

Étude de l'influence d'un polluant organique sur les caractéristiques géotechniques d'un sol argileux

F. CASSAGRANDE
L. LANCELOT
I. SHAHROUR

Laboratoire de Mécanique
de Lille - URA 1441
École Centrale de Lille,
BP 48,
59651 Villeneuve-d'Ascq
Cedex

Résumé

On présente une étude expérimentale en laboratoire portant sur l'évolution du comportement de mélanges sable/argile (kaolinite) dans des proportions variables, quand le liquide interstitiel passe de l'eau à un hydrocarbure non miscible à l'eau (pétrole). L'effet du fluide interstitiel a été examiné sur plusieurs paramètres : la conductivité hydraulique, la compressibilité et la résistance mécanique mesurée lors d'essais de cisaillement direct. Les mesures de conductivité hydraulique, effectuées lors d'essais au consolidomètre, montrent que celle-ci chute fortement lors de la transition eau/pétrole, pour des échantillons d'argile pure, mais qu'elle est peu affectée par cette transition pour les mélanges sableux, ce qui pourrait s'expliquer par l'existence d'une macroporosité pour ces compositions. La compressibilité de l'argile pure mesurée à l'œdomètre est environ quatre fois plus grande pour des échantillons saturés au pétrole que pour des échantillons saturés à l'eau. Enfin des essais de cisaillement non drainés à la boîte ont permis d'établir qu'une augmentation sensible de la résistance au cisaillement à court terme des mélanges sable/argile testés intervenait quand les sols étaient saturés au pétrole, par rapport aux mêmes sols à l'eau. Une étude plus approfondie faisant appel notamment à des essais triaxiaux devrait permettre de préciser quantitativement cette tendance.

Influence of an organic contaminant on geotechnical properties of clayey soils

Abstract

The evolution of the behaviour of a sand/clay (kaolinite) mix, when the pore fluid is changed from water to petrol, is evaluated in laboratory tests. The following soil properties are studied: hydraulic conductivity, compressibility and shear strength. Hydraulic conductivity of pure clay, as measured with a consolidometer, drops drastically when permeating fluid is switched from water to petrol, whereas no change in hydraulic conductivity is noticed for sandy clays, for which pore fluid probably flows in macropores. Compressibility of clay saturated with petrol is four times as much that of clay saturated with water. Lastly, short term shear strength as measured in shear box tests is globally increased for all soils compositions (except pure sand) when saturating fluid is changed from water to petrol. However this trend should be more precisely quantified in triaxial tests.

Introduction

Il y a globalement deux origines possibles à la pollution des sols : d'une part les dépôts de déchets effectués sans précautions suffisantes, d'autre part des accidents (routiers, ferroviaires...) engendrant des déversements localisés de substances polluantes. Le géotechnicien est alors confronté à deux types de problèmes. Il doit d'abord étudier la perméabilité du sol, et son évolution éventuelle avec l'apport de polluants, pour estimer le risque de migration de ces polluants dans les eaux souterraines. Mais dans certains cas il doit aussi se poser le problème de l'effet des polluants sur la résistance mécanique du massif de sol concerné, pour déterminer si la stabilité de celui-ci est menacée.

Notre étude porte sur la comparaison entre le comportement d'un sol argileux saturé en eau, et le même sol saturé en pétrole (effet du déversement accidentel d'un chargement d'hydrocarbures, par exemple). L'effet du fluide interstitiel (eau ou pétrole) a été examiné sur la perméabilité du sol à ce fluide, la compressibilité mesurée lors d'essais œdométriques et la résistance mécanique du sol, mesurée lors d'essais de cisaillement direct.

Mesures de perméabilité

Pour un échantillon de section A soumis à un écoulement avec un débit Q sous un gradient hydraulique i , la conductivité hydraulique ou perméabilité k est définie par la loi de Darcy :

$$\frac{Q}{A} = k \cdot i$$

Le coefficient k dépend donc du fluide et du sol considéré. De plus, lors de la mesure de la perméabilité en laboratoire, on sait que, pour un même couple sol-fluide, les valeurs de k mesurées dépendent dans une

large mesure du type d'appareillage utilisé. Par exemple, si le passage du fluide induit un retrait dans l'échantillon, le perméamètre à parois rigides fournira une valeur de k beaucoup plus élevée que celles obtenues avec le perméamètre à parois flexibles ou le consolidomètre, à cause du passage préférentiel du fluide le long des parois de la cellule (Zimmie, 1981). Le consolidomètre est considéré comme étant l'appareil traduisant le mieux les conditions sur site (Mitchell et Madsen, 1987).

La perméabilité de mélanges argile/sable (kaolinite P300 et sable de Hostun RF) a donc été mesurée dans des essais au consolidomètre (Fig. 1). On a fabriqué des échantillons, saturés en eau ou en pétrole, de deux compositions : kaolinite pure et mélange kaolinite/sable dans les proportions 30/70 (en poids). Les échantillons sont préparés en constituant une boue à partir du sol sec et du fluide étudiés, malaxés dans un rapport poids de liquide/poids de sol sec de 0,8 environ. Cette boue est mise à décanter pendant 24 heures. On remarque que pour une même masse de liquide utilisée, l'eau se trouve en excès et un certain volume d'eau peut être prélevé dans le récipient de décantation, alors que le pétrole semble totalement absorbé, le mélange obtenu semblant plus consistant qu'avec l'eau. Les échantillons sont ensuite mis à consolider directement dans la cellule de mesure, et la contrainte sous laquelle ils ont été consolidés (0,1 MPa) est maintenue pendant toute l'expérience. On pratique des essais de perméabilité à charge constante, et un gradient hydraulique $i = H/h$ de l'ordre de 100 est utilisé afin de réduire la durée de l'expérience (Fig. 1).

Les échantillons des deux compositions étudiées, saturés en eau (essais 1 et 2), sont d'abord soumis à un écoulement d'eau, et on mesure la perméabilité à l'eau une fois le régime permanent établi. Puis l'échantillon, toujours saturé en eau, est soumis à un écoulement de pétrole. On constate alors, pour l'échantillon d'argile pure, une baisse très importante du débit d'écoulement – et donc de la perméabilité. Celle-ci n'a d'ailleurs pu être mesurée, le pétrole n'ayant toujours pas traversé l'échantillon (3 cm) au bout de 4 mois. Les résultats obtenus apparaissent dans le tableau I.

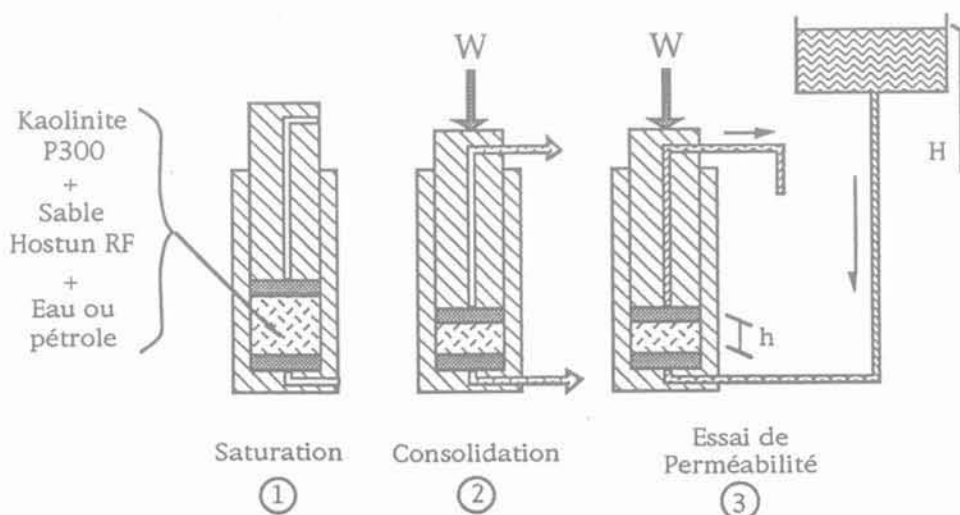


FIG. 1 Dispositif expérimental et mode opératoire pour les essais de perméabilité.

Test setup and experimental procedure for hydraulic conductivity.

TABEAU I Perméabilité à l'eau et au pétrole de mélanges argile/sable.
Water and petroleum permeability of clayey soil.

Essai	Proportion Argile/Sable	Liquide de saturation	Liquide perméant	Conductivité hydraulique (m/s)
1	100/0	eau	eau	$2,6 \cdot 10^{-9}$
	100/0	eau	pétrole	non mesuré (*)
2	30/70	eau	eau	$6 \cdot 10^{-11}$
	30/70	eau	pétrole	$5,8 \cdot 10^{-11}$
3	100/0	pétrole	pétrole	$1,2 \cdot 10^{-8}$

(*) Le pétrole ne traverse pas l'échantillon après 4 mois.

On remarque donc qu'un échantillon de kaolinite pure initialement saturé en eau est très peu perméable au pétrole, ce qui peut s'expliquer par la non-miscibilité de ces deux liquides. En effet, il a été observé que les produits organiques faiblement solubles dans l'eau s'écoulent plutôt dans les macropores du sol, quand ils existent; ils ne déplacent pratiquement pas l'eau présente dans la matrice argileuse (Mitchell et Madsen, 1987). En revanche, on a mesuré (essai 3) sur un échantillon de kaolinite pure initialement saturé en pétrole une perméabilité au pétrole plus forte que la perméabilité à l'eau d'un échantillon de kaolinite initialement saturé en eau. On a par ailleurs pu noter après l'essai une forte fissuration des échantillons saturés au pétrole. Ceci va dans le sens des observations de Anderson *et al.* (1985), qui ont mesuré dans un perméamètre à parois rigides une multiplication par un facteur allant de 100 à 1 000 de la perméabilité d'une argile à l'heptane par rapport à sa perméabilité à l'eau. Les hydrocarbures induisent en effet un retrait et une fissuration de l'échantillon, générant donc une macroporosité et un accroissement de plusieurs ordres de grandeur de la perméabilité. Dans le cas d'un sol testé en laboratoire dans un consolidomètre (comme ici) ou un perméamètre à paroi flexible (voir par exemple Acar *et al.*, 1985), où la fissuration est gênée sous l'effet de la contrainte appliquée, on observe bien une diminution de la perméabilité quand le liquide perméant passe de l'eau à un hydrocarbure pur non miscible à l'eau (Mitchell et Madsen, 1987).

Par ailleurs, il faut noter que la perméabilité à l'eau diminue assez fortement quand le pourcentage en sable augmente. Ceci peut s'expliquer par le fait que, tant que tous les vides entourant les grains de sable sont occupés par l'argile, la perméabilité du mélange est conditionnée par la perméabilité de la matrice argileuse et par le volume offert à l'écoulement, qui diminue quand la teneur en sable augmente. La tendance s'inverse quand la phase argileuse devient discontinue (faible teneur en argile), l'écoulement se faisant alors dans les vides existant dans cette phase, entre les grains de sable. La perméabilité augmente bien alors quand la teneur en argile diminue. La perméabilité dépend donc de l'arrangement respectif des grains de sable, de la phase argileuse et des vides. D'ailleurs, on remarque que la perméabilité au pétrole d'un échantillon comportant une forte proportion de sable et initialement saturé en eau, est voisine de sa perméabilité à l'eau. C'est en général ce qui est observé pour un sol

présentant une macroporosité (Mitchell et Madsen, 1987). On pourrait donc supposer l'existence de vides dans la phase argileuse entre les grains de sable, au sein desquels l'écoulement des liquides, eau ou pétrole, aurait lieu. La perméabilité à l'eau plus faible pour le mélange argile/sable que pour l'argile pure s'expliquerait peut-être alors par un volume disponible à l'écoulement plus faible dans le cas du mélange. Une étude plus approfondie serait nécessaire pour clarifier l'influence des paramètres composition et mise en place du sol (mode de compactage) sur sa perméabilité.

Ainsi, en pratique, pour la kaolinite pure si la fissuration est empêchée (confinement important), la perméabilité décroît beaucoup avec le passage de l'hydrocarbure non dilué. La progression de celui-ci à travers la barrière d'argile est considérablement freinée. En revanche, Mitchell et Madsen (1987) rapportent que la perméabilité n'est pas affectée par la plupart des produits organiques dilués dans l'eau (dans la limite de leur solubilité). Enfin, en l'absence de confinement suffisant, la fissuration causée par l'arrivée de pétrole pur provoque une forte augmentation de la perméabilité et compromet donc l'efficacité de la barrière argileuse. Pour un mélange sable/argile, si la phase argileuse est continue elle dicte le comportement du mélange; sinon l'écoulement se fait dans les vides existant dans cette phase, et la perméabilité n'est pas affectée par le passage du pétrole.

3

Essais œdométriques

La survenue de tassements importants et localisés (au droit d'un déversement accidentel, par exemple) peut être dommageable à la fonctionnalité ou à la stabilité d'une barrière ouvragée ou d'un talus. Or, lors de la préparation des échantillons pour les essais de perméabilité, il a été constaté que ceux saturés au pétrole tassaient beaucoup plus lors de la phase de consolidation (*cf.* Fig. 1). Pour quantifier cette observation, on a effectué des essais œdométriques sur la kaolinite P300 saturée à l'eau et au pétrole.

Comme pour les essais de perméabilité, une boue est constituée à partir de kaolinite séchée et d'eau ou de pétrole en excès. Après décantation et prélèvement du liquide surnageant, on place le sol dans un moule Proctor et on le laisse se consolider sous une charge

faible (environ 10 kPa). On prélève et on taille l'échantillon aux dimensions de la bague de l'œdomètre (diamètre 50 mm, hauteur 20 mm). Un cycle charge-décharge-recharge est effectué à 25 kPa pour atténuer les effets de la préparation de l'échantillon. L'essai œdométrique proprement dit est alors conduit par paliers de 24 heures, de 25 à 400 kPa, puis en effectuant un palier de décharge de 400 à 500 kPa, également de 24 heures. Les courbes obtenues sont représentées en figure 2. Les indices de compression C_c et de gonflement C_s pour l'argile saturée en eau et en pétrole sont donnés dans le tableau II.

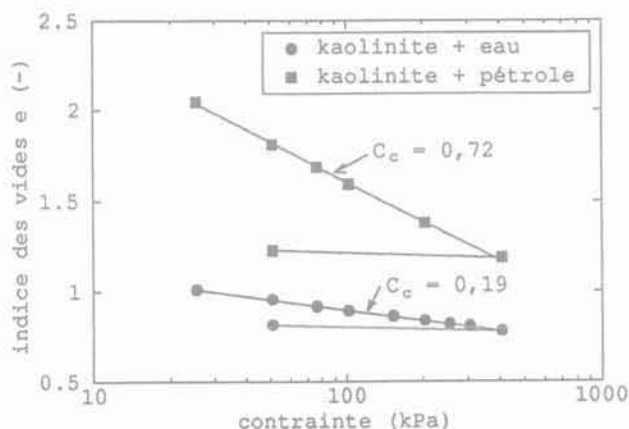


FIG. 2 Essais œdométriques sur la kaolinite saturée à l'eau et au pétrole. Oedometric tests on clay saturated with water and petrol.

TABLEAU II Indice de compression et de gonflement pour l'argile saturée en eau et en pétrole. Compression and swelling indices for water-saturated and petrol-saturated clay.

	Saturation en eau	Saturation en pétrole
C_c	0,19	0,72
C_s	0,083	0,043

On constate une forte augmentation de la compressibilité (C_c passant de 0,19 à 0,72) quand le liquide de saturation passe de l'eau au pétrole. Cependant, les résultats des essais de perméabilité avaient montré qu'un hydrocarbure non miscible à l'eau ne pouvait pas remplacer totalement l'eau de la matrice argileuse d'un sol initialement saturé en eau. Le tassement survenant sous une zone de déversement d'un hydrocarbure pur a donc toutes chances d'être beaucoup moins important que ne le laisseraient supposer les valeurs de compressibilité obtenues ci-dessus. Il serait d'ailleurs possible de suivre le tassement de l'échantillon lors de l'essai de perméabilité au consolidomètre, ce qui n'a pas été fait dans notre étude.

4

Essais de cisaillement direct

Différents mélanges argile/sable (kaolinite P300 et sable de Hostun RF) ont été testés : 100/0, 30/70, 70/30, 0/100 (en pourcentage en poids). Les échantillons sont

préparés en constituant une boue à partir du sol sec et du fluide étudiés dans un rapport poids de liquide/poids de sol sec de 0,8 environ. Cette boue, après décantation pendant 24 heures et prélèvement du liquide surnageant, est mise à consolider sous 1 bar pendant 48 heures, directement dans la boîte de cisaillement. L'échantillon après consolidation a une section de 6 cm x 6 cm et une épaisseur de 1,5 cm environ.

Les échantillons sont cisailés, à contrainte normale constante (0,1 ou 0,2 MPa) et à déplacement tangentiel imposé (0,4 mm/mm). La contrainte tangentielle et le déplacement normal sont enregistrés en fonction du déplacement tangentiel. La contrainte tangentielle atteinte en fin d'essai (7 à 8 mm de déplacement tangentiel) est considérée comme contrainte de rupture.

On a représenté sur les figures 3 à 6 les contraintes à la rupture dans le plan de Mohr pour les différents mélanges kaolinite/sable, pour une saturation à l'eau ou au pétrole.

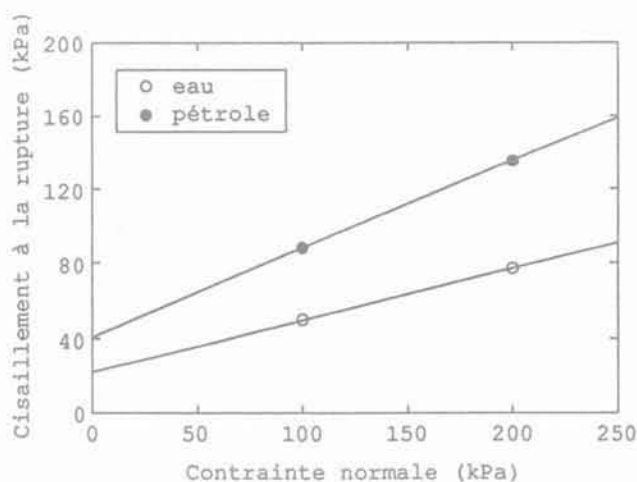


FIG. 3 Contraintes de rupture pour les échantillons d'argile pure saturés à l'eau ou au pétrole. Failure stresses for water or petrol saturated clay samples.

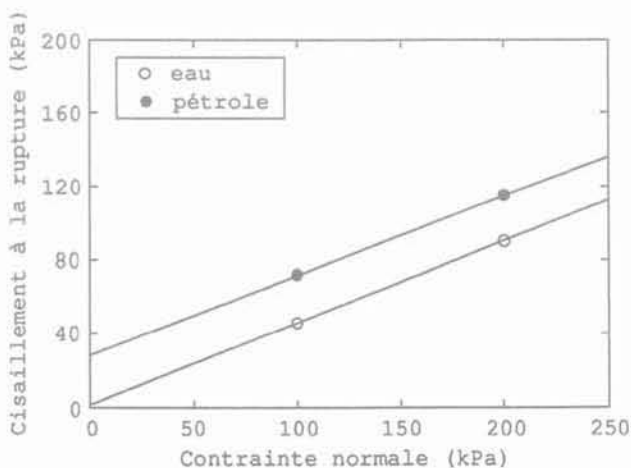


FIG. 4 Contraintes de rupture pour les échantillons argile/sable 70/30 saturés à l'eau ou au pétrole. Failure stresses for water or petrol saturated clay/sand 70/30 samples.

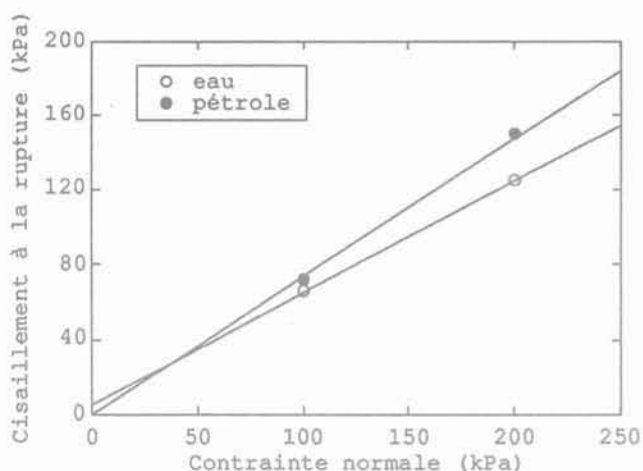


FIG. 5 Contraintes de rupture pour les échantillons argile/sable 30/70 saturés à l'eau ou au pétrole.
Failure stresses for water or petrol saturated clay/sand 30/70 samples.

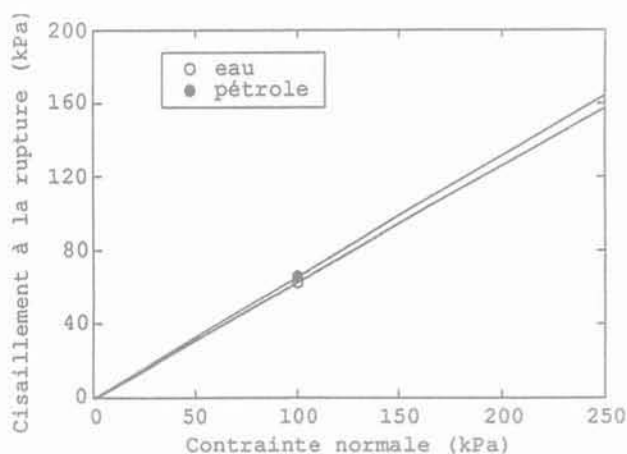


FIG. 6 Contraintes de rupture pour les échantillons de sable saturés à l'eau ou au pétrole.
Failure stresses for water or petrol saturated sand samples.

On notera que les conditions expérimentales choisies auraient dû mener, pour les sols fortement argileux, à des résultats de type essais non consolidés non drainés, donc à un angle de frottement faible et une cohésion élevée. Une mauvaise maîtrise des conditions de drainage est peut être à l'origine des résultats observés. En effet, on peut supposer que la formation de zone de fissuration au voisinage du plan de cisaillement imposé accélère le drainage en cours d'essai. Par ailleurs, les échantillons argileux saturés en pétrole présentent après consolidation un aspect relativement « friable », des blocs se séparant assez facilement suivant des surfaces de clivage sensiblement perpendiculaires à la direction de la contrainte de consolidation, ce qui expliquerait en partie les angles de frottement globalement plus élevés observés pour les échantillons saturés en pétrole. La complexité des phénomènes mis en jeu demanderait que des essais soient effectués, où les conditions expérimentales soient mieux maîtrisées (comme à l'appareillage triaxial).

Toutefois, on constate qualitativement une hausse sensible des caractéristiques mécaniques de tous les sols argileux saturés en pétrole, par rapport aux mêmes sols

saturés en eau. Pour le sable propre, le liquide interstitiel ne semble pas avoir d'influence notable sur l'angle de frottement à la rupture. Par contre, l'influence de la nature du liquide de saturation sur les propriétés mécaniques des sols argileux étudiés montre la prépondérance des interactions d'ordre physico-chimique entre le fluide interstitiel et les particules d'argile dans ce type de sols.

En pratique, il semble qu'une venue massive de pétrole dans un massif de sol présentant une composition analogue à celles que nous avons testées ne représente pas une menace pour sa stabilité. En tout état de cause, on a vu que le fait de considérer un sol totalement saturé en pétrole constituait un cas limite jamais observable en pratique, un hydrocarbure non miscible à l'eau ne pouvant remplacer totalement l'eau de la matrice argileuse du sol. Il est probable que la résistance mécanique du sol sera peu affectée par la présence de pétrole.

5

Conclusion

L'effet de la composition du sol et de la nature du liquide interstitiel a été étudié sur la perméabilité de mélanges kaolinite/sable. Le passage eau/pétrole provoque une forte diminution de la perméabilité de la kaolinite pure, mais ne change pas la perméabilité d'un mélange comportant 70 % de sable. Pour ce mélange comportant une forte proportion de sable, l'existence de discontinuités dans la phase argileuse pourrait expliquer que sa perméabilité, due à cette macroporosité, soit peu sensible à la nature du liquide interstitiel. Ces conclusions ont été tirées à partir de résultats obtenus au consolidomètre, où la fissuration de l'échantillon est gênée par la contrainte appliquée au cours de l'essai. Si la fissuration peut se développer librement, des résultats de la littérature montrent que le passage d'un hydrocarbure non dilué peut augmenter la perméabilité du sol de plusieurs ordres de grandeur.

Des essais œdométriques conduits sur la kaolinite P300 pure saturée à l'eau ou au pétrole ont montré que l'échantillon saturé au pétrole avait une compressibilité 3 à 4 fois supérieure à celle de l'échantillon saturé à l'eau. En pratique, cependant, tout l'espace poral d'un échantillon argileux initialement saturé en eau ne peut pas se remplir de pétrole à cause de la non miscibilité de ces deux liquides, et un apport de pétrole sur un massif argileux ne se traduirait pas par un tel changement de compressibilité du sol – avec les tassements qu'il engendrerait.

Les essais de cisaillement direct ont permis d'effectuer une comparaison qualitative entre des mélanges argile/sable de composition variable, saturés en eau ou en pétrole. On a ainsi pu mettre en évidence une certaine amélioration de la résistance à la rupture quand on passe d'un sol saturé en eau au même sol saturé en pétrole. Cette amélioration n'est pas observable sur un sable pur. Elle est donc imputable à l'effet du liquide interstitiel sur les interactions physico-chimiques entre particules d'argile. Là encore, le sol saturé en pétrole constitue un cas limite non observable en pratique et la résistance à la rupture des sols étudiés serait peu affectée par une venue massive d'hydrocarbure. Il serait cependant souhaitable d'effectuer une étude quantitative de l'effet du liquide interstitiel sur les propriétés mécaniques des sols en conduisant des essais triaxiaux, où les conditions de consolidation et de drainage sont beaucoup mieux contrôlées que dans l'essai de cisaillement à la boîte.

Bibliographie

- Acar Y.B., Hamidon A., Field S.C., Scott L. – The effect of organic fluids on hydraulic conductivity of compacted kaolinite, *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*, ASTM STP 874, p. 171-187, 1985.
- Anderson D.C., Brown K.W., Thomas J.C. – Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids, *Waste Management and Research*, 3 (4), p. 339-349, 1985.
- Mitchell J.K., Madsen F.T. – Chemical effects on clay hydraulic conductivity, *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, ASCE Special Publication n° 13, R.D. Woods Ed., p. 87-116, 1987.
- Zimmie T.F. – Geotechnical testing considerations in the determination of laboratory permeability for hazardous waste disposal siting, *Hazardous Solid Waste Testing*, ASTM STP 760, R.A. Conway & B.C. Malloy Eds, p. 293-304, 1981.