

COMP012 – Test de la loi de Hujeux sur un point matériel

Résumé :

L'objectif de ce test est de valider la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21] qui permet de simuler au point matériel quatre types de trajets de chargement caractéristiques d'essais géomécaniques :

- essai triaxial monotone drainé
- essai triaxial monotone non drainé
- essai triaxial cyclique non drainé
- essai de cisaillement cyclique drainé

Ces quatre essais sont simulés avec la loi de Hujeux. Les solutions calculées sont comparées à des résultats issus du code éléments finis GEFDYN de l'École Centrale Paris pour les trois premiers essais, on effectue un test de non régression pour le dernier.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La géométrie est 0D (la modélisation est de type « point matériel »).

1.2 Propriétés du matériau

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

Les propriétés hydrauliques sont :

- coefficient de Biot : $B = 1$.
- module de compressibilité de l'eau $K_e = 1.E12 \text{ Pa}$ (coefficient de compressibilité $1/K_e = 1.E-12 \text{ Pa}^{-1}$)

1.3 Conditions aux limites et chargements

Quatre trajets de chargement caractéristiques d'essais géomécaniques sont définis automatiquement par la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21].

1.3.1 Trajet de chargement 1

Ce trajet est caractéristique d'un essai triaxial monotone drainé :

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = -5.E4 \text{ Pa}$, et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -5.E4 \text{ Pa}$, tout en imposant une rampe de déformation verticale (Figure 1.3.1-1) entre $t=0$ et $t=100$, de valeur finale $\varepsilon_{zz} = -20\%$

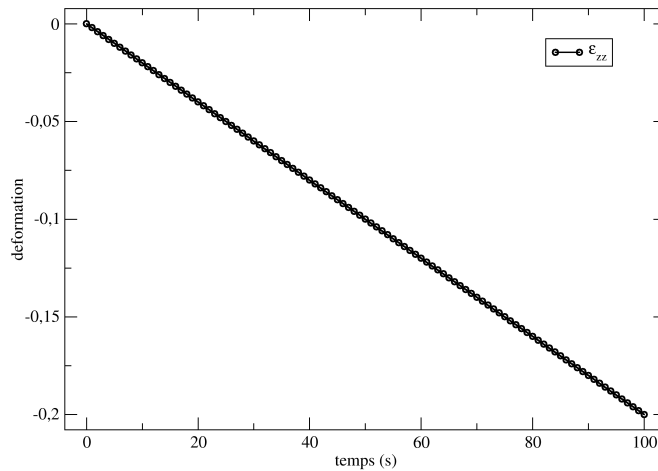


Figure 1.3.1-1: Trajet de chargement 1

Sous le mot-clé facteur ESSAI_TD de la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet correspond à la saisie suivante :

- PRES_CONF = $-5.E4 Pa$
- EPSI_IMPOSE = -0.2

1.3.2 Trajet de chargement 2

Ce trajet est caractéristique d'un essai triaxial monotone non drainé (on suppose la saturation totale) :

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = -5.E4 Pa$, et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -5.E4 Pa$, tout en imposant une rampe de déformation verticale entre $t=0$ et $t=100$, de valeur finale $\varepsilon_{zz} = -2\%$. Le squelette et le fluide sont supposés incompressibles, ce qu'on modélise en imposant $tr(\varepsilon) = 0$. Pour cela on impose aux déformations latérales ε_{xx} et ε_{yy} de suivre une rampe telle qu'entre $t=0$ et $t=100$, ces déformations varient de 0 à 1% (Figure 1.3.2-1).

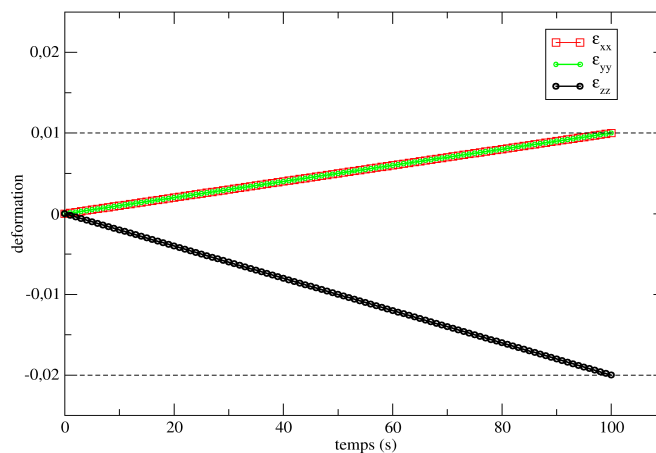


Figure 1.3.2-1: Trajet de chargement 2

Sous le mot-clé facteur ESSAI_TND de la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet correspond à la saisie suivante :

- PRES_CONF = $-5.E4 Pa$

- EPSI_IMPOSE=-0.02

1.3.3 Trajet de chargement 3

Ce trajet est caractéristique d'un essai triaxial cyclique non drainé (on suppose la saturation totale) :

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = -3.E4 Pa$, et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -3.E4 Pa$, tout en imposant pour la contrainte effective verticale σ'_{zz} le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.3-1, d'amplitude $1.5E4 Pa$ et de valeur moyenne $-3.E4 Pa$. Ceci est modélisé en imposant des relations linéaires entre les composantes diagonales du tenseur des déformations, de telle sorte que :

$$\begin{cases} \sigma_{xx} + K_e tr(\boldsymbol{\varepsilon}) = \sigma^0 \\ \sigma_{yy} + K_e tr(\boldsymbol{\varepsilon}) = \sigma^0 \\ \sigma_{zz} + K_e tr(\boldsymbol{\varepsilon}) = \sigma'_{zz} \end{cases}$$

où K_e désigne le module de compressibilité de l'eau, σ^0 la pression latérale maintenue constante, et σ'_{zz} la contrainte effective imposée (Figure 1.3.3-1)

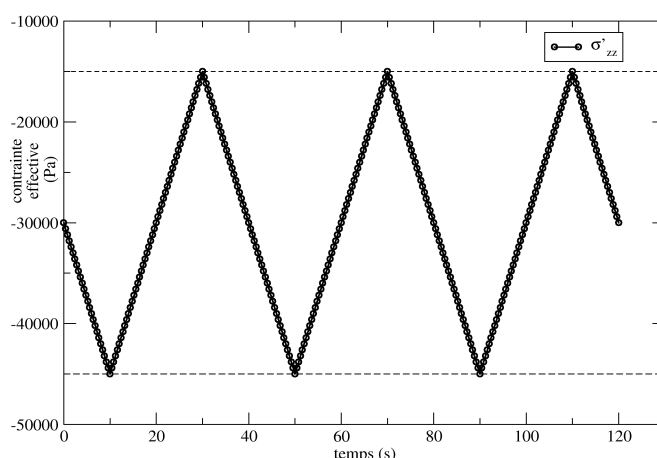


Figure 1.3.3-1: Trajet de chargement 3

Sous le mot-clé facteur ESSAI_TND_C de la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet de chargement correspond à la saisie suivante :

- PRES_CONF=-3.E4 Pa
- SIGM_IMPOSE=1.5E4 Pa
- NB_CYCLE=3

1.3.4 Trajet de chargement 4

Ce trajet est caractéristique d'un essai de cisaillement cyclique drainé :

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = -5.E4 Pa$, et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -5.E4 Pa$, tout en imposant pour ε_{xy} le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.4-1, d'amplitude 0.0195 % et de valeur moyenne 0.

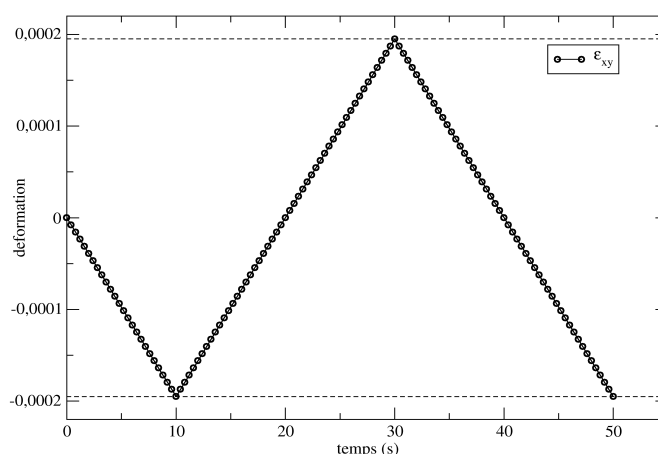


Figure 1.3.4-1: Trajet de chargement 4

Sous le mot-clé facteur ESSAI_CISA_C de la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet correspond à la saisie suivante :

- PRES_CONF = $-5.E4 Pa$
- EPSI_IMPOSE = $1.95E-4$
- NB_CYCLE = 1

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques de la modélisation

Simulation au point matériel.

2.2 Grandeurs testées et résultats

2.2.1 Trajet de chargement 1

Les solutions sont post-traitées en l'unique point du modèle et comparées à des références GEFDYN. en termes de contrainte équivalente de Von Mises Q et de déformation volumique ε_v

$$Q = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma^d : \sigma^d}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\varepsilon_{zz} = -1 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	117640 Pa	2.%
$\varepsilon_{zz} = -2 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	157072 Pa	2.%
$\varepsilon_{zz} = -5 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	200850 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -10 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	207649 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -20 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	185854 Pa	1.%

$$\varepsilon_v = tr(\varepsilon)$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\varepsilon_{zz} = -1 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-0.382%	2.%
$\varepsilon_{zz} = -2 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-0.434	2.%
$\varepsilon_{zz} = -10 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	1.07%	3.%
$\varepsilon_{zz} = -20 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	3.191%	5.%

2.2.2 Trajet de chargement 2

Les solutions sont post-traitées en l'unique point du modèle et comparées à des références GEFDYN. en termes de contrainte équivalente de Von Mises Q et de pression isotrope P .

$$Q = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma^d : \sigma^d}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\varepsilon_{zz} = -0.1 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	31547 Pa	3.%
$\varepsilon_{zz} = -0.2 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	40129 Pa	2.%
$\varepsilon_{zz} = -0.5 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	51937 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -1. \%$	'SOURCE_EXTERNE'	68286 Pa	1.%

$\varepsilon_{zz} = -2. \%$	'SOURCE_EXTERNE'	1103161 Pa	1.%
-----------------------------	------------------	------------	-----

$$3P = tr(\sigma)$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\varepsilon_{zz} = -0.1 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-138887 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -0.2 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-133789 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -0.5 \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-124952 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -1. \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-136801 Pa	1.%
$\varepsilon_{zz} = -2. \%$	'SOURCE_EXTERNE'	-185971 Pa	1.%

2.2.3 Trajet de chargement 3

Les solutions sont post-traitées en l'unique point du modèle et comparées à des références GEFDYN. en termes de pression isotrope P

$$3P = tr(\sigma)$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'SOURCE_EXTERNE'	-80193. Pa	1.%
$t = 30. s$	'SOURCE_EXTERNE'	-74078. Pa	1.%
$t = 50. s$	'SOURCE_EXTERNE'	-66250. Pa	1.%
$t = 70. s$	'SOURCE_EXTERNE'	-52999 Pa	2.%
$t = 90. s$	'SOURCE_EXTERNE'	-45672. Pa	2.%

2.2.4 Trajet de chargement 4

On effectue un test de non régression sur la contrainte σ_{xy} à différents instants du chargement.

$$\sigma_{xy}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'NON_REGRESSION'	-9.99205E+03 Pa	0.1%
$t = 30. s$	'NON_REGRESSION'	1.00784E+04 Pa	0.1%
$t = 50. s$	'NON_REGRESSION'	-9.95414E+03 Pa	0.1%

2.3 Remarques

Les valeurs de référence GEFDYN sont déjà utilisées dans trois tests existants, qui correspondent aux trois premiers trajets de chargement :

- trajet 1 : ssnv197 [V6.04.197], modélisation A
- trajet 2 : wtnv133 [V7.31.133], modélisation A
- trajet 3 : wtnv134 [V7.31.134], modélisation B

3 Synthèse des résultats

Ce test valide la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21] pour les trois premiers trajets de chargement, en prenant les valeurs de références GEFDYN déjà utilisées dans des tests existants (ssnv197 [V6.04.197], wtnv133 [V7.31.133], wtnv134 [V7.31.134]).