

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

Résumé

On a les 3 modélisations suivantes :

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’Ecole Centrale Paris ;

B

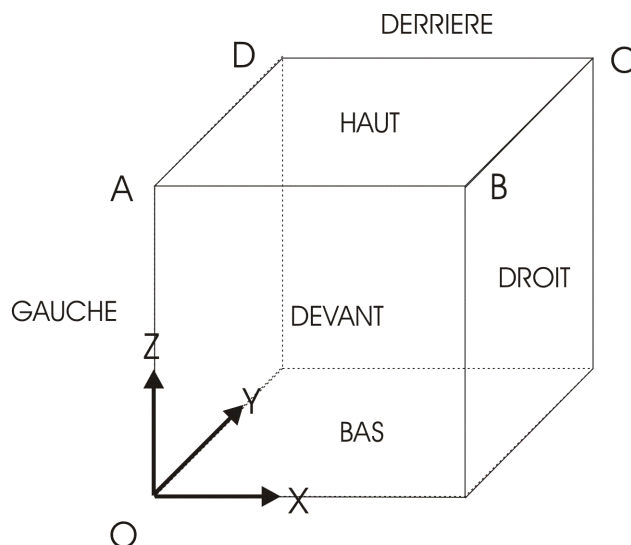
On réalise un *calcul de compression isotrope monotone en mécanique pure* (équivalent à des conditions hydrauliques drainées) sur un matériau *élastique linéaire orthotrope* . Les solutions sont calculées en dégénérant *la loi de Hujeux* vers un comportement élastique linéaire orthotrope et sont comparées à un calcul élastique linéaire orthotrope vrai ;

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’Ecole Centrale Paris ;

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 sable d'Hostun

Les propriétés élastiques sont :

- module de compressibilité isotope : $K = 516200 \text{ kPa}$
- module de cisaillement : $\mu = 238200 \text{ kPa}$

Les propriétés anélastiques (Hujeux) sont issues du document fourni par l'École Centrale Paris et disponible à l'adresse internet suivante : http://www.mssmat.ecp.fr/IMG/pdf/resp_loph40.pdf :

- puissance de la loi élastique non-linéaire : $n_e = 0.4$
- $\beta = 24$
- $d = 2.5$
- $b = 0.2$
- angle de frottement : $\varphi = 33^\circ$
- angle de dilatance : $\psi = 33^\circ$
- pression critique : $P_{c0} = -1000 \text{ kPa}$
- pression de référence : $P_{ref} = -1000 \text{ kPa}$
- rayon élastique des mécanismes isotropes : $r_{ela}^s = 10^{-3}$
- rayon élastique des mécanismes déviatoires : $r_{ela}^d = 5 \cdot 10^{-3}$
- $a_{mon} = 10^{-4}$
- $a_{cyc} = 0.008$
- $c_{mon} = 0.2$
- $c_{cyc} = 0.1$
- $r_{hys} = 0.05$

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

Les propriétés matériaux du sable d'Hostun ont été établies à partir du document de référence GEFDYN disponible sur le site du laboratoire MSS-Mat de Centrale Paris :
http://www.mssmat.ecp.fr/IMG/pdf/resp_loph40.pdf.

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 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 $p = -100 \text{ kPa}$ et $p = -300 \text{ kPa}$.
- 2) chargement isotrope de traction entre $t = 0$ et $t = 10$, où la pression varie entre $p = -300 \text{ kPa}$ et $p = -100 \text{ kPa}$.
- 3) chargement isotrope de compression entre $t = 10$ et $t = 20$ où la pression varie entre $p = -100 \text{ kPa}$ et $p = -340 \text{ kPa}$.

1.4 Résultats

Les solutions sont post-traitées au point *C*, en termes de pression isotrope, de déformation volumique plastique $\mathcal{E}_v^p$ et de coefficients d'écrouissage isotropes monotone r_{iso}^m et cyclique r_{iso}^c .

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

2 Modélisation A

2.1 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 $p = -300 \text{ kPa}$ (1^{ère} 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 $p = -300 \text{ kPa}$ à $p = -100 \text{ kPa}$ (2^{ème} 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 $p = -100 \text{ kPa}$ à $p = -340 \text{ kPa}$ (3^{ème} 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.

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 Hujeux 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 du à des incréments de chargement trop grand ou des incréments de décharge. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée.*

2.2 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

$(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^m)$ et cyclique $(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^c)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

ε_v^p			
$p \text{ (kPa)}$	Type de référence	GEFDYN	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

$(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^m)$			
$p \text{ (kPa)}$	Type de référence	GEFDYN	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	GEFDYN	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

2.3 Remarques

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

3 Modélisation B

3.1 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
$\nu_{xx}=\nu_{yy}=\nu_{zz}$	0,3	$r_{ela}^I=r_{ela}^D$	1
G_{xx}	11910 MPa		
G_{yy}	23820 MPa		
G_{zz}	238,2 MPa		

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

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 Hujeux 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 du à des incréments de chargement trop grand ou des incréments de décharge. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée.*

3.2 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	REFERENCE	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

ϵ_{yy}			
p (kPa)	Type de référence	REFERENCE	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

3.3 Remarques

L'écart entre les deux simulations est très faible, ce qui n'est pas anormal compte tenu du fait que les deux calculs sont a priori *identiques*.

4 Modélisation C

4.1 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 $p = -100 \text{ kPa}$ (1^{ère} 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 $u_x = u_y = u_z = 5 \text{ mm}$ (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 $u_x = u_y = u_z = -5 \text{ mm}$ (3^{ème} 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.

4.2 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 $(r_{ela}^{iso,c} + r_{iso}^c)$ et de contrainte isotrope p , et récapitulées dans les tableaux suivants :

$$\varepsilon_v^p$$

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

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

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

$$p(Pa)$$

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

4.2.1 Commentaires

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

5 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'érouissage isotropes monotone et cyclique (Figure 2). Ces courbes sont issues de la modélisation A.

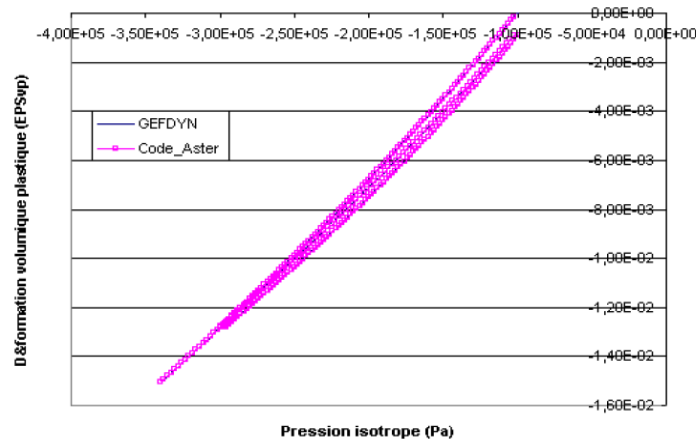


Figure 1 : Déformation volumique plastique fonction de la pression isotrope : comparaison entre les solutions Code_Aster et GEFDYN.

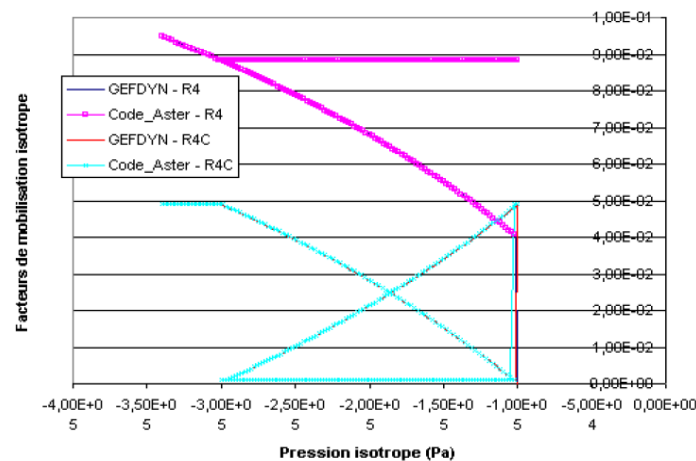


Figure 2 : Rayons isotropes monotone et cycliques en fonction de la pression isotrope : comparaison entre les solutions Code_Aster et GEFDYN.