

## COMP012 – Test de la loi de Hujoux 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 huit types de trajets de chargement caractéristiques d'essais géomécaniques :

- essai triaxial monotone drainé
- essai triaxial monotone non drainé
- essai triaxial cyclique non drainé
- essai triaxial cyclique alterné drainé
- essai triaxial cyclique non alterné drainé
- essai de cisaillement cyclique drainé
- essai oedométrique cyclique drainé
- essai de compression isotrope cyclique drainé

Ces huit essais sont simulés avec la loi de Hujoux. Ils sont regroupés dans la modélisation **A**. 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 les cinq derniers et on compare la solution calculée avec `ESSAI_ISOT_C` aux résultats du cas test `ssnv204a`.

Le neuvième essai est un triaxial monotone drainé simulé avec la loi de Mohr-Coulomb. Il fait l'objet de la modélisation **B**. La solution est comparée avec une solution analytique.

La modélisation **C** traite l'essai triaxial cyclique non-drainé d'un sable modélisé avec la loi de Hujoux. Elle permet de valider la détection de l'instabilité propre à cet essai et le basculement de l'essai en déformation contrôlée.

## 1 Problème de référence pour la modélisation A

### 1.1 Géométrie

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

### 1.2 Propriétés du matériau

Le matériau est du type d'un sable dense. 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 :  $r_{éla}^s = 0.001$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire :  $r_{éla}^d = 0.005$
- $a_{mon} = 0.0001$
- $a_{cyc} = 0.008$
- $c_{mon} = 0.2$
- $c_{cyc} = 0.1$
- $r_{hys} = 0.05$
- $r_{mob} = 0.9$
- $x_m = 1$
- 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

Six 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  $\varepsilon_{zz} = -20\%$

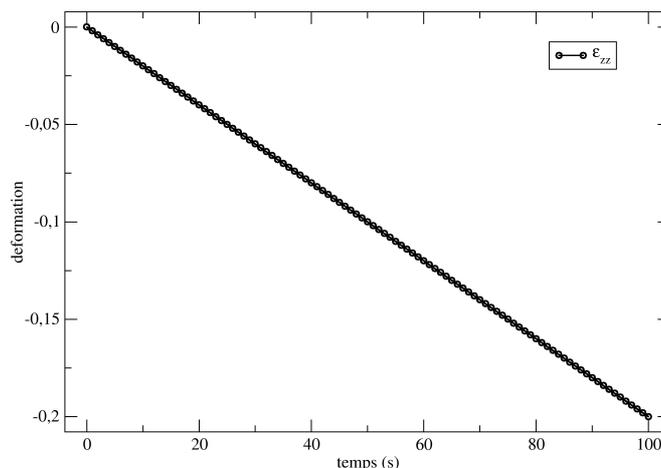


Figure 1.3.1-1: Trajet de chargement 1

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  $tr(\boldsymbol{\varepsilon}) = 0$ . Pour cela on impose aux déformations latérales  $\varepsilon_{xx}$  et  $\varepsilon_{yy}$  de suivre une rampe telle qu'entre  $t=0$  et  $t=100$ , ces déformations varient de 0 à 1% (Figure 1.3.2-1).

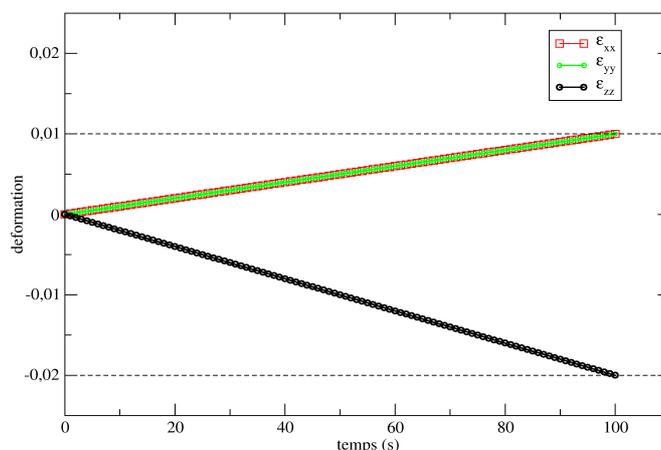


Figure 1.3.2-1: Trajet de chargement 2

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  $\sigma'_{zz}$  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,  $\sigma^0$  la pression latérale maintenue constante, et  $\sigma'_{zz}$  la contrainte effective imposée (Figure 1.3.3-1)

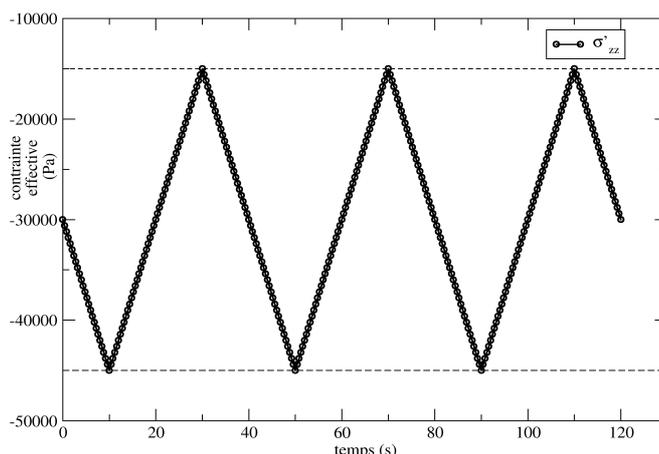


Figure 1.3.3-1: Trajet de chargement 3

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 triaxial cyclique alterné 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  $\varepsilon_{zz}$  le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.4-1, d'amplitude 2% et de valeur moyenne 0.

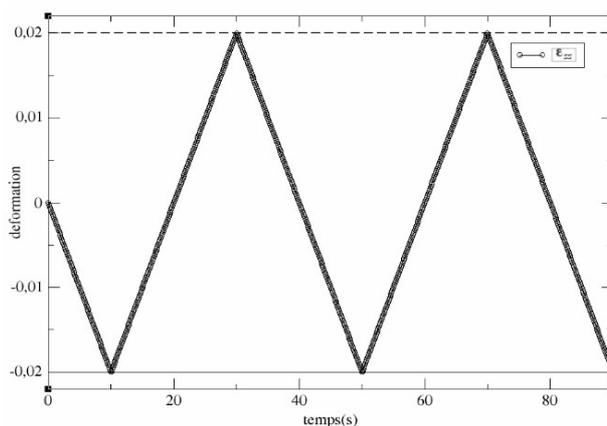


Figure 1.3.4-1: Trajet de chargement 4

Sous le mot-clé facteur ESSAI\_TD\_A 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
- NB\_CYCLE = 2

### 1.3.5 Trajet de chargement 5

Ce trajet est caractéristique d'un essai triaxial cyclique non alterné 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  $\varepsilon_{zz}$  le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.5-1, d'amplitude 2% et de valeur moyenne  $\varepsilon_{zz} = -1\%$ .

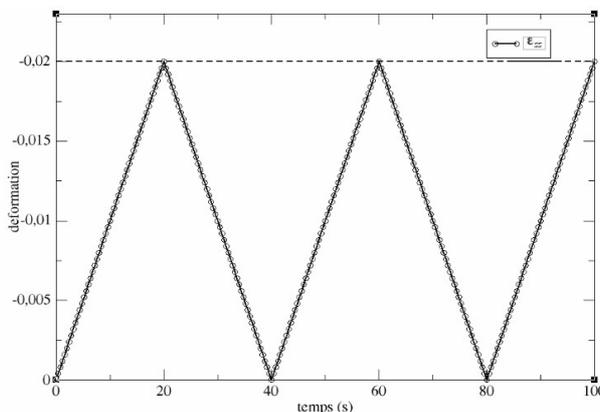


Figure 1.3.5-1: Trajet de chargement 5

Sous le mot-clé facteur ESSAI\_TD\_NA de la macro-commande CALC\_ESSAI\_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet correspond à la saisie suivante :

- PRES\_CONF =  $-5.E4 Pa$
- EPSI\_IMPOSE =  $-0.02$
- NB\_CYCLE = 2

### 1.3.6 Trajet de chargement 6

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  $\gamma_{xy}$  le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.6-1, d'amplitude 0.039 % et de valeur moyenne 0.

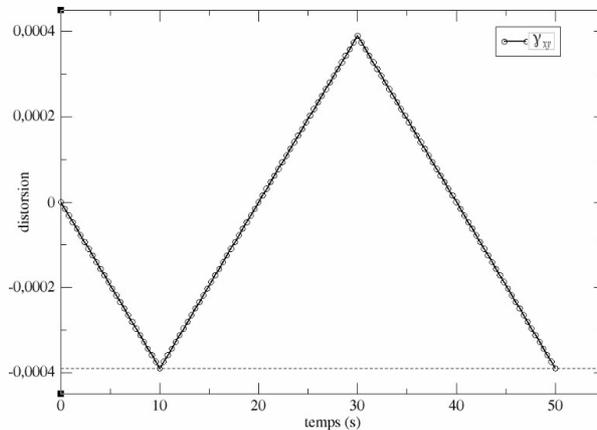


Figure 1.3.6-1: Trajet de chargement 6

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 =  $-5.E4 Pa$
- GAMMA\_IMPOSE =  $3.9E-4$
- NB\_CYCLE = 1

## 1.3.7 Trajet de chargement 7

Ce trajet est caractéristique d'un essai oedométrique 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 la contrainte effective verticale  $\sigma'_{zz}$  le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.7-1, d'amplitude variable égale respectivement à  $-3.E4 Pa$  ,  $-4.E4 Pa$  et  $-5.E4 Pa$  , comptée à partir de la contrainte hydrostatique initiale pour le premier cycle, et à partir de la contrainte de décharge pour les cycles suivants. La contrainte de décharge est de :  $-6E4 Pa$  .

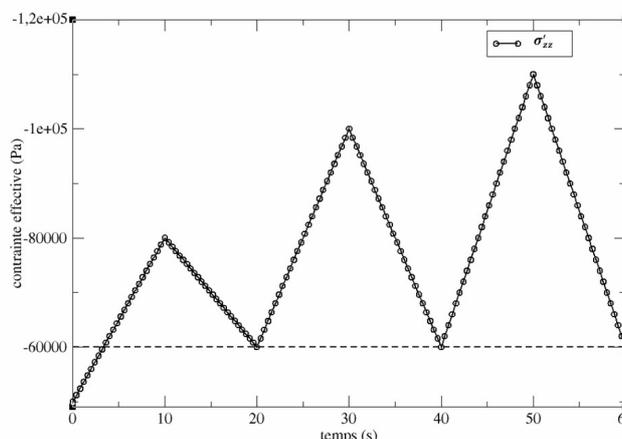


Figure 1.3.7-1 : Trajet de chargement 7

Sous le mot-clé facteur ESSAI\_OEDO\_C de la macro-commande CALC\_ESSAI\_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet correspond à la saisie suivante :

- PRES\_CONF =  $-5.E4 Pa$
- SIGM\_IMPOSE =  $(-3.E4, -4.E4, -5.E4, )$
- SIGM\_DECH =  $-6.E4$

### 1.3.8 Trajet de chargement 8

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

- on part d'un état de contrainte hydrostatique :  $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = -1.E5 Pa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on applique ensuite une pression isotrope  $\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_{zz} = \sigma'_c$ , dont l'amplitude à chaque cycle est égale respectivement à  $-2.E5 Pa$  et  $-2.4E5 Pa$ , comptée à partir de la contrainte hydrostatique initiale pour le premier cycle, et à partir de la contrainte de décharge pour le deuxième. La contrainte de décharge étant égale à la contrainte isotrope initiale:  $-1E5 Pa$ . Ce chargement est illustré à la Figure 1.3.8-1.

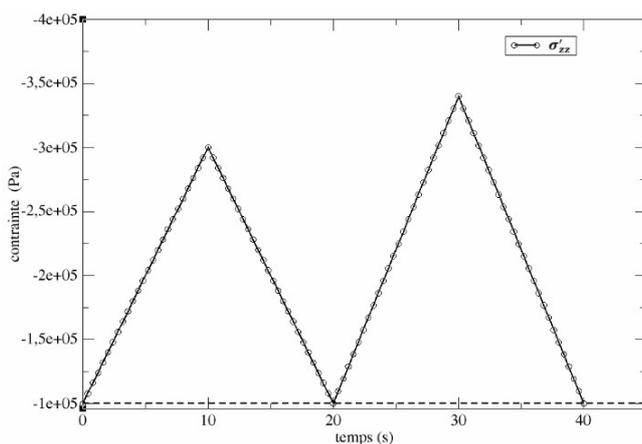


Figure 1.3.8-1 : Trajet de chargement 8

Sous le mot-clé facteur ESSAI\_ISOT\_C de la macro-commande CALC\_ESSAI\_GEOMECA [U4.90.21], ce trajet correspond à la saisie suivante :

- PRES\_CONF =  $-1.E5 Pa$
- SIGM\_IMPOSE =  $(-2.E5, -2.4E5)$
- SIGM\_DECH =  $-1.E5$

## 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 (ESSAI\_TD)

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  $\xi_v$

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\varepsilon_{zz} = -1\%$	'SOURCE_EXTERNE'	117640 Pa	2.0%
$\varepsilon_{zz} = -2\%$	'SOURCE_EXTERNE'	157072 Pa	2.0%
$\varepsilon_{zz} = -5\%$	'SOURCE_EXTERNE'	200850 Pa	1.0%
$\varepsilon_{zz} = -10\%$	'SOURCE_EXTERNE'	207649 Pa	1.0%
$\varepsilon_{zz} = -20\%$	'SOURCE_EXTERNE'	185854 Pa	1.0%

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\varepsilon_{zz} = -1\%$	'SOURCE_EXTERNE'	-0.382%	2.0%
$\varepsilon_{zz} = -2\%$	'SOURCE_EXTERNE'	-0.434	2.0%
$\varepsilon_{zz} = -10\%$	'SOURCE_EXTERNE'	1.07%	3.0%
$\varepsilon_{zz} = -20\%$	'SOURCE_EXTERNE'	3.191%	5.0%

#### 2.2.2 Trajet de chargement 2 (ESSAI\_TND)

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	3.0%
$\varepsilon_{zz} = -0.2\%$	'SOURCE_EXTERNE'	40129 Pa	2.0%
$\varepsilon_{zz} = -0.5\%$	'SOURCE_EXTERNE'	51937 Pa	1.0%
$\varepsilon_{zz} = -1.0\%$	'SOURCE_EXTERNE'	68286 Pa	1.0%

$\varepsilon_{zz} = -2. \%$	'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 (ESSAI\_TND\_C)

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 (ESSAI\_TD\_A)

On effectue un test de non régression sur la contrainte équivalente de Von Mises  $Q$  et de déformation volumique  $\varepsilon_{vol}$ .

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'NON_REGRESSION'	-15.57654 E+04 Pa	0.0001%
$t = 30. s$	'NON_REGRESSION'	4.24744 E+04 Pa	0.0001%
$t = 50. s$	'NON_REGRESSION'	-15.39714 E+04 Pa	0.0001%

$$\varepsilon_{vol}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'NON_REGRESSION'	-4.33281931383E-03	0.0001%
$t = 30. s$	'NON_REGRESSION'	5.89630135815E-04	0.0001%
$t = 50. s$	'NON_REGRESSION'	-8.75197203863E-03	0.0001%

## 2.2.5 Trajet de chargement 5 (ESSAI\_TD\_NA)

On effectue un test de non régression sur la contrainte équivalente de Von Mises  $Q$  et de déformation volumique  $\epsilon_{vol}$ .

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 20. s$	'NON_REGRESSION'	-15.58495 E+04 Pa	0.0001%
$t = 40. s$	'NON_REGRESSION'	3.66029 E+04 Pa	0.0001%
$t = 60. s$	'NON_REGRESSION'	-14.29862 E+04 Pa	0.0001%

$$\epsilon_{vol}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 20. s$	'NON_REGRESSION'	-4.33090139425 E-3	0.0001%
$t = 40. s$	'NON_REGRESSION'	-3.24057746269 E-3	0.0001%
$t = 60. s$	'NON_REGRESSION'	-9.73288861173 E-3	0.0001%

## 2.2.6 Trajet de chargement 6 (ESSAI\_CISA\_C)

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

$$\sigma_{xy}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'NON_REGRESSION'	-1.002427E+04 Pa	0.0001%
$t = 30. s$	'NON_REGRESSION'	1.00516E+04 Pa	0.0001%
$t = 50. s$	'NON_REGRESSION'	-1.000155E+04 Pa	0.0001%

## 2.2.7 Trajet de chargement 7 (ESSAI\_OEDO\_C)

On effectue un test de non régression sur la déformation volumique  $\epsilon_{vol}$  et la contrainte  $\sigma_{xx}$  à différents instants du chargement.

$$\epsilon_{vol}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'NON_REGRESSION'	-8.48266637218E-04	0.0001%
$t = 30. s$	'NON_REGRESSION'	-1.68714233218E-03	0.0001%
$t = 50. s$	'NON_REGRESSION'	-2.14894009601E-03	0.0001%

$$\sigma_{xx}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'NON_REGRESSION'	-49721.6863437 Pa	0.0001%
$t = 30. s$	'NON_REGRESSION'	-53981.1605469 Pa	0.0001%
$t = 50. s$	'NON_REGRESSION'	-56319.3772981 Pa	0.0001%

## 2.2.8 Trajet de chargement 8 (ESSAI\_ISOT\_C)

Les solutions sont post-traitées en l'unique point du modèle et les valeurs de la déformation volumique  $\epsilon_{vol}$  sont comparées aux résultats du cas test ssnv204a à différents instants du chargement.

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 10. s$	'AUTRE_ASTER'	-0.01356660	0.1%
$t = 20. s$	'AUTRE_ASTER'	-0.00091215	0.1%
$t = 30. s$	'AUTRE_ASTER'	-0.01591635	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 Problème de référence pour la modélisation B

---

Identique à celui décrit dans la documentation **V6.04.232**.

## 4 Modélisation B

### 4.1 Caractéristiques de la modélisation

Simulation au point matériel. L'objectif est de valider la compatibilité de CALC\_ESSAI\_GEOMECA avec la loi de Mohr-Coulomb.

Le nombre d'incrément temporels est égal à 300. La pression de confinement initial est de  $\sigma_0 = -50 \text{ kPa}$ . La déformation axiale maximale est égale à  $\epsilon_{zz}^{max} = 0,03 \%$ .

Le critère de convergence est RESI\_GLOB\_RELA =  $10^{-10}$ .

### 4.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont comparées à la solution analytique à l'instant final. Elles sont données en termes de contraintes verticale  $\sigma_{zz}$  et horizontale  $\sigma_{xx}$ , et récapitulées dans le tableau suivant :

$t = 30 \text{ sec}$	Code_Aster	Solution analytique	Erreur relative [%]
$\sigma_{zz}$	-1,732895416041E+5	-1,732895416041E+5	0
$\sigma_{xx}$	50000.	50000.	0

Tableau 4.2-1 : Validation des résultats pour la modélisation B

## 5 Problème de référence pour la modélisation C

### 5.1 Géométrie

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

### 5.2 Propriétés du matériau

Le matériau est du type d'un sable lâche. Les propriétés élastiques sont :

- module d'Young :  $E=670\text{ MPa}$
- coefficient de Poisson :  $\nu=0.25$

Les propriétés anélastiques (Hujeux) sont :

- puissance de la loi élastique non-linéaire :  $n_e=0.5$
- $\beta=29$
- $d=5.8$
- $b=0.2$
- angle de frottement :  $\varphi=40^\circ$
- angle de dilatance :  $\psi=40^\circ$
- pression critique :  $P_{c0}=-150\text{ kPa}$
- pression de référence :  $P_{ref}=-1000\text{ kPa}$
- rayon élastique du mécanisme isotrope :  $r_{\text{éla}}^s=0.006$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire :  $r_{\text{éla}}^d=0.06$
- $a_{\text{mon}}=0.0024$
- $a_{\text{cyc}}=0.00024$
- $c_{\text{mon}}=0.01$
- $c_{\text{cyc}}=0.005$
- $r_{\text{hys}}=0.15$
- $r_{\text{mob}}=0.9$
- $x_m=2.5$
- $\text{dila}=2$

Les propriétés hydrauliques sont :

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

### 5.3 Conditions aux limites et chargements

Le trajet de chargement triaxial cyclique non-drainé est défini automatiquement par la macro-commande CALC\_ESSAI\_GEOMECA [U4.90.21].

#### 5.3.1 Trajet de chargement triaxial cyclique non-drainé

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

- on part d'un état de contrainte hydrostatique :  $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = -200\text{ kPa}$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale :  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -200\text{ kPa}$ , tout en imposant pour la contrainte effective verticale  $\sigma'_{zz}$  le chargement cyclique illustré à la Figure 5.3.1-1, d'amplitude  $1.1E5\text{ Pa}$  et de

valeur moyenne  $-200\text{ kPa}$ . Ceci est modélisé en imposant des relations linéaires entre les composantes diagonales du tenseur des déformations, de telle sorte que :

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

où  $K_e$  désigne le module de compressibilité de l'eau,  $\sigma^0$  la pression latérale maintenue constante, et  $\sigma'_{zz}$  la contrainte effective imposée (Figure 5.3.1-1)

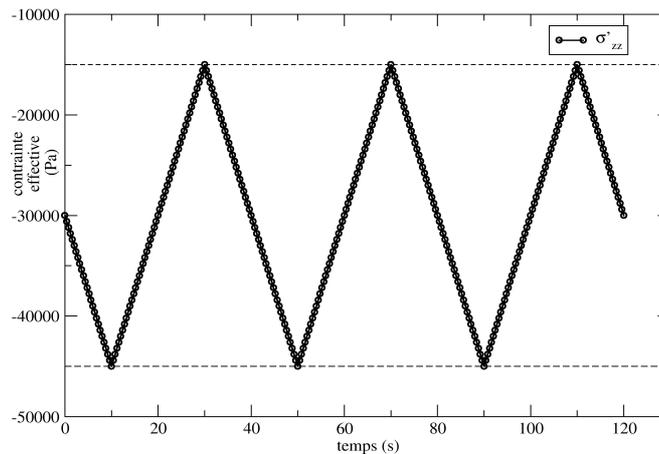


Figure 5.3.1-1: Trajet de chargement 3

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` =  $-2.E5\text{ Pa}$
- `SIGM_IMPOSE` =  $1.1E5\text{ Pa}$
- `NB_CYCLE` = 3

## 6 Modélisation C

### 6.1 Caractéristiques de la modélisation

Simulation au point matériel.

### 6.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont post-traitées en l'unique point du modèle et comparées à des valeurs de non-régression en termes de pression isotrope  $P$ , avec :

$$P = \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma)$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 70. s$	'AUTRE_ASTER'	-167597.Pa	1.%
$t = 106. s$	'AUTRE_ASTER'	-65366. Pa	1.%
$t = 139.8 s$	'AUTRE_ASTER'	-3623. Pa	1.%

Et de contrainte déviatorique  $Q$ , avec :

$$Q = \sigma_{zz} - \sigma_{xx}$$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$t = 70. s$	'AUTRE_ASTER'	-110000.Pa	1.%
$t = 106. s$	'AUTRE_ASTER'	69201. Pa	1.%
$t = 139.8 s$	'AUTRE_ASTER'	-5920. Pa	1.%

### 6.3 Remarques

Cette modélisation a pour but de traiter le passage de la ligne d'instabilité pour le cas d'un sable lâche. En effet, le déviateur des contraintes  $Q$  présente un maximum sur cette ligne de valeur inférieure à la consigne de contrainte maximale imposée  $Q_{max} = 1.1E+5 Pa$ . Par conséquent, le contrôle en contrainte de l'essai n'est pas possible à cet endroit, et conduit généralement soit à une divergence du calcul, soit à un résultat faux parfaitement instable (saut de contrainte et de déformation très important, voir la courbe rouge de la Figure 6.3-1). Le calcul de la solution exacte passe par le basculement de l'essai en déformation contrôlée lorsque l'instabilité est détectée (courbe bleue).

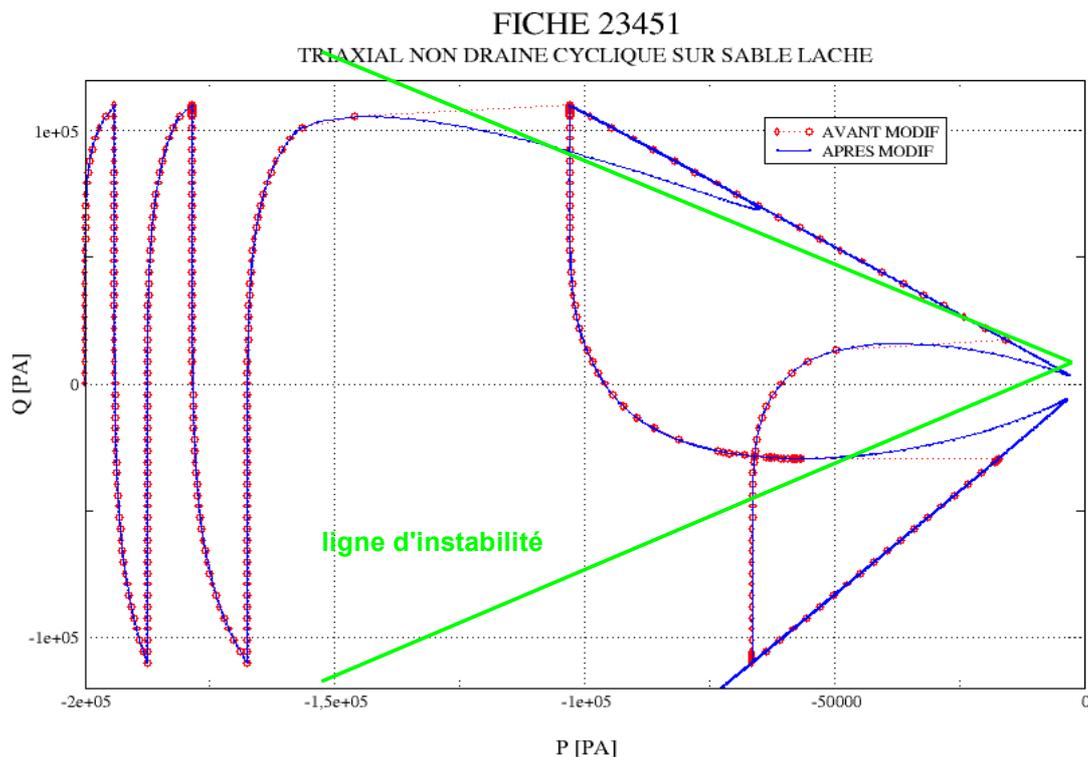


Figure 6.3-1: Comparaison de la solution en contrainte contrôlée (rouge) et en déformation contrôlée (bleue) lors de la traversée de la ligne d'instabilité

## 7 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]).