

SSNV197 - Triaxiaux drainés avec la loi de Hujeux

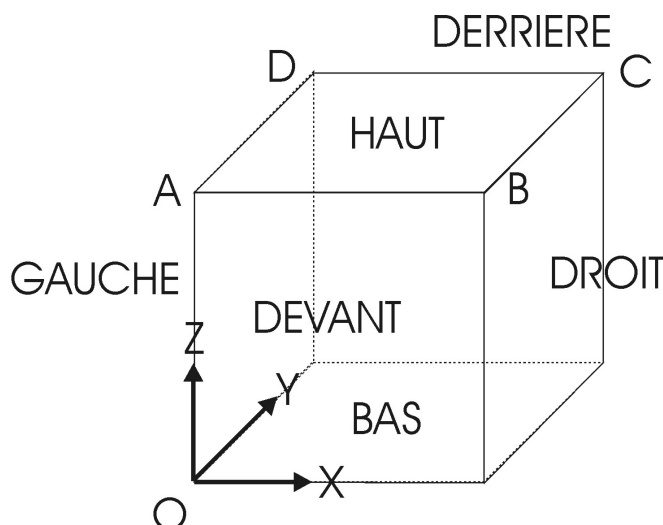
Résumé

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. Ce test comporte quatre modélisations :

- 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 ;

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

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 : $\varphi = 33^\circ$
- angle de dilatance : $\psi = 33^\circ$
- pression critique : $P_{c0} = -1000 \text{ kPa}$
- pression de référence : $P_{ref} = -1000 \text{ kPa}$
- rayon élastique du mécanisme isotrope : $r_{ela}^s = 0.001$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire : $r_{ela}^d = 0.005$
- $a_{mon} = 0.0001$
- $a_{cyc} = 0.008$
- $c_{mon} = 0.2$
- $c_{cyc} = 0.1$
- $r_{hys} = 0.05$
- $r_{mob} = 0.9$
- $x_m = 1$
- $dila = 1$

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

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*.

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* (*ELAS*) de l'échantillon jusqu'à $p_c = 50\text{kPa}$ (1^{ère} 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 (2^{ème} 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 $(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^m)$ et déviatoire $(r_{ela}^{d,m} + r_{dev}^m)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

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

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%

$$\varepsilon_v = \text{trace}(\varepsilon)$$

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%

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

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 %).

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 $p_c = 100 \text{ kPa}$ (1^{ère} 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 (2^{ème} 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'écroûissage isotrope $(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^m)$ et déviatoire $(r_{ela}^{d,m} + r_{dev}^m)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

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

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%

$$\varepsilon_v = \text{trace}(\varepsilon)$$

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%

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

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.

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 $p_c = 200 \text{ kPa}$ (1^{ère} 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 (2^{ème} 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 Hujoux 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'érouissage isotrope $(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^m)$ et déviatoire $(r_{ela}^{d,m} + r_{dev}^m)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

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

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%

$$\varepsilon_v = \text{trace}(\varepsilon)$$

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%

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

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.

5 Modélisation D

5.1 Caractéristiques de la modélisation

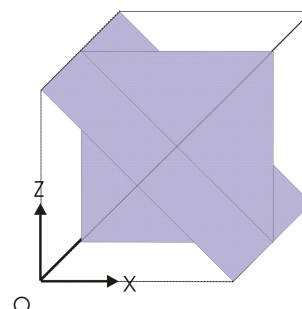
Le but de cette modélisation est de tester la fonctionnalité de réorientation du repère local définissant les trois plans de glissement liés aux mécanismes déviatoires de la loi de Hujeux. Cette réorientation est réalisée à l'aide de l'opérateur `AFFE_CARA_ELEM` → `MASSIF`.

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

On effectue d'abord une *préconsolidation élastique* (`ELAS`) de l'échantillon jusqu'à $p_c = 100 \text{ kPa}$ (1^{ère} 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 (2^{ème} 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 $(r_{ela}^{iso,m} + r_{iso}^m)$ et déviatoire $(r_{ela}^{d,m} + r_{dev}^m)$, et récapitulées dans les tableaux suivants :

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

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%

$$\varepsilon_V = \text{trace}(\varepsilon)$$

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%

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

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%

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

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.

6 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'écoulement déviatoires (Figure 3) et isotrope (Figure 4).

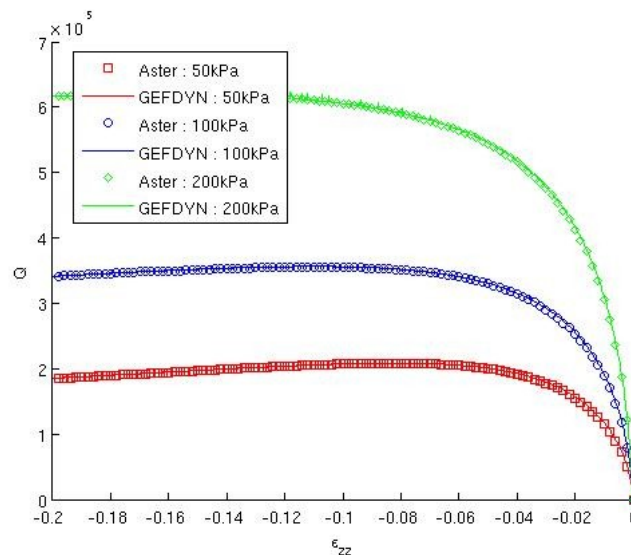


Figure 1 : Contrainte équivalente (notée « Q ») en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de 50 , 100 et 200kPa .

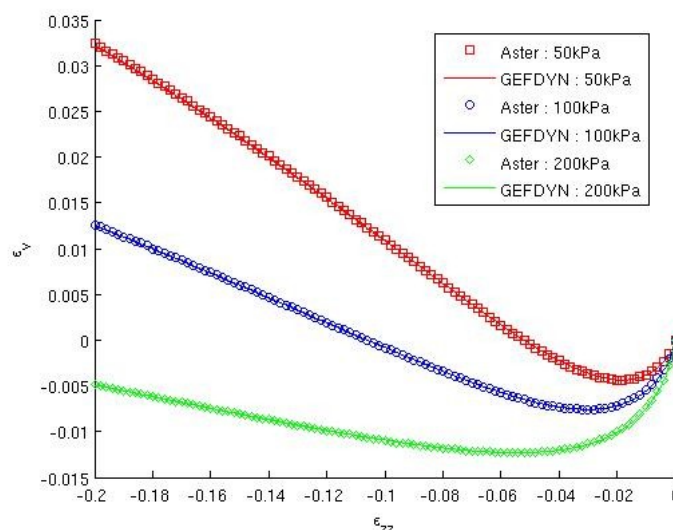


Figure 2 : Déformation volumique totale (notée « EPS_v ») en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de 50 , 100 et 200kPa .

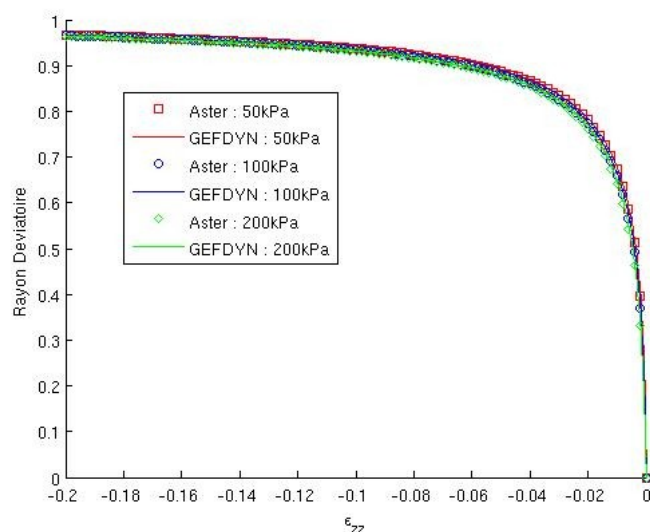


Figure 3 : rayon déviatoire en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de 50 , 100 et 200kPa .

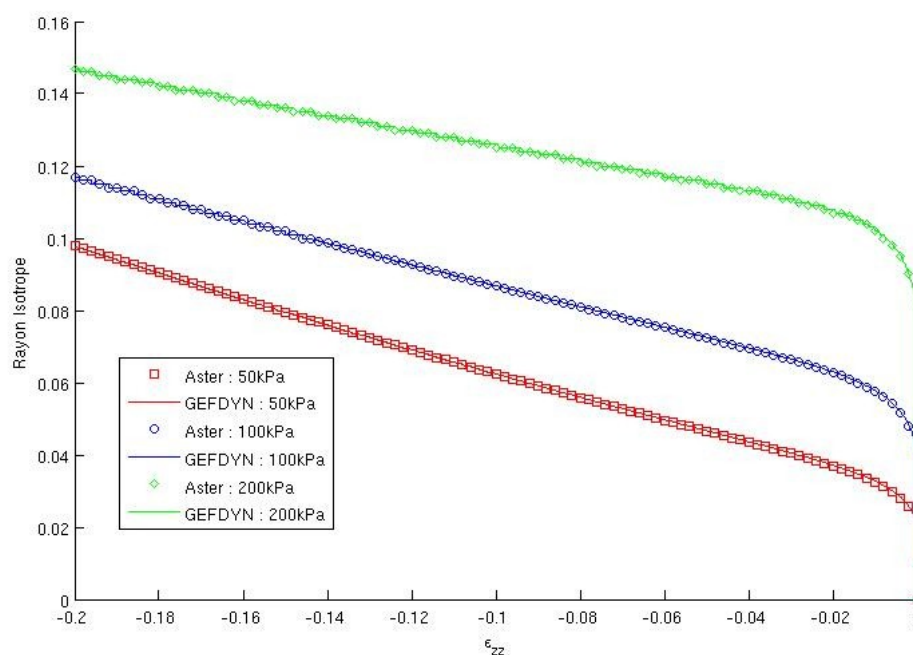


Figure 4: rayon isotrope en fonction de la déformation axiale : comparaison entre les solutions Code_Aster et Xloi, pour les pressions de consolidation de 50 , 100 et 200kPa .