

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Influence des mécanismes de rétention des polluants sur la résistance au cisaillement d'un sol compacté

The effect of the pollutant retention mechanisms on the shear strength of a compacted soil

Y.J.Cui – *Laboratory of Soil and Rock Mechanics (CERMES), Ecole des Ponts et Chaussées, France*
 P.Alzoghbi – *Laboratory of Soil and Rock Mechanics (CERMES), Ecole des Ponts et Chaussées, France*
 L.Lei – *Ecole des Ponts et Chaussées, France*
 P.Delage – *Laboratory of Soil and Rock Mechanics (CERMES), Ecole des Ponts et Chaussées, France*

RÉSUMÉ: On présente ici une étude de mécanismes de rétention à partir d'une analyse de la résistance au cisaillement non drainée d'un limon statiquement compacté à différentes teneurs en eau (15, 17, 19,1 et 21,1%) et à différents poids volumiques (13, 14,5, 16, 16,7 et 17 kN/m³). Pour chaque état, deux échantillons ont été systématiquement préparés, l'un a été maintenu dans l'état, alors que l'autre a été pollué par contact avec du soltrol sous pression atmosphérique. Les résultats expérimentaux ont montré des comportements très différents des échantillons, à relier à différents mécanismes de rétention du soltrol dans un matériau à quatre phases : solide, eau, air et huile (soltrol).

ABSTRACT: This paper presents a study of retention mechanisms by an analysis of the undrained shear strength of a silt statically compacted at different water contents (15, 17, 19.1 and 21.1%) to different dry unit weights (13, 14.5, 16, 16.7 and 17 kN/m³). For each state, two samples are systematically compacted, one was kept at natural state, whereas another was polluted by soltrol under atmospheric pressure. Experimental results showed very different behaviour of the samples, which is in relation with the different mechanisms of the soltrol retention within the soil with four constituents: solid, water, air and oil (soltrol).

1 INTRODUCTION

Devant les préoccupations accrues liées aux problèmes de sols pollués par des hydrocarbures, il devient aujourd'hui plus que nécessaire de bien comprendre les mécanismes de rétention des polluants non miscibles dans des sols en général non saturés, qui influenceraient les caractéristiques mécaniques des sols.

Oren et al. (1992) ont montré que le mécanisme de rétention de l'huile dans le sol dépendait principalement de la mouillabilité et plus précisément du signe du coefficient d'étalement. Si ce dernier est positif, l'huile s'étalera en formant une couche fine et continue, et s'il est négatif, le recouvrement est moins important où la formation d'un film continu n'aura pas lieu. Plus concrètement, si le coefficient d'étalement est positif, on aura dans un pore l'huile qui sépare l'eau et l'air. D'après la mécanique des sols non saturés, suivant la façon à laquelle le polluant est retenu dans les pores, le comportement mécanique du sol peut être très différent, en liaison essentiellement avec la cohésion apparente due à l'effort exercé par différents mécanismes de capillarité. Autrement dit, le comportement mécanique reflète bien le mécanisme de capillarité, donc le mécanisme de rétention des fluides dans un sol.

Afin de vérifier ce point, la résistance à la compression simple des échantillons de limon de Jossigny compactés et pollués avec du soltrol a été déterminée. Elle est comparée avec celle des échantillons non pollués. L'analyse a montré que pour expliquer l'influence de l'infiltration du soltrol sur la résistance au cisaillement, il est nécessaire de considérer à la fois l'effet de la capillarité liée au coefficient d'étalement, l'effet de la réaction chimique minéraux-soltrol et l'effet du piégeage d'air.

2 MATERIAU ET METHODE

Le sol utilisé est le limon de Jossigny de l'Est parisien, une argile peu plastique d'après le diagramme de Casagrande. Les principales propriétés géotechniques sont présentées au tableau 1. On note en particulier une fraction argileuse non négligeable de 34% dans ce sol.

Tableau 1 : Caractéristiques du limon de Jossigny.

w _p (%)	w _L (%)	I _p (%)	% <2μm	% >80μm	w _{opt} (%)	γ _{opt} (kN/m ³)	γ _s (kN/m ³)
19	37	18	34	4	18	16,7	27,2

Le sol a été prélevé, séché à l'air ambiant, broyé, puis tamisé à 400 μm. Deux séries d'échantillons ont été préparées par compactage statique dans un moule de 38mm de diamètre et de 76mm de hauteur. Une première série à un poids volumique sec constant de 16 kN/m³ et à des teneurs en eau différentes : 15, 17, 19,1 et 21,1% ; une deuxième série à une teneur en eau constante de 15% et à des poids volumiques secs différents : 13, 14,5, 16, 16,7 et 17 kN/m³. Pour chaque état, deux échantillons ont été systématiquement préparés, l'un a été maintenu dans l'état, alors que l'autre a été pollué par du soltrol 170 par infiltration capillaire à la pression atmosphérique. Ces échantillons sont répertoriés sur la courbe Proctor à l'énergie normale sur la Figure 1. Les échantillons ont été ensuite soumis à des compressions simples à une vitesse de cisaillement de 0,1 mm/min. Lors des compressions sur une presse triaxiale, les échantillons ont été protégés d'un film plastique contre l'évaporation. Pour suivre la force

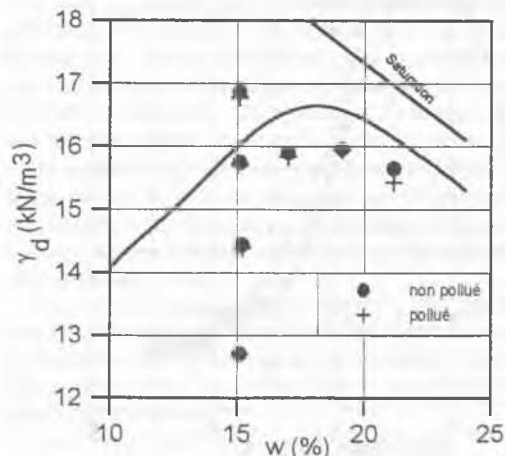


Figure 1. Echantillons préparés répertoriés sur la courbe Proctor normal.

Tableau 2. Caractéristiques des fluides utilisés.

$\rho_{\text{soltrol170}}$ (Mg/m ³)	ρ_w (Mg/m ³)	$\eta_{\text{soltrol170}}$ (Pa.s)	η_w (Pa.s)	η_a (Pa.s)
0,780	1	2,028.10 ⁻³	1,00.10 ⁻³	1,83.10 ⁻³

Tableau 3. Tensions superficielles par les interfaces soltrol-air, soltrol-eau et air-eau.

σ_{s-a} N/m	σ_{s-w} N/m	σ_{a-w} N/m
24,24.10 ⁻³	44,1.10 ⁻³	72,75.10 ⁻³

axiale, un capteur de force d'une étendue de 1 kN a été utilisé sauf pour les deux essais à $w = 15\%$ et $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ (Figure 2a) où un capteur de force de 5 kN a été employé.

Les caractéristiques du soltrol sont présentées au tableau 2, ensemble avec celles de l'air et de l'eau, en termes de densité ρ , et de viscosité η .

Le polluant utilisé, le Soltrol 170 est un liquide non polaire, désaromatisé, non toxique, très peu volatil et ayant une très faible solubilité dans l'eau. Ce liquide est donc considéré non miscible à l'eau dans cette étude.

Avec les trois fluides considérés, on peut définir trois interfaces possibles, soltrol-air, soltrol-eau et air-eau. Les tensions superficielles définies par ces interfaces sont présentées dans le tableau 3.

Le coefficient d'étalement $S = \sigma_{a-w} - (\sigma_{s-a} + \sigma_{s-w})$ est positif (4,38). Le Soltrol va donc s'étaler entre l'eau et l'air en formant une couche fine et continue (Figure 4-b).

3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 A poids volumique sec γ_d constant

Sur la Figure 2 sont présentées les courbes de compression des échantillons compactés à un même poids volumique sec (16 kN/m^3) et à différentes teneurs en eau (15%; 17%; 19,12%; 21,12%). Une certaine dispersion des résultats peuvent être observée sur la Figure 2a, à relier essentiellement à la sensibilité du capteur de force utilisé.

On observe qu'à la même densité, la résistance à la compression simple diminue avec l'augmentation de la teneur en eau, indépendamment du type d'échantillon, ce qui est compatible avec la mécanique des sols non saturés en termes de diminution de la succion. Effectivement, la contrainte maximale de l'échantillon compacté du côté sec de la courbe Proctor est pratiquement trois fois plus grande que celle obtenue du côté humide ($w = 21,12\%$).

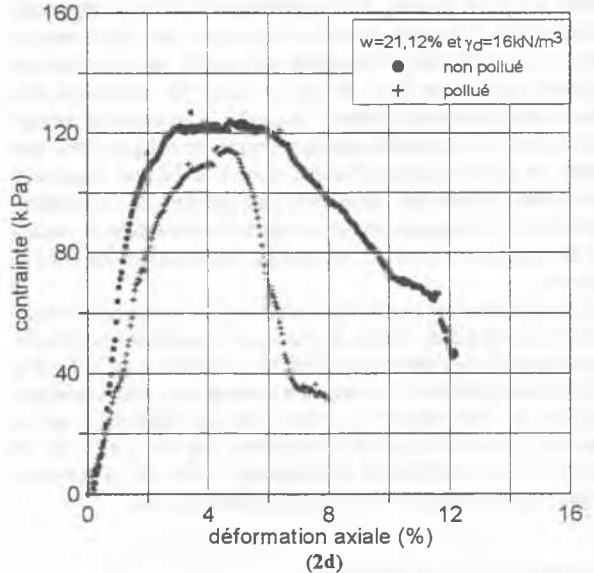
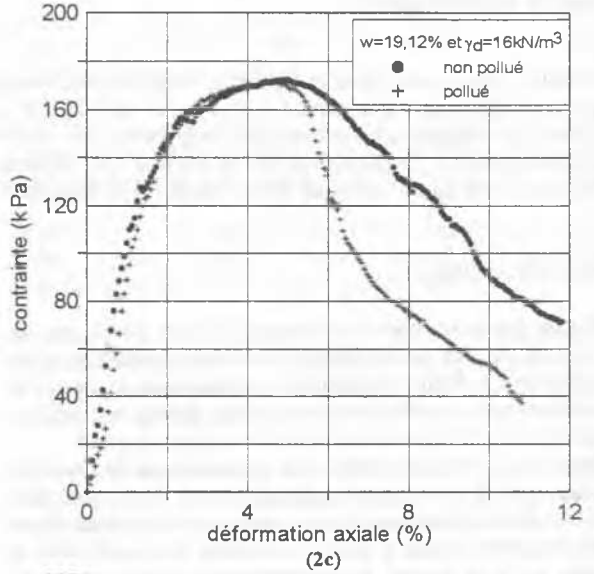
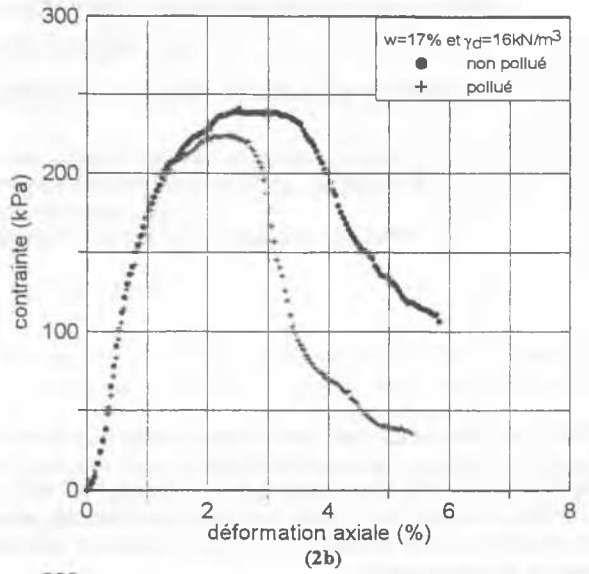
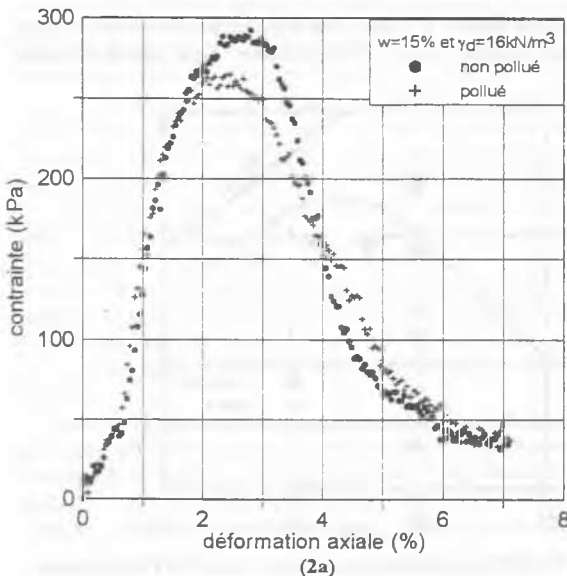


Figure 2. Compression simple des échantillons non pollués et pollués à $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ et à $w = 15\%$ (a); $w = 17\%$ (b); $w = 19,12\%$ (c) et $w = 21,12\%$ (d).

En ce qui concerne l'effet de la pollution, on observe qu'à l'exception des résultats pour $w = 19,12\%$, l'infiltration du sol-

trôle dans le sol a pour effet de diminuer la résistance au cisaillement sans pour autant modifier le module initial.

3.2 A teneur en eau w constante

Les courbes de compression des échantillons compactés à la même teneur en eau (15%) et aux différents poids volumiques

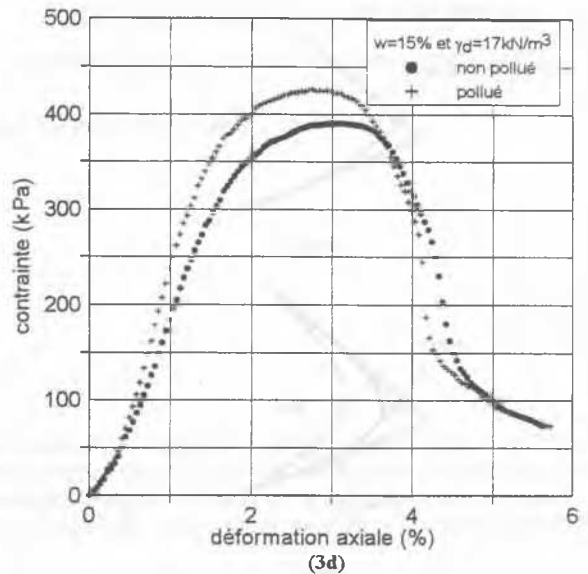
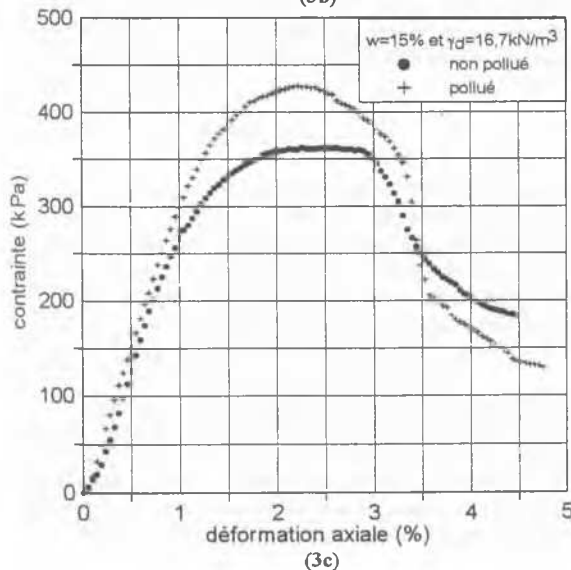
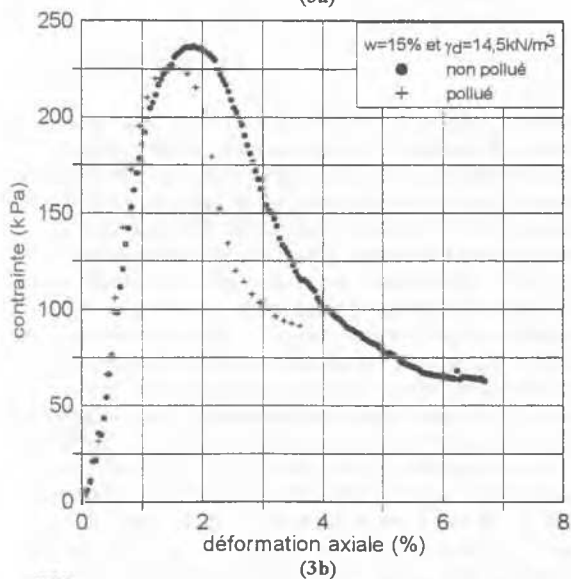
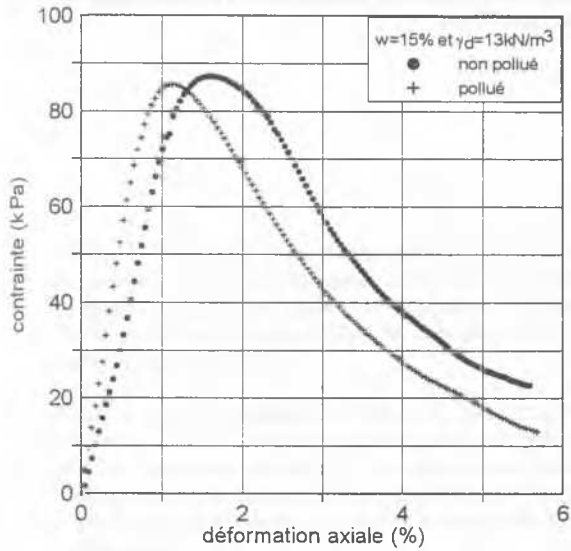


Figure 3. Compression simple des échantillons non pollués et pollués à $w=15\%$ et $\gamma_d=13\text{kN/m}^3$ (a) ; $\gamma_d=14,5\text{kN/m}^3$ (b) ; $\gamma_d=16,7\text{kN/m}^3$ (c) et $\gamma_d=17\text{kN/m}^3$ (d).

(13 ; 14,5 ; 16 ; 16,7 ; et 17 kN/m^3) sont présentées en Figure 3. On observe qu'à la même teneur en eau de 15%, le comportement est très varié d'une densité à l'autre. On peut distinguer globalement les trois cas suivants :

- 1) à un poids volumique sec faible de 13 kN/m^3 (Figure 3-a), la pollution semble augmenter le module initial, mais ne pas influencer de façon significative la résistance au cisaillement, malgré le degré de saturation en soltrol élevé pour cette densité ($S_{ro}=48\%$ et $S_{rw}=37\%$).
- 2) à des poids volumiques secs moyens de 14,5 et de 16 kN/m^3 , on retrouve le comportement du cas à teneur en eau constante, à savoir que la pollution diminue la résistance mais pas le module initial.
- 3) à des forts poids volumiques sec de 16,7 et de 17 kN/m^3 , avec la pollution, on a à la fois l'augmentation du module initial et celle de la résistance.

4 DISCUSSION

A la lumière des résultats obtenus, on peut tenter de définir différents mécanismes d'interaction correspondant à différentes densités.

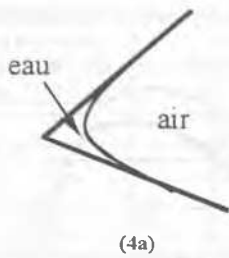
Pour des densités moyennes, comprise entre 14,5 et 16 kN/m^3 , l'effet de l'infiltration du soltrol dans le sol peut être illustré par la Figure 4. Avant l'infiltration, dans des pores du sol, seule l'interface air-eau existe, définissant une succion représentée par la tension surfacique air-eau $\sigma_{a-w} = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ (Figure 4-a). Après l'infiltration, on a la configuration représentée par la Figure 4-b, où deux interfaces capillaires interviennent, air-huile et huile-eau. Théoriquement la succion définie dans ce cas est représentée par la somme des tensions surfaciques air-huile et huile-eau : $\sigma_{s-a} + \sigma_{s-w} = 68,34 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$. On voit clairement que la succion est diminuée par l'infiltration du soltrol ($68,34 \text{ N/m} < 72,75 \text{ N/m}$), ce qui explique la diminution de la résistance au cisaillement observée pour les échantillons pollués (Cui et Delage 1996).

A des fortes densités ($> 16,7 \text{ kN/m}^3$), une grande partie d'air peut être occluse, la succion est définie dans ce cas par la somme des tensions surfaciques eau-air et air-soltrol (Figure 5), qui est théoriquement plus importante que la capillarité initiale définie par l'interface eau-air :

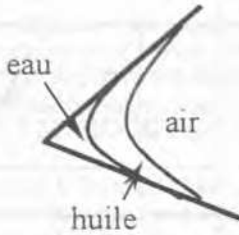
$\sigma_{n-w} + \sigma_{s-n} = 96,99 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} > \sigma_{a-w} = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$
C'est cette augmentation de succion qui explique l'augmentation

6 REFERENCES

- Cui Y. J. & Delage P. 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique* 46, No. 2, pp. 291-311.
- Oren P.E. & Pinczewski W.V. 1992. The effect of wettability and spreading coefficients on the recovery of waterflood residual oil by immiscible gasflooding. *Proceedings of the 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*, Washington, pp. 179-191.



(4a)



(4b)

Figure 4. Mécanismes de capillarité, a) avant pollution, b) après pollution.

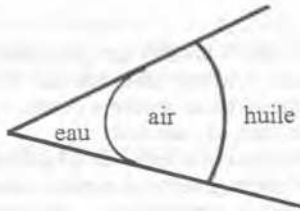


Figure 5. Mécanisme de capillarité avec l'air piégé.

du module initial et celle de la résistance au cisaillement (Cui et Delage 1996).

Pour la densité faible, le très faible degré de saturation en eau a permis probablement aux minéraux d'argile de se mettre en contact direct avec le soltrol, provoquant ainsi une réaction chimique, rigidifiant ainsi le sol. C'est ainsi que le module est plus fort pour les échantillons pollués. Il serait intéressant de faire une analyse chimique du soltrol après l'infiltration afin de vérifier si les échanges ioniques ont eu réellement lieu.

5 CONCLUSION

A partir de la comparaison de la résistance à la compression simple entre les échantillons compactés pollués et non pollués, on a mis en évidence différents mécanismes possibles de rétention d'un polluant (soltrol 170) dans le sol :

- 1) A faible densité et faible degré de saturation, la réaction chimique entre les minéraux d'argile et le soltrol pourrait avoir lieu, conférant au sol plus de rigidité.
- 2) A densité moyenne, l'infiltration du soltrol a pour conséquence de diminuer l'effort capillaire, diminuant ainsi la cohésion apparente du sol. Ceci est traduit par une résistance à la compression plus faible.
- 3) A forte densité, l'air piégé par l'infiltration du soltrol pourrait modifier le mécanisme de capillarité, provoquant une augmentation du module initial et de la résistance à la compression simple.