

ESSAIS D'INTERFACE SOL/STRUCTURE UTILISANT L'APPAREIL DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE

SOIL/STRUCTURE INTERFACE TESTS USING SIMPLE ANNULAR SHEAR APPARATUS

G. Chambon¹, A. Corfdir², P. Lerat³, J. Schmittbuhl¹

¹ UMR 8538, Dept TAO, Ecole Normale Supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05

² CERMES, Centre commun ENPC/LCPC, 6 et 8, avenue Blaise Pascal, 77455 Marne-la-Vallée

³ LAMI, Centre commun ENPC/LCPC, 6 et 8, avenue Blaise Pascal, 77455 Marne-la-Vallée

RESUME – Un appareil d'essai, l'ACSA (appareil de cisaillement simple annulaire) a été développé au CERMES, centre commun de l'ENPC et du LCPC. Cet appareil est destiné à l'étude des interfaces sol/structure. Après la présentation de cet appareil, nous donnerons des exemples d'essais où l'ACSA offre des possibilités intéressantes : essais monotones, essais cycliques, étude de l'influence de la vitesse, essais à très grands déplacements.

ABSTRACT - A testing device, the ACSA (device of annular simple shear) was developed in the CERMES, common centre of the ENPC and the LCPC. This device is intended for the study of ground / structure interfaces. After the presentation of this device, we will give test examples where the ACSA offers interesting possibilities: monotonous tests, cyclic tests, study of the influence of the speed and tests with very large displacement.

1. Introduction

L'appareil de cisaillement simple annulaire est un appareil destiné à l'étude de l'interface sol/structure. Les principaux appareils destinés à ce type de recherche ont été jusqu'à maintenant la boîte de cisaillement directe modifiée (Potyondi, 1961), suivie par les essais d'arrachement (Brumund et Leonards, 1973), puis par la boîte de cisaillement annulaire (Yoshimi et Kishida, 1981) et l'appareil de cisaillement simple (Goh et Donald, 1984). Ces dispositifs ont eux-mêmes subi divers perfectionnements au cours du temps tout en gardant les mêmes principes de base.

L'appareil de cisaillement simple annulaire a été conçu pour pallier certaines difficultés rencontrées avec les appareils précédents et assurer notamment une bonne homogénéité des conditions mécaniques de l'essai sur toute la surface de contact sol/structure, ainsi qu'une bonne étanchéité de l'échantillon (Lerat et al., 1997).

2. Constitution mécanique de l'appareil de cisaillement simple annulaire

Donnons tout d'abord le principe mécanique de l'essai (figure 1) : l'échantillon annulaire a un volume de l'ordre de 9,4 dm³. Il est disposé autour d'un cylindre central dont la mise en rotation assurera le cisaillement de l'échantillon. Sur l'autre bord cylindrique, une pression de confinement est exercée par l'intermédiaire d'une membrane en néoprène elle-même soumise à une pression d'eau. Un tel principe assure l'homogénéité des conditions aux limites de déplacement sur toute l'interface et minimise les effets de bord comme ceux que présente une boîte de cisaillement direct modifiée (où il y a une dissymétrie entre le bord « amont » et le bord « aval »).

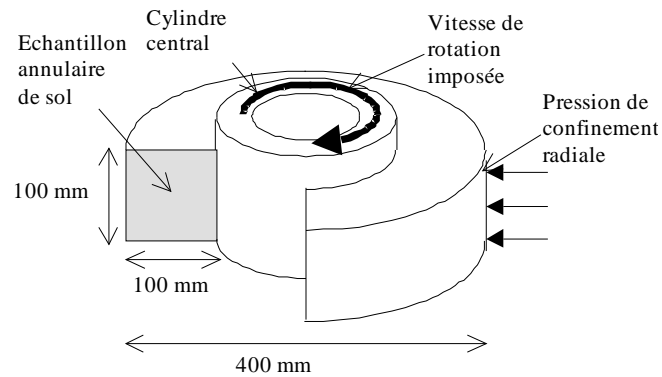


Figure 1. Schéma de principe de l'essai.

La face supérieure de l'échantillon est en contact avec un couvercle fixe, la face inférieure repose sur une plaque de verre fixe elle aussi.

La figure 2 montre une vue d'ensemble de l'appareil qui a été construit (hauteur de l'ensemble : environ 1,7 m).

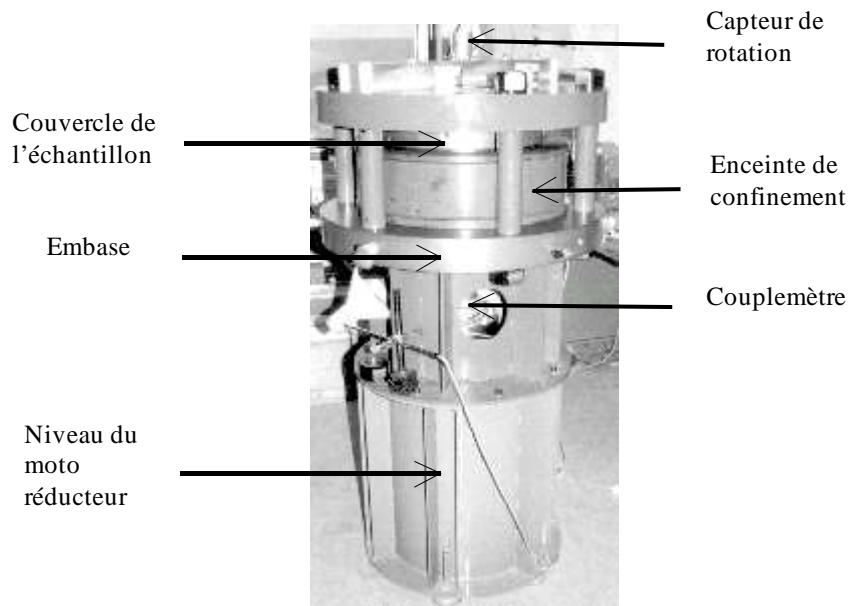


Figure 2. Vue de l'ACSA.

3. Système d'acquisition et de contrôle

Le système de contrôle-commande (figure 3) permet de recueillir les données en provenance des différents capteurs (pression, pression totale, rotation, variation de volume). Il permet l'enregistrement régulier de ces différentes mesures et la commande de l'appareil (pression de confinement, vitesse et sens de rotation, programmation de différentes phases).

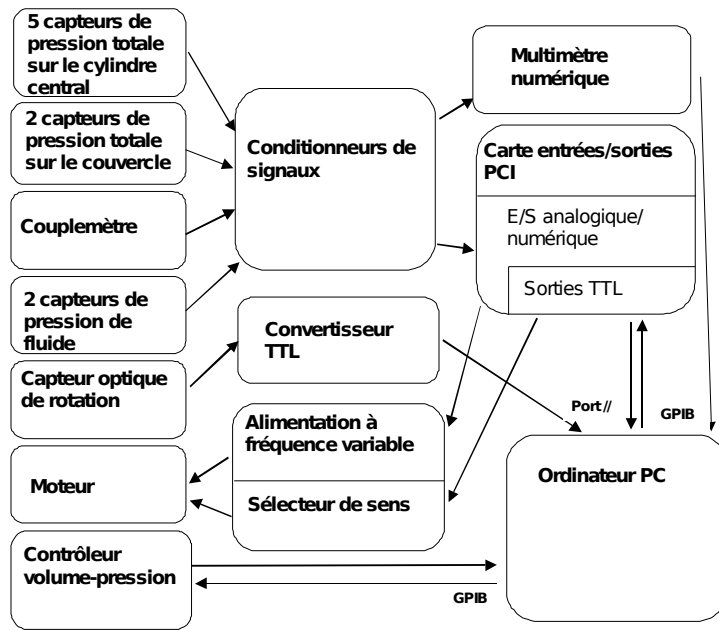


Figure 3. Système de contrôle-commande.

4. Mode opératoire

Les différentes étapes de la mise en place de l'échantillon sont détaillées figure 4. Outre la préparation mécanique, il faut paramétrer le programme de contrôle-commande et l'initialiser.

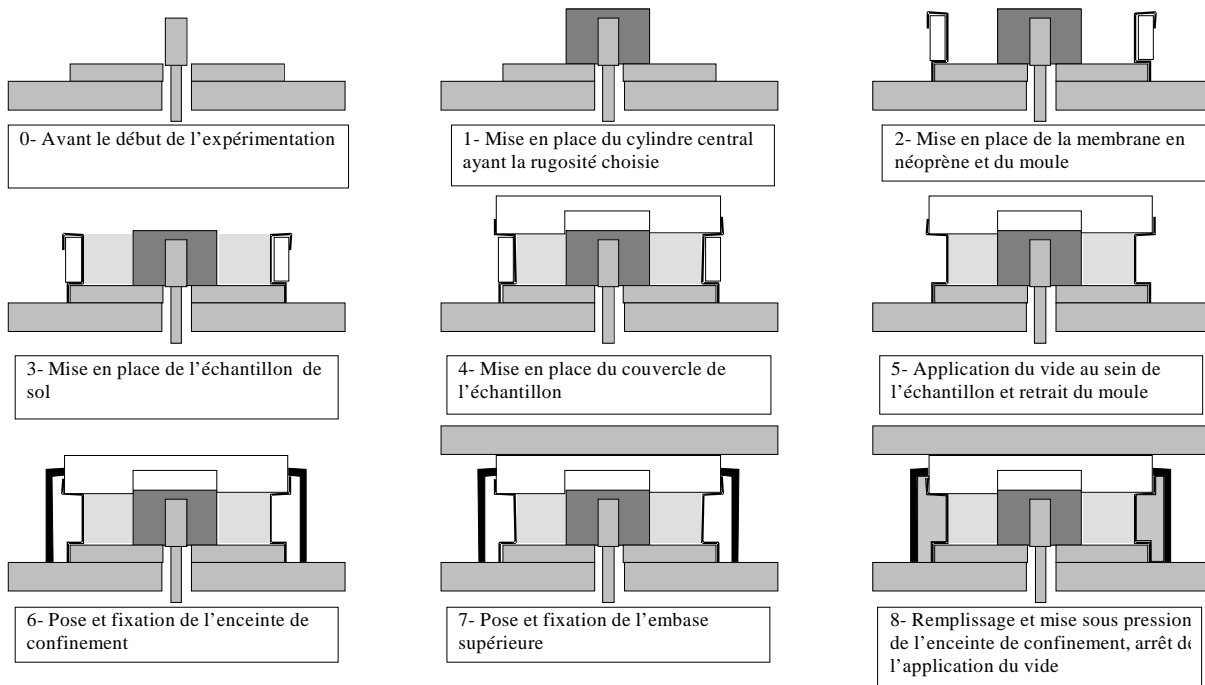


Figure 4. Les étapes de la préparation d'un essai avec l'ACSA.

5. Essais monotones

Les essais peuvent être réalisés en faisant varier les paramètres suivants :

- rugosité de l'interface,
- pression de confinement constante ou volume constant,
- matériau utilisé,
- densité du matériau mis en place,
- valeur de la pression de confinement (constante ou initiale) de 50 à 800 kPa,
- échantillon sec ou saturé.

De nombreux essais à court terme ont été réalisés par P. Lerat dans le cadre de sa thèse (Lerat, 1996). Nous donnons ci-après les résultats d'un essai typique (figure 5).

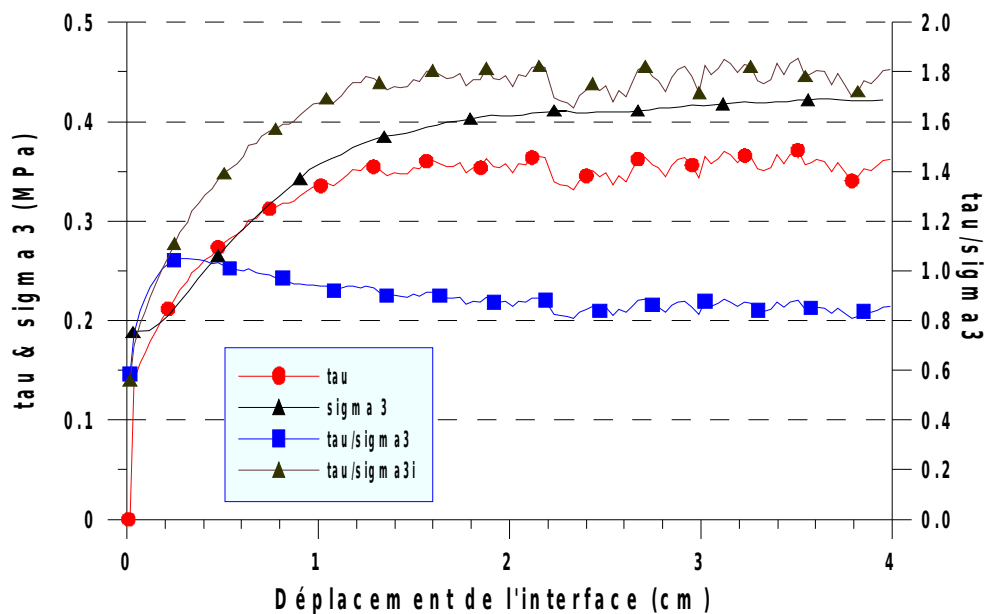


Figure 5. Résultat d'un essai monotone réalisé à l'ACSA (tau : contrainte de cisaillement moyenne ; sigma3 : contrainte de confinement ; sigma3i : valeur initiale de la contrainte de confinement).

La figure 5 représente le résultat d'un essai de cisaillement simple annulaire réalisé sur un échantillon sec, dense de sable grossier ($D_{50} : 3,3 \text{ mm}$, $C_u : 1,4$, $C_c : 1,1$), à volume global constant, avec une interface rugueuse. La pression radiale initiale σ_{3i} est de 0,2 MPa. La contrainte de cisaillement (tau) augmente régulièrement pour atteindre un palier pour un déplacement de l'ordre de 1,5 cm. La pression radiale décroît pour de petits déplacements, de l'ordre de 3 mm (phénomène de contractance) puis augmente fortement pour de plus grands déplacements, pour atteindre une valeur de 0,425 MPa (phénomène de dilatance empêchée, Schlosser et Guilloux, 1981). Ce phénomène se traduit sur les coefficients de frottement apparent et réel (rapport de la contrainte de cisaillement avec, respectivement, la contrainte radiale initiale σ_{3i} et la contrainte radiale mesurée, σ_3).

6. Essais cycliques

En plus des paramètres définissant les essais monotones, il faut fixer :

- le nombre de cycles,
- l'amplitude du déplacement.

La complexité des essais, la diversité des résultats selon les auteurs, montrent la difficulté du sujet.

La figure 6 représente le résultat d'un essai de cisaillement simple annulaire cyclique réalisé sur un échantillon de mêmes caractéristiques que celui utilisé dans l'essai présenté précédemment, à volume global constant, avec une interface rugueuse. La pression radiale initiale est de 0,2 MPa et l'amplitude du cisaillement alterné de 2 mm.

La contrainte de cisaillement atteint une valeur maximale lors du premier cycle (0,12 MPa) puis diminue régulièrement pour se stabiliser à partir du 40^{ème} cycle à environ 0,045 MPa. Pour chaque inversion du sens de cisaillement, nous observons, comme pour les essais monotones sur échantillon dense, la succession d'une phase de contractance puis d'une phase de dilatance. La contractance globale de l'échantillon, caractérisée par une forte diminution de la contrainte radiale (valeur finale de l'ordre de 0,02 MPa), est le résultat d'une succession de phases de contractance et de dilatance.

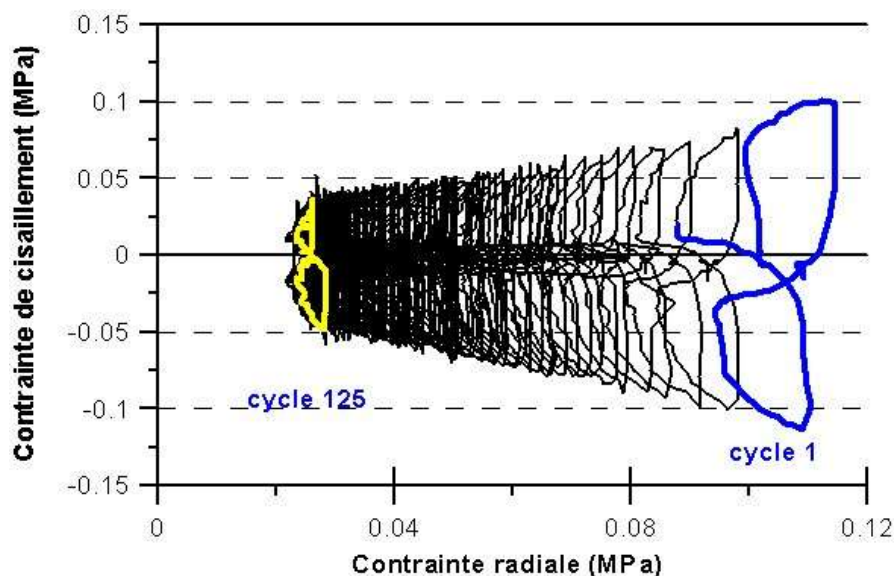


Figure 6. Résultat d'un essai cyclique effectué à l'ACSA.

7. Essais à grand déplacement

L'ACSA, par sa conception assure une excellente étanchéité de l'échantillon et permet ainsi de poursuivre les essais pendant de très longs déplacements. On peut alors observer, pour les conditions expérimentales qui ont été retenues (sable de D_{50} 1 mm), un important phénomène de radoucissement après le pic de contrainte, ce radoucissement se produisant sur une longueur de plus de 50 cm (voir figure 7).

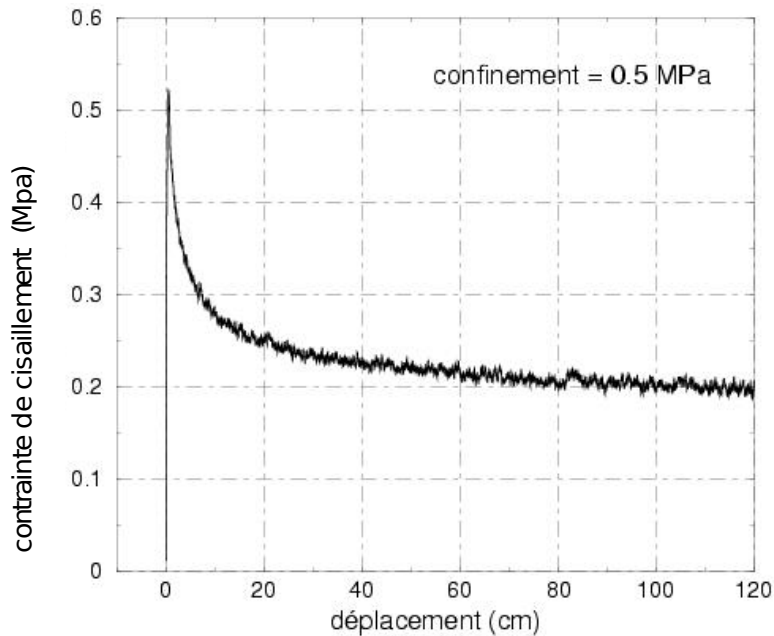


Figure 7. Résultat d'un essai à grand déplacement.

Un tel comportement a des applications en géophysique pour les glissements caractéristiques des failles telles qu'ils sont évalués par l'analyse inverse des séismes (Chambon et al., 2002). On trouve également en géotechnique de nombreuses situations où il faut disposer de données sur le comportement d'interfaces après de grands déplacements : pieux battus, clous forcés, avancement d'un tunnelier.

8. Effet d'un changement de sens, d'un arrêt du déplacement avec relâchement des contraintes

Des essais ont été réalisés dans les conditions suivantes : après un long déplacement (1,5 m), on changeait le sens de rotation pour un nouveau déplacement de 1,5 m dans l'autre sens (voir figure 8).

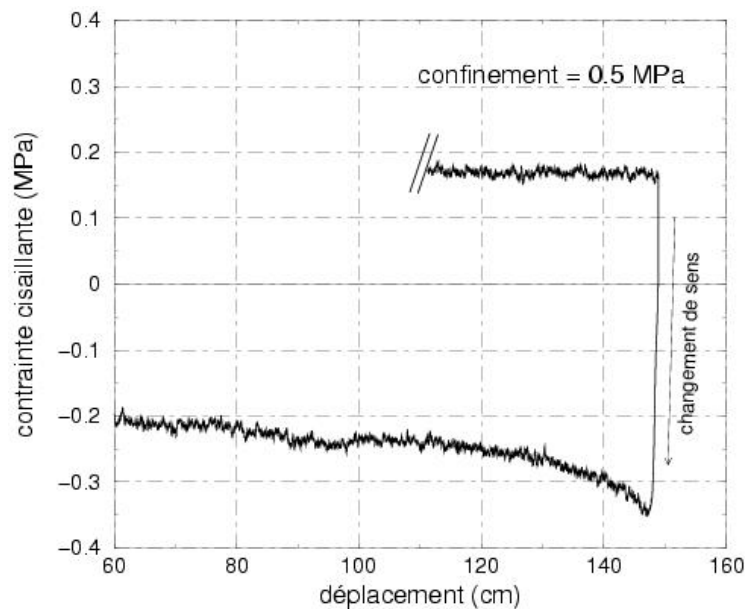


Figure 8. Effet d'un changement de sens de déplacement.

On constate que le changement de sens induit un nouveau pic de cisaillement qui est suivi lui aussi par un radoucissement actif sur des déplacements de l'ordre de plusieurs décimètres. Les essais alternés avec une boîte de cisaillement ne conviennent donc pas pour déterminer les valeurs résiduelles de la résistance d'interface pour les sols granulaires, de même qu'ils ne conviennent pas non plus pour déterminer la résistance résiduelle au cisaillement des sols cohérents (Stark et Eid, 1994).

L'arrêt du déplacement avec retour des contraintes de cisaillement à zéro, conduit aussi lors de la reprise du cisaillement dans le même sens que le sens précédent à une nouvelle résistance de pic, moins élevée toutefois que s'il y a changement de sens. Un tel phénomène peut contribuer partiellement à expliquer le phénomène d'augmentation de la capacité portante de pieux battus dans du sable, tel qu'il est rapporté par exemple par Chow et al. (1997).

9. Influence de la vitesse sur le cisaillement

L'ACSA permet d'étudier une plage de vitesse de déplacement de l'interface entre $1,67 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pour mettre en évidence l'influence de la vitesse, assez faible par rapport à d'autres sources de perturbations, on s'est limité à l'étude de l'influence de la vitesse sur le comportement pendant la phase radoucissante et le plateau de contrainte. L'application d'un grand nombre de cycles de vitesse (figure 9) à un même échantillon permet : de s'affranchir des différences de préparation d'un échantillon à l'autre, et d'effectuer un nombre important de mesures afin de mettre en évidence l'effet de la vitesse sur le frottement malgré les diverses sources de perturbations.

Comme on s'attend à une variation linéaire du coefficient de frottement en fonction du logarithme de la vitesse (Marone, 1998), les vitesses de déplacement à l'intérieur de chaque cycle ont été choisies en progression géométrique.

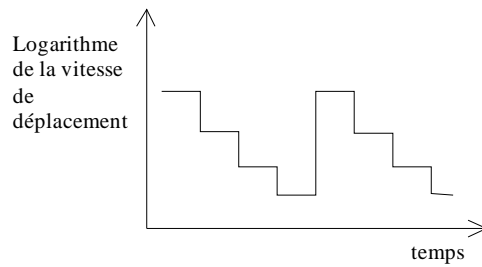


Figure 9. Principe des cycles de vitesse.

La réponse de la contrainte de cisaillement à de tels cycles de vitesse est montrée dans la figure 10.

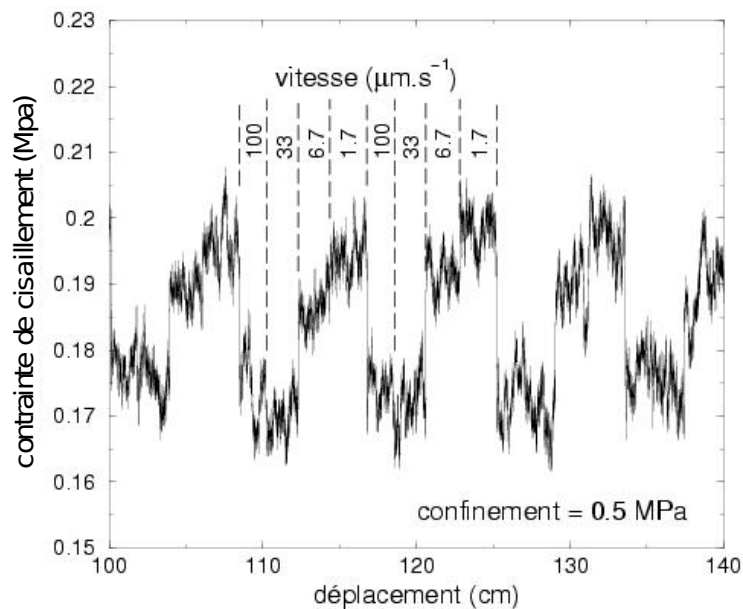


Figure 10. Corrélation entre vitesse et contrainte de cisaillement.

La mise en évidence de l'influence de la vitesse peut avoir des implications dans le domaine de l'étude de la stabilité des failles ou des pentes, en particulier si la résistance au cisaillement diminue quand la vitesse de déformation augmente comme c'est le cas dans l'expérience présentée comme le montre une analyse statistique des résultats. Si on extrapole le comportement observé vers des vitesses beaucoup plus élevées, les résultats présentés contribuent à expliquer, au moins qualitativement, la différence de comportement de pieux entre la phase de battage ou de vibrofonçage où le coefficient de frottement est faible d'une part et la phase de service d'autre part.

10. Conclusion

L'ACSA ouvre la possibilité d'essais avec des caractéristiques d'homogénéité améliorées, des effets de bord diminués. Outre les essais classiques monotones, l'ACSA offre des facilités supplémentaires pour des essais plus spécifiques comme les essais cycliques, des essais avec de très grands déplacements ou l'étude de l'influence de la vitesse. Toutefois, la taille de l'appareil et sa sophistication le destinent davantage à des travaux de recherche qu'à des essais de routine.

11. Références

- Brumund W. F. et Leonards G.A. (1973) Experimental Study of Static and Dynamic Friction Between Sand and Typical Construction Materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 1 (2), 162-165.
- Chambon G., Schmittbuhl J. et Corfdir A. (2002) Laboratory gouge friction: seismic-like slip weakening and secondary rate-and-state effects. *Geophysical Research Letter*, 29 (10), 10.1029/2001GL014467.
- Chow F. C., Jardine R.J., Nauroy J.F. et Bruçy F. (1997) Time-related increases in the shaft capacities of driven piles in sand. *Géotechnique*, 47 (2), 353-361.
- Goh A. T. C. et Donald I.B. (1984) Investigation of Soil-Concrete Interface Behaviour by Simple Shear Apparatus, *Proceedings of the 4th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, 101-106.
- Lerat P., Schlosser F. et Vardoulakis I. (1997) Nouvel appareil de cisaillement simple annulaire pour l'étude des interfaces matériau granulaire-structure, *Comptes Rendus du quatorzième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, 1, 363-366.
- Lerat P. (1996) *Etude de l'interface sol-structure dans les milieux granulaires à l'aide d'un nouvel appareil de cisaillement simple annulaire*, thèse de doctorat de l'ENPC.
- Marone C. (1998) Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annu.Rev.Earth Planet.Sci.*, 26, 339-353.
- Potyondi J. G. (1961) Skin friction between various soils and construction materials. *Géotechnique*, 11 (4), 339-353.
- Schlosser, F. et Guilloux, A. (1981) Le frottement dans le renforcement des sols. *Revue Française de Géotechnique*, (16), 65-77.
- Stark T. D. et Eid H.T. (1994) Drained Residual Strength of Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (5), 856-871.
- Yoshimi Y. et Kishida T. (1981) A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces. *Geotechnical testing journal*, 4 (4), 145-152.