

COMPORTEMENT DE MELANGE MONTMORILLONITE-KAOLINITE SUR CHEMINS OEDOMETRIQUES ET TRIAXIAUX

MONTMORILLONIT - KAOLINIT MIXTURES BEHAVIOUR UNDER OEDOMETRIC AND TRIAXIAL PATHS

Hammad TAMMAM⁽¹⁾, Mahdia HATTAB⁽²⁾

1 Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux
Ecole Centrale Paris – CNRS UMR 8579
Grande voie des vignes 92295 Châtenay Malabry – France
tammam.hammad@ecp.fr

2 Laboratoire Physique et Mécanique des Matériaux
Université Paul Verlaine – CNRS UMR 7554
Ile du Saulcy 57045 Metz – France
mahdia.hattab@ecp.fr

RÉSUMÉ – L'objectif de cette recherche est de caractériser le comportement, sur chemins oedométriques et triaxiaux, de matériaux constitués d'un mélange de deux types d'argiles : une montmorillonite ($w_L=170\%$, $w_P=60\%$), et une kaolinite ($w_L=40\%$, $w_P=20\%$), puis d'analyser l'évolution du comportement des mélanges d'argiles allant de la montmorillonite (0% de kaolinite) jusqu'à la kaolinite (0% de montmorillonite)

ABSTRACT – The objective of this research is to characterize the mechanical behaviour under oedometric and triaxial paths, for a mixture between two kinds of pure clay: montmorillonit ($w_L=170\%$, $w_P=60\%$), and kaolinit ($w_L=40\%$, $w_P=20\%$), and to analyze the behaviour evolution from the montmorillonit's behaviour (0% of kaolinit) to kaolinit's behaviour (0% of montmorillonit).

1. Introduction

Pour les sols argileux, la composition minéralogique des particules influence directement les propriétés mécaniques, la résistance, et la perméabilité du matériau (Belanteur, 1995). La variation du volume lors d'un chargement est due à une expulsion de l'eau et à un réarrangement des particules. Néanmoins, la réponse aux efforts mécaniques est complexe. Au niveau global, l'argile a un comportement contractant lorsqu'elle est normalement consolidée (NC) (Biarez et Hicher, 1994), l'état de plasticité parfaite est atteint quand la variation du volume tend vers un palier.

L'argile présente deux niveaux d'organisations distinctes : les unités organisées en particules et les particules elles-mêmes dont l'arrangement forme la matrice solide, ce dernier niveau d'organisation étant altéré par la contrainte mécanique. Pour la kaolinite, les particules sont faites de feuillets constitués de deux couches dont la charge est nulle, l'épaisseur de feuillet est de 0,7 nm. La montmorillonite est constituée de feuillets à 3 couches, le feuillet a une charge importante et son épaisseur est de 1 nm.

Dans cette étude nous nous proposons d'analyser le comportement mécanique sur différents chemins de chargement : en chargement oedométrique, en chargement isotrope, et sur chemin triaxial normalement consolidé à $\sigma'_3 = \text{constante}$.

Nous considérons dans ce travail deux types d'argile remaniée (la kaolinite et la montmorillonite) puis des mélanges avec différents pourcentages de ces argiles.

2. Caractéristiques des matériaux

Les deux types d'argiles utilisés sont la kaolinite (commercialisée sous le nom de kaolinite P300), et la montmorillonite (commercialisée sous le nom d'argile grecque).

L'analyse microstructurale effectuée par diffraction des rayons X sur la kaolinite P300, a mis en évidence en dehors de la kaolinite, la présence de deux autres minéraux : l'illite et le quartz. L'observation effectuée au microscope électronique à balayage (figure 1) vient confirmer cette analyse et montrer que le constituant principal est la kaolinite.

L'argile grecque est une smectite calcique ou magnésienne (Brindly et Brown, 1980) ayant un caractère dioctaédrique, la particule est définie comme un empilement parallèle quel que soit le degré d'ordre dans la répartition des feuillets à l'intérieur de l'empilement. L'épaisseur de particule varie selon la teneur en eau (Pons, 1982 ; Pons, 1987).

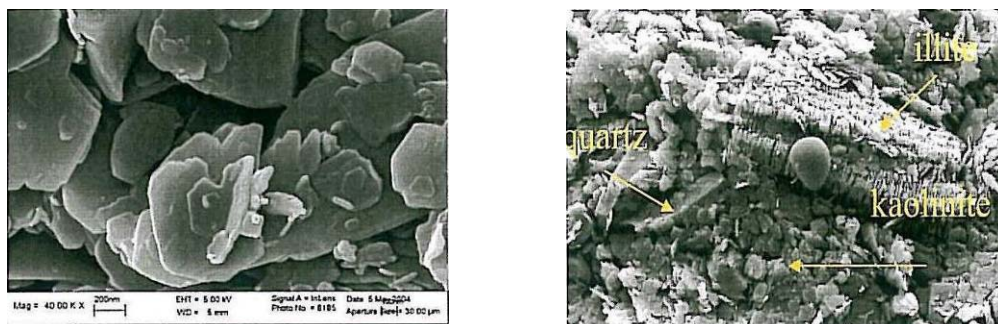


Figure 1. Photos de la kaolinite P300 au MEB (Bouziri, 2007)

Les propriétés physiques de l'argile grecque, de la kaolinite P300 et des mélanges étudiés de ces deux argiles sont présentées dans le tableau I.

Tableau I. Caractéristiques physiques des matériaux

	Kaolinite (K)	Montmorillonite (M)	(M-1) 35% de (K)	(M-2) 65% de (K)	(M-3) 25% de (K)	(M-4) 50% de (K)
w_L	40	170	118	82	128	92
w_P	20	60	36,42	30	48	40
l_P	20	110	81,58	52	80	52
γ_S	2,65	2,73	2,702	2,678		

Les deux mélanges (kaolinite + montmorillonite) réalisés ont permis d'analyser l'influence de chaque matériau sur la réponse mécanique. Le mélange M-1, par exemple, est constitué de 35% de kaolinite et 65% de montmorillonite, et le mélange M-2 est constitué de 65% de kaolinite et 35% de montmorillonite.

L'indice de plasticité et la limite de liquidité permettent de vérifier le classement de la montmorillonite comme une argile très plastique à très fort potentiel de gonflement d'après (Dakshanamurphy et Raman, 1973 ; Chen, 1988). La kaolinite P300 est

classée comme une argile plastique à faible ou moyen potentiel de gonflement (figure 2).

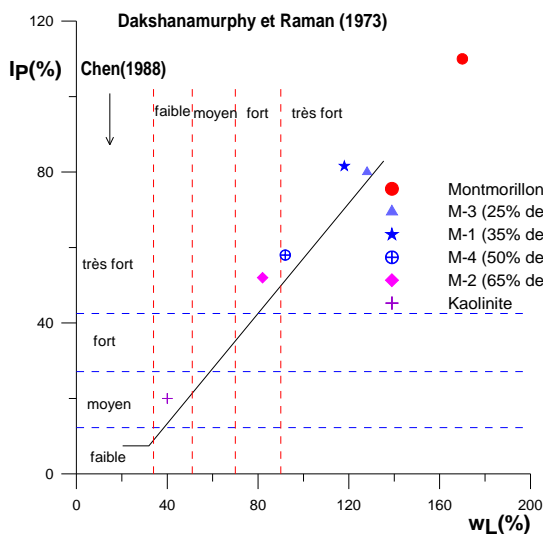


Figure 2. Classification des matériaux d'après (Dakshanamurthy et Raman, 1973 ; Chen, 1988)

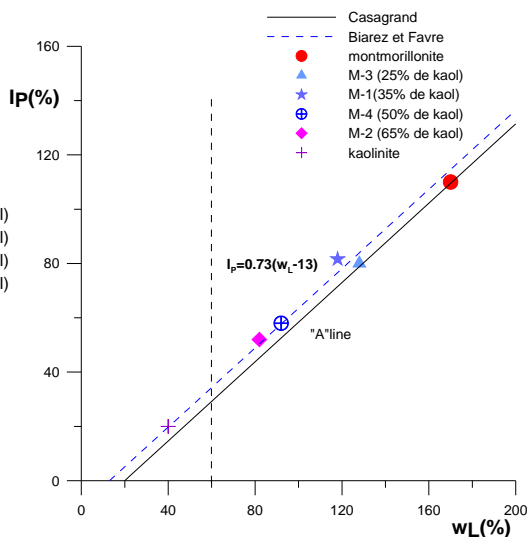


Figure 3. Corrélation dans le plan $w_L - I_P$ (Biarez et Favre, 1977)

Dans le plan de ($w_L - I_P$) de la (figure 3), les résultats sont confrontés aux corrélations de Biarez et Favre (1977) et de Casagrande (1948): nous montrons que la montmorillonite et le mélange M-3 constitué de 25% de kaolinite et 75% de montmorillonite suivent la droite de Casagrande, alors que la kaolinite et les mélanges (M-1, M-2 et M-4) sont en accord avec la corrélation de Biarez et Favre.

3. Chemin Oedométrique

Les essais oedométriques ont été réalisés à partir d'échantillons sous forme de boue préparée à une teneur en eau $w = 1,5.w_L$. Cette boue est laissée à reposer pendant 24 heures, puis consolidée dans un bâti de 100 mm de hauteur et 40 mm de diamètre. Le bâti est graissé à l'intérieur afin de minimiser l'effet de frottement avec les parois intérieures. Le drainage est autorisé aux deux extrémités haute et basse.

L'effet de la présence d'un élément très plastique comme la montmorillonite est claire sur les résultats sur chemins oedométriques (figure 4). La kaolinite pure a un indice de compression $C_c = 0,25$ ce qui est cohérent avec les valeurs trouvées dans la littérature (Wahyudi, 1991). La présence de 35% de montmorillonite dans le mélange M-2 ramène celui-ci à une valeur de 0,685. D'autre part la valeur de celui-ci pour la montmorillonite est $C_c = 1,73$ ($C_c = 1,57$ selon Soemitro, 1994), la présence de 35% de kaolinite M-1 donne $C_c = 1,438$. En comparant avec l'étude de Hicher et al (2000), sur la bentonite verte ($w_L = 100\%$), on constate que la forme de la courbe oedométrique de la montmorillonite semble être semblable à celle de la bentonite verte, alors que ce n'est pas le cas pour les mélanges M-1 et M-2.

L'indice de gonflement semble être très influencé par la proportion de montmorillonite. Sa valeur va de 0,041 pour 100% de kaolinite, jusqu'à 0,19 pour 100% de montmorillonite, en passant par des valeurs intermédiaires 0,149 et 0,09 pour respectivement M-1 et M-2.

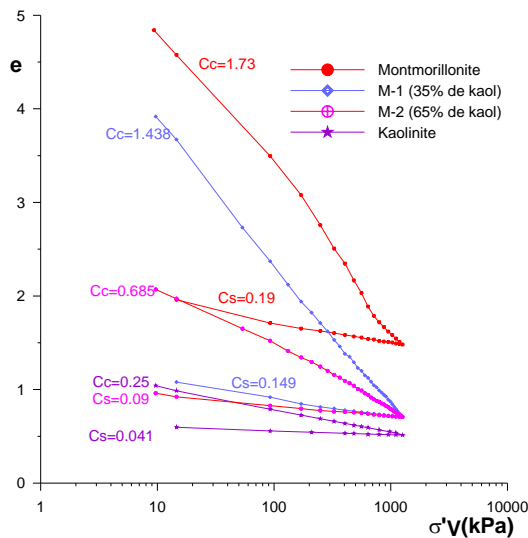


Figure 4. Essais oedométriques sur la kaolinite (K), montmorillonite (M), M-1, et M-2

Dans le plan de (Burland, 1990) l'indice des vides normalisé I_v est calculé à partir de l'équation 1.

$$I_v = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} \quad (1)$$

Où e^*_{100} et e^*_{1000} sont les indices des vides correspondant respectivement à σ'_v égale à 100 et 1000 kPa. Ces valeurs particulières permettent d'obtenir la courbe de consolidation intrinsèque introduite par Burland (ICL).

La figure 5 montre que toutes les courbes suivent la courbe ICL à partir de $\sigma'_v = 100$ kPa. Le décalage observé au départ pourrait être dû au phénomène de sédimentation de la boue (voir figure 4).

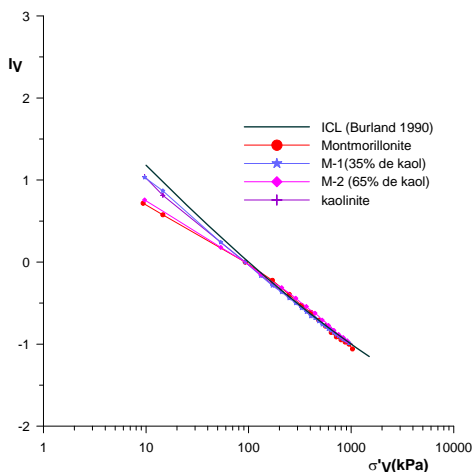


Figure 5. Plan $I_v - \sigma'_v$ (Burland, 1990)

En comparant les résultats des essais oedométriques avec la corrélation de Biarez et Hicher (1994) (figure 6), nous trouvons que la kaolinite et le mélange M-2 sont en accord avec la corrélation alors que la montmorillonite et le mélange M-1 ont une compressibilité beaucoup plus élevée que celle présentée dans la corrélation.

Il semble que la montmorillonite a un effet guide sur le comportement, nous pouvons constater dans le plan ($E_{oed}-\sigma'_v$) de la figure 7, que la courbe de E_{oed} pour le mélange M-1 est confondue avec celle de la montmorillonite, la courbe du mélange M-2 se situe au-dessus.

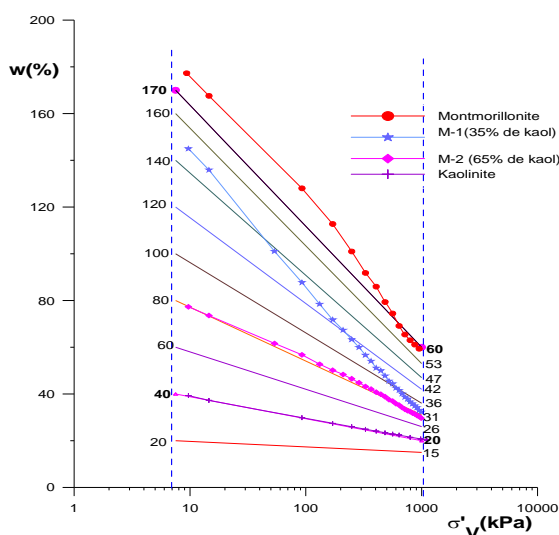


Figure 6. Corrélation de (Biarez et Hicher ,1994)

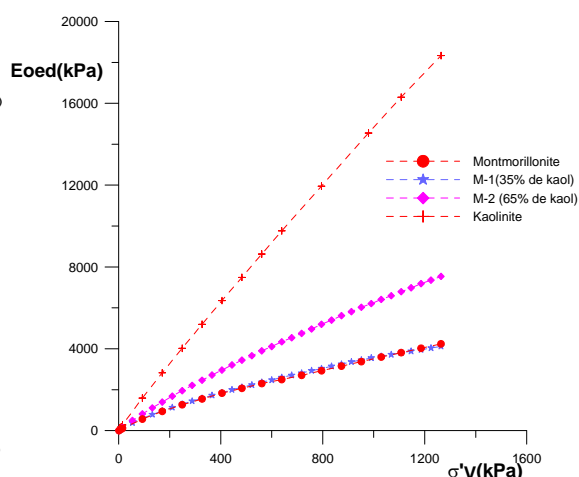


Figure 7. E_{oed} en fonction de σ'_v

4. Chemin triaxial

4.1. Mode de préparation et mise en place

Les échantillons sont préparés à partir de poudre mélangée à l'eau distillée à $w=1.5w_L$ jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, cette pâte est ensuite versée dans un consolidomètre de 98 mm de diamètre et 1m de hauteur. Les parois du consolidomètre ainsi que les gages sont bien graissés.

L'argile ainsi consolidée sera ensuite taillée en éprouvettes cylindriques d'élanement $H/D=1$ (dimensions 35/35 mm). L'éprouvette est mis en place avec un système d'antifrettage (plaque antifrettage graissée avec des petits morceaux de latex distribués sur la surface de la plaque).

4.2. Étude du comportement

L'essai comporte une phase de saturation afin d'assurer l'annulation des surpressions interstitielles. Le contrôle de la saturation est effectué en calculant le coefficient de Skempton B ($B=\Delta u/\Delta\sigma_3$), par application d'une contrainte radiale $\Delta\sigma_3$, et l'observation de l'augmentation de la pression interstitielle. Une fois celle-ci stabilisée, le calcul de B (qui doit être proche de 1) est effectué. Nous procédons ensuite au chargement isotrope jusqu'à une contrainte donnée, puis enfin au chargement

triaxial à $\sigma'_3 = \text{constante}$. Les indices des vides (initial et en cours d'essai) sont calculés respectivement par les relations classiques (2) et (3).

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (2)$$

$$e = e_0 - \frac{\Delta V}{V_0} (1 + e_0) \quad (3)$$

4.2.1. Chemin de chargement isotrope

Cette étape de l'essai consiste à réaliser un chargement isotrope par paliers de 100 kPa, d'une durée de 1 heure, 24 heures et 48 heures pour la kaolinite, le mélange M-2 et la montmorillonite respectivement, jusqu'à l'obtention de P'_{ic} désignée.

Les résultats sur chemin de chargement isotrope sont présentés dans la figure 8, Cc étant la courbe de consolidation isotrope.

4.2.2. Chemin triaxial à $\sigma'_3 = \text{constante}$

Les essais sont réalisés sur la kaolinite, la montmorillonite et un seul essai sur le mélange M-2. La vitesse d'écrasement pour chaque matériau est calculée à partir de la formule (4).

$$V_{\max} = \frac{\varepsilon_f \cdot h_0}{a \cdot t_{100}} \quad (4)$$

Où ε_f est la déformation à la rupture (estimée à 6%), h_0 est la hauteur initiale de l'éprouvette, t_{100} est le temps de consolidation primaire, et a un coefficient dépendant des conditions de drainage.

La vitesse d'écrasement est de 0,0035 mm/min pour la kaolinite, de 0,000347 mm/min pour la montmorillonite et de 0,000693 mm/min pour le mélange M-2.

Les contraintes de consolidation pour les différents essais réalisés sont résumées dans le tableau II.

Tableau II : Essais réalisés sur chemin triaxial

matériau	Kaolinite	Montmorillonite	M-2
P'_0 (kPa)	200 600 1000	200 600	200

Le comportement de la kaolinite est présenté sur la figure 8. Le comportement dans le plan $\varepsilon_1 - \varepsilon_V$ traduit le phénomène de contractance, en fin d'essai la déformation volumique tend vers un palier, ce qui est caractéristique de la plasticité parfaite (Biarez et Hicher, 1994). Dans le plan $(q-p')$ ce phénomène est traduit par la droite de plasticité parfaite de pente $M=1,05$ qui correspond à un angle de frottement $\phi'=26,53^\circ$, ce qui est cohérent avec les valeurs trouvées dans la littérature (Bouziri, 2007 ; Hattab, 1995 ; Wahyudi, 1991).

Sur la figure 8, les résultats pour la montmorillonite permettent de caractériser $M=0,7$ ($\phi'_{PP}=18,24^\circ$). Ce sont des valeurs très proches de celles trouvées par Soemiro (1994) sur la même argile ($M=0,666$, $\phi'_{PP}=17,44^\circ$). En revanche, dans le plan $\varepsilon_1 -$

ε_v la variation volumique continue à évoluer alors que le déviateur a atteint son palier. Nous retrouvons le même comportement sur l'essai réalisé sur M-2 (figure 8), qui nous donne une valeur de $M=0,765$ et $\phi'_{PP}=19,83^\circ$, qui est très proche de la valeur trouvée pour la montmorillonite traduisant un effet important de la présence de la montmorillonite, cette hypothèse reste à confirmer par d'autres essais. Dans le plan ε_1 - q , nous constatons que la montmorillonite atteint son palier à des déformations axiales plus petites que celles du mélange M-2.

La figure 9 représente l'évolution de la droite M des trois matériaux, le comportement de M-2 tend vers celui de la montmorillonite.

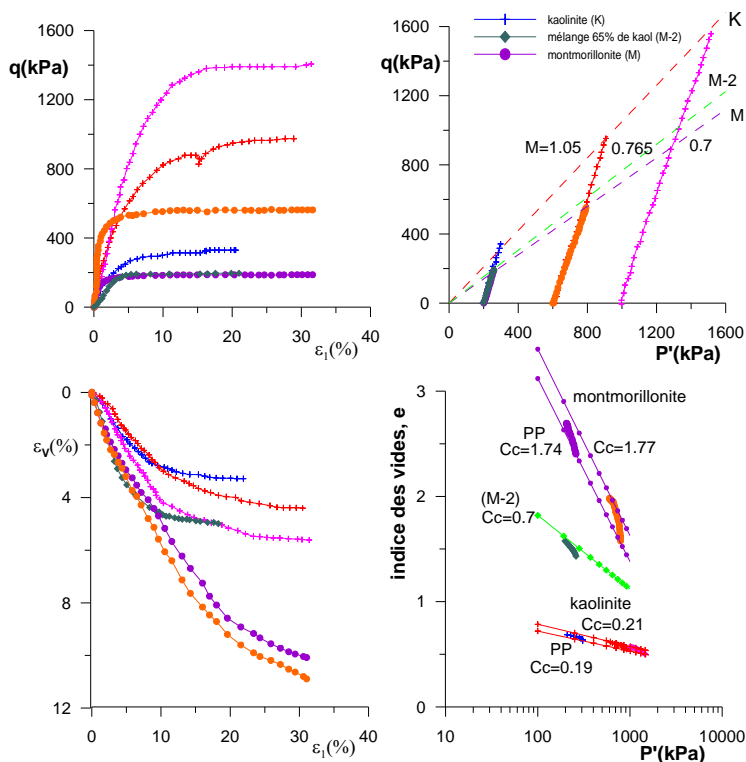


Figure 8. Essais triaxiaux drainés sur la kaolinite (K), montmorillonite (M), et mélange (M-2)

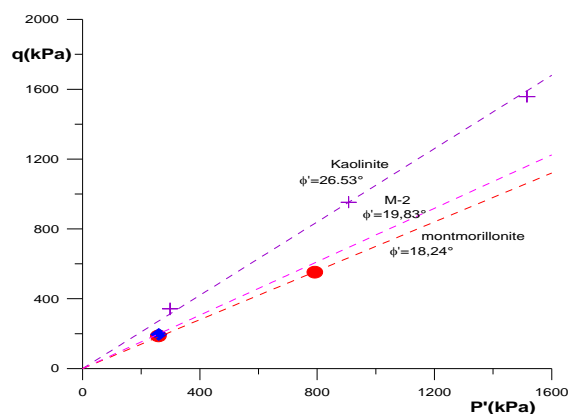


Figure 9. Présentation des trois matériaux dans le plan q - p'

5. Conclusion

Cette étude nous a permis de déterminer les paramètres mécaniques des matériaux utilisés : C_c , C_s , M et ϕ'_{PP} . L'allure de la courbe oedométrique trouvée pour la montmorillonite semble être en concordance avec celle présentée par Hicher et al (2000) sur la bentonite verte ($w_L=100\%$). Pour les courbes oedométriques des mélanges M-1 ($w_L=118\%$) et M-2 ($w_L= 82\%$), cette allure n'apparaît pas dans notre domaine de contrainte (σ'_v allant jusqu'à 1000 kPa). nous avons également montré que la présence de la montmorillonite a un effet guide sur le comportement mécanique du mélange. Cela apparaît clairement sur le chemin triaxial dans le plan (ε_1 - q) où les valeurs de déviateur sont très proches pour la montmorillonite et le mélange M-2, et dans le plan (ε_1 - ε_v) où la déformation volumique est plus importante pour la montmorillonite et le mélange M-2 que pour la kaolinite. Sur chemin oedométrique ce rôle important est constaté dans le plan (E_{oed} - σ'_v) où les courbes de la montmorillonite et mélanges M-1 sont confondues.

6. Références bibliographiques

- Belanteur N. (1995) Contribution à l'étude des comportements mécanique et thermo-mécanique des argiles remaniées, saturées et fortement surconsolidées
- Biarez J., Favre J.L. (1977) Statistical estimation and extrapolation from observation. Report of organiser, Spec. Session 6. IXICMFE, Tokyo, Vol.3, pp 205-509
- Biarez J., Hicher P. (1994) Elementary mechanics of soils behaviour saturated remoulded soils. Balkema, Rotterdam.
- Bouziri S. (2007) Etude des mécaniques de déformation dans les argiles surconsolidées. Thèse de doctorat. Ecole centrale Paris
- Brown. G. Brindley G.W (1980) X-ray procedures for clay mineral identification in: Crystal Structures of clay Minerals and their X- ray identification. Monograph 5, Mineralogical Society, London, pp 305-360
- Burland J.B. (1990) On compressibility and shear strength of natural clays. Géotechnique 40, No. 3, 329-378
- Casagrande A. (1948) Classification and identification of soils. American Society of civil Engineering
- Chen F.H. (1988) Foundations on expansive soils, Developments in Geotechnical Engineering. Elsevier Publishing Co, Amsterdam, 54, 464
- Dakshnamurthy V., Raman V. (1973) A simple method of identifying an expansive soil. Soils and foundations.13, 97-104
- Hattab M. (1995) Etude expérimentale du comportement dilatant des argiles surconsolidées. Thèse de doctorat. ECP.
- Hicher P Y., Wahyudi H., Tessier D (2000) Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay. Mechanics of Cohesive-Frictional Material. 2000; 5:341-371
- Pons C.H., Rousseaux F., Tchoubar D. (1982) Utilisation du rayonnement synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des smectite. I. Etude de différents systèmes eau-smectite en fonction de la température. Clay mineral, pp 327-338
- Pons C.H., Ben Rhaeim H., Tessier D., Clinard C. (1987) Apport de la diffusion aux petits angles de rayons X à l'étude de la microstructure des matériaux argileux. In soil micro-morphologie, pp 37-42
- Soemitro R. (1994) Contribution à l'étude du rôle de la pression interstitielle négative dans le gonflement et d'autres aspects du comportement des sols non saturés. Thèse de doctorat. ECP.
- Wahyudi H. (1991) Etudes des propriétés mécaniques des matériaux argileux en relation avec leur organisation à différentes échelles. Thèse de doctorat. ECP.