SSNV197 - Triaxiaux drainés avec la loi de Hujeux

Résumé

On réalise un *calcul triaxial 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. Les quatre premières modélisations de ce test sont effectuées avec une hypothèse petites déformations (DEFORMATION='PETIT') :

- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $50\,kPa$ (état surconsolidé) ;
- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $100\,kPa$ (état moyennement consolidé) ;
- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $200\,kPa$ (état normalement consolidé) ;
- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $100\,kPa$ (état normalement consolidé), mais on utilise un échantillon avec des plans de glissement (liés aux mécanismes déviatoires) inclinés de $45\,°$ par rapport à la verticale ;

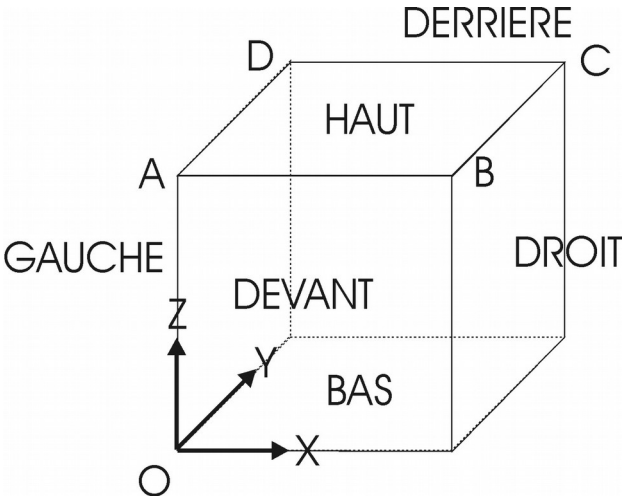
Les trois tests suivants reprennent les mêmes essais avec une cinématique grandes déformations fournie par l'opérateur GDEF_LOG :(DEFORMATION='GDEF_LOG') :

- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $50\,kPa$ (état surconsolidé) ;
- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $100\,kPa$ (état moyennement consolidé) ;
- on préconsolide l'éprouvette jusqu'à $200\,kPa$ (état normalement consolidé) ;

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 $CUB8$. La longueur de chaque arête vaut 1. Les différentes facettes de ce cube sont des groupes de mailles nommés $HAUT$, BAS, $DEVANT$, $DERRIERE$, $DROIT$ 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 $DERRIERE$ et $DROIT$.

1.2 Propriétés de matériaux

Les propriétés élastiques sont :

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

Les propriétés anélastiques (Hujeux) sont :

- 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 du mécanisme isotrope : $r^{s}_{éla}=0.001$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire : $r^{d}_{éla}=0.005$
- $a_{mon}=0.0001$
- $a_{cyc}=0.008$
- $c_{mon}=0.2$
- $c_{cyc}=0.1$
- $r_{hys}=0.05$
- $r_{mob}=0.9$
- $x_m=1$
- $\mathrm{dila}=1$

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

1.3 Conditions aux limites et chargements

Un essai triaxial consiste à imposer à l'éprouvette une variation de charge verticale tout en maintenant la pression latérale constante. 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 $GAUCHE$
  - $u_y=0$ sur le groupe de maille $DEVANT$
- Les conditions de pression latérale :
  - $P_n=1$ sur le groupe de maille $COTE$
- Les conditions de chargement :
  - $P_n=1$ sur le groupe de maille $HAUT$ (phase 1)
  - $u_z=-1$ sur le groupe de maille $HAUT$ (phase 2)

Le chargement s'effectue en deux phases :

- chargement isotrope entre $t=-2$ et $t=0$ où la pression sur les groupes de mailles $COTE$ et HAUT varie entre $p=0$ et $p=p_c$ (pression de préconsolidation isotrope). Dans les modélisations A, B et C, la valeur de p_c est respectivement de $50,100,200\,kPa$;
- déplacement imposé sur le groupe de mailles $HAUT$ et variant entre $t=0$ et $t=10$ de $u_z=0$ et $u_z=-0.2$ (déformation verticale totale de $20\,\%$).

1.4 Résultats

Les solutions sont post-traitées au point C, en termes de contrainte équivalente Q, de déformation volumique totale ε_v et de coefficients d'écrouissage isotrope $\left(r_{ela}^{s,m}+r_{iso}^{m}\right)$ et déviatoire $\left(r_{ela}^{d,m}+r_{dev}^{m}\right)$, selon l'évolution de la déformation axiale ε_{zz}

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

Pour les modélisations mettant en avant l'approche grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG, on considère la déformation logarithmique $\underline{E}=1/2\log\left(I+2\,\underline{\Delta}\right)$, avec $\underline{\Delta}$ le tenseur de Green-Lagrange. La déformation volumique dans ce cas est directement obtenue à partir du déterminant du gradient de déformation, $J=det\left(F\right)$.

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*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c=50\text{kPa}$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre $0.$ et -0.2 (2ème phase du calcul) 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.
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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*.**

2.2 Grandeurs testées et résultats

2.2.1 Valeurs testées

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

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{s}:\underline{s}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	115523.	117640.	-1.799%
-2%	155466.	157072.	-1.022%
-5%	199986.	200850.	-0.430%
-10%	206823.	207649.	-0.398%
-20%	184853.	185854.	-0.539%

$$\varepsilon_V=trace(\varepsilon)$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	-3.78E-3	-3.82E-3	-1.125%
-2%	-4,34E-003	-4.34E-3	-0.051%
-10%	1.09E-2	1.07E-2	1.917%
-20%	3.237E-2	3.191E-2	1.433%

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

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.673	0.679	-0.904%
-2%	0.781	0.784	-0.406%
-5%	0.887	0.888	-0.107%
-10%	0.937	0.937	0.004%
-20%	0.966	0.967	-0.054%

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.0325	0.0328	-0.900%
-2%	0.0370	0.0372	-0.663%
-5%	0.0466	0.0467	-0.296%
-10%	0.0624	0.0623	0.085%
-20%	0.0979	0.0973	0.576%

2.2.2 Commentaires

L'écart entre les deux codes est très faible (inférieur à 2%).

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

3 Modélisation B

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation B est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c=100\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre $0.$ et -0.2 (2ème phase du calcul) 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. 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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*.**

3.2 Grandeurs testées et résultats

3.2.1 Valeurs testées

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

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{s}:\underline{s}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	188768.	191799.	-1.580%
-2%	253219.	255501.	-0.893%
-5%	329638.	330404.	-0.232%
-10%	355436.	355895.	-0.129%
-20%	340728.	341220.	-0.144%

$$\varepsilon_V=trace\left(\varepsilon\right)$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	-5.47E-3	-5.53E-3	-1.086%
-2%	-7.128E-3	-7.15E-3	-0.314%
-5%	-6.684E-3	-6.64E-3	0.660%
-10%	-8.227E-4	-8.22E-4	0.083%
-20%	1.261E-2	1.25E-2	0.905%

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

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.659	0.665	-0.879%
-2%	0.772	0.775	-0.431%
-5%	0.882	0.883	-0.115%
-10%	0.934	0.934	0.010%
-20%	0.965	0.965	0.010%

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.0575	0.0578	-0.466%
-2%	0.0627	0.0630	-0.471%
-5%	0.0723	0.0725	-0.286%
-10%	0.0867	0.0868	-0.132%
-20%	0.169	0.117	-0.054%

3.2.2 Commentaires

L'erreur relative est plus élevée quand les valeurs testées sont plus faibles, ce qui n'est pas anormal. En définitive, l'écart entre les deux codes est très raisonnable.

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

4 Modélisation C

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation C est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c=200\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre 0 et -0.2 (2ème phase du calcul) 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.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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*.**

4.2 Grandeurs testées et résultats

4.2.1 Valeurs testées

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

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{s}:\underline{s}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	306905.	311459.	-1.462%
-2%	413405.	416832.	-0.822%
-5%	543741.	545338.	-0.293%
-10%	605206.	605666.	-0.076%
-20%	616663.	616946.	-0.046%

$$\varepsilon_V=trace\left(\varepsilon\right)$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	-7.389E-3	-7.47E-3	-1.086%
-2%	-1.001E-2	-1.005E-2	-0.387%
-5%	-1.229E-2	-1.227E-2	0.175%
-10%	-1.096E-2	-1.092E-2	0.367%
-20%	-4.88E-3	-4.88E-3	-0.007%

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

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.642	0.648	-0.939%
-2%	0.761	0.765	-0.488%
-5%	0.877	0.878	-0.130%
-10%	0.931	0.932	-0.087%
-20%	0.964	0.964	-0.031%

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.102	0.102	0.112%
-2%	0.107	0.108	-0.532%
-5%	0.115	0.115	0.116%
-10%	0.125	0.126	-0.450%
-20%	0.147	0.147	-0.301%

4.2.2 Commentaires

L'erreur relative est plus élevée quand les valeurs testées sont plus faibles. En définitive, l'écart entre les deux codes est très raisonnable.

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

5 Modélisation D

5.1 Caractéristiques de la modélisation

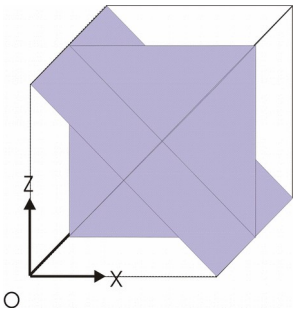
Le but de cette modélisation est de tester la fonctionnalité de réorientation du repère local définissant les trois plans de glissement liés aux mécanismes déviatoires de la loi de Hujeux. Cette réorientation est réalisée à l'aide de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM → MASSIF.

La modélisation D est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c = 100\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre $0.$ et -0.2 (2ème phase du calcul) 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.

On teste la réorientation des plans de glissement définie par une rotation du repère de $45°$ autour de l'axe (OZ). Cette réorientation est définie par AFFE_CARA_ELEM → MASSIF.



On charge l'objet CARAEL définissant l'orientation du repère local sur lequel seront définis les plans de glissement de la loi de Hujeux. 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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*.**

5.2 Grandeurs testées et résultats de la modélisation D

5.2.1 Valeurs testées

Les solutions sont calculées au point C et comparées à un calcul identique réalisé (avec Code_Aster) sur un échantillon préalablement tourné de $45°$. Elles sont données en termes de contrainte équivalente Q, de déformation volumique totale ε_v et de coefficients d'écrouissage isotrope $\left(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^{m}\right)$ et déviatoire $\left(r_{ela}^{d,m} + r_{dev}^{m}\right)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

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

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{\underline{s}}:\underline{\underline{s}}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-2%	148396	148396	0.0002%
-4%	176513	176513	0.006%
-6%	185559	185554	0.002%
-8%	187683	187681	0.001%
-10%	186806	186804	0.001%

$$\varepsilon_V=trace\left(\varepsilon\right)$$

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-2%	-7.40E-3	-7,40E-3	0.001%
-4%	-6,72E-3	-6,72E-3	0.016%
-6%	-4,36E-3	-4,36E-3	-0.001%
-8%	-1,45E-3	-1,45E-3	-0.013%
-10%	1,63E-3	1,63E-3	0.018%

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-2%	0,565	0,565	-0.062%
-4%	0,630	0,630	0.008%
-6%	0,654	0,654	0.073%
-8%	0,666	0,666	-0.035%
-10%	0,671	0,671	0.054%

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

ε_{zz}	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
-2%	0,067	0,067	-0.564%
-4%	0,074	0,074	0.140%
-6%	0,081	0,081	-0.499%
-8%	0,087	0,087	-0.038%
-10%	0,093	0,093	0.421%

5.2.2 Commentaires

L'erreur relative est toujours très faible, ce qui est normal, puisqu'il s'agit en définitive exactement du même calcul.

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

6 Modélisation E

6.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation E est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c=50\text{kPa}$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre $0.$ et -0.2 (2ème phase du calcul) en 100 pas de temps entre $t=0$ et $t=10$. La modélisation considère une cinématique grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG (DEORMATION='GDEF_LOG') .
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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*.**

6.2 Grandeurs testées et résultats

6.2.1 Valeurs testées

Les solutions sont calculées au point C et comparées à la fois aux résultats de la modélisation A et aux valeurs de référence de GEFDYN. Elles sont données en termes de contrainte équivalente Q, de déformation volumique totale ε_v / $J=det\left(\underline{\underline{F}}\right)$ et de coefficients d'écrouissage isotrope $\left(r_{ela}^{iso,m}+r_{iso}^{m}\right)$ et déviatoire $\left(r_{ela}^{d,m}+r_{dev}^{m}\right)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{\underline{s}}:\underline{\underline{s}}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION= 'PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	115523.	115620.	0.104%	117640.	1.717%
-2%	155466.	155603.	0.097%	157072.	0.935%
-5%	199986.	199911.	0.033%	200850.	0.468%
-10%	206823.	206191.	0.305%	207649.	0.702%
-20%	184853.	183693.	0.628%	185854.	1.162%

$$\varepsilon_V=trace\left(\varepsilon\right)\ ,\ J=det\left(\underline{\underline{F}}\right)$$

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION= 'PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	-3.78E-3	-0.00374	0.825%	-3.82E-3	1.946%
-2%	-4,34E-003	-0.00429	1.067%	-4.34E-3	1.109%
-10%	1.09E-2	0.01084	0.573%	1.07E-2	1.319%
-20%	3.237E-2	0.03226	0.337%	3.191E-2	1.086%

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

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

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION='PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION='GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.673	0.673	5.45E-03%	0.679	0.909%
-2%	0.781	0.781	5.23E-03%	0.784	0.416%
-5%	0.887	0.887	0.01258%	0.888	0.121%
-10%	0.937	0.937	0.00915%	0.937	6.51E-03%
-20%	0.966	0.966	6.58E-03%	0.967	0.061%

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

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION='PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION='GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.0325	0.0324	0.276%	0.0328	1.181%
-2%	0.0370	0.0368	0.296%	0.0372	0.962%
-5%	0.0466	0.0465	4.28E-03%	0.0467	0.305%
-10%	0.0624	0.0627	0.629%	0.0623	0.710%
-20%	0.0979	0.0992	1.396%	0.0973	1.976%

6.2.2 Commentaires

On observe que le résultat de l'intégration en grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG permet de reproduire, avec la cinématique enrichie, le comportement prescrit par la loi de comportement (variation au maximum de l'ordre de 1% pour les déformations volumiques). Voir les Figures **5** et **6**.

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

7 Modélisation F

7.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation B est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c = 100\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre $0.$ et -0.2 (2ème phase du calcul) en 100 pas de temps entre $t=0$ et $t=10$. La modélisation considère une cinématique grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG (DEORMATION='GDEF_LOG') .
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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*** **.**

7.2 Grandeurs testées et résultats

7.2.1 Valeurs testées

Les solutions sont calculées au point C et comparées à la fois aux résultats de la modélisation B et aux valeurs de référence de GEFDYN. Elles sont données en termes de contrainte équivalente Q, de déformation volumique totale ε_v / $J=det\left(\underline{\underline{F}}\right)$ et de coefficients d'écrouissage isotrope $\left(r_{ela}^{iso,m}+r_{iso}^{m}\right)$ et déviatoire $\left(r_{ela}^{d,m}+r_{dev}^{m}\right)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{\underline{s}}:\underline{\underline{s}}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz} , E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION= 'PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	188768.	189073.	0.304%	191799.	1.421%
-2%	253219.	253669.	0.233%	255501.	0.717%
-5%	329638.	330053.	0.151%	330404.	0.106%
-10%	355436.	355331.	0.020%	355895.	0.158%
-20%	340728.	339806.	0.271%	341220.	0.414%

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

$$\varepsilon_V = trace(\varepsilon)\ ,\ J = det(\underline{\underline{F}})$$

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION= 'PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	-5.47E-3	-0.00540	1.172%	-5.53E-3	2.340%
-2%	-7.128E-3	-0.00702	1.521%	-7.15E-3	1.831%
-5%	-6.684E-3	-0.00655	2.029%	-6.64E-3	1.338%
-10%	-8.227E-4	-0.00077	7.481%	-8.22E-4	6.775%
-20%	1.261E-2	0.01248	1.026%	1.25E-2	0.189%

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

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION=' PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.659	0.659	0.108%	0.665	0.853%
-2%	0.772	0.772	0.042%	0.775	0.418%
-5%	0.882	0.882	0.010%	0.883	0.117%
-10%	0.934	0.934	2.03E-03%	0.934	5.24E-03%
-20%	0.965	0.965	1.36E-03%	0.965	5.78E-03%

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

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION=' PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.0575	0.0573	0.313%	0.0578	0.820%
-2%	0.0627	0.0624	0.407%	0.0630	0.901%
-5%	0.0723	0.0721	0.314%	0.0725	0.619%
-10%	0.0867	0.0867	0.060%	0.0868	0.090%
-20%	0.169	0.118	0.624%	0.117	0.552%

7.2.2 Commentaires

On observe que le résultat de l'intégration en grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG permet de reproduire, avec la cinématique enrichie, le comportement prescrit par la loi de comportement. Dans ce cas une variation plus importante est observé pour des déformations élevées (variation au maximum de l'ordre de 10%). Voir les Figures **5** et **6**.

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

8 Modélisation G

8.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation C est *tridimensionnelle* et *statique non-linéaire*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* ($ELAS$) de l'échantillon jusqu'à $p_c = 200\,kPa$ (1ère phase du calcul). Cette préconsolidation a lieu en 1 pas de temps entre $t=-2$ et $t=0$.

Le déplacement vertical imposé à la facette supérieure varie entre 0 et -0.2 (2ème phase du calcul) en 100 pas de temps entre $t=0$ et $t=10$. La modélisation considère une cinématique grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG (DEORMATION='GDEF_LOG') .
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 dû à des incréments de chargement trop grands. ***Cette fonctionnalité est grandement recommandée*.**

8.2 Grandeurs testées et résultats

8.2.1 Valeurs testées

Les solutions sont calculées au point C et comparées à la fois aux résultats de la modélisation C et aux valeurs de référence de GEFDYN. Elles sont données en termes de contrainte équivalente Q, de déformation volumique totale ε_v / $J=det\left(\underline{\underline{F}}\right)$ et de coefficients d'écrouissage isotrope $\left(r_{ela}^{iso,m}+r_{iso}^{m}\right)$ et déviatoire $\left(r_{ela}^{d,m}+r_{dev}^{m}\right)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

$$Q=\sqrt{\frac{1}{2}\underline{\underline{s}}:\underline{\underline{s}}}\ \ [Pa]$$

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION= 'PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	306905.	307810.	0.995%	311459.	1.171%
-2%	413405.	414492.	0.610%	416832.	0.561%
-5%	543741.	545019.	0.335%	545338.	0.058%
-10%	605206.	606137	0.179%	605666.	0.078%
-20%	616663.	616650.	0.010%	616946.	0.048%

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

$$\varepsilon_V = trace(\varepsilon)\ ,\ J = det(\underline{\underline{F}})$$

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION= 'PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	-7.389E-3	-0.00725	1.404%	-7.47E-3	2.934%
-2%	-1.001E-2	-0.00979	2.055%	-1.005E-2	2.572%
-5%	-1.229E-2	-0.01197	2.730%	-1.227E-2	2.447%
-10%	-1.096E-2	-0.01063	3.263%	-1.092E-2	2.673%
-20%	-4.88E-3	-0.00467	4.941%	-4.88E-3	4.365%

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

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION=' PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.642	0.643	0.536%	0.648	0.835%
-2%	0.761	0.762	0.245%	0.765	0.438%
-5%	0.877	0.877	0.074%	0.878	0.113%
-10%	0.931	0.931	0.027%	0.932	0.083%
-20%	0.964	0.964	7.82E-03%	0.964	0.031%

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

ε_{zz}, E_{zz}	Code_Aster (DEFORMATION=' PETIT)	Code_Aster (DEFORMATION= 'GDEF_LOG)	erreur relative	GEFDYN	erreur relative
-1%	0.102	0.102	0.218%	0.102	0.263%
-2%	0.107	0.107	0.376%	0.108	1.016%
-5%	0.115	0.115	0.438%	0.115	0.405%
-10%	0.125	0.125	0.282%	0.126	0.805%
-20%	0.147	0.147	0.069%	0.147	0.298%

8.2.2 Commentaires

On observe que le résultat de l'intégration en grandes déformations avec l'opérateur GDEF_LOG permet de reproduire, avec la cinématique enrichie, le comportement prescrit par la loi de comportement. Dans ce cas une variation plus importante est observé pour des déformations élevées (variation au maximum de l'ordre de 5%). Voir les Figures **5** et **6**.

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

9 Synthèse des résultats

On représente dans les courbes suivantes les différentes comparaisons entre Code_Aster et Xloi (programme de calcul de loi de comportement, non éléments finis, sur un point matériel. La loi de Hujeux qui y est implémentée est identique à celle qui se trouve dans GEFDYN), en termes de contrainte déviatoire (Figure **1**), de déformation volumique totale (Figure **2**) et de coefficients d'écrouissage déviatoires (Figure **3**) et isotrope (Figure **4**).

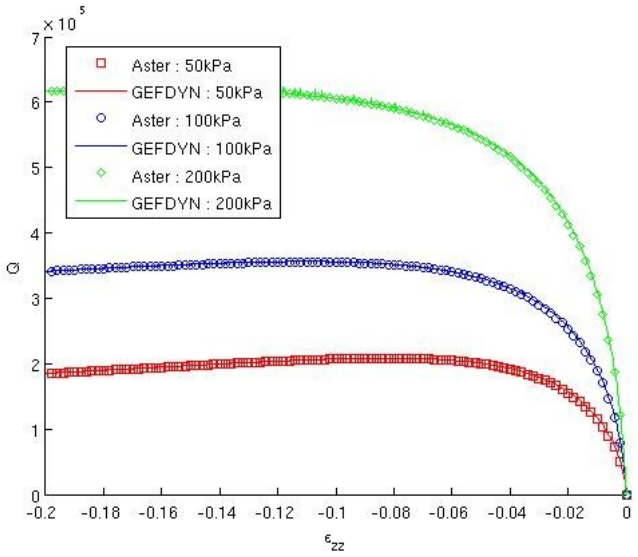


Figure 1 : ***Contrainte équivalente (notée « Q »)en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de*** 50 **,** 100 ***et*** 200kPa **.**

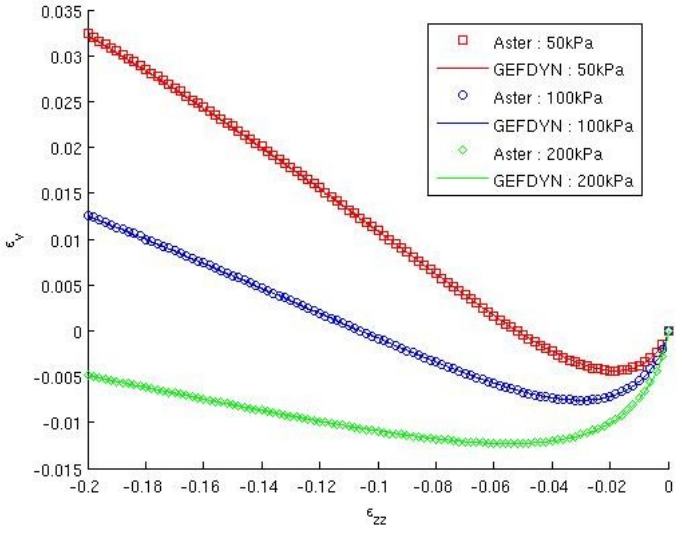


Figure 2 : ***Déformation volumique totale (notée « $EPSv$ ») en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de*** 50 **,** 100 ***et*** 200kPa **.**

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

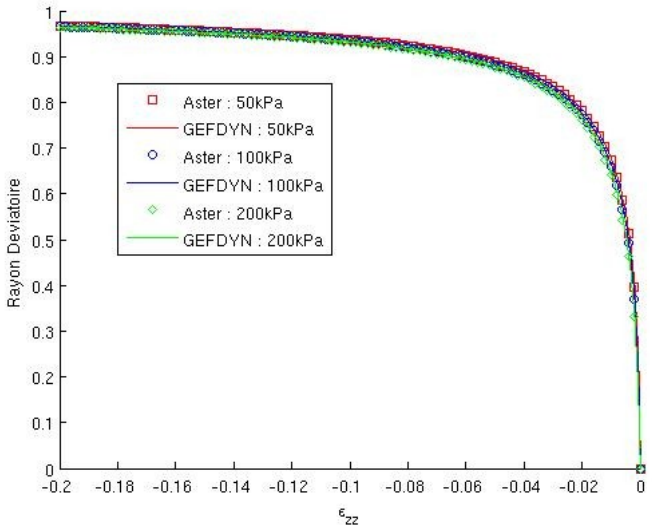


Figure 3 : ***rayon déviatoire en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de*** 50 , 100 ***et*** 200kPa ***.***

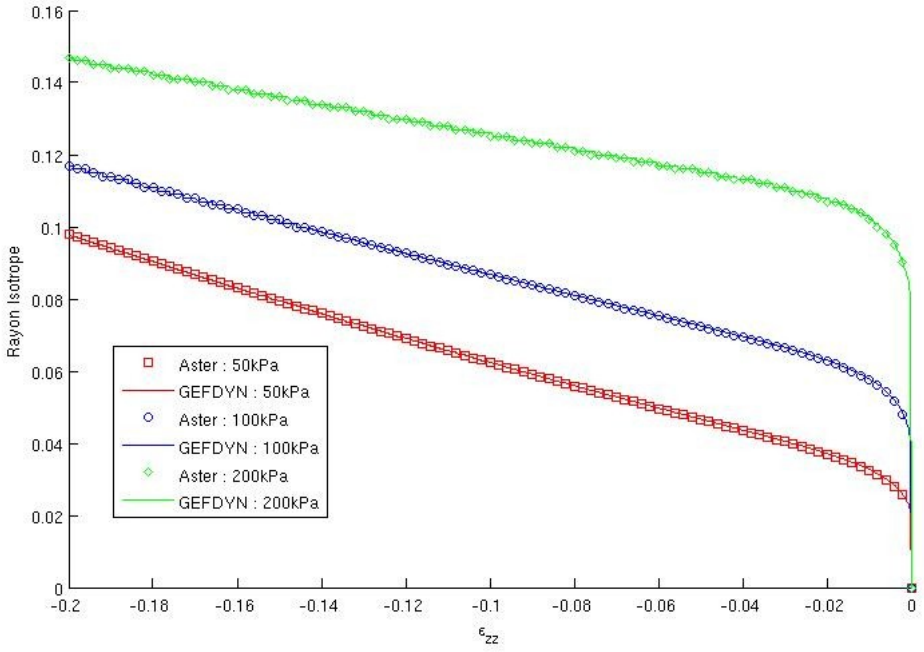


Figure 4: ***rayon isotrope en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de*** 50 , 100 ***et*** 200kPa ***.***

On représente dans les courbes suivantes les comparaisons entre les résultats avec une modélisation petites déformations et grandes déformations dans *Code_Aster*. La Figure **5** montre l'évolution des contraintes déviatoriques et une comparaison des déformations volumiques est présentée dans la Figure **6**.

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

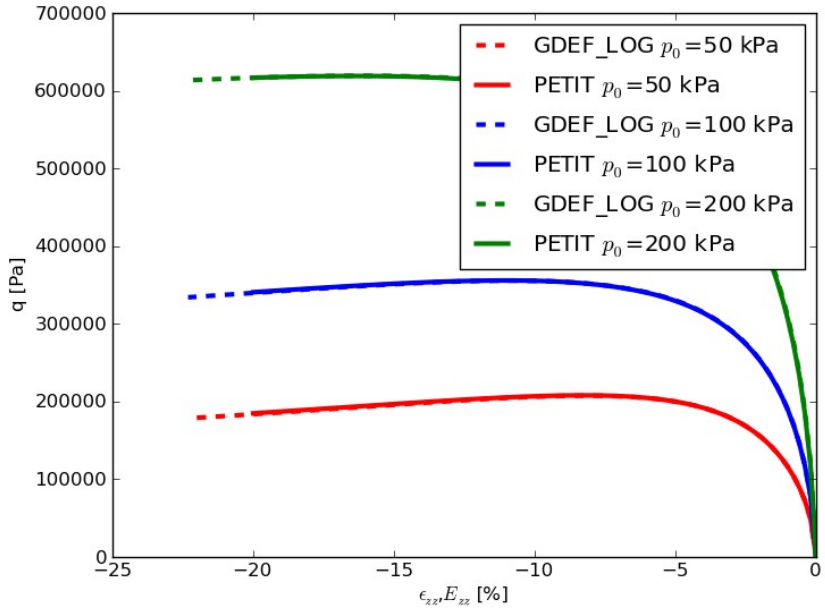


Figure 5 : ***Contrainte équivalente (notée « Q »)en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions à petites et grandes déformations dans Code_Aster, pour les pressions de consolidation de*** 50 , 100 ***et*** 200kPa .

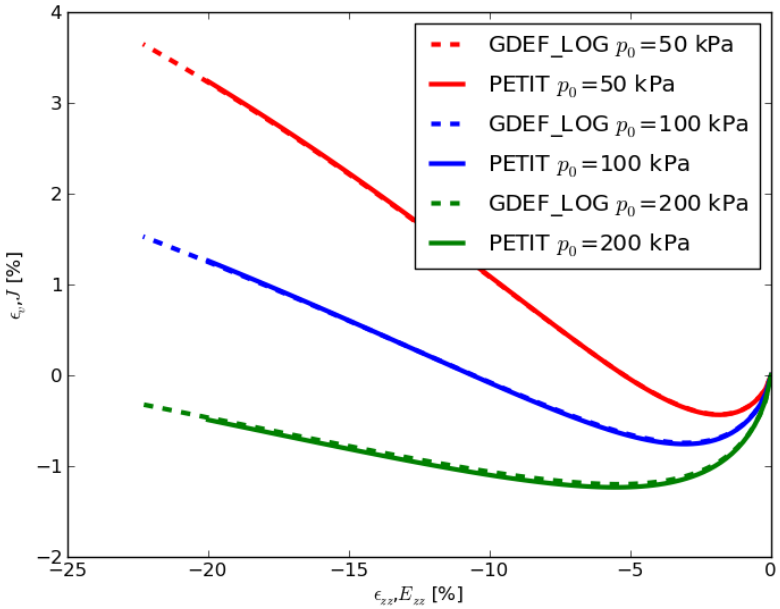


Figure 6 : ***Déformation volumique totale en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions à petites et grandes déformations dans Code_Aster, pour les pressions de consolidation de*** 50 , 100 ***et*** 200kPa .

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