_s au cours de l'essai CE3, n'a pas permis de faire une comparaison en termes de répétabilité avec la courbe de mobilisation du frottement latéral correspondant à l'essai CE5.

3.2 Analyse des courbes de chargement

Après avoir installé le pieu modèle par fonçage, sans modifier la valeur de la contrainte de confinement, on a procédé à l'essai de chargement statique de l'inclusion. La vitesse de déplacement en tête retenue comme représentative de la condition de chargement statique est $v_c = 0,1$ mm/min. Pour les essais où le fonçage a été réalisé en deux phases, nous avons effectué des essais de chargement statique pour les deux valeurs d'élancement atteintes, à savoir $D/B = 17,25$ et $D/B = 25$. Dans ce paragraphe on analyse les résultats des mesures effectuées au cours du chargement statique du modèle pour l'essai CE5, essai pour lequel nous avons déjà présenté les résultats concernant le fonçage (Figs 2, 3).

Les Figures 4 et 5 montrent les courbes de mobilisation "typiques" de la résistance en pointe et du frottement latéral, obtenues pour un élancement $D/B = 17,25$ (essai CE5b, $\sigma_c^c = \sigma_h = \sigma_v = 100$ kPa, Figs 2, 3). Comme nous pouvons l'observer, la résistance en pointe et le frottement latéral se mobilisent progressivement au cours du chargement. Après une première phase linéaire, les courbes sont caractérisées par un écrouissage progressif, et par une stabilisation à une valeur constante atteinte pour les déplacements en tête les plus importants.

3.3 Effet de la vitesse de chargement

Les résultats de l'ensemble des mesures sont résumés sur les Figures 6 et 7. Les valeurs de q_p et q_s ont été enregistrées au cours des différentes phases de réalisation des essais (fonçage et chargement) une fois la rupture atteinte (stabilisation sur un palier). Les mesures correspondent aux deux valeurs d'élancement déjà considérées ($D/B = 17,25$ et $D/B = 25$).

Les valeurs de résistance en pointe enregistrées sont peu modifiées par la variation de la vitesse à l'intérieur de la gamme considérée, comme on peut le voir sur la Figure 6. Par contre, la Figure 7 indique que les mesures du frottement latéral unitaire sont très sensibles à la variation de la vitesse de déplacement (v_c ou v_f) imposée au modèle. Les valeurs maximales de q_s , pour le même confinement imposé au massif de sable, sont obtenues lors du chargement statique, pour une vitesse de déplacement en tête $v_c = 0,1$ mm/min. L'augmentation de la vitesse provoque une réduction progressive de la valeur du frottement mobilisé sur la surface latérale du modèle. Ces mesures sont fonction non seulement du confinement imposé au massif, mais également de l'élancement D/B (effet de bord des embases). Ces résultats s'expliquent probablement par la nature différente des phénomènes qui se développent à proximité de la pointe et de la surface latérale du pieu modèle. Notamment, en ce qui concerne le frottement latéral, la perte de résistance au cisaillement aux grandes vitesses peut être associée à une modification de la nature du contact entre les grains ("mechanical fluidization", Seville et al. 1997).

4 CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans cette communication montrent que la vitesse de chargement a une influence assez nette sur les valeurs du frottement enregistrées à l'interface sol-pieu modèle. Les mesures de résistance unitaire en pointe sont, à l'inverse, presque insensibles aux variations de la vitesse de chargement de l'inclusion.

La procédure d'installation par fonçage du pieu modèle en chambre d'étalonnage présente de fortes analogies avec les procédures couramment utilisées pour les sondes employées pour la reconnaissance en place des sols (pénétromètres, pressiomètres, piézocônes, etc), avec l'arrachement statique d'un clou ou, encore, avec le cas du chargement statique d'un pieu.

Pour tous les cas mentionnés, la gamme des vitesses suggé-

5 REFERENCES

- AFNOR 1994. Norme française homologuée. *Association française de normalisation*, tour Europe, Paris la Défense, France.
- ASTM 1995. Annual book of ASTM standards. *PCN 01-040895-38 ASTM 1916 Race Street*, Philadelphia, PA, USA.
- Bellotti R., Bizzi G. & Ghionna V. 1982. Design, construction and use of a calibration chamber. *Proc. of the 2nd European Symp. On Penetration Testing (2)*, Amsterdam: 439-446.
- Boulon M., Desrues J. & Foray P. 1979. Méthode de calcul d comportement des pieux à l'arrachement. *Rev. Franç. Géot.*, 7: 11-22.
- Boulon M. & Foray P. 1986. Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. *3th Int. Conf. on Num. Meth. in Offshore Piling*, IFP-LCPC, Nantes 21-22 Mai: 127-146.
- De Gennaro V. 1999. Etude du comportement mécanique des interfaces sol-structure. Application à l'analyse du comportement des pieux. *Thèse de Doctorat de l'E.N.P.C., Paris, France*.
- Dupla J.C. 1995. Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable. *Thèse de Doctorat de l'E.N.P.C., Paris, France*.
- Foray P., Balachowski L. & Colliant J.L. 1998. Bearing capacity of model piles driven into dense overconsolidated sands. *Can. Geotech. J.*, 35: 374-385.
- Francis R. 1997. Etude du comportement mécanique de micropieux modèles en chambre d'étalonnage. Application aux effets de groupe. *Thèse de Doctorat de l'E.N.P.C., Paris, France*.
- Ghionna V.N. & Jamiolkowski M. 1991. A critical appraisal of calibration chamber testing of sands. *Proc. 1st Int. Symposium on Calibration Chamber Testing*, Postdam: 13-39.
- Kulhawy F.H. 1991. Fifteen+ years of model foundation testing in large chambers. *Proc. 1st Int. Symposium on Calibration Chamber Testing*, Potsdam: 185-196.
- Parkin A.K., Monash U., Tan C.P. & Willoughby D.R. 1990. Driven model piles tested in calcareous sand in a large calibration chamber. *Proceedings of the 22th Annual OTC*, Houston, Texas, May 7-10: 389-397.
- Penumadu D. & Chameau J.L. 1998. Interpretation of model pressuremeter test using automated clay calibration chamber data. *Geot. Testing J.*, GTJODJ, 21 (1): 18-30
- Schnaid F. & Houlsby G.T. 1992. Measurement of the properties of sand in a calibration chamber by the cone pressuremeter test. *Géotechnique*, 42 (4): 587-601.
- Seville J.P.K., Tuzun U. & Clift R. 1997. *Processing of particulate solids*. Chapman & Hall, London.
- Sweeney B.P. & Clough G.W. 1990. Design of a large calibration chamber. *Geot. Testing J.*, GTJODJ, 13 (1): 36-44.
- Yoshimi Y. & Kishida T. 1981. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surface. *Geot. Testing J.*, GTJODJ, (4): 145-152.
- Yu H.S. & Mitchell J.K. 1998. Analysis of cone resistance: review of methods. *Journ. Geotech. and Geoenv. Eng.*, 124 (2): 140-149.

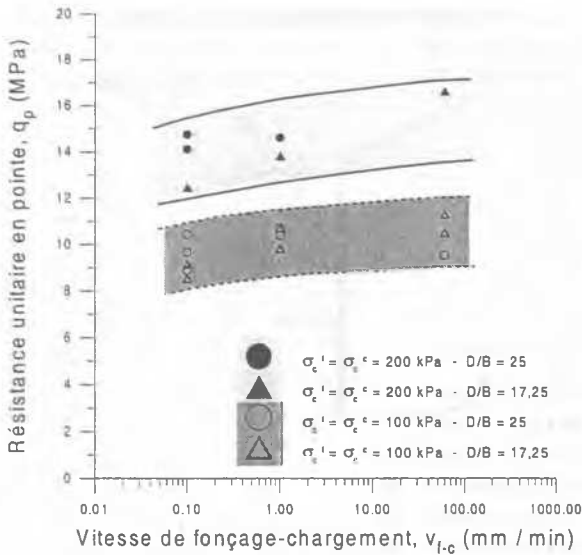


Figure 6. Influence de la vitesse sur les mesures de la résistance unitaire en pointe.

rées par les normes est très variable. Pour l'essai de pénétration statique en place, les recommandations AFNOR (1994) indiquent une valeur de vitesse de fonçage du pénétromètre égale à 20 mm/sec, autrement dit 1200 mm/min. Lorsque l'on réalise le chargement statique du modèle, conformément aux normes existantes (AFNOR 1994, ASTM 1995), il faut considérer des vitesses de déplacement de l'ordre de 1.5 mm/min (cas de l'arrachement statique d'un clou) ou effectuer un chargement par paliers successifs où l'on applique une fraction de la charge limite estimée au préalable, pendant environ 12 heures (cas du chargement statique d'un pieu). Par conséquent, il se rend nécessaire de définir une valeur typique de vitesse de déplacement de la sonde, notamment si l'on envisage une mesure du frottement qui se mobilise sur la surface latérale.

Les essais en chambre d'étalonnage sont souvent réalisés dans le but de pouvoir fournir des corrélations entre les mesures de résistance en pointe et/ou de frottement latéral et certaines caractéristiques mécaniques du sol, par exemple son angle de frottement interne (ϕ) ou son module de cisaillement (G). Dans ces cas, l'influence de la vitesse de cisaillement sur la réponse mécanique de l'interface sol granulaire-structure doit être prise en compte.

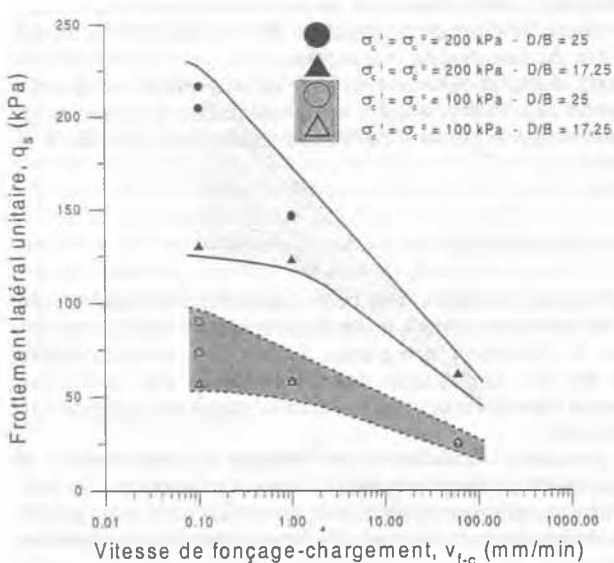


Figure 7. Influence de la vitesse sur les mesures du frottement latéral unitaire.