SSNV202 – Essai œdométrique drainé avec la loi de Camclay

Résumé

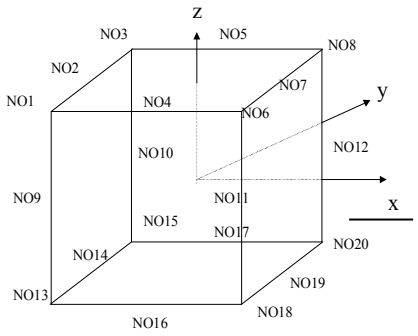
Ce test permet de valider la loi mécanique élasto-plastique de Camclay spécifique aux sols normalement consolidés. Cette loi intègre un mécanisme hydrostatique élasto-plastique (dont la partie élastique est non-linéaire et le seuil d'écoulement correspond à la pression de consolidation) couplé à un mécanisme déviatorique élasto-plastique (dont la partie élastique est linéaire). Le comportement est *durcissant* ou *adoucissant* suivant la combinaison des deux mécanismes.

On réalise un *œdomètre en mécanique pure* (équivalent à des conditions hydrauliques drainées). Les solutions calculées sont comparées à des résultats issus du logiciel FLAQ de calcul de mécanique des sols. Ce test ne comporte qu'une seule modélisation : on part d'un état du sol normalement consolidé à $p_{co}=10^{+4}\,Pa$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



L'essai triaxial est effectué sur un seul élément fini isoparamétrique de forme cubique HEXA20. La longueur de chaque arête vaut 1. On définit les mailles suivantes :

DROITE : *NO3 NO5 NO8 NO10 NO12 NO15 NO17 NO20*
GAUCHE : *NO1 NO4 NO6 NO9 NO11 NO13 NO16 NO18*
DEVANT : *NO6 NO7 NO8 NO11 NO12 NO18 NO19 NO20*
DERRIERE : *NO1 NO2 NO3 NO9 NO10 NO13 NO14 NO15*
BAS : *NO13 NO14 NO15 NO16 NO17 NO18 NO19 NO20*
HAUT : *NO1 NO2 NO3 NO4 NO5 NO6 NO7 NO8*

1.2 Propriétés de matériaux

Les propriétés élastiques sont :
- coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$
- Les module d'Young : $E = 7.2.10^{+5} Pa$

Les propriétés anélastiques (Camclay) sont :

- porosité initiale : $\varphi_0 = 0.667$ (correspondant à un indice des vides $e_0 = \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0} = 2$)
- pente de la droite d'état critique : $M = 1.02$
- pression critique : $p_{cr} = p_{co}/2 = 5.10^{+3} Pa$ (état du sol normalement consolidé)
- pression de référence : $pref = 100\, Pa$ [1]
- angle de frottement : $\varphi = 21°$
- angle de dilatance : $\psi = 21°$
- coefficient de compressibilité : $\lambda = 0.2$
- coefficient de gonflement : $\kappa = 0.05$

1 Cette pression n'a aucune signification physique particulière, et sert uniquement à des fins de normalisation numérique.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Du fait de la loi élastique non-linéaire retenue, il est nécessaire de vérifier la cohérence des données mécaniques initiales avec l'état de contraintes initial : en effet, la loi élastique non-linéaire s'écrit comme suit :

$$\dot{P}' = K\,\dot{\varepsilon}_v^e = \frac{P'(1+e_0)}{\kappa}\,\dot{\varepsilon}_v^e \qquad [1]$$

$$\dot{s} = 2G\,\dot{\tilde{\varepsilon}} \qquad [2]$$

où P' représente la contrainte effective volumique, K^t le module de compressibilité tangent, G le module de cisaillement, ε_v^e la déformation élastique volumique, s le tenseur du déviateur des contraintes et $\tilde{\varepsilon}$ celui des déformations. Le symbole $*$ indique la dérivée par rapport au temps des quantités considérées.

On voit que l'aspect non-linéaire de la loi est porté par la partie volumique, avec un module de compressibilité K dépendant de l'état de contrainte effective volumique P'. La partie déviatorique reste linéaire, avec un module de cisaillement $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ déterminé à partir des données mécaniques. Il s'avère ainsi nécessaire de vérifier initialement la cohérence entre les valeurs de G et de K, et plus exactement, de vérifier que l'on a bien au départ $0<\nu<0.5$. On arrive ainsi aux conditions suivantes :

$$P' \geq 0 \text{ et } E < \frac{3P'(1+e_0)}{\kappa} \qquad [3]$$

La première condition indique que l'on ne tolère pas d'état de contrainte volumique négatif (condition de stabilité du matériau poroélastique), tandis que la seconde revient à majorer la valeur de E en fonction de l'état de contrainte volumique actuel. Ainsi, partant d'un état normalement consolidé, soit $P'_0 = p_{co}$, la seconde inégalité montre qu'un module bien choisi doit respecter la condition :

$$E < 1.8\,10^6\,Pa \qquad [4]$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.3 Conditions aux limites et chargements

Un essai oedométrique consiste à imposer à l'éprouvette une *variation de charge verticale* tout en *maintenant les déformations latérales constantes* . Il peut-être drainé (la pression interstitielle de fluide ne varie pas au cours de l'essai) ou non-drainé (on ferme le robinet : la pression interstitielle de fluide évolue dans l'échantillon). On s'intéresse ici au cas drainé, plus simple, car ne faisant pas intervenir l'influence de la pression interstitielle du fluide et *modélisable de ce fait par un calcul mécanique pur* .

Dans le modèle considéré, l'élément cubique représente un huitième de l'échantillon. Les conditions limites sont donc les suivantes :

- Les conditions de symétrie :
  $u_z=0.$ sur le groupe de maille BAS
  $u_x=0.$ sur le groupe de maille $DERRIERE$
  $u_y=0.$ sur le groupe de maille $GAUCHE$
- Les conditions de pression latérale :
  $u_x=0.$ sur le groupe de maille $DEVANT$
  $u_y=0.$ sur le groupe de maille $DROITE$
- Les conditions de contrainte isostatique :
  $P'=p_{co}=10^{+4}Pa$ sur tout l'élément (opérateur CREA_CHAMP)
- Les conditions de chargement :
  Le chargement s'effectue en une seule phase :
  déplacement imposé sur le groupe de mailles $HAUT$ entre $t=0.$ et $t=10.$ variant de $u_z=0$ à $u_z=-0.1$ (déformation axiale de 10%).

1.4 Résultats

Les solutions sont post-traitées au point $NO8$, en termes de contrainte effective volumique P' , de contrainte équivalente Q et d'indice des vides e .

La validation est effectuée par comparaison aux solutions FLAQ fournies par le CIH.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation A est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire* .
La préconsolidation initiale de l'échantillon est égale à $p_{co}=10^{+4}Pa$. On vérifie que le module d'Young respecte l'inégalité [4] : $E<1.8\times10^{+6}Pa$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre 0. et –0.1 en 70 pas de temps entre $t=0.$ et $t=10$. Lors du calcul, on active la subdivision automatique du pas de temps pour gérer les situations de non convergence de l'intégration locale.

Dans l'intégration des équations d'équilibre, on demande une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Camclay et accélère sensiblement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps (commande DEFI_LIST_INST) pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grands.

2.2 Grandeurs testées et résultats

2.2.1 Valeurs testées

Les solutions sont calculées au point $NO8$ et comparées à des références FLAQ. Elles sont données en termes de contrainte effective volumique P', de contrainte équivalente Q et d'indice des vides e, et récapitulées dans le tableaux suivants :

$$P'=\frac{1}{3}trace(\sigma')$$ (variable interne V3)

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-0.1%	10132.3	10070.0	0.6%
-0.5%	10505.9	10500.0	0.1%
-1%	11014.5	11010.0	0.1%
-2%	12499.3	12480.0	0.2%
-10%	41989.0	41840.0	0.4%

$$Q=\sqrt{\frac{3}{2}s:s}$$ (variable interne $V4$)

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-0.1%	514.6	521.0	-1.2%
-0.5%	1998.8	2016.0	-0.9%
-1%	3051.1	3068.0	-0.5%
-2%	4189.7	4219.0	-0.7%
-10%	12904.9	13020.0	-0.9%

e (variable interne $V7$)

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-0.1%	1.998	1.997	0.03%
-0.5%	1.986	1.985	0.03%
-1%	1.971	1.970	0.03%
-2%	1.941	1.940	0.03%
-10%	1.701	1.700	0.03%

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

A titre indicatif, le temps CPU consommé sur la machine BULL avec la version *Code_Aster* 9.0.15 est de $9.13\,s$.

2.2.2 Commentaires

L'erreur relative reste inférieure à 1% , ce qui est satisfaisant.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Synthèse des résultats

On représente dans les courbes suivantes les différentes comparaisons entre *Code_Aster* et GEFDYN, en termes de trajet de chargement dans le plan (P',Q) (Figure **1**), et d'évolution de l'indice des vides (Figure **2**).

Dans cette dernière figure, on fait apparaître deux solutions *Code-Aster* :
- La solution en 1 phase, qui correspond à la modélisation A ;
- La solution en 2 phases, où l'on a remplacé l'affectation pure et simple du champ de contrainte initiale p_{co} (CREA_CHAM) par un calcul anélastique (Camclay) de consolidation isotrope jusqu' à la pression p_{co} .

La procédure adoptée dans la modélisation A étant celle utilisée pour le calcul FLAQ.
En termes de trajet de chargement dans le plan (P',Q) (Fig. **1**), on retrouve une excellente convergence des solutions entre FLAQ et ASTER, aussi bien en 1 phase qu'en 2.
En ce qui concerne, en revanche, l'indice des vides (Fig. **2**), si la solution *Code_Aster* en 1 phase coïncide bien avec la solution FLAQ, il en est tout différemment pour la solution *Code_Aster* en 2 phases. Ceci s'explique aisément : lors du chargement anélastique isotrope (Camclay), l'indice des vides a évolué, et est passé de $e_0=2.$ à $e\approx 1.82$.

Ce résultat montre donc en quoi les deux approches (en 1 ou 2 phases) ne sont pas tout à fait équivalentes, et qu'il convient d'en avoir conscience.

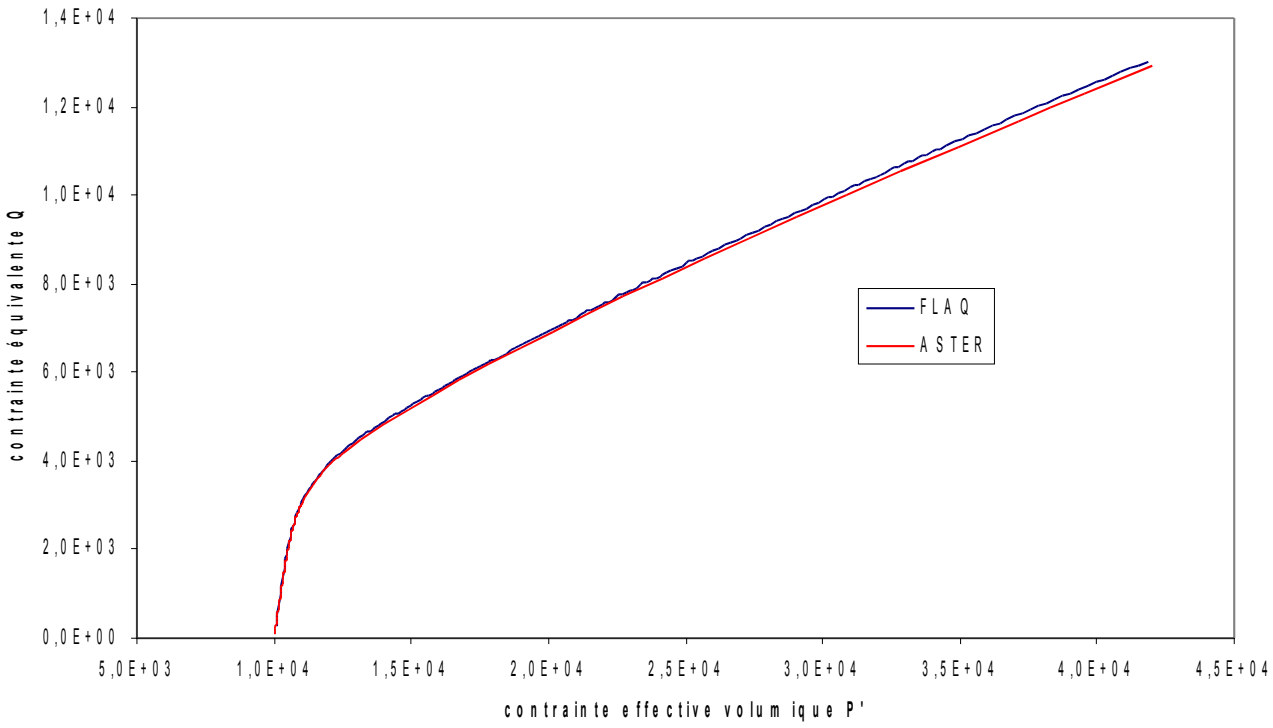


Figure **1** : *Trajet de chargement de le plan* (P',Q) *: comparaison entre les solutions Code_Aster et FLAQ .*

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

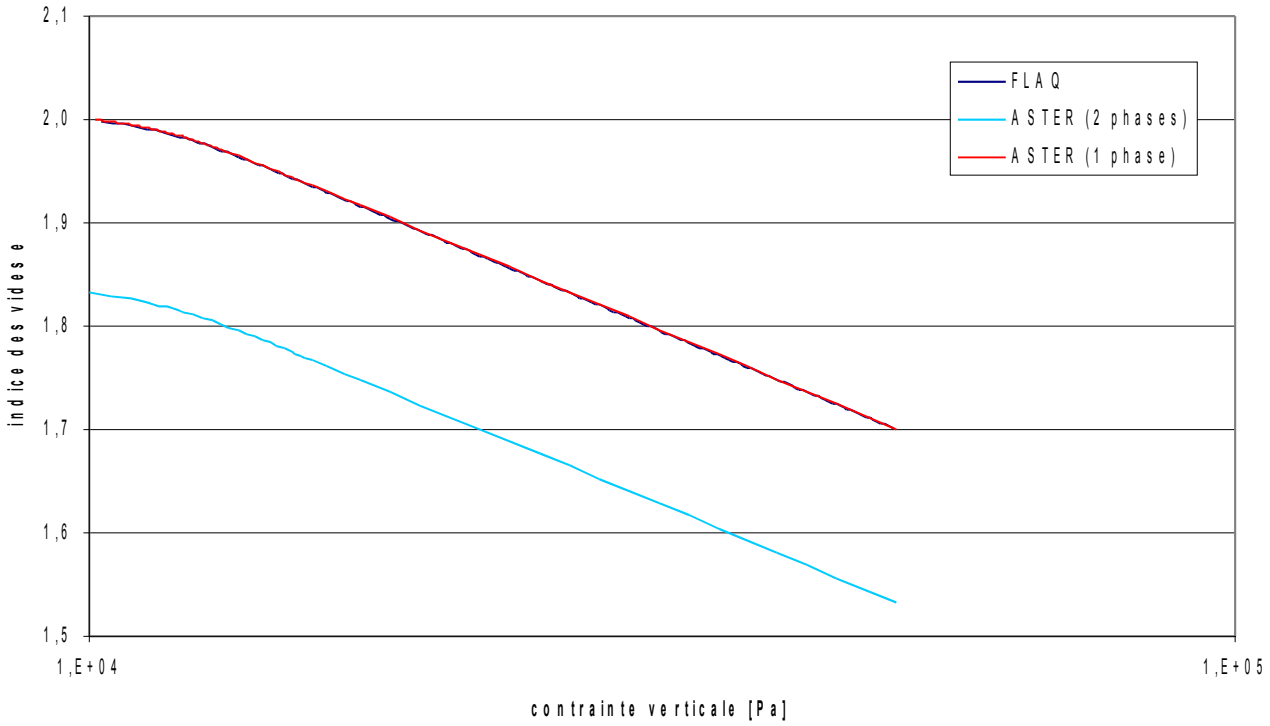


Figure **2** : *Indice des vides en fonction de la contrainte verticale : comparaison entre les solutions FLAQ et Code_Aster pour deux calculs : en une phase et en deux phases .*

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)