

N. BELANTEUR
S. TACHERIFET
M. PAKZAD

Laboratoire de Génie Civil,
Université d'Orléans
rue Léonard-de-Vinci
45072 Orléans

Étude des comportements mécanique, thermo-mécanique et hydro-mécanique des argiles gonflantes et non gonflantes fortement compactées

Résumé

Des essais sur des échantillons d'argiles remaniées ont permis d'analyser l'influence des fortes pressions de consolidation, des cycles thermiques et des cycles de « sorption-désorption » sur le comportement thermo-hydro-mécanique des argiles fortement compactées. Le comportement mécanique a été étudié à travers la réalisation d'essais œdométriques cycliques sur des argiles gonflantes et non gonflantes, ainsi que d'essais de compression triaxiale axisymétrique non drainés sur des échantillons aux états de contraintes normalement consolidé et surconsolidé (OCR = 5 ; 10). Pour l'étude du comportement thermo-mécanique, nous avons réalisé des essais isothermes sur des chemins œdométriques et triaxiaux non drainés d'une part, et d'autre part des cycles thermiques sous chargement mécanique constant à l'état normalement consolidé et à l'état surconsolidé sur des chemins œdométriques. Les principaux phénomènes liés au comportement hydro-mécanique des argiles fortement compactées ont été mis en évidence grâce à des cycles de « sorption-désorption » sous une contrainte constante également sur des chemins œdométriques.

Study of mechanical, thermo-mecanical and hydro-mechanical behaviour of swelling and unswelling highly compacted clays

Abstract

Tests on specimens of reconstituted clays have examined the influence of highly consolidation pressure, temperature, and « sorption-desorption » cycles on hydro-thermo-mechanical behaviour of highly compacted clays. For the study of mechanical behaviour, the program involved cyclic oedometric tests on swelling and unswelling clays, undrained compression axisymmetric triaxial tests on normally consolidated and over consolidated specimens (OCR = 5,10). For thermo-mechanical behaviour, we have performed isothermal tests on oedometric and triaxial paths, and thermal cycle under constant effective stress, in normally and over consolidated states on eodometric path. The principals phenomena tied to hydro-mechanical behaviour were examined by « sorption-desorption » cycle under constant stress on eodometric path.

NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

C'	:	cohésion drainée.
e	:	indice des vides.
hr	:	humidité relative.
IP	:	indice de plasticité.
M	:	paramètre d'état critique.
P'	:	pression moyenne effective.
q	:	déviateur de contraintes.
$S = U_a - U_w$:	succion.
T	:	température.
w_L	:	limite de liquidité.
w_p	:	limite de plasticité.
Δu	:	surpression interstitielle.
ϵ_j	:	déformation axiale.
φ'	:	angle de frottement interne drainé.
γ_s	:	densité des grains solides.
OCR	:	degré de surconsolidation.

1

Introduction

Jusqu'à présent en mécanique des sols, les études relatives au comportement des argiles sous fortes contraintes ont été rares. Ce domaine a surtout concerné les roches et les matériaux pulvérulents. Pour les argiles, la recherche a été centrée sur le domaine des pressions courantes pour la majorité des ouvrages de génie civil qui, en général, ne dépassent pas 1 MPa. L'option de stockage des déchets radioactifs dans des ouvrages creusés dans des formations argileuses profondes a nécessité la réalisation d'essais, afin de connaître le comportement de ces matériaux dans les conditions de leur utilisation, caractérisées, entre autres, par de fortes pressions de compactage, le contact avec une source de chaleur et un changement d'état hydrique.

Parmi les travaux expérimentaux réalisés pour décrire le comportement des argiles fortement compactées, il convient de citer les essais triaxiaux drainés de Rousset (1988) sur une argile plastique (Boom) et une argile raide (Couy), les essais œdométriques cycliques et triaxiaux monotones et cycliques de Baldi *et al.* (1990) sur l'argile de Boom, les essais œdométriques et triaxiaux de Börgesson *et al.* (1993) sur une bentonite MX80, ainsi que les essais triaxiaux non drainés, et drainés à pression moyenne constante et à différentes températures, de Lingnau *et al.* (1993) sur des échantillons remaniés, fabriqués à partir d'un mélange de sable et de bentonite.

Les résultats présentés sont une contribution en amont du problème décrit précédemment. A travers cette étude essentiellement expérimentale, nous avons voulu faire un inventaire des principaux phénomènes liés au comportement mécanique, thermo-mécanique et hydro-mécanique des argiles remaniées et fortement consolidées. Les différents essais réalisés, ont permis d'analyser l'effet des fortes pressions de consolidation, du degré de surconsolidation, des cycles de tempéra-

ture et de « sorption-désorption » sous une contrainte mécanique fixe. Nous présentons dans cet article les résultats d'essais œdométriques cycliques réalisés sur des argiles gonflantes et non gonflantes, d'essais triaxiaux non drainés aux états de contraintes normalement consolidés et surconsolidés à différentes températures. Les résultats d'essais œdométriques isothermes, avec cycles thermiques et de « sorption-désorption » sous une contrainte mécanique constante sont également présentés.

2

Comportement mécanique des argiles gonflantes et non gonflantes remaniées, saturées et fortement consolidées

2.1

Comportement sur chemin œdométrique

L'étude expérimentale a été réalisée au moyen d'un œdomètre à haute pression (Fig. 1). Elle a été menée sur

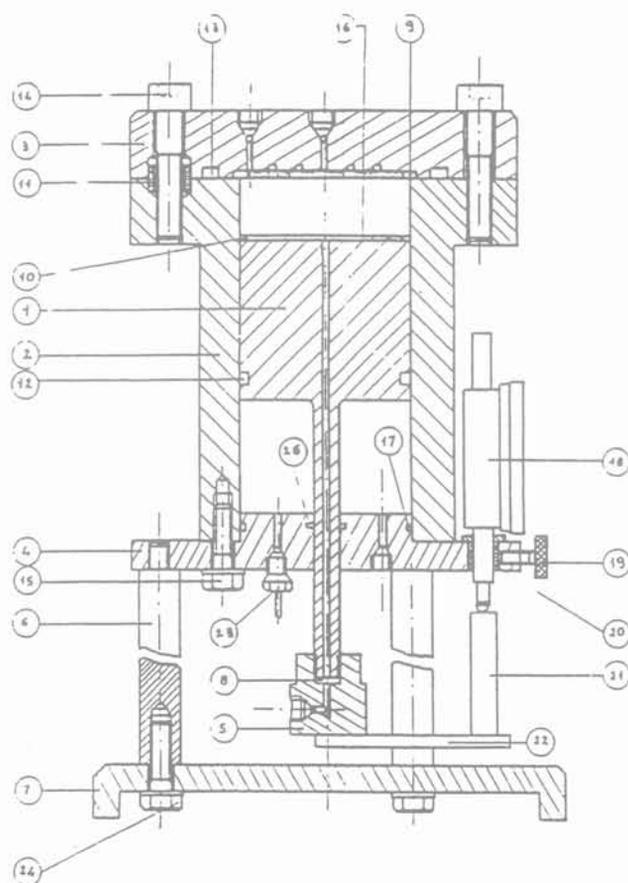


FIG. 1 Coupe schématique de la cellule œdométrique à haute pression. Schematic representation of high pressure oedometer cell.

TABLEAU I

Caractéristiques physiques et minéralogiques de l'argile du Bassin parisien, de la kaolinite, de la smectite et de l'argile de Boom.

Physical and mineralogical characteristics of Bassin parisien clay, kaolinite, smectite and boom clay.

Caractéristiques physiques	Argile du Bassin parisien	Kaolinite	Smectite	Argile de Boom
Densité des grains γ_s (g/cm ³)	2,68	2,5	2,75	2,67
Surface spécifique (BET (m ² /g))	33,5	10,3	426	53-177
Capacité d'échange de base (mécq)	46	—	64	20-40
Limite de liquidité w_L (%)	52,5	40	112	59-76
Limite de plasticité w_p (%)	22,5	20	50	22-26
Indice de plasticité $IP = w_L - w_p$	30	20	62	37-50
Type d'argile	non gonflante	non gonflante	gonflante	gonflante
Composition minéralogique				
Kaolinite	—	86 % ± 3	4 % ± 2	30 %
Géothite	—	—	6 % ± 1	—
Calcite	—	—	2 % ± 1	—
Quartz	—	6 % ± 1	6 % ± 1	28 %
Illite	—	—	—	20 %
Smectite	—	—	80 % ± 1	22 %
Moscovite	—	—	—	—
Feldspath et mica	—	8 % ± 1	—	—

quatre matériaux argileux différents de part leur nature, à savoir : kaolinite, smectite, argile du Bassin parisien et argile de Boom. Les caractéristiques physiques et minéralogiques de ces argiles sont données dans le tableau I. Les échantillons sont initialement à l'état de boue d'argile. Les essais ont consisté à effectuer des cycles de « décharge-recharge » afin d'analyser le gonflement de chaque matériau. Les échantillons sont consolidés à une pression de 5 MPa, déchargés à une pression relativement faible (0,15-0,45 MPa), ensuite rechargés à une pression de 10 MPa et enfin déchargés complètement. Une contre-pression d'eau de 1 MPa a été appliquée à l'échantillon durant l'essai afin d'éviter sa désaturation. Les résultats de ces essais sont présentés sur les figures 2a, 1b, 1c et 1d. Ils montrent les phénomènes suivants :

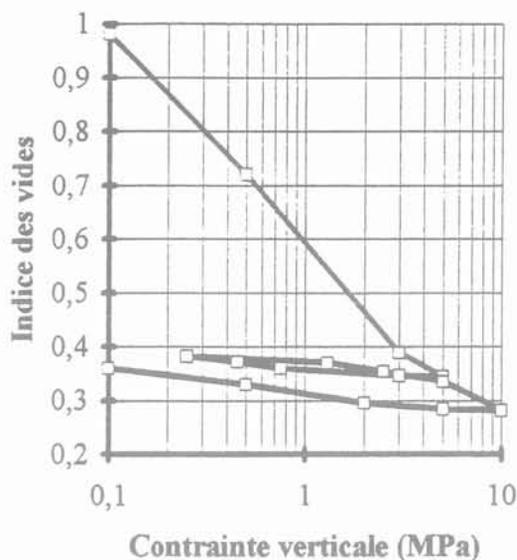
- les pentes normalement consolidées sont parallèles pour les différents matériaux, et le comportement est élastoplastique ;
- les pentes de décharge sont plus fortes pour l'argile de Boom et la smectite ;
- les boucles d'hystérésis après une décharge à 5 MPa sont plus aplaties pour la kaolinite et l'argile du Bassin parisien. Elles sont plus larges pour la smectite et l'argile de Boom.

Par conséquent, les argiles de type kaolinite et Bassin parisien peuvent être classées comme des argiles non gonflantes. En revanche, la smectite et l'argile de Boom sont classées comme des argiles gonflantes. Nous avons constaté que la différence la plus significative entre le comportement des différentes argiles est observée en décharge. La smectite possède un gonflement beaucoup plus important que celui de la kaolinite. En effet, la diminution de la contrainte mécanique en décharge va provoquer le gonflement du matériau sous l'effet des forces non équilibrées de répulsion. Ce gonflement augmente avec la pression de consolidation.

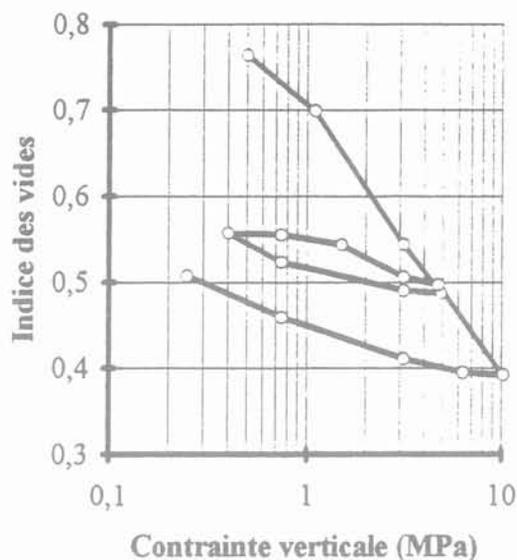
2.2
Comportement mécanique sur chemin triaxial non drainé

Le but des essais réalisés est principalement l'étude du comportement mécanique des argiles remaniées, saturées et fortement consolidées, dans le cas d'une argile gonflante (smectite) et d'une argile non gonflante (kaolinite). Les essais réalisés sont de type « compression triaxiale axisymétrique non drainée et monotone ». La vitesse de cisaillement choisie est de $6,67 \cdot 10^{-5}$ mm/s. L'échantillon d'argile à cisailier passe par plusieurs étapes, deux étapes de consolidation isotrope et une étape de cisaillement. La première phase de consolidation isotrope est effectuée à basse pression (0,5 MPa), dans une cellule triaxiale classique modifiée à cet effet. Elle se confond avec l'étape de fabrication des échantillons pour les essais. Sa durée dépend de la nature du matériau en consolidation (Fig. 3).

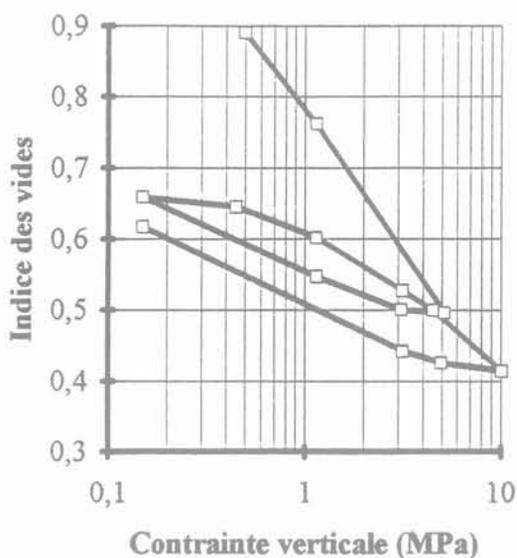
A la fin de l'étape précédente, à l'aide d'un tour manuel, est taillé l'échantillon qui servira à l'essai triaxial dans la cellule haute pression, ses dimensions sont choisies de manière à obtenir un élanement de 1 (diamètre = 65 mm, hauteur = 65 mm). Après la mise en place de l'échantillon dans la cellule (Fig. 4), la deuxième étape de la consolidation peut commencer. La pression de confinement à laquelle doit se dérouler le cisaillement est atteinte après un certain nombre de paliers de chargement. La fin de cette étape correspond à une variation des déformations volumiques de l'échantillon inférieure à 0,1 %, entre deux mesures prises à vingt-quatre heures d'intervalle. La figure 5, présente la consolidation isotrope d'un échantillon de kaolinite dans la cellule haute pression, en vue d'un essai à un degré de surconsolidation de 10. A la fin de la consolidation, et après la mise en contact du piston d'écrasement avec l'embase drainante supérieure, les



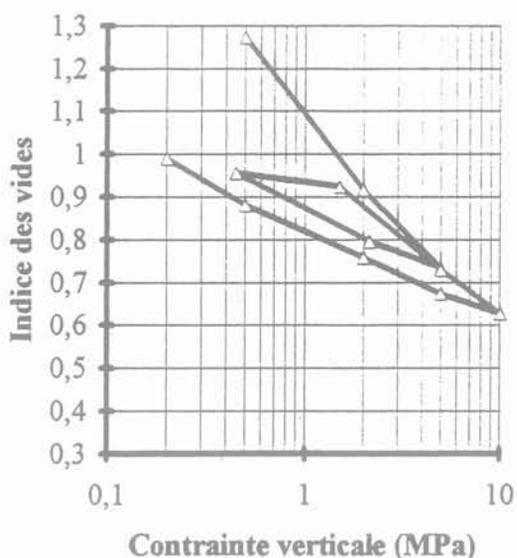
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 2. Essais oedométriques cycliques sur des argiles remaniées saturées « comparaison du comportement entre argiles gonflantes et non gonflantes » : (a) argile du Bassin parisien (b) kaolinite (c) argile de Boom (d) argile smectite.
Cyclic odometer tests on remoulded saturated clays « comparison of behaviour between swelling and unswelling clays » : (a) Bassin parisien clay (b) kaolinite (c) Boom clay (d) smectite.

conduits de drainage sont fermés et le cisaillement peut commencer. Cette phase se poursuit jusqu'à la rupture de l'échantillon. L'enregistrement des résultats « bruts » de l'essai se fait grâce à un système d'acquisition, en vue d'un traitement ultérieur.

2.3

Résultats obtenus et interprétation

Nous avons réalisé trois essais triaxiaux de compression axisymétrique non drainés normale-

ment consolidés, à des pressions de confinement de 5 et 10 MPa sur la kaolinite et la smectite. Trois essais du même type ont été également réalisés à l'état surconsolidé ($OCR = 5 ; 10$). Les courbes présentées pour chaque essai et argile illustrent notamment :

- la variation du déviateur de contraintes (q) en fonction de la déformation axiale (ϵ_1);
- la variation de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale (ϵ_1);
- la variation du déviateur de contraintes (q) en fonction de la pression moyenne effective (p').

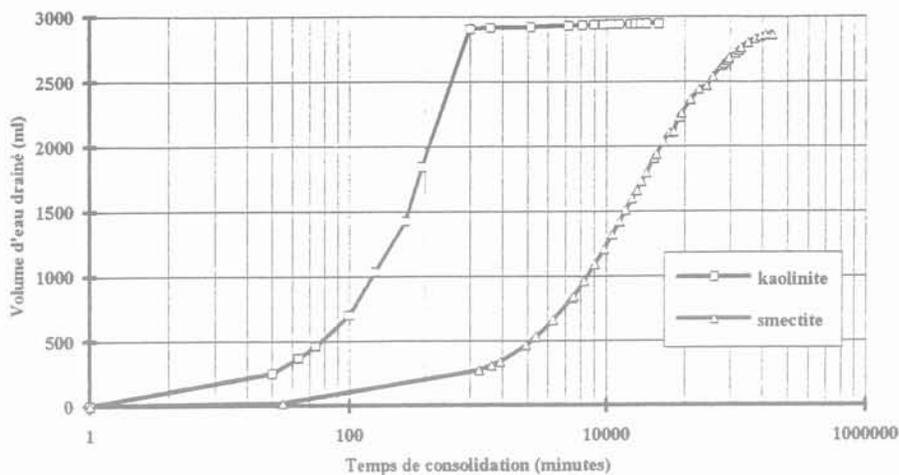


FIG. 3 Consolidation isotrope à basse pression de boues argileuses (0,5 MPa).
Isotropic consolidation of mud clays under low pressure (0,5 MPa).

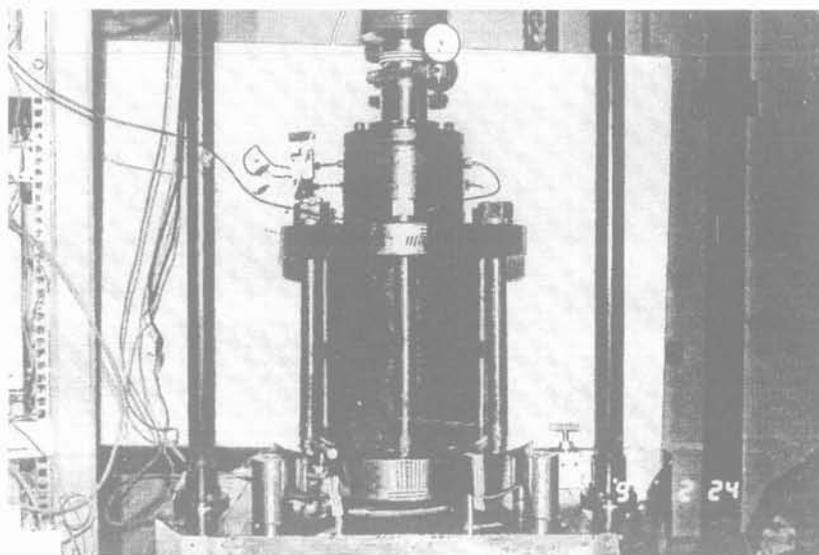


FIG. 4 Cellule triaxiale à haute pression.
High pressure triaxial cell.

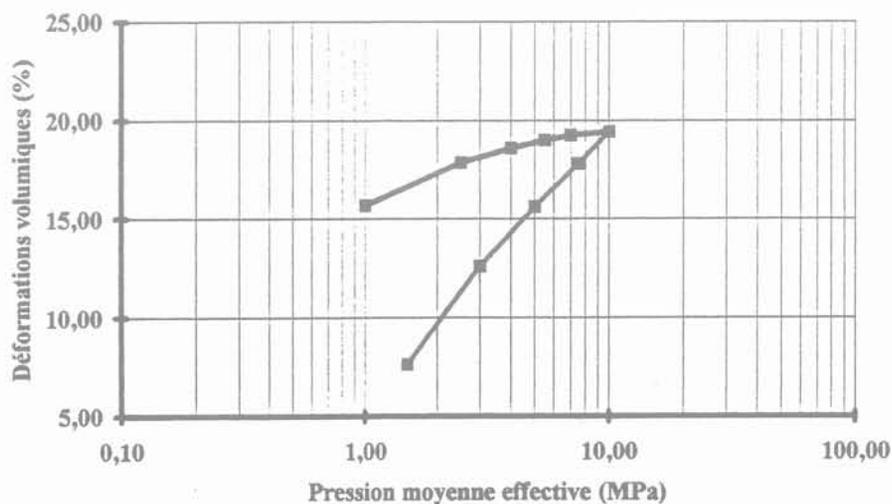


FIG. 5 Consolidation isotrope d'un échantillon de kaolinite.
Isotropic consolidation of kaolinite sample.

Cas des essais triaxiaux sur la kaolinite normalement consolidée

Les résultats des deux essais réalisés aux pressions de confinement de 5 et 10 MPa, présentés sur la figure 6, permettent de faire les observations suivantes :

- les courbes représentant la variation du déviateur de contraintes, en fonction de la déformation axiale, montrent un léger pic correspondant à la valeur maximale du déviateur. Celui-ci survient pour des valeurs de déformations axiales à peu près identiques, dans le cas des essais considérés. La valeur du déviateur va chuter légèrement pour commencer à se stabiliser et à tendre

vers un palier à partir d'une valeur de déformation axiale correspondant à 12 % ;

- les courbes représentant la variation de la pression interstitielle, en fonction de la déformation axiale, montrent que la pression interstitielle continue à évoluer légèrement contrairement au pic observé dans le plan (q, ϵ_1) ;
- dans le plan (q, p') , le chemin des contraintes effectives, après le pic correspondant au déviateur maximum, se déplace sur la droite de plasticité parfaite, caractérisée par la pente $M = q/p'$.

Les caractéristiques drainées du matériau sont les suivantes :

- cohésion drainée (C') : 0,12 MPa ;
- angle de frottement interne drainé (ϕ') : 14,8 degrés.

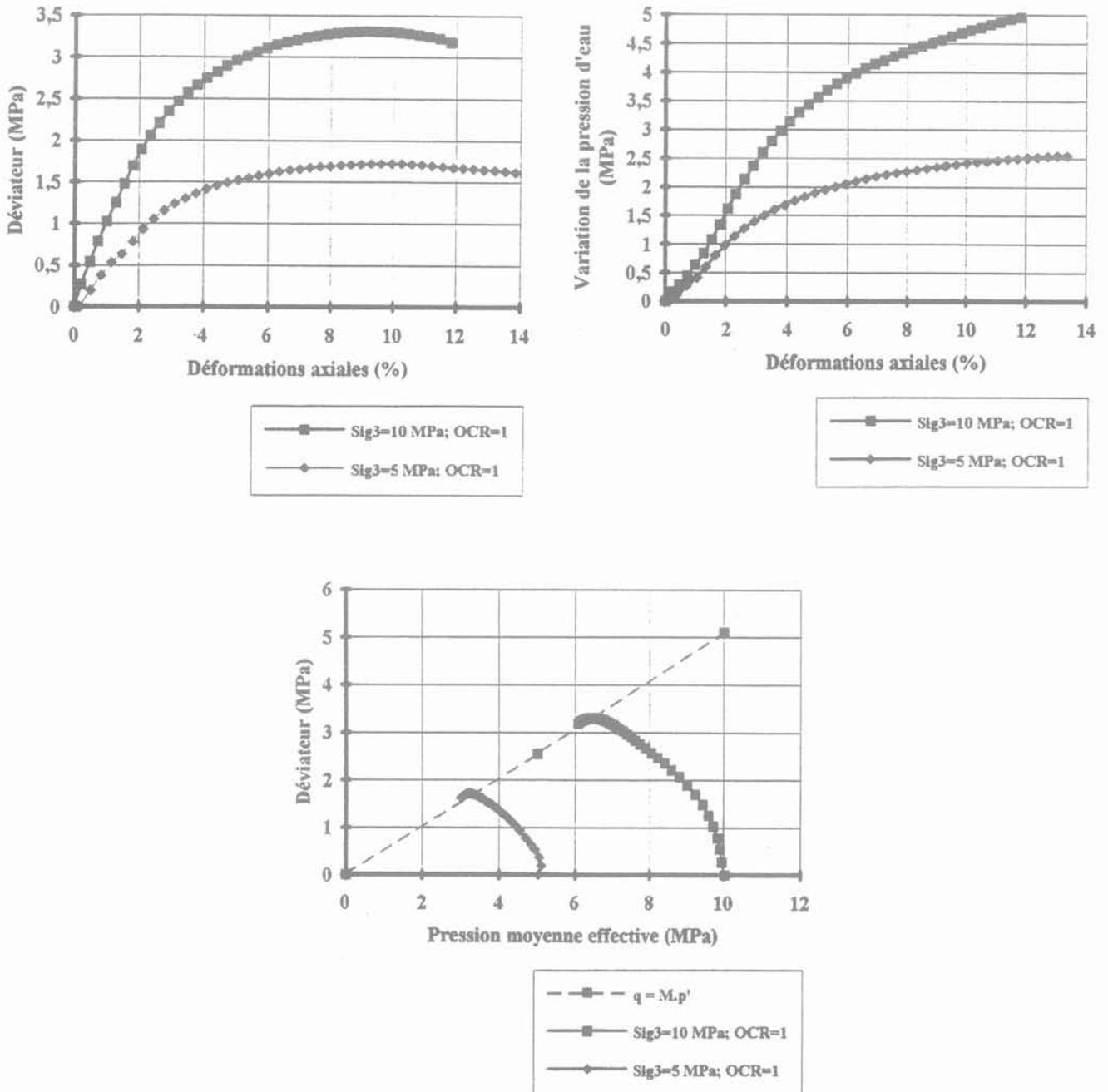


FIG. 6 Essais triaxiaux non drainés sur la kaolinite à l'état normalement consolidé. Undrained triaxial tests on kaolinite normally consolidated.

Cas de la smectite et comparaison avec la kaolinite

La figure 7 illustre les résultats des essais effectués à une pression de confinement de 5 MPa sur la kaolinite et la smectite. Les constatations suivantes ont été faites :

- l'échantillon de kaolinite à la fin de l'essai présentait de légers plans de cisaillement, ce qui n'était pas le cas de celui de smectite ;
- dans le plan (q, ϵ) , pour la kaolinite on note un léger pic qui correspond à la valeur maximale du déviateur de contraintes, le palier de plasticité parfaite est atteint

après une légère chute du déviateur et le début de sa stabilisation à partir de 12 % de déformations axiales. Dans le cas de la smectite par contre, on note l'absence de pic. Le palier de plasticité parfaite se confond avec la résistance maximale du matériau ;

- la kaolinite présente un déviateur à la rupture beaucoup plus important que celui de la smectite. On passe de 1,73 MPa pour la kaolinite à 0,77 MPa pour la smectite. La rupture survient plus tôt dans le cas de la kaolinite, à environ 9,26 % de déformations axiales, alors que pour la smectite, elle se produit pour une valeur de 11,80 %.

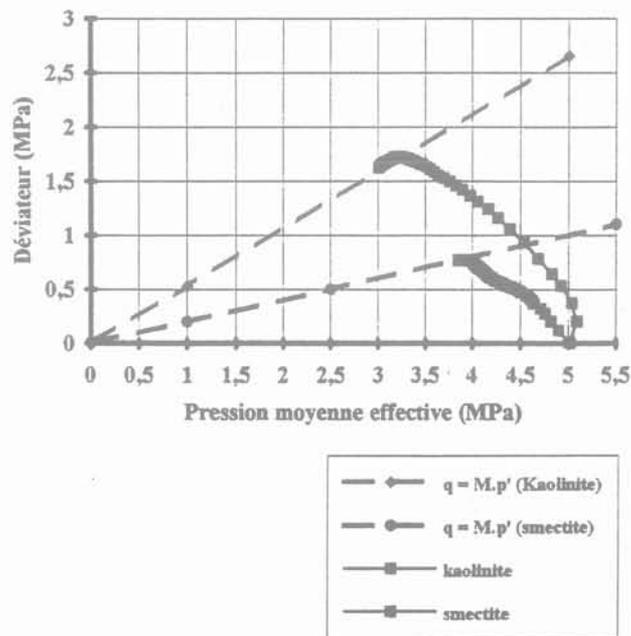
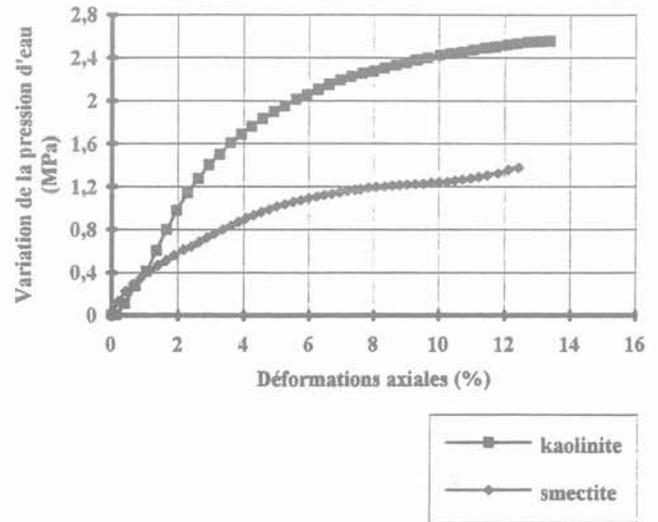
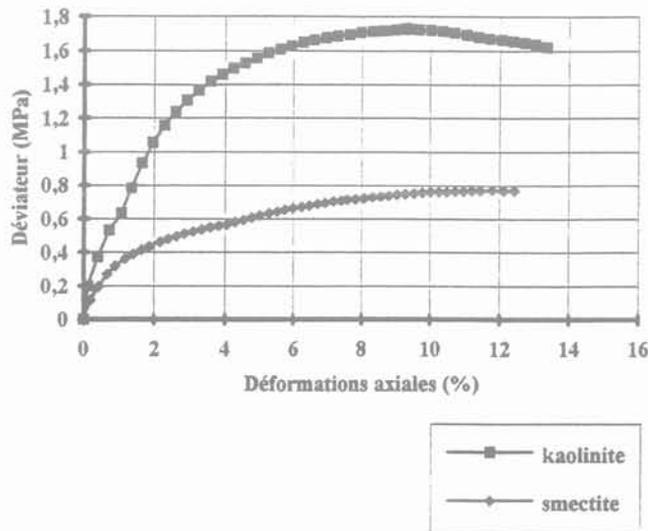


FIG. 7 Essais triaxiaux non drainés sur des argiles normalement consolidées - cas de la kaolinite et de la smectite.
Undrained triaxial tests on normally consolidated clays - cases of kaolinite and smectite.

Cas des essais triaxiaux sur la kaolinite surconsolidée

Pour l'étude du comportement mécanique de la kaolinite à l'état surconsolidé, nous avons réalisé deux essais à des degrés de surconsolidation de 5 et 10. Dans le cas de l'essai à $OCR = 5$, l'échantillon a été chargé de manière isotrope jusqu'à 5 MPa, puis déchargé à 1 MPa. Pour l'essai à un OCR de 10, l'échantillon fut chargé à 10 MPa et également déchargé à 1 MPa. Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure 8. De l'analyse de ces résultats nous avons relevé ce qui suit :

- pour l'essai avec un OCR de 5, nous observons qu'après le maximum, le déviateur chute de manière progressive pour se stabiliser, avec l'apparition d'un palier de plasticité parfaite. Dans le cas de l'essai avec un degré de surconsolidation de 10, le déviateur chute de manière brutale. Le radoucissement (perte de résistance après le seuil de rupture) est donc d'autant moins

marqué que l' OCR diminue. La rupture du matériau survient d'autant plus rapidement que celui-ci a un degré de surconsolidation élevé. Pour l'échantillon ayant un degré de surconsolidation égal à 10, la rupture survient à une valeur de la déformation axiale égale à 3,06 %, alors que pour l'échantillon ayant un degré de surconsolidation égal à 5, celle-ci survient à une déformation axiale de 6,27 %. La résistance du matériau diminue avec l'augmentation du degré de surconsolidation. En effet, dans le cas de la kaolinite testée à une pression de confinement égale à 1 MPa, nous avons obtenu respectivement pour des valeurs du degré de surconsolidation égales à 5 et 10, un déviateur de contraintes à la rupture de 0,718 MPa dans le premier cas et 0,30 MPa pour le deuxième cas ;

- concernant, la variation de la pression interstitielle (Δu) avec la déformation axiale (ϵ_x), nous remarquons pour les deux essais que, l'extremum de la surpression interstitielle est atteint avant l'extremum du déviateur. Autrement dit l'échantillon commence à se dilater avant la rupture, ce qui indique l'apparition de déformations irréversibles avant que le déviateur ne soit maximal. En outre, nous observons une stabilisation de la pression d'eau après la rupture du matériau, dans l'essai réalisé à un OCR de 5. Dans le cas de l'essai à OCR égal 10, on note qu'après la rupture, la pression d'eau dans l'échantillon devient négative. Après la rupture le matériau est dilatant, cette dilatance est d'autant plus importante que le degré de surconsolidation augmente ;

- dans le plan (q, p'), la plasticité parfaite est atteinte dans le cas de l'essai avec un $OCR = 5$. En revanche dans le cas de l'essai à $OCR = 10$, le matériau arrive à la rupture sans atteindre la droite de plasticité parfaite.

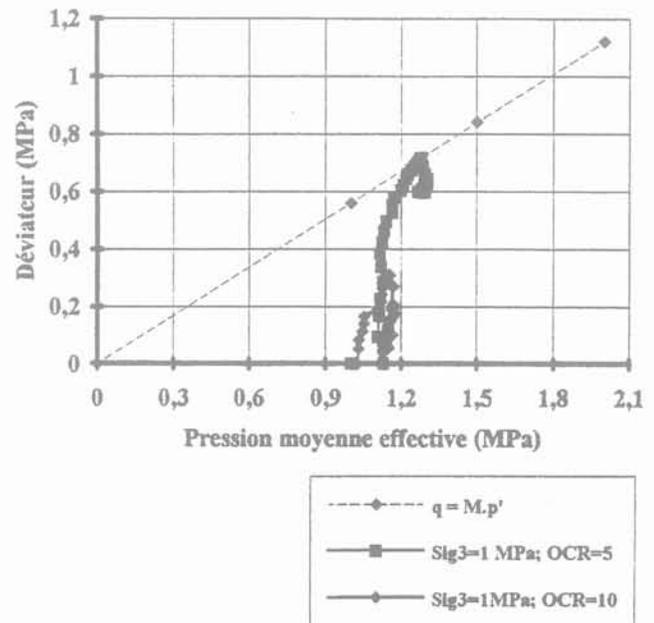
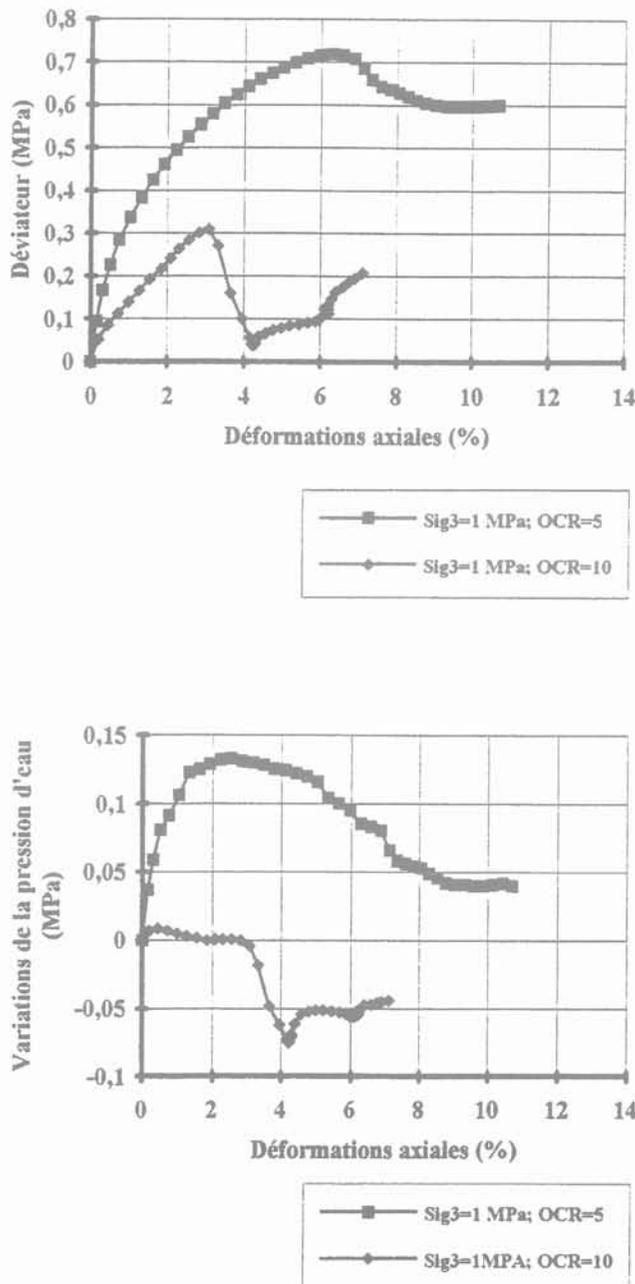


FIG. 8 Essais triaxiaux non drainés sur la kaolinite à l'état surconsolidé. Undrained triaxial tests on kaolinite over consolidated.

Cas de la smectite surconsolidée et comparaison avec la kaolinite

La comparaison du comportement mécanique de la kaolinite et de la smectite, à l'état surconsolidé, sur la base des deux essais réalisés dans les mêmes conditions et dont les résultats sont présentés dans les mêmes plans sur la figure 9, nous conduit à faire les constatations qui suivent :

– le déviateur à la rupture dans le cas de la kaolinite est plus important que celui de la smectite. Il est de 0,72 MPa pour le premier matériau nommé et de 0,40 pour le second ;

– la smectite atteint la rupture à une valeur de déformation axiale supérieure, à celle correspondant à la rupture de la kaolinite (respectivement 7 et 6,27 %) ;

– après la rupture, la résistance de la kaolinite chute assez brutalement, alors que celle de la smectite diminue de manière progressive.

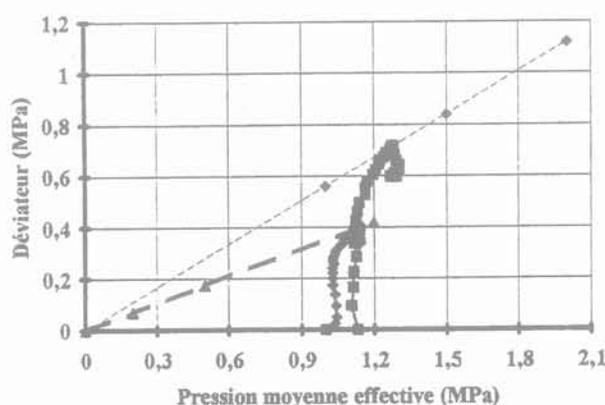
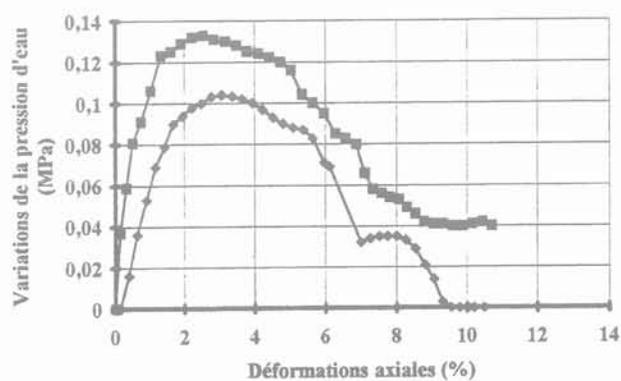
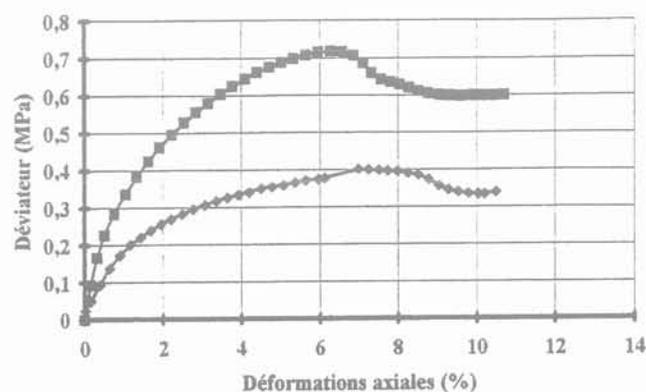


FIG. 9 Essais triaxiaux non drainés sur argiles surconsolidées – cas de la kaolinite et de la smectite. Undrained triaxial tests on over consolidated clays – cases of kaolinite and smectite.

Comportement thermo-mécanique des argiles remaniées, saturées et fortement consolidées

A travers l'étude expérimentale du comportement thermo-mécanique de quatre argiles de natures différentes, dont les principales caractéristiques physiques et minéralogiques sont résumées dans le tableau I, nous avons tenté de faire un inventaire des phénomènes résultant de l'application d'un gradient de température. La plupart des essais ayant concerné l'étude thermo-mécanique ont été réalisés sur des chemins œdométriques. Le seul essai triaxial en température a été réalisé en utilisant un échantillon fabriqué selon la méthode décrite dans le paragraphe 2.2.

Les argiles naturelles ayant servi pour notre étude expérimentale se présentent sous forme de petits fragments de blocs rocheux dans des galeries du laboratoire souterrain de Mol (Belgique) pour l'argile de Boom. Pour l'argile du Bassin parisien, nous avons travaillé sur des morceaux d'échantillons déjà utilisés pour des essais mécaniques, et fabriqués à partir de carottes de sondage. Les argiles kaolinite et smectite se présentent sous forme de poudre. Plusieurs échantillons des argiles naturelles (Boom et Bassin parisien) sont mis dans de l'eau distillée à température ambiante. La saturation complète est obtenue après deux semaines de macération dans l'eau. La boue d'argile ainsi obtenue nous servira pour réaliser les essais œdométriques. L'obtention de boues argileuses, à partir des poudres de kaolinite et de smectite, se fait en versant progressivement, tout en malaxant dans un récipient rempli d'eau distillée, de la poudre d'argile. Afin de minimiser

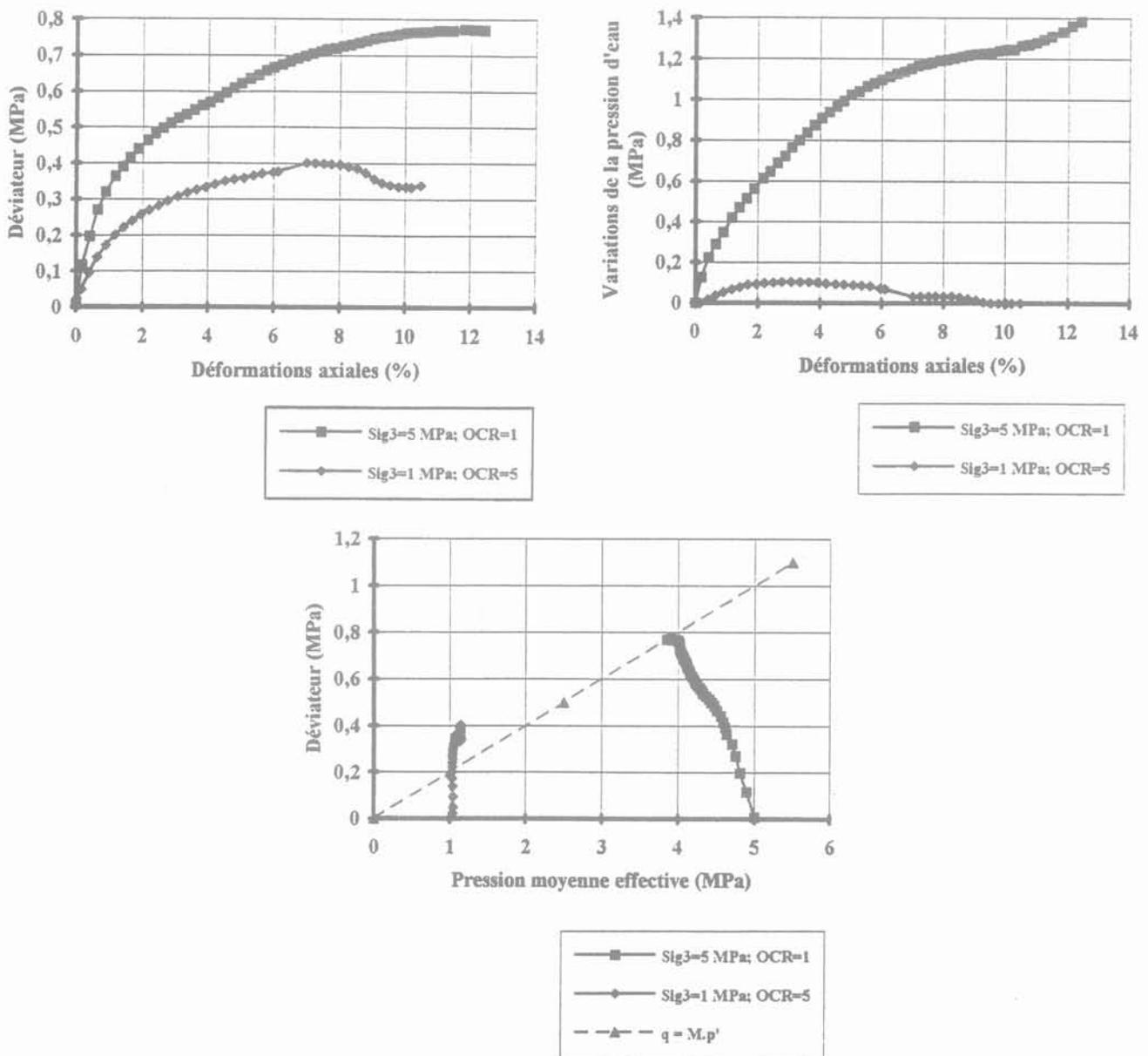


FIG. 10 Essais triaxiaux non drainés sur la smectite. Undrained triaxial tests on smectite.

la présence de bulles d'air dans les boues argileuses, celles-ci sont malaxées au moyen d'un appareil centrifugeur pendant quelques heures (2 à 3 heures).

3.1

Réalisation d'un essai œdométrique en température

Les essais œdométriques en température sont réalisés en utilisant le « dispositif œdométrique » (Fig. 1). Après avoir saturé la pierre poreuse disposée sur le piston, la boue d'argile est mise en place dans le corps de la cellule. Celle-ci est refermée par son embase supérieure. La cellule est introduite à l'intérieur de l'étuve autorégulée. Elle est raccordée au circuit de saturation et de chargement hydraulique. Le comparateur de mesure du tassement de l'échantillon est mis en place. Selon le type d'essai à réaliser, le chauffage du matériau intervient avant l'application de toute charge mécanique, ou après.

3.2

Différents types d'essais réalisés

L'effet de la température sur le comportement mécanique des argiles remaniées, saturées et fortement consolidées, peut être analysé, d'une part dans le cas où celle-ci est constante, et son effet est alors associé à celui de la charge mécanique, d'autre part dans le cas d'une charge mécanique maintenue constante alors que la température varie et, dans ce cas, seul l'effet de la dite température est étudié. Les deux aspects de l'influence de la température, correspondent respectivement, aux essais isothermes et aux essais avec cycle(s) de température.

3.3

Résultats des essais et interprétations

3.3.1

Cas des essais isothermes

Les essais isothermes ont concerné l'argile du Bassin parisien, la kaolinite et la smectite. Dans le cas de l'argile du Bassin parisien, après la mise en place de l'échantillon dans l'œdomètre, le matériau a été préalablement porté à la température de déroulement de l'essai, pendant vingt-quatre heures, avant l'application de toute charge mécanique. Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure 11. Dans le cas des essais œdométriques isothermes, réalisés respectivement sur la kaolinite et la smectite, les matériaux sont préconsolidés à 1,5 MPa. Le chauffage du matériau s'effectuant à partir du palier de chargement correspondant à 0,5 MPa (Fig. 12, 13). Le seul essai triaxial isotherme a été réalisé sur la kaolinite. Cet essai dans sa mise en œuvre est analogue à un essai à température ambiante, sauf que dans ce cas à la fin de la consolidation isotrope et avant son cisaillement, le chauffage du matériau est effectué. Les résultats de l'essai sont présentés sur la figure 14.

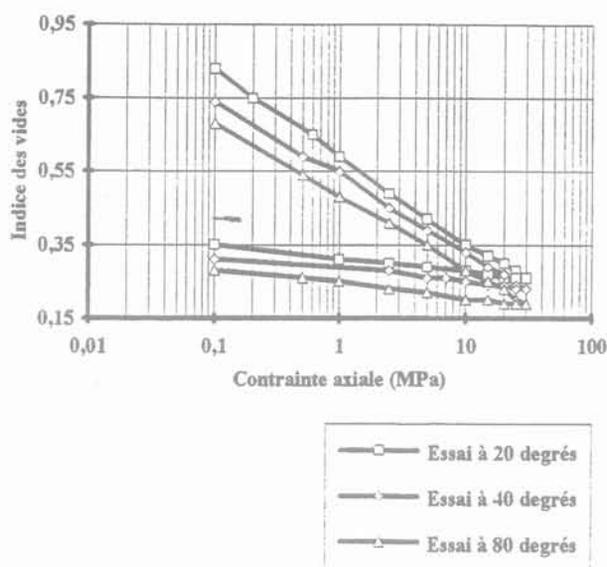


FIG. 11 Essais œdométriques isothermes sur l'argile du Bassin parisien.
Isothermal oedometric tests on Bassin parisien clay.

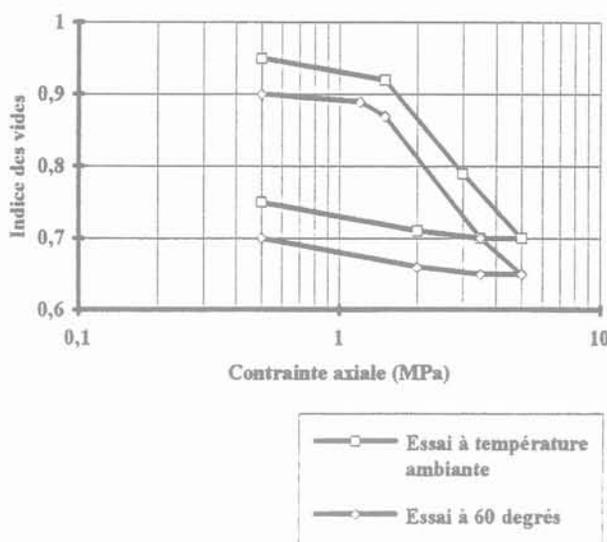


FIG. 12 Essais œdométriques isothermes sur une kaolinite préconsolidée à 1,5 MPa.
Isothermal oedometric tests on kaolinite preconsolidated at 1.5 MPa.

Des essais œdométriques isothermes réalisés sur l'argile du Bassin parisien, nous avons tiré les enseignements suivants :

- en charge et en décharge, les courbes tracées dans le plan $(e, \log p)$ sont linéaires et quasiment parallèles pour les trois essais. Ainsi, la compressibilité de l'argile remaniée à une pression donnée ne semble pas être affectée par la température ;
- les variations de l'indice des vides à 0,2 MPa, premier incrément de charge, sont dues à la température imposée pour la réalisation de l'essai. La différence entre les indices des vides, à tous les niveaux de pression de chargement et de déchargement mécanique, est le résultat du chauffage initial du matériau. La variation

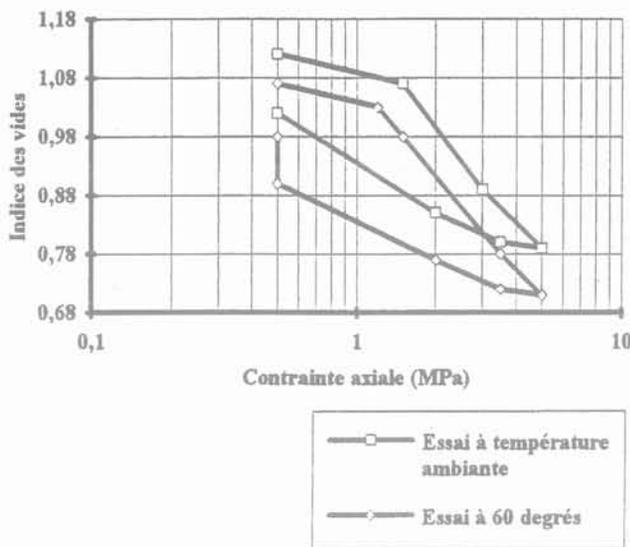


FIG. 13 Essais œdométriques isothermes sur une smectite préconsolidée à 1,5 MPa.
Isothermal oedometric tests on smectite preconsolidated at 1,5 MPa.

de l'indice des vides, en fonction de la température, est la conséquence de la densification du squelette solide avec l'augmentation de la température, pour supporter la contrainte effective;

– pour une pression de consolidation donnée, l'indice des vides diminue avec l'augmentation de la température.

A partir des essais œdométriques isothermes réalisés sur la kaolinite et la smectite, en plus des observations déjà faites suite à l'analyse des essais œdométriques sur l'argile du Bassin parisien à différentes températures (20, 40 et 80 degrés), nous notons que le changement de pente observé dans le plan $(e, \log p)$, en raison de la pression de préconsolidation des matériaux égale à 1,5 MPa, se produit pour une valeur de pression légèrement inférieure à la dite pression de préconsolidation (1,5 MPa), pour des essais réalisés à une température de 60 °C. Le chauffage initial du matériau a réduit son domaine élastique (du fait de la diminution de la pression de préconsolidation). Ce résultat est conforme à ce que Campanella et Mitchell (1968) ont trouvé suite à trois essais isothermes (25, 39 et 51 °C) de consolidation isotrope, sur une illite remaniée et saturée.

Les résultats de l'essai triaxial isotrope non drainé sur une kaolinite remaniée, saturée et normalement consolidée à 5 MPa, réalisé à une température de 40 °C et à la température ambiante sont présentés sur la figure 14:

– dans le plan (q, ϵ_v) , la courbe correspondant à l'essai réalisé à une température de 40 °C montre une plus

grande déformabilité du matériau, comparativement à l'essai à température ambiante. La rupture pour les essais à 40 °C et à température ambiante se produit pour environ la même valeur de déformation axiale, mais pour un déviateur de contraintes plus faible dans le cas de l'essai à 40 °C. La phase post-rupture se caractérise, pour l'essai à température ambiante, par une légère chute du déviateur et sa stabilisation à partir de 12 % de déformation axiale. En revanche, dans le cas de l'essai à 40 °C, on note une chute significative du déviateur, comparable à celle observée dans le cas des sols surconsolidés. Un début de stabilisation du déviateur est perceptible, à partir d'environ 12 % de déformation axiale. Le pic observé pour l'essai à 40 °C peut nous permettre de dire que la rupture s'est faite avec l'apparition de plans de cisaillement plus marqués que dans le cas de l'essai à température ambiante;

– dans les plans $(\Delta u, \epsilon_v)$ et (q, p') , le comportement mécanique global du matériau chauffé à 40 °C se trouve relativement confirmé. En effet, à part l'augmentation de la pression interstitielle malgré la rupture du matériau (phénomène observé lors des essais à température ambiante), les observations faites, suite à l'analyse de la variation du déviateur de contraintes en fonction des déformations axiales, sont confirmées dans les plans $(\Delta u, \epsilon_v)$ et (q, p') .

A la suite donc de l'analyse des résultats de l'essai triaxial réalisé à une température de 40 °C, et leur comparaison à ceux obtenus pour un essai à température ambiante, quelques conclusions ont été tirées sur l'influence de la température sur le comportement mécanique des argiles remaniées, saturées et normalement consolidées. Les conclusions présentées ici concernent les argiles non gonflantes, parmi lesquelles est classée la kaolinite testée. La température a donc pour effet:

- d'augmenter la ductibilité du matériau;
- de diminuer la résistance du matériau;
- de provoquer une surconsolidation du matériau, qui s'illustre notamment par un pic caractérisant une chute brutale de la résistance du matériau après sa rupture;
- de diminuer les caractéristiques mécaniques (kaolinite), deux de ses principaux paramètres mécaniques, obtenus à partir de deux essais triaxiaux réalisés à des températures différentes (à température ambiante et à 40 °C), sont présentés dans le tableau ci-après.

3.3.2.

Cas des essais avec cycle(s) thermique(s)

Les essais avec cycle(s) thermique(s) n'ont été réalisés que sur des chemins œdométriques. Ils permettent d'examiner pour une pression de chargement fixe, la variation des déformations volumiques d'un sol aussi bien à l'état normalement consolidé qu'à l'état surconsolidé. Les résultats des différents essais avec cycle(s) thermique(s) sont présentés, sur les figures 15, 16, 17, 18, 19 et 20.

Température de l'essai	Paramètre d'état critique à la rupture (M)	Angle de frottement interne drainé à la rupture (φ')
A température ambiante	0,53	14,00
A 40 °C	0,36	9,77

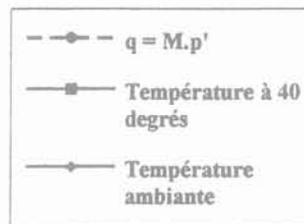
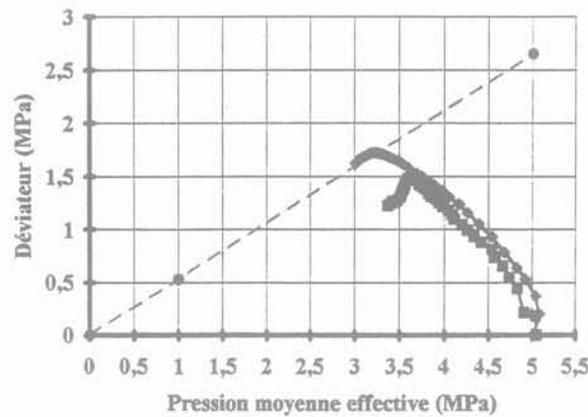
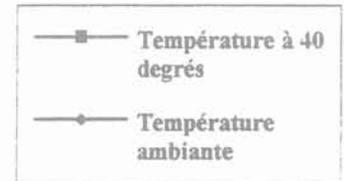
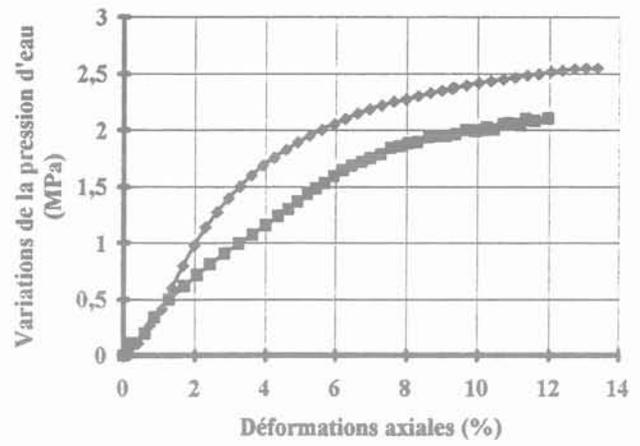
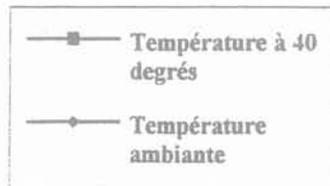
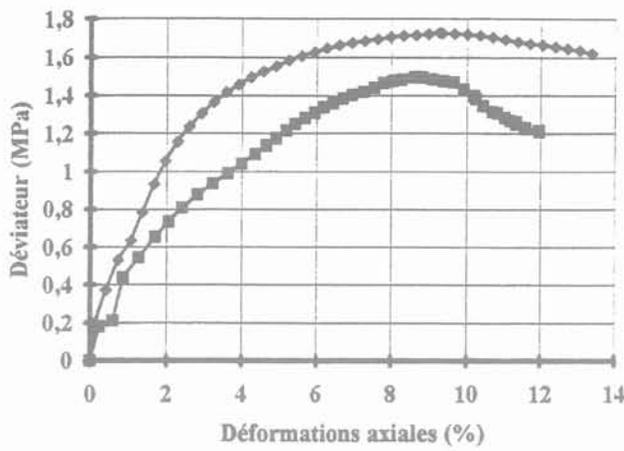


FIG.14 Essais triaxiaux isothermes non drainés sur une kaolinite normalement consolidée.
 Isothermal triaxial undrained tests on kaolinite normally consolidated.

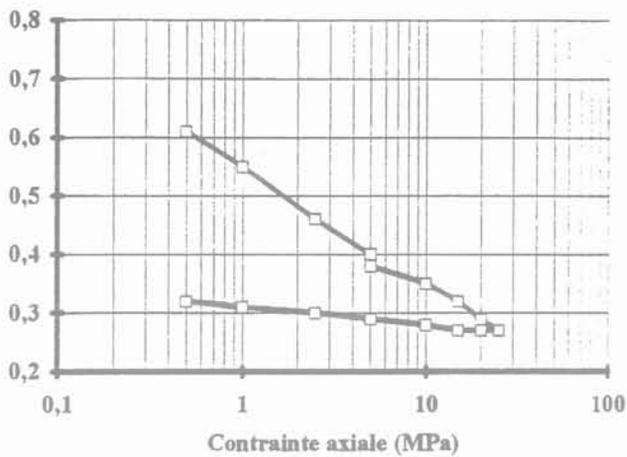
a) Cycles thermiques en normalement consolidé

Nous avons réalisé trois cycles thermiques, dans trois essais différents, sur respectivement les argiles smectite, de Boom et du Bassin parisien. L'analyse globale des résultats, montre dans le plan (e, log p), pour tous les essais, après le cycle thermique, une surconsolidation du matériau, qui se traduit par l'apparition d'un coude de préconsolidation (Fig. 15, 16 et 17). De plus, nous constatons que l'effet global du cycle de température, 20-80-20, est un tassement irréversible dans les trois essais considérés. En effet, dans le cas d'un matériau normalement consolidé, ce dernier, pour supporter le niveau de contrainte imposé qu'il subit pour la première fois suite à l'effet du cycle de température,

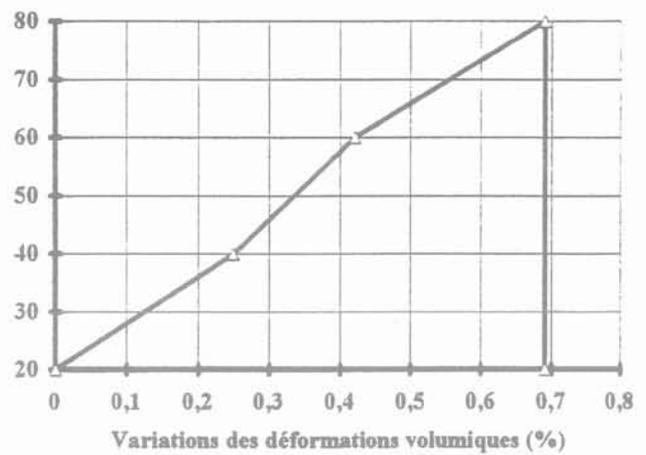
doit réorganiser sa structure solide en la densifiant, d'où le tassement observé.

b) Cycle(s) thermique(s) à l'état surconsolidé

Nous avons réalisé trois cycles thermiques à l'état surconsolidé sur deux argiles différentes que sont la smectite et l'argile du Bassin parisien. Pour les trois essais considérés, le cycle de température, avec un chauffage de 20 à 80 puis un refroidissement à 20 degrés, produit un gonflement irréversible du matériau (Fig. 18, 19 et 20). Pour expliquer ce phénomène nous nous sommes basés sur les résultats d'une étude menée par C.H. Pons et D. Tchoubar (1993) sur les effets d'un cycle de température de 7 jours à 200°C

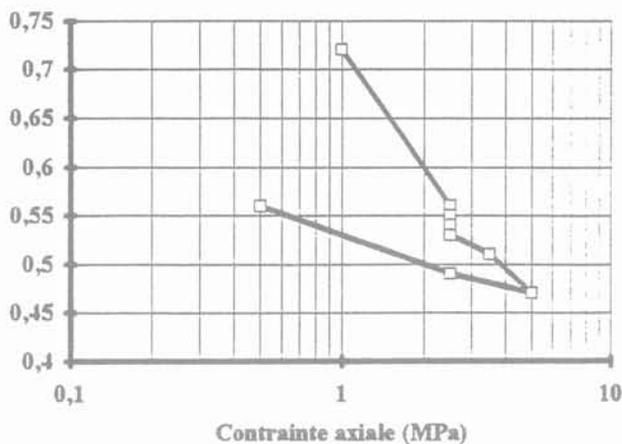


—□— "Essai oedométrique avec cycles thermiques à OCR = 1 et 5 sur une argile du bassin parisien"

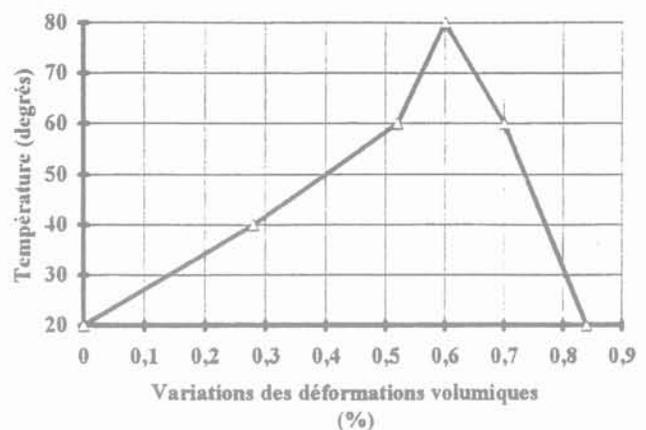


—△— Cycle thermique (20-80-20) à OCR = 1 sur une argile du bassin parisien

FIG. 15 Essai oedométrique avec cycle(s) de température – cas de l'argile du Bassin parisien remaniée, saturée. Oedometric test with cycle of temperature – case of Bassin parisien clay remoulded and saturated.



—□— Essai oedométrique avec cycle thermique à OCR = 1 sur l'argile de Boom

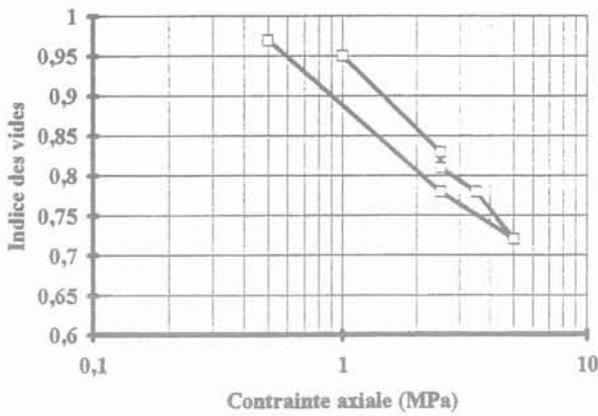


—△— Cycle thermique (20-80-20) à OCR = 1 sur l'argile de Boom

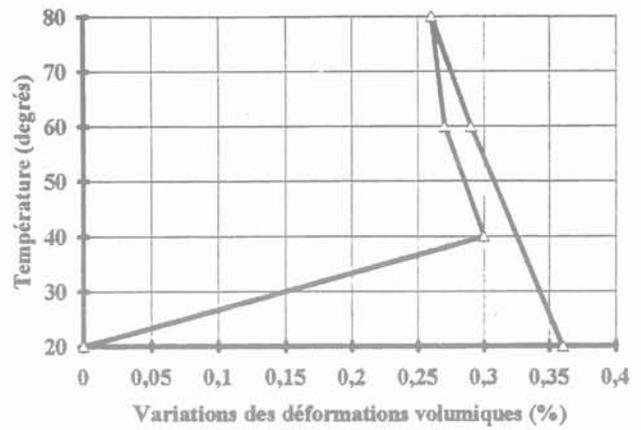
FIG. 16 Essai oedométrique avec cycle(s) de température – cas de l'argile de Boom remaniée, saturée. Oedometric test with cycle of temperature – case of Boom clay remoulded and saturated.

dans un réacteur étanche sur la structure interne d'une boue de montmorillonite, en utilisant la technique des rayons X aux petits angles, qui permettent l'étude de distances de corrélation jusqu'à 500 Å. Ces résultats, montrent que la distance moyenne interfoliaire ne varie pas, mais que le nombre de feuillet par particule diminue de façon significative, ce qui correspond à une division irréversible des particules de sol. En effet, cette division irréversible des particules, qui résulte de l'effet

du cycle de chauffage et de refroidissement du matériau, n'induit pas un réarrangement de la structure du sol afin de supporter la contrainte imposée dans le cas d'un matériau surconsolidé, car celui-ci a subi par le passé une contrainte supérieure à celle qui lui est imposée actuellement, d'où le gonflement observé, qui correspond à l'effet de la température seule. L'amplitude de ce gonflement est d'autant plus importante que le degré de surconsolidation est élevé.

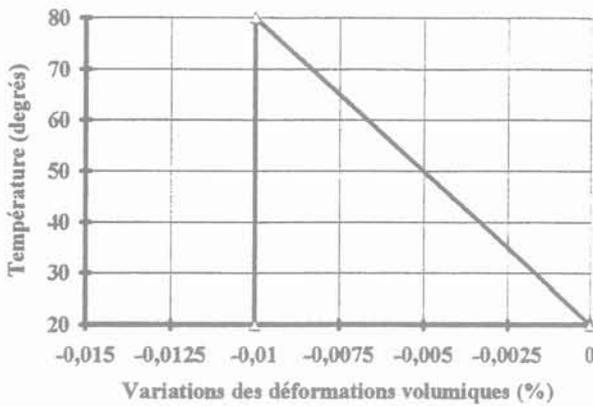


—□— Essai œdométrique avec cycle thermique à OCR = 1 sur une smectite

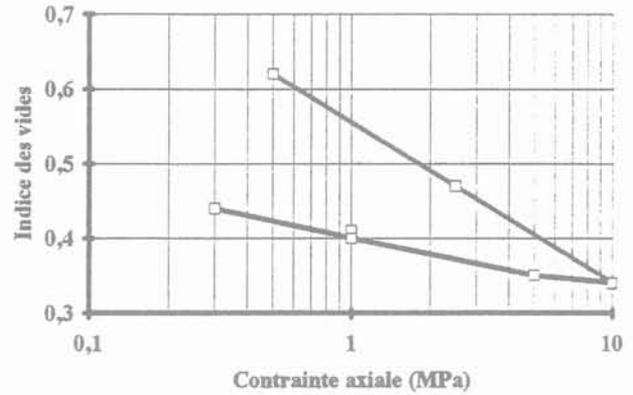


—□— Cycle thermique (20-80-20) à OCR = 1 sur une smectite

FIG. 17 Essai œdométrique avec cycle(s) de température - cas de la smectite remaniée, saturée. Oedometric test with cycle of temperature - case of smectite clay remoulded and saturated.



—□— Cycle thermique (20-80-20) à OCR = 5 sur une argile du bassin parisien



—□— Essai œdométrique avec cycle thermique à OCR = 10 sur une argile du bassin parisien

FIG. 18 Cycle thermique à un degré de surconsolidation (OCR) de 5 - cas de l'argile du Bassin parisien remaniée et saturée. Thermal cycle at OCR = 5 - case of Bassin parisien clay remoulded and saturated.

4

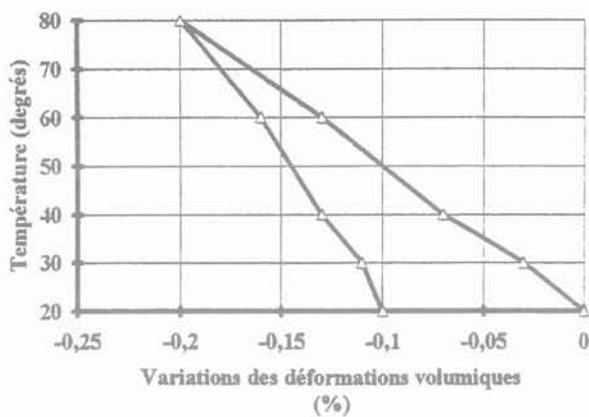
Étude du comportement hydro-mécanique des argiles partiellement saturées sur chemins œdométriques

4.1

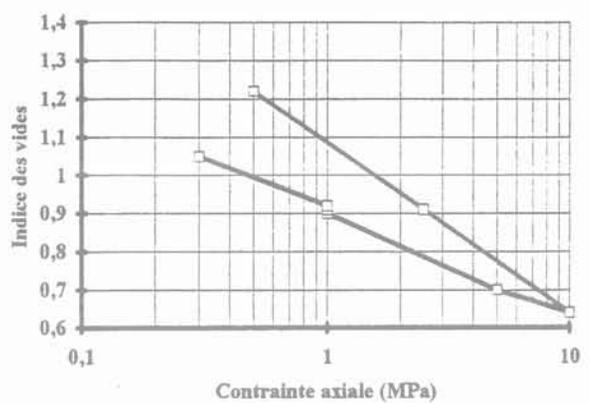
Essais de sorption-désorption sous fortes contraintes sur la smectite et la kaolinite

Pour déterminer le rôle de la préconsolidation initiale de l'argile fortement compactée sur un chemin de

« désorption-sorption », nous avons réalisé des essais sur une argile gonflante (smectite) et une argile non gonflante (kaolinite). L'appareillage utilisé est un œdomètre haute pression, pour lequel a été adapté un couvercle et un récipient contenant des solutions salines (Fig. 21). L'état hydrique, imposé à l'échantillon par la solution saline, nécessite la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air. Il en résulte que le temps d'équilibre avec un tel dispositif est très long. Il n'a donc été retenu dans cette étude qu'une humidité relative de 11 %. Les échantillons sont initialement saturés et fortement compactés à 5,2 et 0,5 MPa; ensuite, ils sont soumis à une humidité relative à 11 % correspondant à une succion de 300 MPa et, enfin, ils sont resaturés. Pendant le cycle hydrique, la contrainte mécanique extérieure est gardée constante.

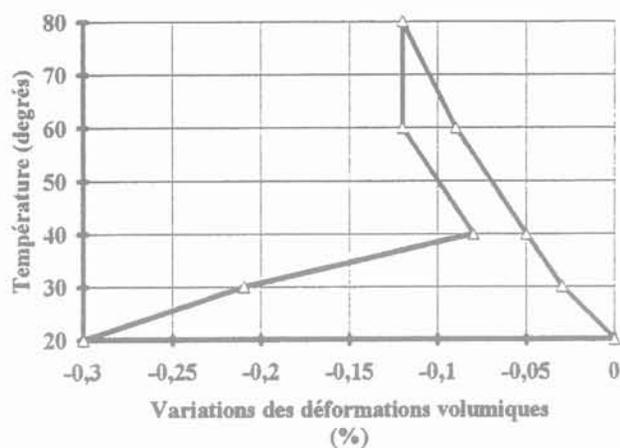


—△— Cycle thermique (20-80-20) à OCR = 10 sur une argile du bassin parisien



—□— Essai oedométrique avec cycle thermique à OCR = 10 sur une smectite

FIG. 19 Essai œdométrique avec cycle(s) de température – cas de l'argile du Bassin parisien remaniée, saturée. Thermal cycle at OCR = 10 – case of Bassin parisien clay remoulded and saturated.



—△— Cycle thermique (20-80-20) à OCR = 10 sur une smectite

FIG. 20 Essai œdométrique avec cycle(s) de température – cas de la smectite remaniée, saturée. Thermal cycle at OCR = 10 – case of smectite clay remoulded and saturated.

Les figures 22 et 23 présentent les résultats des essais réalisés. On constate les phénomènes suivants :

- l'existence de déformations irréversibles après un cycle de « désorption-sorption » pour les deux matériaux ;
- pendant la désorption, l'indice des vides diminue beaucoup plus dans le cas de la smectite que dans le cas de la kaolinite, en raison du caractère plus absorbant de la smectite par rapport à la kaolinite ;

- le domaine quasi saturé est assez large dans le cas de la smectite et, par conséquent, la pression de désaturation est très grande ;
- pendant la sorption, l'indice des vides augmente, et on observe un gonflement très important pour la smectite qui, en toute rigueur, devrait apparaître proche de la désaturation (dans le domaine quasi saturé).

4.2

Étude du phénomène d'effondrement (tassement plastique)

Le phénomène d'effondrement (collapse) est la diminution de volume, suite à l'humidification d'un sol dans certaines conditions de contraintes. Ce phénomène peut affecter des ouvrages tels que les remblais, les barrages en terre et les ouvrages souterrains lors de la saturation. Les essais d'effondrement réalisés par Broc *et al.* (1987) sur une smectite fortement compactée et partiellement saturée montrent que la saturation du matériau, effectuée sous une contrainte à un état normalement consolidé, induit les phénomènes suivants :

- tant que la pression de consolidation est inférieure à la pression de compactage, l'argile non saturée se comporte élastiquement ;
- un tassement irréversible se produit par un changement d'état hydrique sous une contrainte mécanique constante. L'amplitude de ce tassement irréversible augmente avec la pression de consolidation jusqu'au coude (consolidation hydrique), pour ensuite diminuer et s'annuler à la pression de gonflement (pas de variation du volume au cours du changement d'état hydrique) ;
- le matériau non saturé tasse et tend vers la courbe de consolidation du matériau saturé : la saturation provoque l'effacement de la mémoire du matériau.

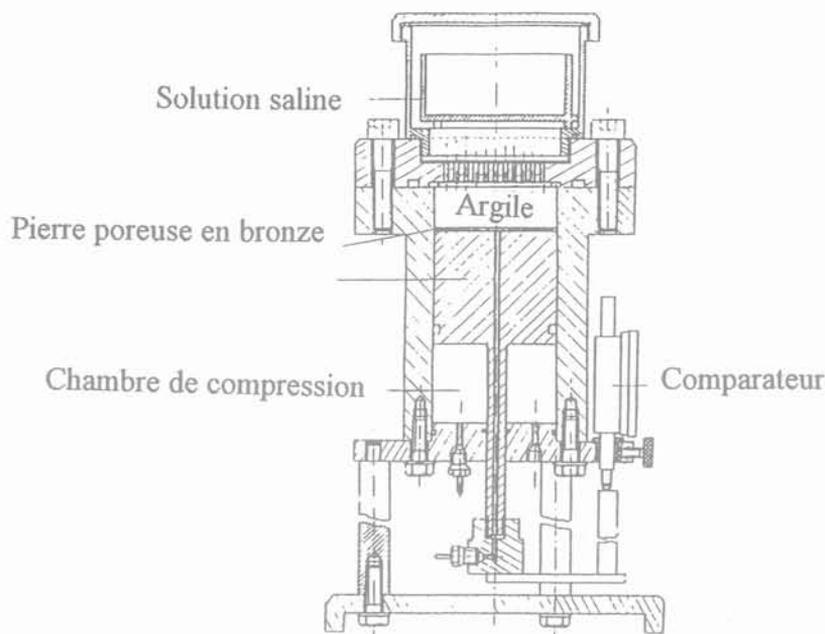


FIG. 21 Coupe schématique de la cellule œdométrique à haute pression à succion contrôlée.
Schematic representation of high pressure oedometric cell controlled suction.

4.3

Essai de tassement et gonflement plastique (chemin de « sorption-désorption »)

La figure 24 présente le comportement hydro-mécanique d'une smectite sur un chemin œdométrique avec deux cycles hydriques de « sorption-désorption ». L'essai a été réalisé sur un échantillon d'argile sous forme de poudre. Celle-ci a été stabilisée hydriquement dans la dessiccation à une humidité relative de 76 %. L'échantillon a été compacté par paliers successifs jusqu'à 5 MPa à succion constante. Ensuite, il est saturé et désaturé (à une humidité relative de « sorption-désorption »). Après le cycle hydrique, l'échantillon a été consolidé jusqu'à 20 MPa, et déchargé à 0,5 MPa à succion constante ($h_r = 11\%$). Ensuite, il est saturé et désaturé sous une contrainte mécanique constante de 0,5 MPa (deuxième cycle hydrique), et enfin, l'échantillon a été déchargé complètement sous une humidité constante ($h_r = 11\%$).

Au cours du premier cycle hydrique à l'état normalement consolidé, on observe un tassement correspondant à l'effondrement du sol, suivi d'un deuxième tassement dû à la désorption. Le deuxième cycle hydrique à l'état surconsolidé, montre un gonflement plastique de l'argile. Par ailleurs, on constate une surconsolidation de l'argile après le premier cycle hydrique.

5

Conclusion

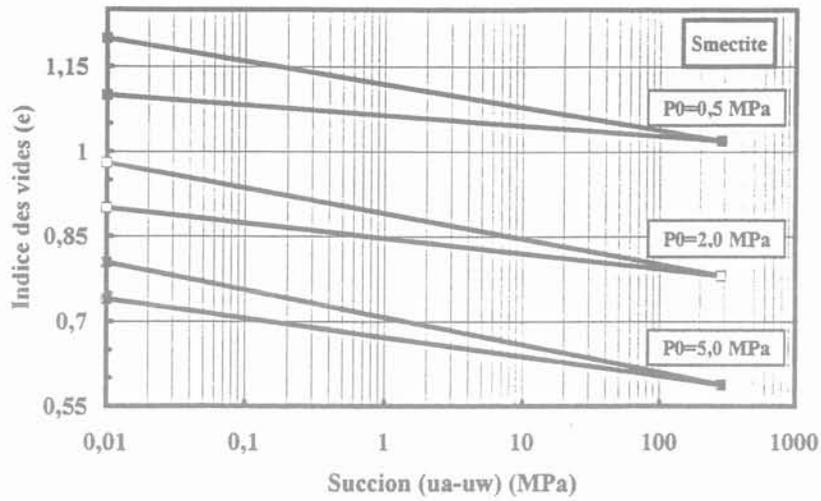
L'étude de la compressibilité œdométrique menée sur quatre types d'argiles saturées et remaniées montre que :

- quel que soit le type d'argile gonflante ou non, le comportement en décharge est élastoplastique ;
- en décharge le comportement est élastique linéaire pour les argiles non gonflantes (argile du Bassin parisien et kaolinite). En revanche, les argiles gonflantes (Boom et smectite), présentent un comportement élastoplastique ;
- la pente de décharge augmente avec la pression de consolidation, et la boucle d'hystérésis est d'autant plus large que l'argile est gonflante.

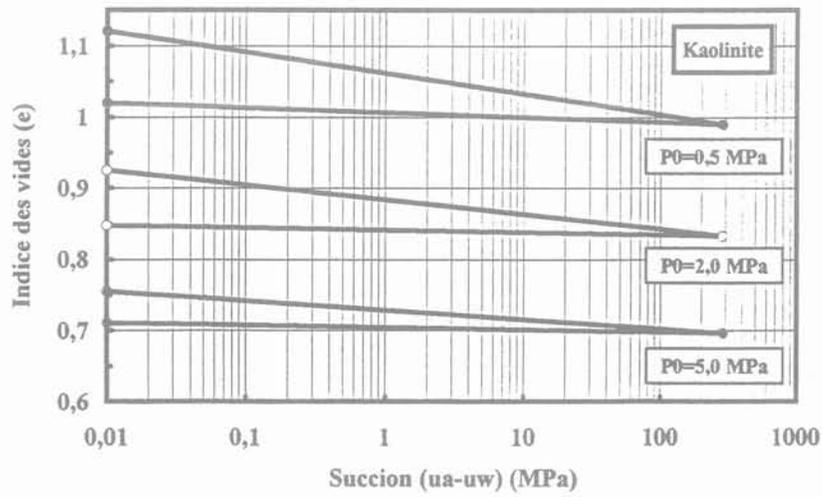
L'analyse des résultats des essais triaxiaux, non drainés, réalisés sur la kaolinite et la smectite remaniées et saturées à différentes pressions de confinements et à différents degrés de surconsolidation, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- la surconsolidation d'un matériau a d'autant moins d'influence sur le comportement mécanique que l'argile est plus plastique et gonflante. En effet, contrairement à la kaolinite qui est une argile peu plastique et non gonflante, qui présente une chute brutale du déviateur après la rupture, la smectite présente un pic beaucoup plus atténué et presque confondu avec le palier de plasticité parfaite. Par conséquent, le comportement de la smectite à l'état surconsolidé peut être assimilé à celui d'une argile normalement consolidée. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Rousset (1988) (essais réalisés sur une argile plastique (Boom) et sur une argile raide (Coug));
- à l'état normalement consolidé, la faible plasticité de l'argile favorise l'apparition de plans de cisaillement à l'exemple de la kaolinite. La résistance mécanique du matériau augmente avec la pression de confinement ;
- les fortes pressions de consolidation semblent ne pas remettre en cause le concept d'état critique.

L'étude expérimentale sur le comportement thermo-mécanique que nous avons menée sur quatre argiles saturées et remaniées, nous a permis de mettre en évidence certains des principaux phénomènes liés à l'influence de la température sur le comportement

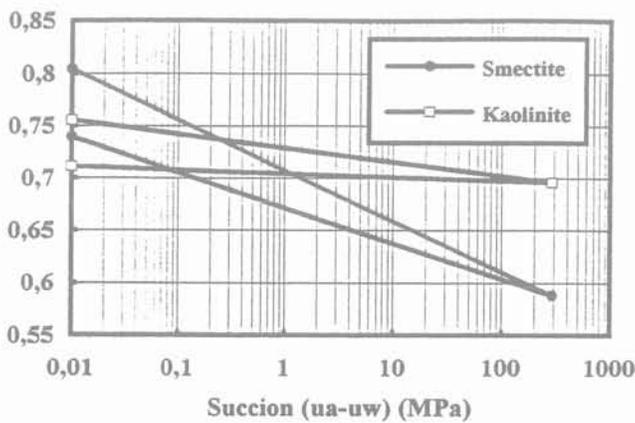


(a)

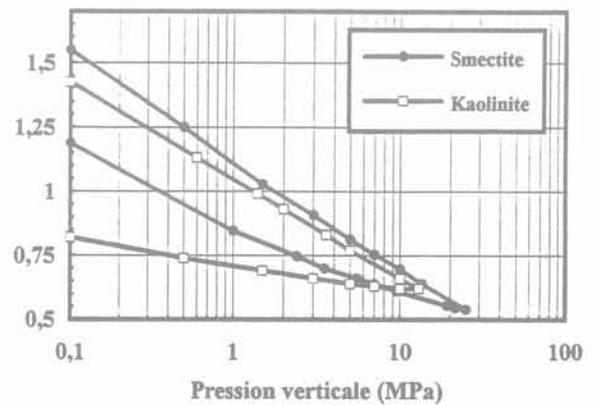


(b)

FIG. 22 Variation de l'indice des vides avec la succion pendant le cycle hydrique de « désorption-sorption » à différentes pressions de consolidation sur : (a) smectite, (b) kaolinite.
Void ratio variation with suction during hydric cycle of « desorption-sorption » at several consolidation pressure on (a) smectite (b) kaolinite.



(a)



(b)

FIG. 23 Comparaison entre : (a) chemin hydrique de « désorption-sorption » (sous une pression de consolidation de 5 MPa), et (b) chemin mécanique (œdométrique), sur une smectite et une kaolinite.
Comparison between : (a) hydric path of « desorption-sorption » under consolidation pressure of 5 MPa, (b) mechanical path (oedometric) on smectite and kaolinite.

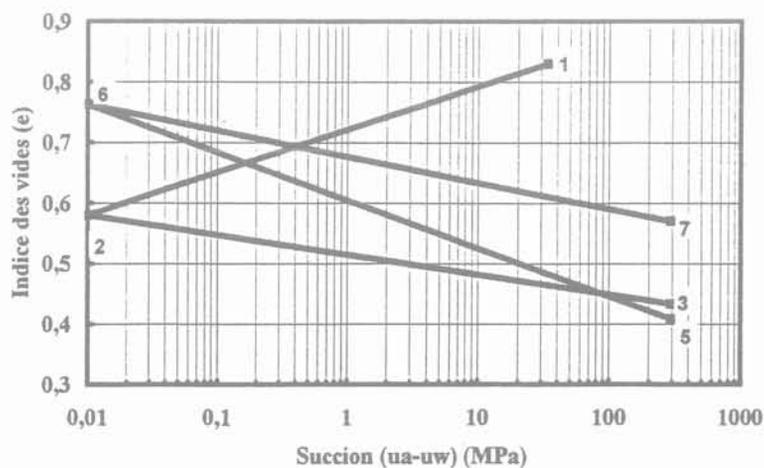
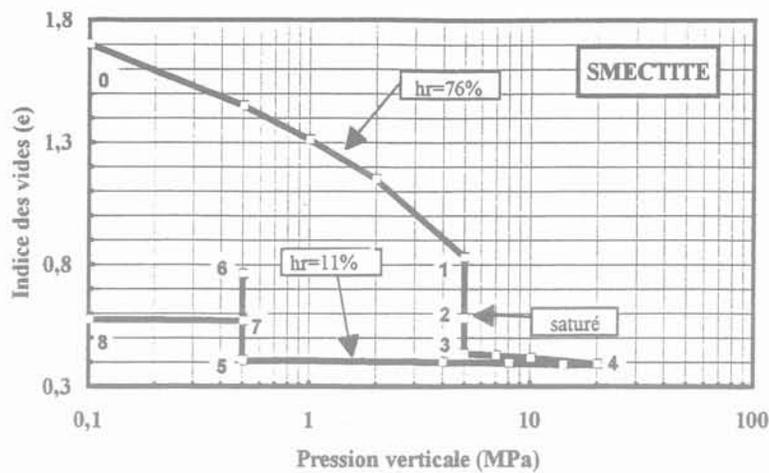


FIG. 24 Variation de l'indice des vides avec la contrainte verticale et la succion pendant un essai œdométrique avec deux cycles hydriques de « sorption-désorption » sur une smectite à l'état initial de poudre.
Variation of void ratio with vertical stress and suction during oedometric test with hydric cycle « sorption-desorption » on smectite in initial state of powder.

mécanique des argiles. Nous pouvons les résumer dans ce qui suit :

- le chauffage d'un matériau argileux préconsolidé provoque une diminution de son domaine élastique ;
- la température induit une légère surconsolidation du matériau ;
- la résistance mécanique des argiles diminue avec l'augmentation de la température ;
- la ductilité des argiles augmente avec l'élévation de la température ;
- à l'état normalement consolidé, un cycle thermique induit un écoulement positif du matériau. Celui-ci est d'autant plus important que l'argile est de nature gonflante (smectite) ;
- à l'état surconsolidé, un cycle thermique induit un écoulement négatif du matériau. Son ampleur est d'autant plus importante que l'argile est gonflante.

L'étude de la compressibilité œdométrique des argiles remaniées, partiellement saturées montre que :

- la saturation du matériau pour des états de contraintes normalement consolidés produit un tassement irréversible. En effet, la structure se réorganise en se densifiant, pour pouvoir supporter la contrainte mécanique qui lui est imposée. Sa désaturation produit un tassement réversible ;
- la sorption du matériau argileux à l'état surconsolidé engendre un gonflement plastique. Sa désorption conduit à un tassement réversible. L'amplitude du gonflement est d'autant plus importante que le degré de surconsolidation est élevé. Par ailleurs, on note que les déformations volumiques produites pendant la désorption et la sorption de l'argile sont plus importantes dans le cas d'une argile gonflante (smectite) que dans le cas d'une argile non gonflante (kaolinite).

- Baldi G., Hueckel T., Pellegrini R. – Thermal volume changes of the mineral-water system in low porosity clay soils, *Can. Geot. Journal*, 25, p.807-825, 1988.
- Baldi G., Hueckel T., Peano A., Pellegrini R. – Development in modelling of the thermo-hydro-geomechanical behaviour of Boom Clay and clay based buffer materials, Final report for CEC (FI1W/0150 A), ISMES, Bergamo, Italy, 1990.
- Belanteur N. – Contribution à l'étude des comportements mécanique et thermomécanique des argiles remaniées, saturées et fortement consolidées, Thèse de doctorat, Univ. d'Orléans, 1995.
- Börgesson L., Karnland O., Johannesson L.E. – Modelling of the physical behaviour of clay barriers close to water saturation, International workshop on Thermo-Mechanics of clay and clay barriers, Bergamo, Italy, 1993.
- Broc D., Plas F., Robinet J.-C. – Mechanical properties of swelling clays, *Material Research Society*, 127, p. 669-676, 1987.
- Campanella R.G., Mitchell J.K. – Influence of temperature variations on soil behaviour, *ASCE Journ. of the Soil Mech. and Found. Div.*, 94 (SM3), p.709-734, 1968.
- Demars K.R., Charles R.D. – Soil volume changes induced by temperature cycling, *Can. Geot. Journal*, 19, p. 188-194, 1982.
- Lahlou R. – Étude du comportement d'une argile gonflante et développement d'une cellule triaxiale autonome. Application au stockage des déchets radioactifs, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 1990.
- Lingnau B.E., Yarechewski D., Graham J., Tanaka N., Gray M.N. – Stress-strain properties of sand bentonite buffer at elevated temperatures, International workshop on Thermo-Mechanics of clay and clay barriers, Bergamo, Italy, 1993.
- Pakzad M. – Modélisation du comportement hydro-mécanique des argiles gonflantes à faible porosité, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 1995.
- Robinet J.-C., Al-Mukhtar M., Belanteur N., Rahbaoui A. – Comportement thermo-mécanique des argiles fortement compactées, Colloque International « René Houpert » (Structure et mécanique des géomatériaux), Nancy, 1992.
- Rousset G. – Comportement mécanique des argiles profondes, application au stockage de déchets radioactifs, Thèse de doctorat, ENPC, Paris, 1988.
- Tacherifet S. – Modélisation du comportement mécanique des argiles profondes gonflantes, application aux ouvrages de stockages, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 1995.