

# 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.*

# Nouvel appareil pour l'étude des sols grossiers sur chemins de drainage-imbibition

New device for the study of coarse soils on drying-wetting paths

J.M.Fleureau & A.Bouabdallah – Ecole Centrale & CNRS UMR 8579, Châtenay-Malabry, France

S.Kheirbek-Saoud – Université Tichrine, Lattaquié, Syrie

S.Taibi – Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences et Techniques, Le Havre, France

**RESUME :** Un nouveau moule de grandes dimensions a été conçu pour étudier les chemins de drainage-humidification des sols grossiers. Des essais de validation ont été réalisés sur des mélanges de sable et de limon en différentes proportions. On présente ici les résultats des essais de compactage Proctor Normal et des chemins de drainage-humidification depuis l'Optimum, qui mettent en évidence le rôle du pourcentage de fines lorsque  $w_L < 20$ , et la comparaison avec les résultats des dispositifs classiques.

**ABSTRACT :** A new mould of large dimensions has been developed to study the drying-wetting paths of coarse soils. Validation tests have been performed on sand-silt mixtures in different proportions. The results of Standard Proctor compaction tests and drying-wetting paths from the Optimum are presented here ; they highlight the role of the percentage of fines when  $w_L < 20$ .

## 1 INTRODUCTION

De nombreux travaux ont montré la possibilité de modéliser de façon satisfaisante les chemins de drainage-humidification des sols fins dans différents états initiaux à partir de leur limite de liquidité (Burland 1990, Marinho & Chandler 1993, Fleureau et al. 1993, 1999), ou des sables à partir de leur granulométrie (Taibi 1994). Il n'en n'est pas de même pour les matériaux grossiers auxquels l'ingénieur est souvent confronté, et pour lesquels les paramètres de plasticité ou de granulométrie ne sont plus nécessairement significatifs (Fleureau & Kheirbek-Saoud 1992). L'objet de la communication est d'une part de décrire un appareil spécialement conçu pour la réalisation des essais de drainage-humidification sur ce type de sols, d'autre part de présenter les résultats d'une série d'essais de validation effectués sur des mélanges compactés de limon de Jossigny et de sable d'Hostun en différentes proportions, en vue de dégager une logique de l'évolution du comportement de ces matériaux avec les paramètres d'identification.

## 2 APPAREILS ET METHODES

Deux séries de mesures de drainage-humidification ont été faites.

Dans la première série, les essais ont été réalisés dans un moule de dimensions CBR, modifié pour permettre l'application ou la mesure d'une pression interstitielle négative (suction) par la technique de translation d'axe (Fig. 1). Une fois le compactage terminé dans les conditions habituelles, le moule est rendu étanche et on lui adapte une base équipée d'une membrane cellulosique semi-perméable à l'eau. On impose alors une pression d'air  $u_a$  dans la partie supérieure du moule et une pression d'eau  $u_w < u_a$  (le plus souvent,  $u_w \approx 0$ ) dans le circuit de la base ; la membrane semi-perméable empêche le passage de l'air gazeux dans le circuit d'eau. A l'équilibre, l'échantillon est soumis à la pression interstitielle négative (ou suction)  $u_a - u_w$ . Compte-tenu de l'élanement limité de l'échantillon, la pression négative dans le sol peut être considérée comme sensiblement homogène. Du fait du passage d'air dissous dans l'eau à travers la membrane cellulosique, il est nécessaire d'effectuer un balayage régulier du circuit d'eau au moyen d'une pompe péristaltique, ce qui permet d'éliminer les bulles d'air qui se dégagent à la pression atmos-

phérique et de maintenir le circuit d'eau saturé. Le phénomène est d'autant plus intense que la pression d'air est plus forte.

L'appareil est conçu pour des pressions d'air pouvant aller jusqu'à 5 MPa. Les membranes utilisées sont de divers types (Visking, Millipore, etc.), selon la pression négative que l'on veut imposer. Le dispositif peut également être utilisé dans le domaine tensiométrique en imposant une pression d'air nulle et une pression d'eau négative, jusqu'à -70 kPa. Un capteur de déplacement placé dans la cellule permet de mesurer les déformations de l'échantillon au cours de l'essai. L'intérêt de ce dispositif est de permettre l'étude de matériaux grossiers dont le diamètre des grains atteint 20 mm.

Pour la seconde série d'essais, des techniques expérimentales classiques ont été mises en œuvre pour contrôler la pression négative : tensiométrie, osmose, solutions salines, papier-filtre étalonné. Dans ce cas, les échantillons sont obtenus en découpant le gros échantillon compacté en petits éléments de quelques  $\text{cm}^3$  de volume. Le détail de ces techniques figure notamment dans l'article de Biarez et al. 1988.

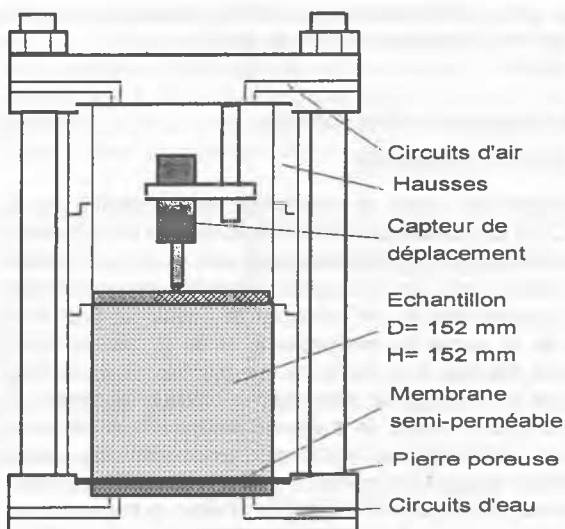


Fig. 1. Schéma du moule CBR

Tableau 1. Caractéristiques des matériaux

	Limons 100	L90 / S10	L70 / S30	L50 / S50	L30 / S70	L10 / S90	Sable 100
$\gamma_s/\gamma_w$	2.74	2.73	2.71	2.69	2.67	2.66	2.65
$w_L$	37	29	22	20.5	17	na	na
$w_p$	17	14	11	10	10	na	na
$d_{60}$ ( $\mu\text{m}$ )	11	14	27	650	820	850	850
$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	1.2	1.3	1.7	2.5	3.2	30	600
$d_{60}/d_{10}$	9	11	15	260	256	28	1.4
F < 80 $\mu\text{m}$ (%)	100	90	70	50	30	10	0
f < 2 $\mu\text{m}$ (%)	17	15.4	12	8.5	5.1	1.7	0

Tous les mélanges ont été compactés dans les conditions Proctor Normal à l'intérieur du grand moule, à différentes teneurs en eau. Pour les essais de la seconde série, lors du compactage, on a placé entre les couches de sol des papiers filtres étalonnés Whatman n° 42 (protégés par des papiers-filtres normaux). Après le compactage, les échantillons ont été conservés dans un étui en plastique étanche pendant une semaine pour éviter le séchage avant de procéder à la mesure de la teneur en eau des papiers-filtres et du sol. Les valeurs de pression négative sont déduites de la courbe d'étalonnage du papier-filtre sur le même chemin (Indarto 1991).

À la fin des essais de drainage et d'humidification, une fois l'équilibre atteint, le volume des échantillons est mesuré, soit par l'intermédiaire du capteur de déplacement à l'intérieur du grand moule, soit par pesée hydrostatique des petits échantillons dans du kerdane pour les essais de la seconde série.

Dans le cas des chemins d'humidification, les mesures ont été faites à la fois sur le matériau compacté à l'Optimum Proctor Normal et sur le matériau séché à l'étuve après compactage à l'OPN ; pour les essais de drainage, les essais ont été effectués sur le sol compacté à l'OPN ainsi que sur le sol compacté préalablement humidifié jusqu'à 1 Pa.

### 3 MATERIAUX

Les matériaux étudiés sont des mélanges de sable d'Hostun RF et de limon de Jossigny, dans des proportions allant de 100% de limon à 100% de sable. Le limon de Jossigny est un limon naturel assez plastique provenant de l'est de la région parisienne. Le sable d'Hostun, formé de silice pratiquement pure, présente une granulométrie très étroite tandis que celle du limon est relativement étalée. Les principales caractéristiques des matériaux sont indiquées dans le Tableau 1 (les dénominations se réfèrent au pourcentage de chaque composant ; par ex. L70 / S30 = 70% de limon et 30% de sable).

## 4 RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1 Chemins de compactage

Les résultats des essais de compactage sont présentés sur la figure 2, où les variations de poids volumique sec et de pression interstitielle négative après compactage sont tracées en fonction de la teneur en eau. On note un rôle important du sable, même pour le pourcentage le plus faible, qui se traduit par une diminution de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale. En fait, si la teneur en eau optimale diminue bien lorsque le pourcentage de sable dans le mélange augmente, il n'en n'est pas de même de la densité maximale dont la variation n'est absolument pas monotone. Les courbes de pression interstitielle négative présentent une allure classique caractérisée par une décroissance très marquée lorsque la teneur en eau augmente à gauche de l'Optimum, beaucoup plus faible à droite de l'Optimum (Kheirbek-Saoud 1994).

### 4.2 Chemins de drainage-humidification

Les chemins de drainage et d'humidification à partir de l'Optimum Proctor Normal ont été tracés sur la figure 3, dans les plans de l'indice des vides et de la teneur en eau en fonction de la pression interstitielle négative. Pour ne pas surcharger la figure, les chemins de drainage à partir des mélanges humidifiés et les chemins d'humidification à partir des matériaux séchés n'ont pas été reportés. En dépit d'une certaine dispersion des points expérimentaux inhérente à ce type de mesure, les courbes présentent l'allure, assez habituelle pour les matériaux compactés, de deux segments de droite qui se coupent à l'OPN (représenté par un segment vertical sur la figure). On retrouve dans les deux plans un classement, déjà mis en évidence lors d'essais antérieurs, en fonction du pourcentage de limon : plus ce pourcentage est élevé, plus grande est la pente des chemins d'humidification et de drainage. On note également une augmentation de la pression interstitielle, de l'indice des vides et de la teneur en eau à l'OPN avec la plasticité du mélange.

La comparaison entre les chemins d'humidification et les chemins de drainage montre que ceux-ci sont globalement réversi-

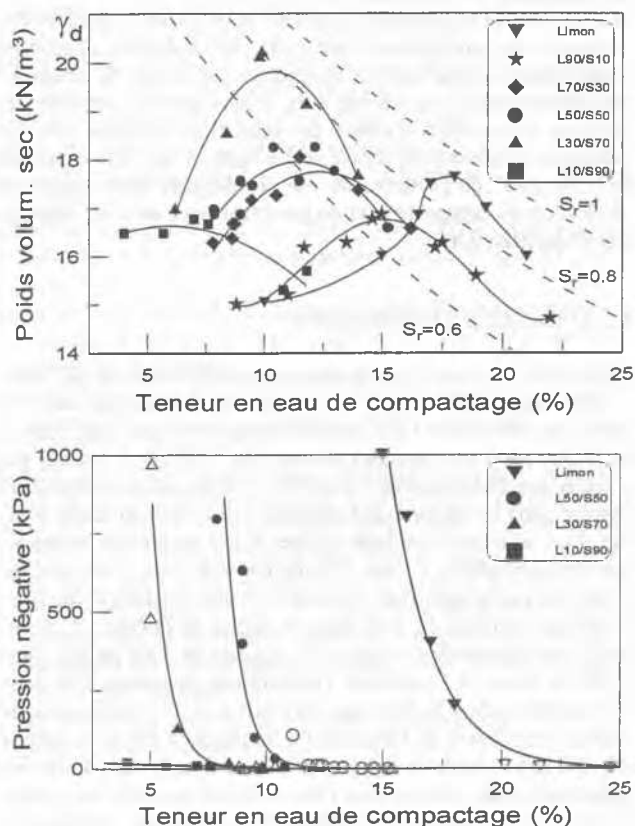


Fig. 2. Courbes de compactage des mélanges et variations de pression interstitielle négative. Comparaison avec les chemins d'humidification

bles, aux incertitudes expérimentales près, particulièrement à droite de l'Optimum.

En outre, il a déjà été observé que les caractéristiques (teneur en eau, indice des vides...) des échantillons compactés à l'OPN et humidifiés sous une pression négative imposée étaient peu différentes de celles des échantillons ayant atteint la même pression négative en fin de compactage, autrement dit que les chemins d'humidification depuis l'OPN et de compactage à droite de l'OPN étaient confondus. Pour vérifier ceci, les points expérimentaux des essais d'humidification ont été reportés, sous la forme de symboles vides, sur la figure 2, dans le plan de la pression interstitielle négative en fonction de la teneur en eau. On note le bon accord entre ces points et les courbes de variation de la pression négative mesurées directement, ce qui confirme l'observation précédente.

### 4.3 Corrélations

Pour interpréter les résultats, on a cherché à établir des corrélations entre les grandeurs caractéristiques de compactage, de drainage et d'humidification et la plasticité du sol. La limite de liquidité constitue généralement un paramètre de classement significatif pour les matériaux argileux comme l'ont montré par ailleurs les auteurs en synthétisant les données de nombreux matériaux (Fleureau et al. 1993, 1999). La figure 4 présente les résultats des mesures de teneur en eau, de poids volumique sec et de pression interstitielle négative à l'OPN en fonction de la limite de liquidité. Une corrélation analogue entre la limite de liquidité et la pente de la droite d'humidification partant de l'Optimum Proctor Normal, ou coefficient d'imbibition  $C_{ms}$ , est présentée sur la figure 5. Sur ces figures, on a également reporté (en traits continus) les corrélations établies, lors d'études précédentes, pour une vingtaine d'autres sols argileux compactés à l'OPN.

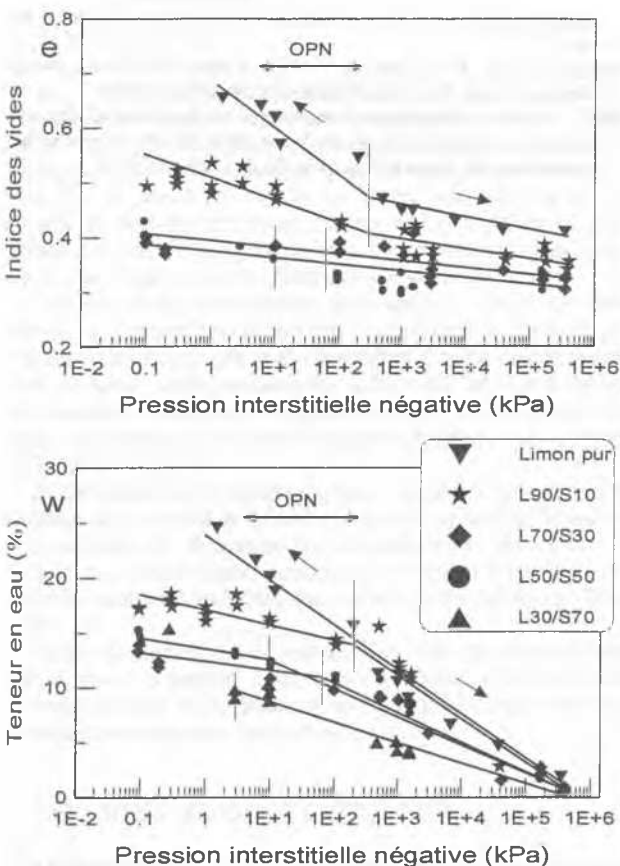


Fig. 3. Chemins de drainage et d'humidification à partir de l'OPN sur les mélanges de sable d'Hostun et limon de Jossigny

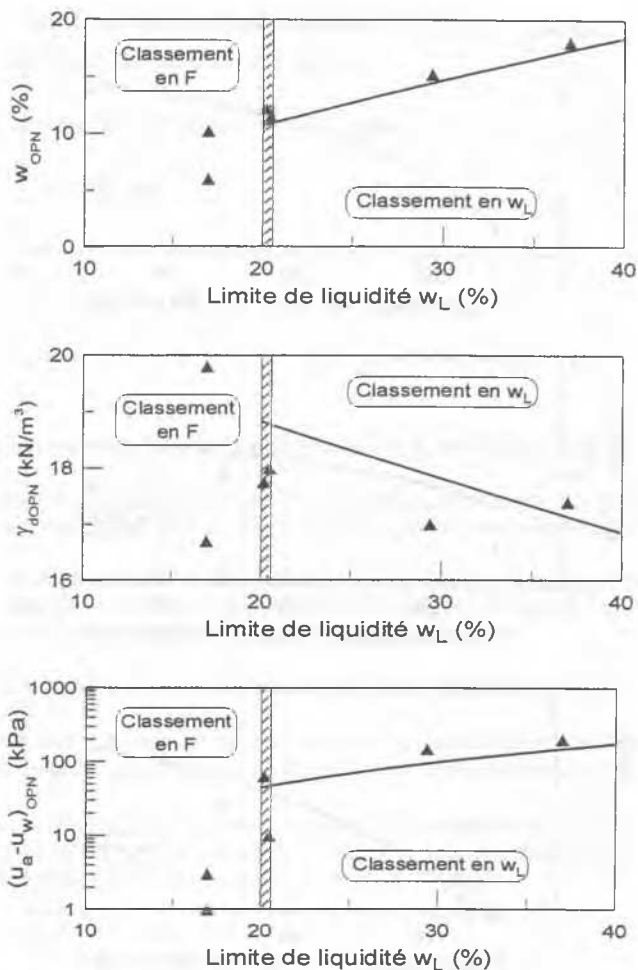


Fig. 4. Corrélation des paramètres de compactage avec la limite de liquidité (les lignes continues représentent les corrélations déduites d'études antérieures sur une vingtaine d'autres sols argileux)

Il ressort de ces graphes que les sols étudiés obéissent de façon assez satisfaisante aux corrélations lorsque leur limite de liquidité est supérieure à 20. Il n'en n'est plus de même dans le cas des sols peu plastiques ( $w_L < 20$ ) pour lesquels la dispersion devient très importante. Dans ce cas, la notion de limite de liquidité perd son sens et il est habituel de rechercher un classement en fonction du pourcentage de fines F ou de l'Indice de Groupe, censé synthétiser à la fois les caractéristiques de plasticité et de granulométrie (Kheirbek-Saoud 1994).

En fait, l'utilisation de ce dernier paramètre n'a pas conduit à des corrélations très satisfaisantes. En revanche, l'utilisation du pourcentage de fines comme paramètre de classement apparaît préférable, comme le montrent les résultats représentés sur la figure 6 pour les mélanges dont la limite de liquidité est inférieure à 20.

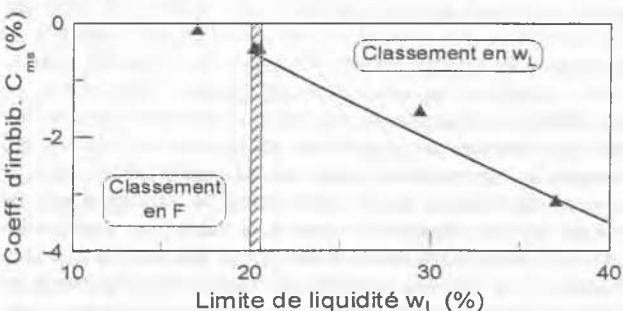


Fig. 5. Corrélation du coefficient d'imbibition à partir de l'OPN avec la limite de liquidité

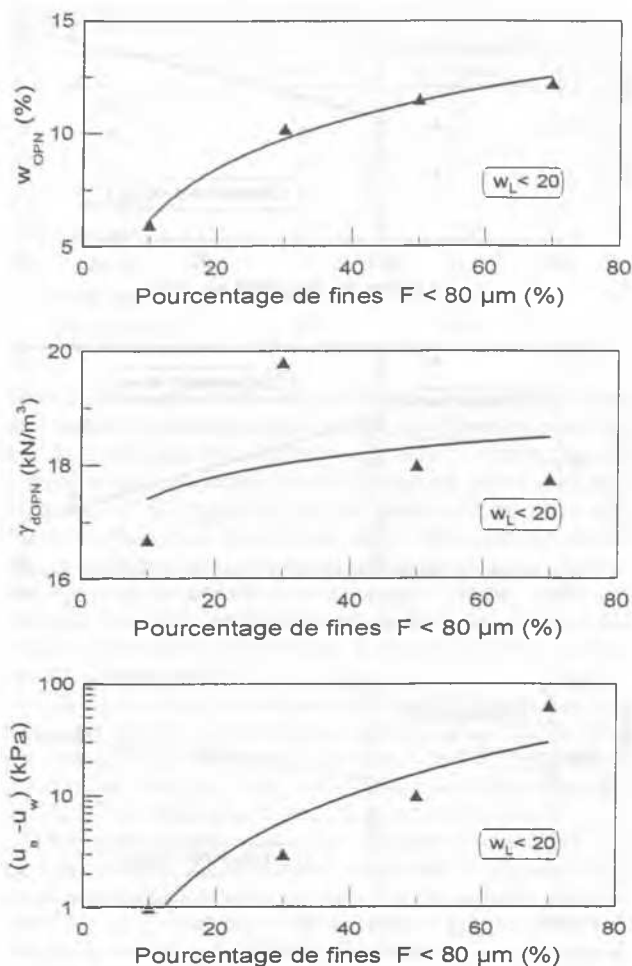


Fig. 6. Corrélation de paramètres de compactage avec le pourcentage de fines

rière ou égale à 20. Il faut toutefois noter que, si les corrélations sont assez significatives dans le cas de la teneur en eau et de la pression interstitielle négative à l'OPN, le résultat est moins probant en ce qui concerne le poids volumique sec. Celui-ci dépend en effet fortement de l'étalement granulométrique du sol, qui ne peut se réduire au seul pourcentage de fines. L'échec du classement en fonction de l'Indice de Groupe indique une relative indépendance des critères de plasticité et de granulométrie. D'autres paramètres, tels que le degré de saturation, jouent certainement un rôle non négligeable dans le compactage de ces mélanges.

## 5 CONCLUSIONS

Cette communication présente un nouvel appareil de mesure adapté à l'étude des sols grossiers sur chemins de drainage-humidification, sur lesquels le praticien dispose de très peu de données. Cet appareil permet d'imposer une pression interstitielle négative à un échantillon de grandes dimensions, en contrôlant les variations de volume et de teneur en eau du sol. Ces phénomènes sont importants notamment dans le cas des barrages et des remblais routiers où des matériaux de ce type peuvent être mis en œuvre. Des essais de validation ont été réalisés sur des mélanges de limon et de sable. Les résultats des essais de compactage dans les conditions Proctor Normal avec mesure de la pression interstitielle négative et des essais de drainage-humidification mettent en évidence l'influence très importante de la limite de liquidité, lorsque celle-ci dépasse 20, à la fois sur les caractéristiques à l'OPN et les indices

d'imbibition et de drainage. Pour les matériaux très peu plastiques ( $w_L \leq 20$ ), un classement en fonction du pourcentage de fines apparaît plus pertinent.

Pour tous ces essais, les résultats obtenus avec le nouvel appareil et avec les appareillages classiques sont en très bon accord ; en revanche, la durée importante des essais effectués dans le grand moule limite l'utilisation de ce dernier aux matériaux grossiers de perméabilité suffisamment élevée.

On constate également une bonne coïncidence des points expérimentaux mesurés lors des essais d'humidification et des points déduits des essais de compactage pour la même pression négative. Ce résultat suggère une autre méthode, beaucoup plus simple, pour obtenir les chemins d'humidification d'un sol grossier, par compactage à différents teneurs en eau et mesure de la pression négative à l'équilibre.

## 6 REFERENCES

- Biaze, J., Fleureau, J.M., Zerhouni, M.I., Soepandji, B.S. 1988. Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification, *Rev. Franç. Géotechnique* 41: 63-71.
- Burland, J.B. 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays, *Geotechnique* 40 : 329-378.
- Fleureau, J.M. & Kheirbek-Saoud, S. 1992. Variation de résistance des sols compactés avec la pression interstitielle négative, *Rev. Franç. Géotechnique* 59: 57-64.
- Fleureau, J.M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R. & Taibi, S. 1993. Behavior of clayey soils on drying-wetting paths, *Can. Geotec. J.* 30, 2: 287-296.
- Fleureau, J.M., Bouabdallah, A., Maouchi, D., Taibi, S. & Kheirbek-Saoud, S. 1999. Description and modelling of the drying-wetting paths of a few natural soils, *Proc. 11<sup>th</sup> PCSMGE*, Foz de Iguaçu, 1: 193-200.
- Indarto, 1991. Comportement mécanique et compactage des matériaux de barrages, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale Paris.
- Kheirbek-Saoud, S. 1994. Comportement mécanique de la couche de fondation d'une voie ferrée, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale Paris.
- Marinho, F.A.M. & Chandler, R.J. 1993. Aspects of the behaviour of clays on drying, *Proc. ASCE National Convention*, Dallas.
- Taibi, S. 1994. Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative : Etude expérimentale et modélisation, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale Paris.