HAL
open science

Modélisation discrète de la résistance à la traction d'une couche d'argile

Thi-Ngoc-Hà Lè, Olivier Ple, Pascal Villard, Jean-Pierre Gourc

To cite this version:

Thi-Ngoc-Hà Lè, Olivier Ple, Pascal Villard, Jean-Pierre Gourc. Modélisation discrète de la résistance à la traction d'une couche d'argile. Annales du Bâtiment et des travaux publics, 2010, 1, pp.1-10. hal-00484273

HAL Id: hal-00484273

https://hal.science/hal-00484273v1

Submitted on 18 May 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les annales du BTP, Vol. X, N° 1/2010, pp X à Y

Modélisation discrète de la résistance à la traction d'une couche d'argile

Discrete analysis of clay layer tensile strength

Thi-Ngoc-Hà Lê* — O. Plé* — P. Villard* — JP. Gourc**

** Université Joseph Fourier, Laboratoire 3S-R, Domaine Universitaire, B.P. 53, F-38041 Grenoble cedex 98, France, olivier.ple@ujf-grenoble.fr*
*** Université Joseph Fourier, Laboratoire THE, Domaine Universitaire, B.P. 53, F-38041 Grenoble cedex 98, France, jp.gourc@ujf-grenoble.fr*

Rubrique : Sécurité, environnement

1. Introduction

Les centres de stockage de déchets (ISD) ont une barrière sommitale composée d'une couche d'argile compactée. Cette barrière pose de nombreux problèmes en particulier ceux relatifs à sa mise en œuvre et à sa durabilité. En effet, de nombreuses sollicitations (tassements, surcharge, dessiccation, gel) peuvent induire des dommages par flexion-cisaillement dans la couche d'argile et ainsi mettre en défaut son étanchéité. Dans ces conditions, la sécurité du site de stockage ne pourrait plus être garantie.

De nombreuses lois de comportement existent dans la littérature sur la résistance à la compression sous faible et fort confinement et sur la résistance au cisaillement des argiles plastiques non saturées. Malheureusement, la résistance à la traction de ce genre de matériau n'est pas très souvent étudiée et les références bibliographiques associées sont parfois contradictoires. Les expériences de traction directe sur ce matériau étant difficiles à réaliser, une méthode utilisant une modélisation discrète est proposée comme solution alternative. Déjà très largement développée sur les matériaux granulaires (Cundall et Strack, 1979), cette technique n'est habituellement pas utilisée pour reproduire le comportement de matériaux cohérents. Comme le sol testé dans cette étude est une argile non saturée très plastique, la méthode discrète a d'abord été calibrée sur les lois de référence du code de calcul PFC²D et appliquée à la simulation d'expériences biaxiales. Différentes lois de contact ont ensuite été testées pour comprendre comment les interactions entre les particules rendent compte d'un comportement macroscopique élasto-plastique. Une extension de ces résultats à la résistance à la traction d'une argile plastique montre que la simulation numérique est capable de reproduire les mécanismes d'endommagement observés en laboratoire. Une application de cette approche à la modélisation du comportement en flexion d'une couverture d'un centre de stockage de déchets est réalisée. Une étude comparative avec des essais en vraie grandeur sur site montre l'intérêt de ce genre de modélisation dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques.

2. Principe de l'essai en vraie grandeur

La majorité des pathologies observées sur les couvertures des centres de stockage proviennent du tassement différentiel des déchets sous-jacents. La conséquence est un endommagement par flexion-cisaillement de la couche d'argile (barrière passive). Ce

phénomène peut être mis expérimentalement en évidence en soumettant la couverture, composée d'une barrière active (géotextile + géomembrane) et d'une barrière passive, à des sollicitations de flexion. Deux types de tests en vraie grandeur sont alors réalisés pour cela, des tests de tassement et des tests de soulèvement. Afin d'observer au cours de la déformation l'évolution de l'endommagement de la couche d'argile compactée des essais de soulèvements ont été réalisés (Figure 1). Pour cela, une fosse en béton armé de 2 mètres de profondeur a été réalisée (Figure 2). Une plaque métallique articulée a été placée sur la fosse (Figure 3). Un ensemble de 4 vérins hydrauliques permet le déplacement de la plaque et de produire un soulèvement localisé de la couverture passive composée d'une couche de sable lâche et d'une couche d'argile compactée. Les 4 vérins ont été synchronisés pour assurer le même déplacement aux 4 coins de la plaque sous le même effort. Ils sont équipés de capteurs d'effort et de déplacement. Cette instrumentation permet un contrôle en continu et une régulation des vérins. A la fin de l'essai le déplacement de la plaque et l'effort de soulèvement sont relevés. Le déplacement maximum de la plaque est de 25 cm, il est limité par la course des vérins. Un géotextile et une géomembrane (barrière active) sont positionnés sur la plaque métallique. Sur cette barrière, est positionné une couche de sable lâche de 20 cm. Cette couche, existante in-situ, préserve la géomembrane d'un endommagement possible et consécutif du compactage de la couche d'argile sus-jacente. Enfin la couche d'argile, majoritairement constitutive de la barrière passive, est compactée en deux couches équivalentes de 45 cm.

Les résultats provenant des essais in situ montrent clairement que la résistance à la traction de l'argile est très sensible à la déflection de la couverture (Camp, 2008). La première fissure apparaît dans la partie centrale pour un déplacement vertical de la plaque de 2 cm. A la fin des essais (déplacement de 25 cm pour un effort résultant de 43 kN/m²) une coupe transversale est réalisée (Figure 4) et une caractérisation des matériaux constitutifs de la barrière est faite en laboratoire sur des échantillons cylindriques. Ces essais, situés entre des essais U.U. et C.U., sont effectués sur des matériaux non saturés (tel qu'in situ) et interprétés en terme de contraintes totales (Plé *et al.*, 2009 ; Camp *et al.*, 2009). Le tableau ci-dessous donne les résultats des essais de laboratoire de l'argile et du sable (Tableau 1).

	f_c (kPa)	f_t (kPa)	E_{app} (MPa)	ϕ_{app} (°)	C_{app} (kPa)
Argile	175	-15	3	3	84
Sable	/	0	13	31	0

Tableau 1. *Caractéristiques mécaniques des matériaux de la couverture*

Dans ce tableau, f_c représente la résistance à la compression, f_t représente la résistance à la traction, E_{app} le module d'Young apparent, ϕ_{app} l'angle de frottement apparent et C_{app} la cohésion non drainée apparente. La convention adoptée est celle de la mécanique des sols ($f_t < 0$).

3. Procédure numérique

Dans une première étape, des échantillons numériques sont réalisés sur la base des échantillons expérimentaux. Les essais axisymétriques de laboratoire sont modélisés par des essais numériques biaxiaux. Les échantillons numériques sont fabriqués par la méthode ERDF (Expansion de Rayon de Diminution de Frottement) développée par Chareyre et Villard (Chareyre et Villard, 2003). Les échantillons sont limités à un volume donné. Les particules ou disques sont générés aléatoirement à l'intérieur du volume avec un rayon réduit et aucun

frottement n'est pris en compte entre les disques et les frontières du volume. A l'issu du remplissage, le rayon des particules est augmenté jusqu'à ce que la porosité désirée pour l'échantillon, noté n, soit atteinte. Par suite, les paramètres microscopiques du modèle sont sélectionnés pour tester différentes conditions de chargement et différentes conditions limites. 6 paramètres sont sélectionnés pour la modélisation : k_n et k_s représentant la raideur normale et tangentielle, a_n et a_s représentant l'adhérence normale et tangentielle, n représentant la porosité et μ représentant le frottement entre les disques.

L'interaction entre les particules, noté F (Figure 5), est rendue, au niveau local, par l'association d'une force normale F_i^n et d'une force tangentielle F_i^s à chaque pas de calcul de la façon suivante :

$$F_i = F_i^n + F_i^s \text{ et } F_i^n = k_n \times U_n \text{ et } \Delta F_i^s = k_s \times \Delta U_s \quad (1)$$

Avec U_n et ΔU_s les déplacements relatifs entre les particules.

3.1. *Modélisation du sable*

Afin de reproduire le comportement mécanique du sable lâche, l'assemblage granulaire est réalisé à partir de clusters. Le milieu présente une faible densité et chacun des clusters est le résultat de l'association de deux disques inséparables de diamètre D et 0,9 × D. L'échantillon numérique est réalisé avec deux tailles de clusters dont le rapport est égal à 2 et la proportion équivalente (50%). Le comportement macroscopique de l'échantillon est obtenu en utilisant 5000 clusters soumis à différents cas de chargement. Les valeurs des microparamètres qui rendent compte du comportement macroscopique du sable le plus proche de la réalité sont données dans le Tableau 2.

k_n (kN/m)	k_s (kN/m)	a_n (kN/m)	a_s (kN/m)	n (%)	μ
$52{,}8.10^3$	$26{,}4.10^3$	0	0	20,15	0,455

Tableau 2. *Paramètres microscopiques pour le sable lâche*

Le comportement macroscopique, caractéristique du sable lâche, est donné sur la Figure 6 avec σ la contrainte normale totale et P la pression de confinement. Une interprétation des résultats dans le plan de Mohr permet de déduire l'angle de frottement apparent et la cohésion non drainée apparente du sable (Figure 7).

3.2. *Lois de contact et critère de rupture pour l'argile*

Pour l'argile, ce sont la résistance à la traction et la rigidité du matériau qui contrôlent les mécanismes d'endommagement par flexion (Ammeri *et al.*, 2009). La difficulté numérique principale réside dans la détermination des paramètres microscopiques qui sont capables de simuler en même temps les essais de traction directe et les essais de compression simple. C'est pourquoi, la loi de contact de référence du code de calcul PFC²D a du être améliorée. Dans sa configuration initiale, PFC²D propose un critère d'endommagement fonction de la rupture par traction et par cisaillement. Pour la composante normale, le critère peut-être écrit sous la forme suivante:

$$F^n > C^n \quad (2)$$

Dans cette expression, $C^n = a_n \times D_{min}/2$ représente la cohésion normale limite. Le critère de rupture par cisaillement peut être écrit sous la forme suivante :

$$F^s < \text{Max}\ \{C^s; F^n \times \mu\} \quad (3)$$

Dans cette expression, $C^s = a_s \times D_{min}/2$ représente la cohésion tangentielle limite. Quand les contacts sont rompus, la cohésion est perdue. Cette simple loi de contact est généralement réservée aux matériaux granulaires.

Pour prendre en compte la nature des matériaux testés (argile plastique), le critère de rupture par cisaillement a du être amélioré de trois façons différentes. La première expression est écrite sous la forme suivante :

$$F^s < C^s + F^n \times \mu \quad (4)$$

Comme pour la loi de référence, la cohésion est perdue lorsque le contact est rompu. A ce moment là, le frottement entre les particules est toujours conservé et $F^s = F^n \times \mu$. Cette expression sera notée loi N°1. La seconde expression peut-être écrite sous la forme suivante :

$$F^s < \text{Max}\ (C^s; F^n \times \mu) \quad (5)$$

Lorsque le critère de rupture est atteint, la cohésion est conservée. Le matériau présente alors un comportement cohésif et frottant. Cette expression sera notée loi N°2. Finalement, la troisième expression peut-être écrite sous la forme suivante:

$$F^s < (C^s + F^n \times \mu) \quad (6)$$

Lorsque le critère de rupture est atteint, la cohésion est conservée. Le matériau présente alors un comportement cohésif et frottant. Cette expression sera notée loi N°3.

Dans toute la suite de l'étude, les échantillons numériques sont réalisés à partir d'un ensemble de 5000 disques testés sous différents cas de chargement. Chaque assemblage granulaire est réalisé à partir d'une granulométrie donnée, variant entre D_{min} et D_{max} avec D_{max} / D_{min} = 3, pour une porosité désirée n. Afin de comparer les différentes lois de contact des nouvelles simulations ont été faites avec les paramètres du Tableau 3. La Figure 8 montre l'évolution de la contrainte normale en fonction de la déformation pour les différentes lois de contact. La contrainte maximale de compression est située entre 195 kPa et 368 kPa, c'est-à-dire dans un rapport de 1,88. Les déformations correspondantes sont situées entre 2.48 % et 4.72 % relevant ainsi de l'influence des différentes lois de contact.

k_n (kN/m)	k_s (kN/m)	a_n (kN/m)	a_s (kN/m)	n (%)	μ
20.10^3	20.10^3	400	400	15,9	0,2

Tableau 3. *Paramètres microscopiques préliminaires pour l'argile*

Une étude numérique complète a été entreprise afin de déterminer les micro-paramètres qui reproduisent le comportement macroscopique de l'argile. Une attention particulière a été portée à la détermination du module d'Young, de la résistance à la traction et du rapport f_c/f_t. Il est à noter que la rigidité de l'échantillon est directement liée aux paramètres microscopiques k_n et k_s. La relation entre les deux est linéaire. Des raideurs microscopiques faibles donnent un matériau moins rigide. D'autre part, la résistance à la traction n'est pas

influencée par l'adhérence tangentielle (a_s). Par contre, la résistance à la traction diminue lorsque l'adhérence normale (a_n) diminue.

Finalement, les paramètres microscopiques retenus pour l'argile plastique sont rassemblés dans le Tableau 4.

k_n (kN/m)	k_s (kN/m)	a_n (kN/m)	a_s (kN/m)	n (%)	μ
10.10^3	10.10^3	100	400	15,93	0,2

Tableau 4. *Paramètres microscopiques définitifs pour l'argile plastique*

4. Application à un cas réel

Pour le sable lâche, le modèle numérique est réalisé à partir d'un ensemble de 2000 clusters et des paramètres microscopique du Tableau 2. Pour l'argile, l'assemblage granulaire comporte 8000 grains. Les paramètres microscopiques définitifs retenus pour l'argile proviennent du Tableau 4. De plus, la loi de contact retenue est la loi N°3 car elle donne un rapport f_c/f_t important et rend compte d'un comportement cohérent et frottant (Figure 8).

La géométrie du modèle est proche de la réalité de l'essai en vraie grandeur. L'échantillon numérique est réalisé par la méthode ERDF sous gravité. Les conditions limites du problème sont imposées par l'intermédiaire de murs mobiles. L'essai de soulèvement est obtenu par le déplacement à vitesse constante d'un mur horizontal. L'effort résultant sur le mur est mesuré en continu et des images de la simulation sont prises au cours du processus d'endommagement (Figure 9 et Figure 10).

La courbe représentant l'évolution de l'effort en fonction du déplacement du mur horizontal est donnée sur la Figure 11. La première partie verticale de cette courbe (Figure 11) correspond au poids des matériaux. La partie linéaire de la courbe correspond au comportement élastique de l'ouvrage. La fin de la droite correspond au début de la propagation de la fissure dans la couche d'argile. La charge maximale est atteinte lorsque la fissure forme des blocs distincts. La propagation est alors représentée sur la Figure 10. Les résultats numériques sont tout à fait comparables avec les résultats et les observations relevés in situ. L'initialisation de la fissure apparaît, pour le modèle numérique (Figure 9), pour un déplacement du mur horizontal de 1,7 cm contre 2 cm dans l'essai in situ. A la fin de l'essai l'effort résultant est du même ordre de grandeur de 40 kN/m² contre 43 kN/m² pour l'essai in situ. De plus les mécanismes d'endommagement sont très comparables avec une large fissure de traction dans la partie centrale de la couverture et du cisaillement de part et d'autre. Aucune fissure n'a été observée dans la couche de sable lâche (Figure 4 et Figure 10).

5. Conclusions

Les études expérimentales à grandes échelles en géotechnique demeurent indispensables et préalables à toutes réalisations d'ouvrages prototypes. Malheureusement elles sont coûteuses et souvent difficiles à mener en particulier sur des matériaux fins non saturés comme c'est le cas ici. En conséquence, une approche numérique est proposée comme une solution alternative. Différentes lois de contact sont utilisées pour décrire le comportement macroscopique du matériau cohérent. Cette première approche prometteuse permet la modélisation discrète d'un matériau plastique cohérent sous des sollicitations de traction. Les résultats numériques sont très comparables aux résultats expérimentaux et permettent d'envisager l'extension de la modélisation à la flexion de la couverture étanche d'un centre de stockage de déchets.

6. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration scientifique entre les laboratoires sols solides structures risques (L3S-R) et étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE) de Grenoble puis avec des partenaires industriels (Andra, Egis-Géotechnique et Benedetti) qui ont mis à disposition de l'équipe de recherche leurs matériels et leurs savoirs faire. Merci à tous.

6. Références

Ammeri A., Jamei M., Bouassida M., Plé O., Villard P., Gourc J.P., Numerical study of bending test on compacted clay by DEM: tensile strength determination, International Journal of Computer Applications in Technology, Inderscience Publishers, Vol. 34, N°1, 2009, pp13-22.

Camp-Devernay S., Comportement sous flexion d'une argile: application à la couverture d'une ISD TFA, Thèse de 3ème cycle de l'Université Joseph Fourier, 2008, 350 p.

Camp S., Plé O., Gourc JP., Proposed protocol for characterizing a clay layer subjected to bending, Geotechnical Testing Journal, ASTM Publishers, Vol. 32, N°3, 2009, pp273-279.

Chareyre B., Villard P., Discret element modeling of curved geosynthetic anchorages with known macro-properties, 1er Inter. PFC Symp. (Gelsenkitchen, Germany, 6/7-11-2002), Konietzky (ed), 2003, p. 197-203.

Cundall P.A., Strack O.D.L., A discrete numerical modelling method for granular assemblies, Geotechnique, Vol. 29, N° 1, 1979, pp47-65.

Plé O., Lè H., Gotteland Ph., Mechanical approach for fibre-reinforced clay in landfill caps cover application, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Hermes Science, Vol. 13, N°1, 2009, pp53-69.

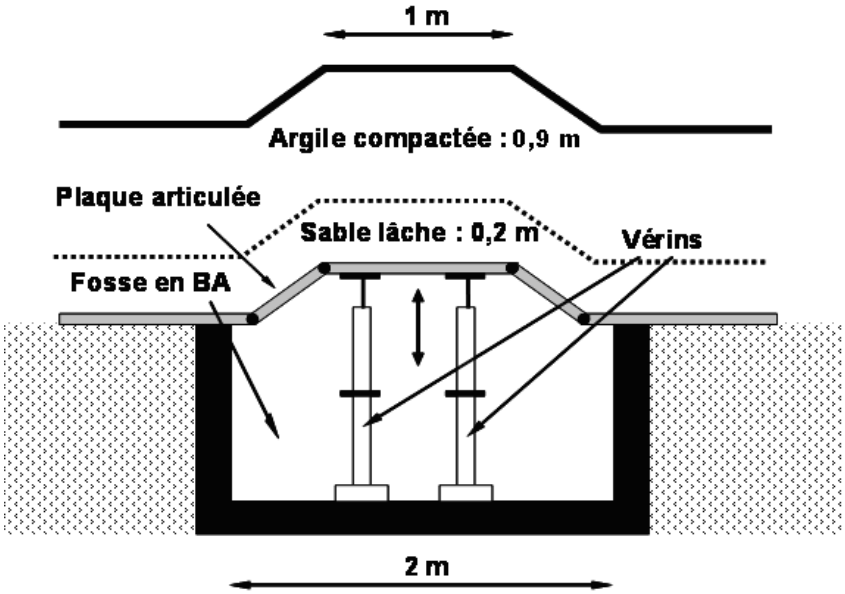

Figure 1. *Essai de soulèvement d'une couverture d'une ISD*

Figure 2. *Fosse en béton armé (7 m × 4 m × 2 m)*

Figure 3. *Plaque métallique articulée (2 m × 2 m)*

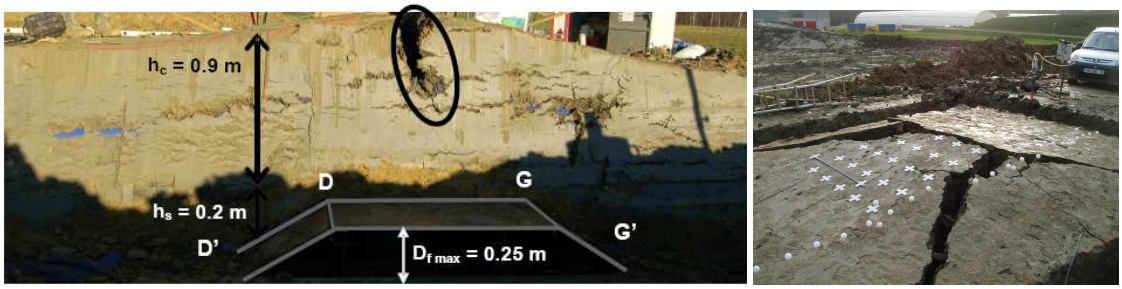

Figure 4. *Coupe transversale et vue de dessus d'un essai de soulèvement (déplacement de 25 cm)*

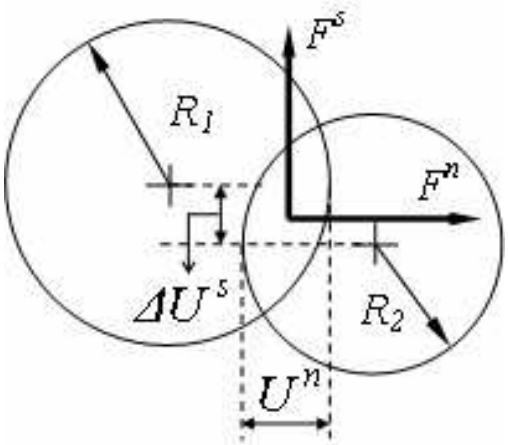

Figure 5. *Interaction entre particules, R_1 et R_2 rayons des disques*

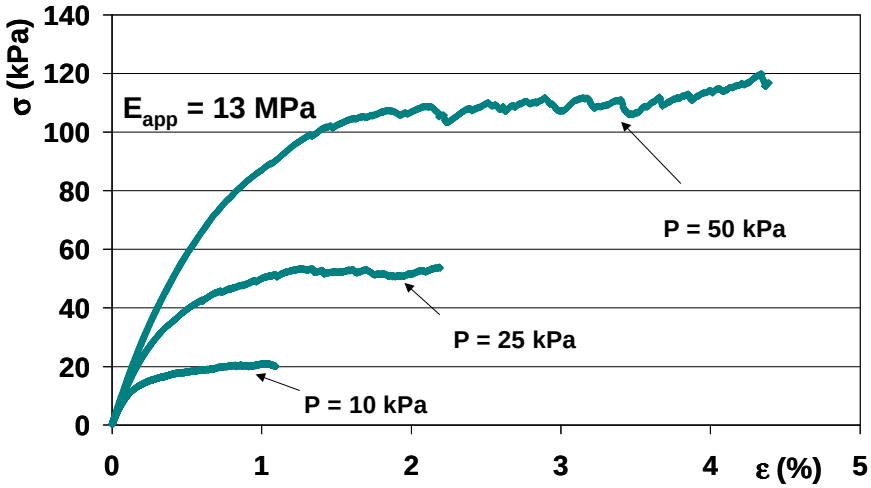

Figure 6. *Simulation d'essais biaxiaux sur sable lâche*

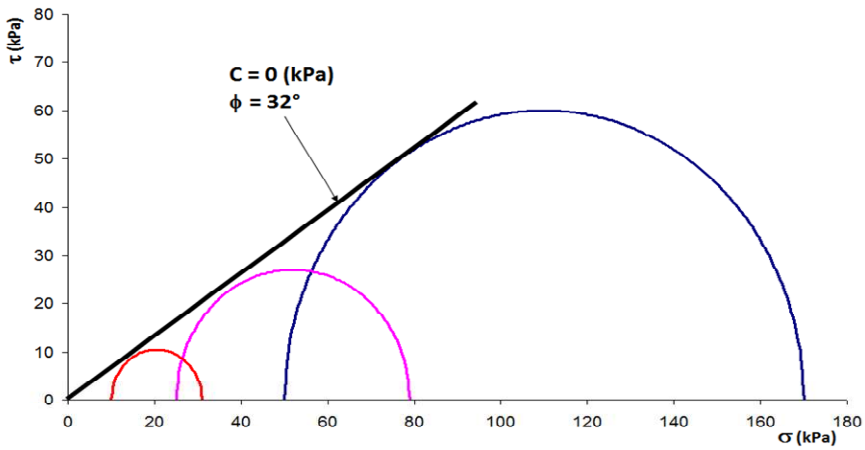

Figure 7. *Plan de Mohr et courbe intrinsèque pour le sable lâche*

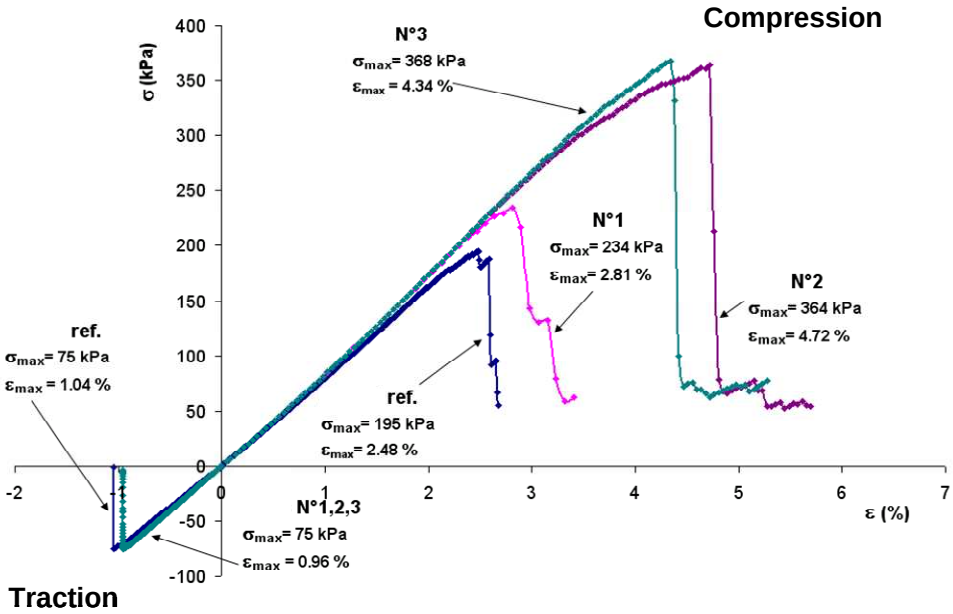

Figure 8. *Simulation d'essais de traction et de compression sur l'argile*

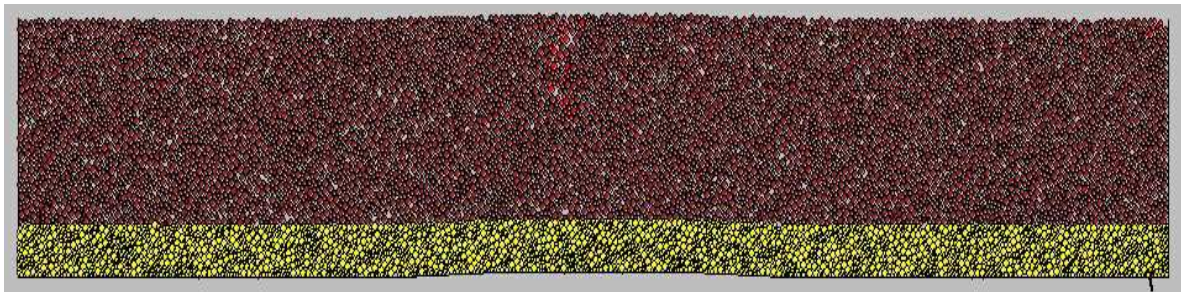

Figure 9. *Modélisation du soulèvement, initialisation de la fissure dans la couche d'argile (points rouges)*

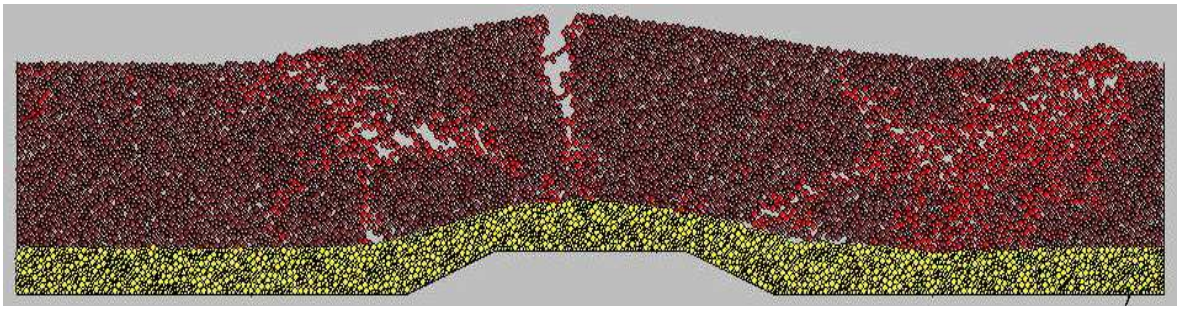

Figure 10. *Modélisation du soulèvement, fin de la simulation (déplacement de 19 cm)*

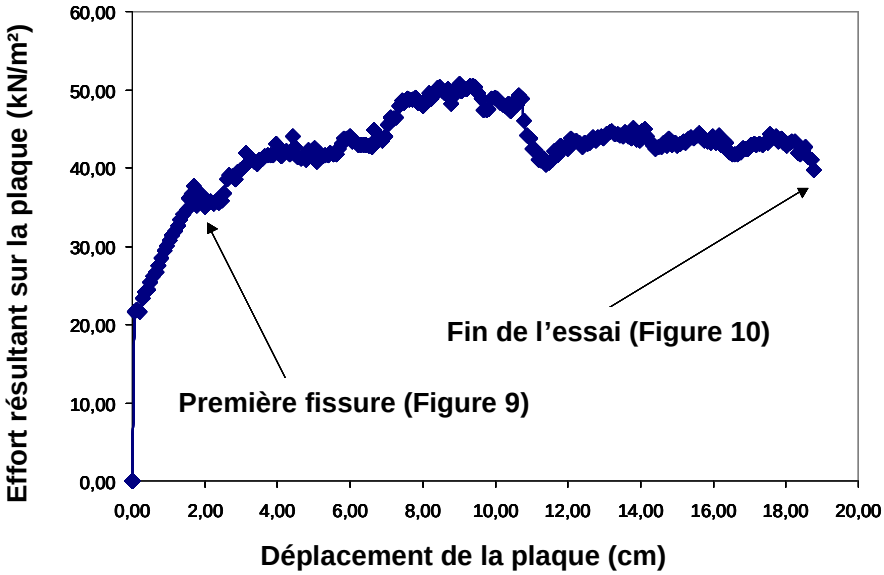

Figure 11. *Effort résultant sur le mur horizontal*