SSNV204 – Test de compression isotrope drainé cyclique sur sable d'Hostun

Résumé

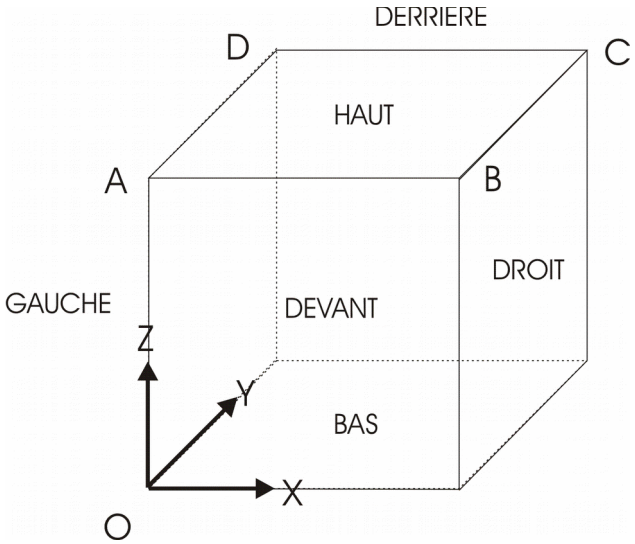
On a les quatre modélisations suivantes :

- Modélisation A : on réalise un calcul de compression isotrope cyclique en mécanique pure (équivalent à des conditions hydrauliques drainées) avec la loi de Hujeux. Les solutions calculées sont comparées à des résultats issus du code éléments finis GEFDYN de l'École Centrale Paris ;
- Modélisation B : on réalise un calcul de compression isotrope monotone en mécanique pure (équivalent à des conditions hydrauliques drainées) sur un matériau élastique linéaire orthotrope. Les solutions sont calculées en dégénérant la loi de Hujeux vers un comportement élastique linéaire orthotrope et sont comparées à un calcul élastique linéaire orthotrope vrai ;
- Modélisation C : on réalise un calcul de traction isotrope cyclique en mécanique pure (équivalent à des conditions hydrauliques drainées) avec la loi de Hujeux. Le but de cette modélisation est de tester les mécanismes de traction complémentaires à la loi de Hujeux. Les solutions calculées sont comparées à des résultats issus du code éléments finis GEFDYN de l'École Centrale Paris ;
- Modélisation D : on réalise un calcul de compression isotrope cyclique en mécanique pure (équivalent à des conditions hydrauliques drainées) comme pour la modélisation A. Le but de cette modélisation est de tester la possibilité de prendre en compte des propriétés mécaniques qui dépendent des coordonnées du maillage dans un calcul non-linéaire avec la loi de Hujeux.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



L'essai est effectué sur un seul élément fini isoparamétrique de forme cubique $CUB8$. La longueur de chaque arête vaut 1. Les différentes facettes de ce cube sont des groupes de mailles nommés $HAUT$, BAS, $DEVANT$, $ARRIERE$, $DROIT$ et $GAUCHE$. Le groupe de mailles SYM contient par ailleurs les groupes de mailles BAS, $DEVANT$ et $GAUCHE$; le groupe de mailles $COTE$ les groupes de mailles $ARRIERE$ et $DROIT$.

1.2 Propriétés du matériau

Les propriétés élastiques sont :

- module de compressibilité isotrope : $K=516200\,kPa$
- module de cisaillement : $\mu=238200\,kPa$

Les propriétés anélastiques (Hujeux) sont issues du document fourni par l'École Centrale Paris [1] :

- puissance de la loi élastique non-linéaire : $n_e=0.4$
- $\beta=24$
- $d=2.5$
- $b=0.2$
- angle de frottement : $\varphi=33°$
- angle de dilatance : $\psi=33°$
- pression critique : $P_{c0}=-1000\,kPa$
- pression de référence : $P_{ref}=-1000\,kPa$
- rayon élastique des mécanismes isotropes : $r^s_{éla}=10^{-3}$
- rayon élastique des mécanismes déviatoires : $r^d_{éla}=5.10^{-3}$
- $a_{mon}=10^{-4}$
- $a_{cyc}=0.008$
- $c_{mon}=0.2$
- $c_{cyc}=0.1$
- $r_{hys}=0.05$

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

- $r_{mon}=0.9$
- $x_m=1$
- $\mathrm{dila}=1$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Un essai de compression isotrope consiste à imposer à l'éprouvette une variation de charge égale sur chaque face de l'échantillon.

Dans le modèle considéré, l'élément cubique représente un huitième de l'échantillon. Les conditions aux 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 $GAUCHE$
  - $u_y=0$ sur le groupe de maille $DEVANT$
- Les conditions de chargement :
  - $P_n=1$ sur les groupes de mailles $COTE$ et $HAUT$

Le chargement s'effectue en trois phases :

1) chargement isotrope de compression entre $t=-10$ et $t=0$ où la pression sur les groupes de mailles $COTE$ et $HAUT$ varie entre $p=-100\,kPa$ et $p=-300\,kPa$.
2) chargement isotrope de traction entre $t=0$ et $t=10$, où la pression varie entre $p=-300\,kPa$ et $p=-100\,kPa$.
3) chargement isotrope de compression entre $t=10$ et $t=20$ où la pression varie entre $p=-100\,kPa$ et $p=-340\,kPa$.

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

2 Résultats

2.1 Méthode de calcul

La validation est effectuée par comparaison aux solutions GEFDYN fournies par l'École Centrale Paris.

2.2 Grandeurs et résultats de référence

Les solutions sont post-traitées au point C, en termes de pression isotrope, de déformation volumique plastique ε_v^p et de coefficients d'écrouissage isotropes monotones r_{iso}^m et cyclique r_{iso}^c.

2.3 Incertitudes sur la solution

Solution numérique (code de calcul).

2.4 Références bibliographiques

[1] Document de référence GEFDYN, École Centrale Paris. Disponible à l'adresse http://www.mssmat.ecp.fr/IMG/pdf/resp_loph40.pdf

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation A est tridimensionnelle et statique non-linéaire, 3D.

On effectue d'abord une préconsolidation anélastique (Hujeux) de l'échantillon jusqu'à $p=-300\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 100 pas de temps entre $t=-10$ et $t=0$. Cette phase sollicite le mécanisme isotrope monotone de la loi de Hujeux.

La phase de traction isotrope de $p=-300\,kPa$ à $p=-100\,kPa$ (2ème phase du calcul) se déroule en 100 pas de temps entre $t=0$ et $t=10$. Lors de cette deuxième phase, on active la subdivision automatique du pas de temps pour gérer les situations de non-convergence de l'intégration locale. Cette phase permet de traiter le passage entre les mécanismes isotrope monotone et cyclique puis de suivre l'écrouissage mixte du mécanisme cyclique.

La nouvelle phase de compression isotrope de $p=-100\,kPa$ à $p=-340\,kPa$ (3ème phase de calcul) a lieu en 100 pas de temps entre les instants $t=10$ et $t=20$. La subdivision automatique du pas de temps est à nouveau activée pour gérer les passages de mécanismes cyclique/cyclique et cyclique/monotone. Le nouveau mécanisme de consolidation cyclique créé suit un écrouissage mixte, puis lors du passage au mécanisme monotone, celui-ci s'écrouit de façon isotrope.

3.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point C et comparées à des références GEFDYN. Elles sont données en termes de déformation volumique plastique ε_v^p et de coefficients d'écrouissage isotrope monotone $\left(r_{ela}^{iso,m}+r_{iso}^{m}\right)$ et cyclique $\left(r_{ela}^{iso,c}+r_{iso}^{c}\right)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

ε_v^p

p (kPa)	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-200	SOURCE_EXTERNE	-6.78E-3	1.0
-300	SOURCE_EXTERNE	-1.28E-2	1.0
-200	SOURCE_EXTERNE	-7.49E-3	1.0
-100	SOURCE_EXTERNE	-9.15E-4	4.0
-220	SOURCE_EXTERNE	-8.29E-3	1.0
-340	SOURCE_EXTERNE	-1.50E-2	1.0

$\left(r_{ela}^{iso,m}+r_{iso}^{m}\right)$

p (kPa)	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-200	SOURCE_EXTERNE	6.8E-2	1.0
-300	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-200	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-100	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-220	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-340	SOURCE_EXTERNE	9.48E-2	1.0

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

$\left(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^{c}\right)$

p (kPa)	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-200	SOURCE_EXTERNE	1.E-3	1.0
-300	SOURCE_EXTERNE	1.E-3	1.0
-200	SOURCE_EXTERNE	2.14E-2	1.0
-100	SOURCE_EXTERNE	4.91E-2	1.0
-220	SOURCE_EXTERNE	3.29E-2	1.0
-340	SOURCE_EXTERNE	4.91E-2	1.0

3.3 Remarques

L'écart entre les deux codes est très faible pour l'ensemble des valeurs testées.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation B est tridimensionnelle et statique linéaire (3D). Elle a pour but de tester l'orthotropie de la loi de Hujeux. On utilise les propriétés mécaniques suivantes :

Paramètres élastiques		Paramètres Hujeux (modifiés par rapport au §1.2)	
E_{xx}	$62000\,MPa$	n	0
E_{yy}	$31000\,MPa$	d	100
E_{zz}	$620\,MPa$	b	0,1
$\upsilon_{xx}=\upsilon_{yy}=\upsilon_{zz}$	0,3	$r^I_{ela}=r^D_{ela}$	1
G_{xx}	$11910\,MPa$		
G_{yy}	$23820\,MPa$		
G_{zz}	$238{,}2\,MPa$		

On effectue une compression isotrope de l'échantillon jusqu'à $p_f=-300\,kPa$ en 101 pas de temps entre $t=-10$ et $t=0$.

4.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point C et comparées à un calcul élastique linéaire orthotrope véritable réalisé avec *Code_Aster*. Elles sont données en termes de déformations longitudinale ϵ_{xx} et transversale ϵ_{yy}, et récapitulées dans les tableaux suivants :

ϵ_{xx}

ϵ_{zz}	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-6,40E-5	AUTRE_ASTER	-2,580E-7	1.0
-1,28E-4	AUTRE_ASTER	-5,170E-7	1.0
-1,92E-4	AUTRE_ASTER	-7,750E-7	1.0
-2,56E-4	AUTRE_ASTER	-1,033E-6	1.0
-3,20E-4	AUTRE_ASTER	-1,291E-6	1.0

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

ϵ_{zz}	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-6,40E-5	AUTRE_ASTER	-7,10E-7	1.0
-1,28E-4	AUTRE_ASTER	-1,42E-6	1.0
-1,92E-4	AUTRE_ASTER	-2,13E-6	1.0
-2,56E-4	AUTRE_ASTER	-2,84E-6	1.0
-3,20E-4	AUTRE_ASTER	-3,55E-6	1.0

4.3 Remarques

L'écart entre les deux simulations, qui modélisent le même comportement, est très faible.

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation C est tridimensionnelle et statique non-linéaire, (3D).

On effectue d'abord une préconsolidation élastique ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p=-100\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-10$ et $t=0$. Cette phase est purement élastique.

La phase de traction isotrope, contrôlée en déplacement imposé, jusqu'à $u_x=u_y=u_z=5\,mm$ (déplacement imposé sur les faces $HAUT$, $DROIT$, $ARRIERE$) se déroule en 100 pas de temps entre $t=0$ et $t=5$. Les déplacements maxima imposés correspondent à une déformation de $0.5\,\%$. Lors de cette deuxième phase, on active la subdivision automatique du pas de temps pour gérer les situations de non convergence de l'intégration locale. Cette phase permet de traiter le passage entre les mécanismes isotrope monotone et cyclique puis de suivre l'écrouissage mixte du mécanisme cyclique jusqu'à atteindre un état de contraintes proche de la traction pour le matériau. Ce test permet de s'assurer que les mécanismes parfaitement plastiques contrôlant la traction du modèle de Hujeux s'activent correctement.

La phase suivante de compression isotrope jusqu'à $u_x=u_y=u_z=-5\,mm$ (3ème phase de calcul) a lieu en 100 pas de temps entre les instants $t=5$ et $t=10$. La subdivision automatique du pas de temps est à nouveau activée pour gérer les passages de mécanismes traction aux mécanismes cycliques isotropes et cyclique/monotone. Le nouveau mécanisme de consolidation cyclique créé suit un écrouissage mixte, puis lors du passage au mécanisme monotone, celui-ci s'écrouit de façon isotrope.

5.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point C et comparées à des références GEFDYN. Elles sont données en termes de déformation volumique plastique ε_v^p, de coefficients d'écrouissage isotropes cycliques $\left(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^{c}\right)$ et de contrainte isotrope p, et récapitulées dans les tableaux suivants :

ε_v^p

ε_a	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
0.003	SOURCE_EXTERNE	7.43E-3	1.0
-0.005	SOURCE_EXTERNE	-2.06E-2	3.0

$\left(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^{c}\right)$

ε_a	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
0.003	SOURCE_EXTERNE	4.00E-2	1.0

$\left(r_{ela}^{s}+r_{iso}^{m}\right)$

ε_a	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
0.003	SOURCE_EXTERNE	1.094E-1	1.0

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

$p(Pa)$

ε_a	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
0.003	SOURCE_EXTERNE	-2.000	1.0
-0.005	SOURCE_EXTERNE	-4.482E5	2.0

5.2.1 Commentaires

L'écart entre les deux codes est très faible pour l'ensemble des valeurs testées.

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation et valeurs testées

Le problème résolu dans ce cas est le même que pour la modélisation A. Il permet de tester la possibilité de prendre en compte la dépendance spatiale des propriétés mécaniques avec la loi de Hujeux.

6.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point C et comparées à des références GEFDYN. Elles sont données en termes de déformation volumique plastique ε_v^p et de coefficients d'écrouissage isotrope monotone $\left(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^{m}\right)$ et cyclique $\left(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^{c}\right)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

ε_v^p

p (kPa)	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-200	SOURCE_EXTERNE	-6.78E-3	1.0
-300	SOURCE_EXTERNE	-1.28E-2	1.0
-200	SOURCE_EXTERNE	-7.49E-3	1.0
-100	SOURCE_EXTERNE	-9.15E-4	4.0
-220	SOURCE_EXTERNE	-8.29E-3	1.0
-340	SOURCE_EXTERNE	-1.50E-2	1.0

$\left(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^{m}\right)$

p (kPa)	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-200	SOURCE_EXTERNE	6.8E-2	1.0
-300	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-200	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-100	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-220	SOURCE_EXTERNE	8.83E-2	1.0
-340	SOURCE_EXTERNE	9.48E-2	1.0

$\left(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^{c}\right)$

p (kPa)	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
-200	SOURCE_EXTERNE	1.E-3	1.0
-300	SOURCE_EXTERNE	1.E-3	1.0
-200	SOURCE_EXTERNE	2.14E-2	1.0
-100	SOURCE_EXTERNE	4.91E-2	1.0
-220	SOURCE_EXTERNE	3.29E-2	1.0
-340	SOURCE_EXTERNE	4.91E-2	1.0

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

6.3 Remarques

L'écart entre les deux codes est très faible pour l'ensemble des valeurs testées et permet de valider la prise en compte des variables de commandes pour représenter une dépendance spatiale des paramètres d'élasticité dans la loi de Hujeux.

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

7 Synthèse des résultats

On représente dans les courbes suivantes les différentes comparaisons entre Code_Aster et GEFDYN, en termes de déformation volumique plastique (Figure **1**) et de coefficients d'écrouissage isotropes monotone et cyclique (Figure **2**). Ces courbes sont issues de la modélisation A.

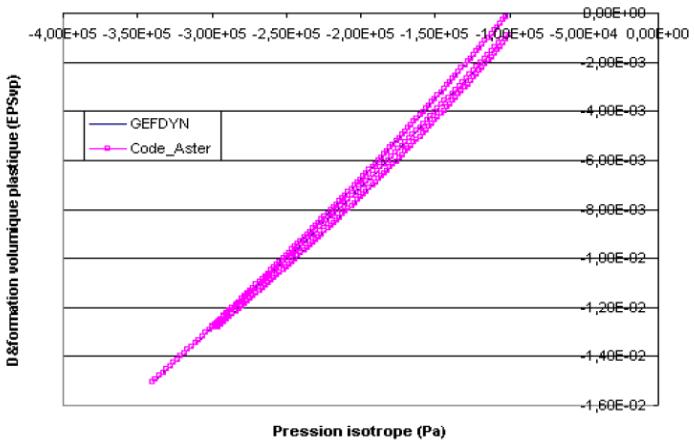


Figure **1** : Déformation volumique plastique fonction de la pression isotrope : comparaison entre les solutions *Code_Aster* et GEFDYN.

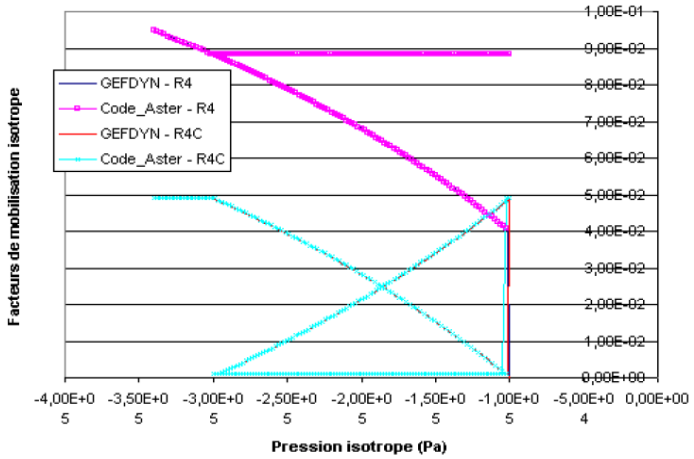


Figure **2** : Rayons isotropes monotone et cycliques en fonction de la pression isotrope : comparaison entre les solutions *Code_Aster* et GEFDYN.

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