# COMP012 – Validation de la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA avec plusieurs lois de comportement

**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 à déplacement imposé ;
- essai triaxial monotone non drainé à déplacement imposé ;
- essai triaxial cyclique non drainé à force imposée ;
- essai triaxial cyclique alterné drainé à déplacement imposé ;
- essai triaxial cyclique non alterné drainé à déplacement imposé ;
- essai de cisaillement cyclique drainé à déformation imposée ;
- essai oedometrique cyclique drainé à force imposée ;
- essai de compression isotrope cyclique drainé à force imposée ;
- essai triaxial cyclique non drainé à déplacement imposé ;

Dans la modélisation **A**, ces neuf essais sont simulés avec la loi de Hujeux. Pour les trois premiers tests, les solutions calculées sont comparées à des résultats issus du code éléments finis GEFDYN de Centrale Supélec. Pour les cinq tests suivants, les solutions calculées après la version 14.2 du Code_Aster (pour laquelle une refonte de la macro-commande a été réalisée) sont comparées aux solutions calculées avant cette version. Pour le test **ESSAI_ISOT_DR_C_F** , les solutions calculées sont comparés à celles du cas test ssnv204a. Enfin pour le dernier test, les solutions sont contrôlées par des tests de non régression.

Dans la modélisation **B**, un essai triaxial monotone drainé à déplacement imposé est simulé avec la loi MOHR_COULOMB. La solution est comparée à une solution analytique.



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

Dans la modélisation **C**, un essai triaxial cyclique non-drainé à force imposée est simulé sur un sable modélisé avec la loi de Hujeux. Elle permet de valider la détection de l'instabilité propre à cet essai et le basculement de l'essai en déformation contrôlée.

Dans la modélisation **D**, un essai de cisaillement cyclique drainé avec la loi d'Iwan est simulé.

Dans la modélisation **E**, un essai triaxial cyclique non-drainé à force imposée est simulé sur le même sable que la modélisation **C** et modélisé avec la loi de Hujeux. Elle permet de tester les croisements des nouveaux critères de liquéfaction et d'illustrer l'utilisation de nouveaux mot-clés introduits par la refonte de la macro-commande dans la version 14.2 du Code_Aster.

Dans la modélisation **F**, un essai triaxial monotone drainé à déplacement imposé est simulé avec la loi `MohrCoulombAS`. La solution est comparée à une solution analytique.

Dans la modélisation **G**, un essai triaxial monotone drainé à déplacement imposé est simulé avec la loi `NLH_CSRM`. Un test de non-régression permet de valider la robustesse du modèle.



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

# 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 : $K=516200\,kPa$
- 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 : $P_{cr,0}=-1\,MPa$
- pression de référence : $P_{ref}=-1\,MPa$
- rayon élastique du mécanisme isotrope : $r^s_{éla}=0.001$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire : $r^d_{éla}=0.005$
- $a_{mon}=0.0001$
- $a_{cyc}=0.008$
- $c_{mon}=0.2$
- $c_{cyc}=0.1$
- $r_{hys}=0.05$
- $r_{mob}=0.9$
- $x_m=1$
- $\alpha=1$

Les propriétés hydrauliques sont :

- coefficient de Biot : $B=1.$
- module de compressibilité de l'eau $K_e=10^{+12}\,Pa$ (coefficient de compressibilité $1/K_e=10^{-12}\,Pa^{-1}$ )

## 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].

Suite à la refonte de la macro-commande dans la version 14.2 de Code_Aster, les contraintes et les déformations données en entrée respectent la convention de la mécanique des sols, à savoir que la compression est positive.

### 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 : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=50\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.



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

- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$ , tout en imposant une rampe de déformation verticale (Figure 1.3.1-1) entre $t=0$ et $t=100$ , de valeur finale $\epsilon_{zz}=20\%$

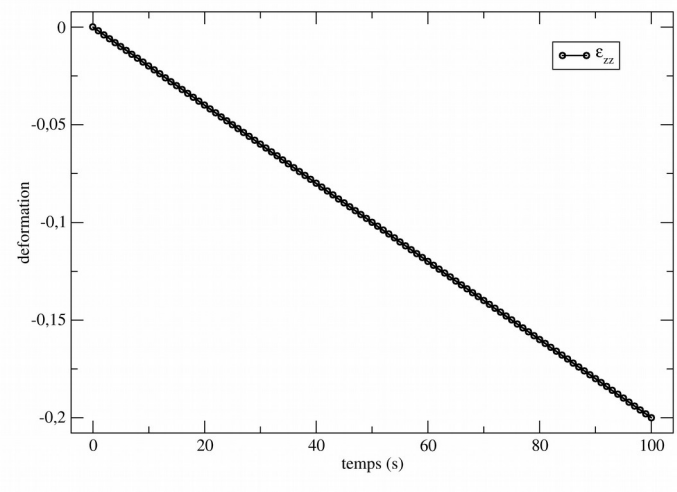



**Figure 1.3.1-1: Trajet de chargement 1**

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

- PRES_CONF$=50\,kPa$
- 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 : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=50\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$ , tout en imposant une rampe de déformation verticale entre $t=0$ et $t=100$ , de valeur finale $\epsilon_{zz}=2\%$ . Le squelette et le fluide sont supposés incompressibles, ce qu'on modélise en imposant $tr(\boldsymbol{\epsilon})=0$ . Pour cela on impose aux déformations latérales $\epsilon_{xx}$ et $\epsilon_{yy}$ de suivre une rampe telle qu'entre $t=0$ et $t=100$ , ces déformations varient de $0$ à $1\%$ (Figure 1.3.2-1).

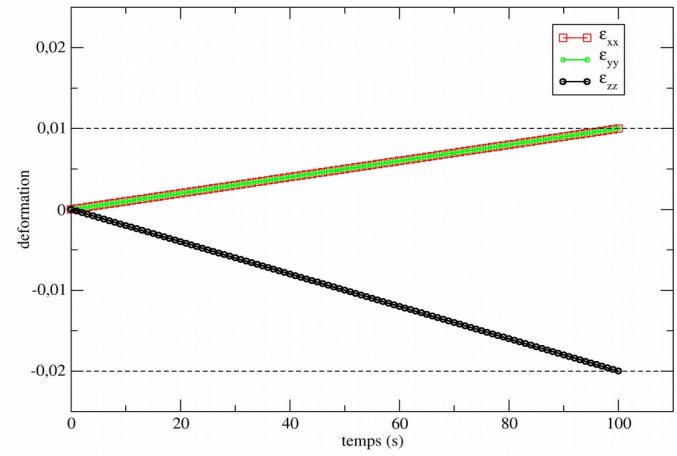



**Figure 1.3.2-1: Trajet de chargement 2**



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

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

- PRES_CONF=$50\,kPa$
- EPSI_IMPOSE=$0.02$

### 1.3.3 Trajet de chargement 3

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

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=30\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=30\,kPa$ , tout en imposant pour la contrainte totale verticale $\sigma_{zz}$ le chargement cyclique de forme triangulaire, d'amplitude $15\,kPa$ et de valeur moyenne $30\,kPa$ avec le premier cycle en extension, comme illustré à la Figure 1.3.3-1. 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 totale imposée (Figure 1.3.3-1)

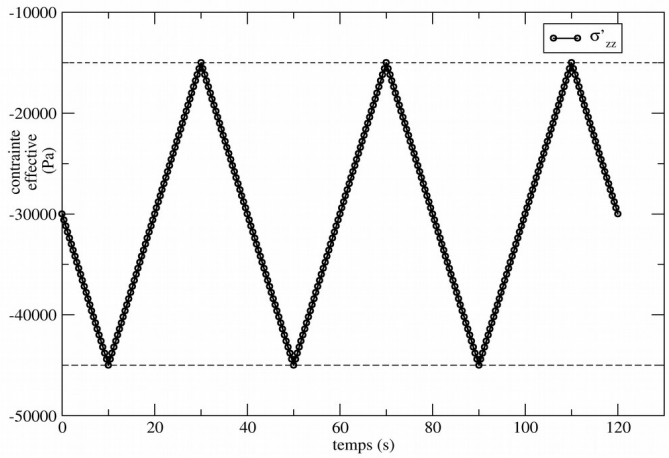



**Figure 1.3.3-1: Trajet de chargement 3**

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

- PRES_CONF=$30\,kPa$
- SIGM_IMPOSE=$-15\,kPa$ (la valeur négative indiquant un premier cycle en extension)
- NB_CYCLE=$3$

Le critère de liquéfaction utilisée est $\mathrm{RU_MAX}=0.8$ avec arrêt du calcul quand celui-ci est atteint.

### 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 : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=50\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.



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

- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$ , 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.

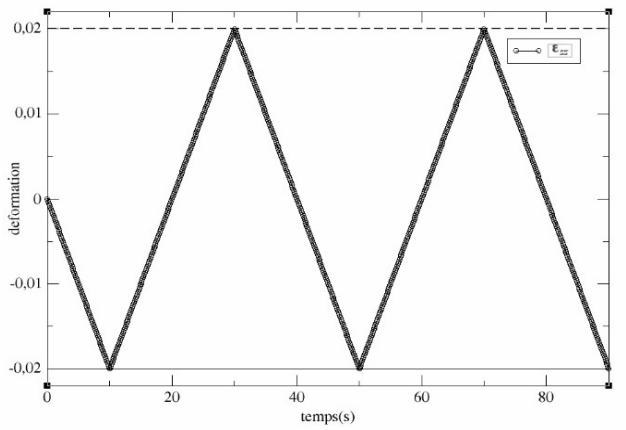



**Figure 1.3.4-1: Trajet de chargement 4**

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

- PRES_CONF$=50\,kPa$
- EPSI_MAXI$=0.02$
- EPSI_MINI$=-0.02$
- 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 : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=50\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$ , tout en imposant pour $\varepsilon_{zz}$ le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.5-1, d'amplitude $2\,\%$ et de valeur moyenne $\varepsilon_{zz}=1\,\%$ ;

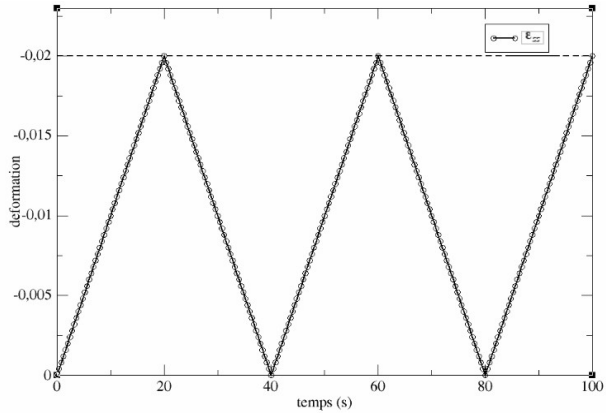



**Figure 1.3.5-1: Trajet de chargement 5**

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

- PRES_CONF$=50\,kPa$
- EPSI_MAXI$=0.02$
- EPSI_MINI$=0$



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

- 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 : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=50\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$ , 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.

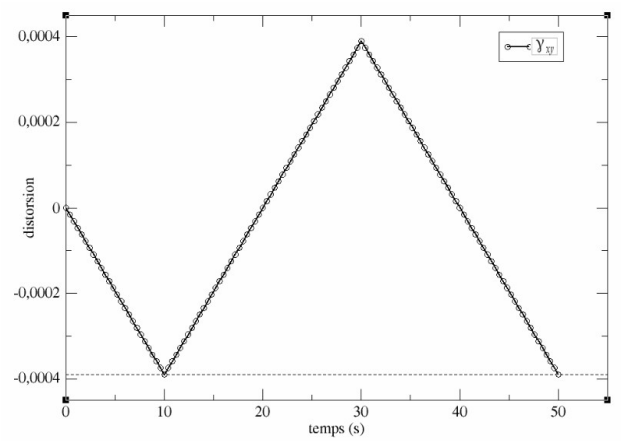



**Figure 1.3.6-1: Trajet de chargement 6**

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

- PRES_CONF=$50\,kPa$
- GAMMA_IMPOSE=$3.9\times10^{-4}$
- NB_CYCLE=1

### 1.3.7 Trajet de chargement 7

Ce trajet est caractéristique d'un essai œdométrique cyclique drainé :

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=50\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$ , 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 $30\,kPa$ , $40\,kPa$ et $50\,kPa$ , 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 : $60\,kPa$ .



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

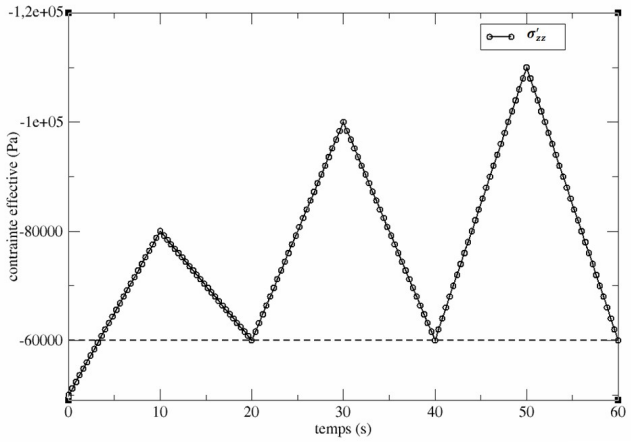



**Figure 1.3.7-1 : Trajet de chargement 7**

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

- PRES_CONF=$50\,kPa$
- SIGM_IMPOSE=$(30,\ 40,\ 50)\ [kPa]$
- SIGM_DECH=$60\,kPa$

### 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 : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=100\,kPa$ , 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 $200\,kPa$ et $240\,kPa$ , 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: $100\,kPa$ . Ce chargement est illustré à la Figure 1.3.8-1.

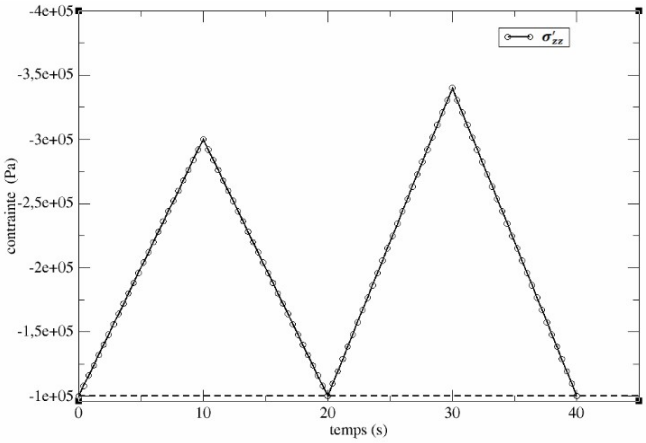



**Figure 1.3.8-1 : Trajet de chargement 8**

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

- PRES_CONF=$100\,kPa$
- SIGM_IMPOSE=$(200,\ 240)\ [kPa]$



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

- SIGM_DECH$=100\,kPa$

### 1.3.9 Trajet de chargement 9

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

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=30\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=30\,kPa$ , tout en imposant $\epsilon_{zz}=0$ . Le chargement cyclique imposé est en déformation $\epsilon_{zz}$ et de forme sinusoïdale, d'amplitude $0.5\,\%$ et de valeur moyenne nulle avec le premier cycle en compression, comme illustré à la Figure 1.3.9-1 . Ceci est modélisé en imposant des relations linéaires entre les composantes diagonales du tenseur des déformations, de telle sorte que :

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

où $K_e$ désigne le module de compressibilité de l'eau, $\sigma^0$ la pression latérale maintenue constante ;

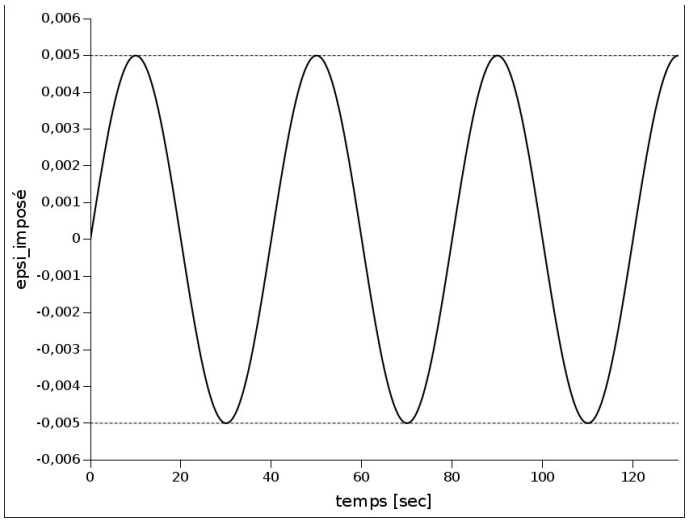



**Figure 1.3.9-1: Trajet de chargement 9**

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

- PRES_CONF$=30\,kPa$
- EPSI_MAXI$=0.005$
- EPSI_MINI$=-0.005$
- NB_CYCLE$=3$

Le critère de liquéfaction utilisée est $\mathrm{RU_MAX}=0.8$ avec arrêt du calcul quand celui-ci est atteint.

# 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_TRIA_DR_M_D)



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

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 $\epsilon_v$

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

| 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.% |

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

| 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 (ESSAI_TRIA_ND_M_D)

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 effective isotrope $P'$.

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

| 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.% |

$$P'=\frac{tr(\boldsymbol{\sigma}')}{3}$$

| 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.% |



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

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\varepsilon_{zz}=1.\%$ | 'SOURCE_EXTERNE' | 136801 Pa | 1.% |
| $\varepsilon_{zz}=2.\%$ | 'SOURCE_EXTERNE' | 185971 Pa | 1.% |

### 2.2.3 Trajet de chargement 3 (ESSAI_TRIA_ND_C_F)

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

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

| 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.% |
| $t=84.8\,s$ | 'SOURCE_EXTERNE' | 45672. Pa | 2.% |

### 2.2.4 Trajet de chargement 4 (ESSAI_TRIA_DR_C_D)

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 |
|---|---|---|---|
| $t=10.\,s$ | '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% |

$\epsilon_{vol}$

| 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_TRIA_DR_C_D)

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% |



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

| | | | |
|---|---|---|---|
| $t=40.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 3.66029 E+04 Pa | 0.0001% |
| $t=50.\,s$ | '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% |
| $t=50.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 9.73288861173 E-3 | 0.0001% |

### 2.2.6 Trajet de chargement 6 (ESSAI_CISA_DR_C_D)

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_DR_C_F)

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% |
| $t=50.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 1.68714233218E-03 | 0.0001% |
| $t=90.\,s$ | '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% |
| $t=50.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 53981.1605469 Pa | 0.0001% |
| $t=90.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 56319.3772981 Pa | 0.0001% |

### 2.2.8 Trajet de chargement 8 (ESSAI_ISOT_DR_C_F)

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.

$\epsilon_{vol}$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $t=10.\,s$ | 'AUTRE_ASTER' | 0.01356660 | 0.1% |
| $t=30.\,s$ | 'AUTRE_ASTER' | 0.00091215 | 0.1% |
| $t=50.\,s$ | 'AUTRE_ASTER' | 0.01591635 | 0.1% |



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

### 2.2.9 Trajet de chargement 9 (ESSAI_TRIA_ND_C_D)

On effectue un test de non régression sur la contrainte effective moyenne $P'$, la contrainte équivalente de Von Mises $Q$ et de déformation volumique plastique $\epsilon_{vol}^{plas}$.

$$P' = \frac{trace(\boldsymbol{\sigma}')}{3}$$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $t = 20.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 10064.1486965 Pa | 0.0001% |
| $t = 110.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | 25713.2501603 Pa | 0.0001% |

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

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $t = 20.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | -7514.28427045 Pa | 0.0001% |
| $t = 110.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | -29890.4822779 | 0.0001% |

$\epsilon_{vol}^{plas}$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $t = 20.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | -0.000189977948884 | 0.0001% |
| $t = 110.\,s$ | 'NON_REGRESSION' | -0.000555199619402 | 0.0001% |

## 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 MOHR_COULOMB. On réalise pour ce faire un essai triaxial drainé monotone à déplacement imposé ESSAI_TRIA_DR_M_D. Le nombre d'incréments temporels est égal à 300. La pression de confinement initiale est de $\sigma_0 = 50\,kPa$. 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 :



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

| $t=30\,sec$ | 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 : $E=670\,MPa$
- 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 : $\phi=40°$
- angle de dilatance : $\psi=40°$
- pression critique : $P_{cr,0}=-150\,kPa$
- pression de référence : $P_{ref}=-1000\,kPa$
- rayon élastique du mécanisme isotrope : $r^s_{éla}=0.006$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire : $r^d_{éla}=0.06$
- $a_{mon}=0.0024$
- $a_{cyc}=0.00024$
- $c_{mon}=0.01$
- $c_{cyc}=0.005$
- $r_{hys}=0.15$
- $r_{mob}=0.9$
- $x_m=2.5$
- $\alpha=2$

Les propriétés hydrauliques sont :

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

## 5.3 Conditions aux limites et chargements

Le trajet de chargement triaxial cyclique non-drainé à force imposée est défini automatiquement par la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21].



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

Suite à la refonte de la macro-commande dans la version 14.2 de Code_Aster, les contraintes et les déformations données en entrée respectent la convention de la mécanique des sols, à savoir que la compression est positive.

### 5.3.1 Trajet de chargement traxial cyclique non-drainé à force imposée

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

- on part d'un état de contrainte hydrostatique : $\sigma^0_{xx}=\sigma^0_{yy}=\sigma^0_{zz}=\sigma^0=200\,kPa$ , et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=200\,kPa$ , tout en imposant pour la contrainte totale $\sigma_{zz}$ le chargement cyclique de type triangulaire illustré à la Figure 5.3.1-1, d'amplitude $110\,kPa$ et de valeur moyenne $200\,kPa$ . Ceci est modélisé en imposant des relations linéaires entre les composantes diagonales du tenseur des déformations, de telle sorte que :

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

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

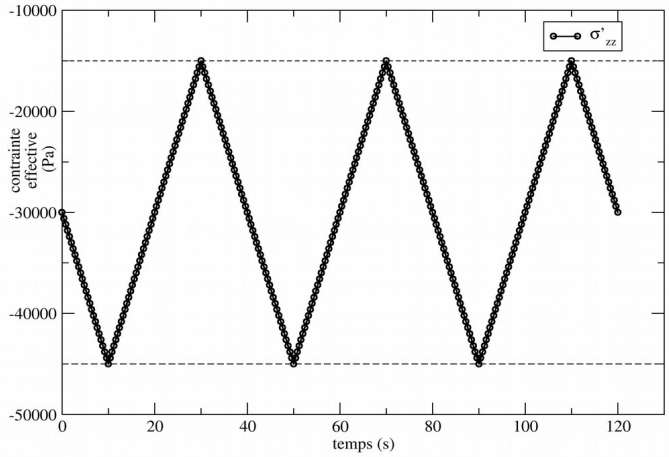



**Figure 5.3.1-1: Trajet de chargement 3**

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

- PRES_CONF$=200\,kPa$
- SIGM_IMPOSE$=-110\,kPa$ (la valeur négative indique un premier cycle en extension)
- NB_CYCLE$=3$

Le critère de liquéfaction utilisée est $\mathrm{RU_MAX}=0.8$ avec arrêt du calcul quand celui-ci est atteint.

# 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 effective isotrope $P'$ , avec :



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

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

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $t=70.s$ | 'AUTRE_ASTER' | 167597.Pa | 1.% |
| $t=91,15\,s$ | 'AUTRE_ASTER' | 65366. Pa | 1.% |
| $t=99,3\,s$ | '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.% |
| $t=91,15\,s$ | 'AUTRE_ASTER' | -69201. Pa | 1.% |
| $t=99,3\,s$ | '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 $Q_{max}=110\,kPa$ . 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).



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

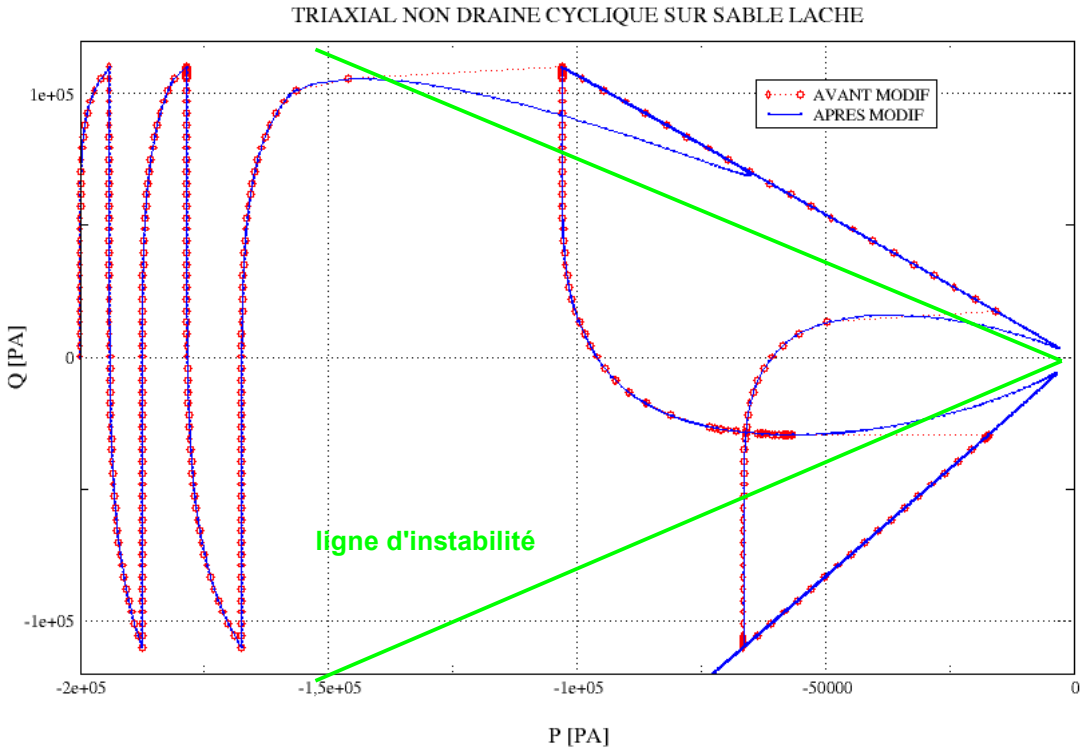



**Figure 6.3-1: Comparaison de la solution en contrainte contrôlée (rouge) et en déformation contrôlée (bleue) lors de la traversée de la ligne d'instabilité**

# 7 Problème de référence pour la modélisation D

Identique à celui décrit dans la documentation **V6.04.205**.

# 8 Modélisation D

## 8.1 Caractéristiques de la modélisation

L'objectif est de valider la compatibilité de **CALC_ESSAI_GEOMECA** avec la loi de Iwan. Le nombre d'incréments temporels est égal à 200. La pression de confinement initial est de $\sigma_0 = 50\,kPa$ . Le critère de convergence est **RESI_GLOB_RELA** = $10^{-8}$.

## 8.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont comparées à la solution obtenue directement par **SIMU_POINT_MAT** dans le cas test ssnv205b.

Cas 1 : $d\epsilon_{xy} = 2e\text{-}5$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $SIXY - INST = 5$ | 'AUTRE_ASTER' | -1297.65875776 | 0.5% |
| $SIXY - INST = 10$ | 'AUTRE_ASTER' | -2343.93741663 | 0.5% |
| $SIXY - INST = 30$ | 'AUTRE_ASTER' | 2343.86416193 | 0.5% |
| $SIXY - INST = 50$ | 'AUTRE_ASTER' | -2343.86423947 | 0.5% |


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

Cas 2 : $d\epsilon_{xy}=2e\text{-}4$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $SIXY-INST=5$ | 'AUTRE_ASTER' | -7532.17502946 | 0.5% |
| $SIXY-INST=10$ | 'AUTRE_ASTER' | -10852.9781787 | 0.5% |
| $SIXY-INST=20$ | 'AUTRE_ASTER' | 4213.07055785 | 0.6% |
| $SIXY-INST=30$ | 'AUTRE_ASTER' | 10852.9310857 | 0.5% |
| $SIXY-INST=40$ | 'AUTRE_ASTER' | -4213.07619046 | 0.6% |
| $SIXY-INST=50$ | 'AUTRE_ASTER' | -10852.9310864 | 0.5% |

Cas 3 : $d\epsilon_{xy}=2e\text{-}3$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $SIXY-INST=5$ | 'AUTRE_ASTER' | -19270.5640459 | 0.5% |
| $SIXY-INST=10$ | 'AUTRE_ASTER' | -23316.7694931 | 0.5% |
| $SIXY-INST=20$ | 'AUTRE_ASTER' | 15228.3800807 | 0.5% |
| $SIXY-INST=30$ | 'AUTRE_ASTER' | 23315.5132772 | 0.5% |
| $SIXY-INST=40$ | 'AUTRE_ASTER' | -15228.1639186 | 0.5% |
| $SIXY-INST=50$ | 'AUTRE_ASTER' | -23315.469541 | 0.5% |

**Tableau 8.2-1 : Validation des résultats pour la modélisation D**

# 9 Problème de référence pour la modélisation E

## 9.1 Géométrie

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

## 9.2 Propriétés du matériau

Identique à la modélisation **C**.

## 9.3 Conditions aux limites et chargements

Identique à la modélisation **C**, hormis que l'état initial n'est pas hydrostatique mais avec un déviateur donné par $K_0=0.5$

### 9.3.1 Trajet de chargement traxial cyclique non-drainé à force imposée

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

- on part d'un état de contrainte non hydrostatique : $\sigma_{zz}^0=\frac{1}{K_0}\sigma_{xx}^0=\frac{1}{K_0}\sigma_{yy}^0=\sigma^0=(50,\ 100,\ 150)\ [kPa]$ avec $K_0=0.5$ , et d'un état de déformations nulles ;
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=K_0\sigma^0$ , tout en imposant pour la contrainte totale verticale $\sigma_{zz}$ le chargement cyclique de type sinusoïdal, d'amplitude $100\,kPa$ et de valeur moyenne $\frac{1+2K_0}{3}\sigma^0$ .

  Ceci est modélisé en imposant des relations linéaires entre les composantes diagonales du tenseur des déformations, de telle sorte que :



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

$$\begin{cases} \sigma'_{xx} + K_e\, tr(\epsilon) = K_0 \sigma^0 \\ \sigma'_{yy} + K_e\, tr(\epsilon) = K_0 \sigma^0 \\ \sigma'_{zz} + K_e\, tr(\epsilon) = \sigma_{zz} \end{cases}$$

où $K_e$ désigne le module de compressibilité de l'eau, $\sigma^0$ la pression latérale maintenue constante, et $\sigma_{zz}$ la contrainte totale imposée ;

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

- PRES_CONF $=(50,\ 100,\ 150)\ kPa$
- SIGM_IMPOSE $=100\,kPa$ (la valeur positive indique un premier cycle en compression)
- NB_CYCLE $=10$

Le croisement des trois critères de liquéfaction est testé :

- Le critère sur le coefficient d'augmentation de pression interstitielle $\text{RU_MAX} = \dfrac{\Delta u_w}{\sigma^0_{zz}} = 0.705$ ;
- Le critère en seuil de déformation axiale absolue en compression dit « single amplitude strain » $\text{EPSI_ABSO_MAX} = \epsilon^{SA}_{zz} = 5\%$ ;
- Le critère en amplitude de déformation axiale sur un cycle dit « double amplitude strain » $\text{EPSI_RELA_MAX} = \Delta\epsilon^{DA}_{zz} = 1\%$ ;

L'arrêt du calcul intervient quand les trois critères ont été atteints.

# 10 Modélisation E

## 10.1 Caractéristiques de la modélisation

Simulation au point matériel.

## 10.2 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 nombre de cycles à la liquéfaction $NCYCL$ pour :

le critère numéro 1 : $\text{RU_MAX} = 0.705$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $\text{PRES_CONF} = 50\,kPa$ | 'NON_REGRESSION' | 0 | 0.0001% |
| $\text{PRES_CONF} = 100\,kPa$ | 'NON_REGRESSION' | 1 | 0.0001% |
| $\text{PRES_CONF} = 150\,kPa$ | 'NON_REGRESSION' | 1 | 0.0001% |

le critère numéro 2 : $\text{RU_MAX} = 0.705$ + $\text{EPSI_ABSO_MAX} = 5\%$

| Identification | Type de référence | Valeur de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| $\text{PRES_CONF} = 50\,kPa$ | 'NON_REGRESSION' | 0 | 0.0001% |
| $\text{PRES_CONF} = 100\,kPa$ | 'NON_REGRESSION' | 3 | 0.0001% |
| $\text{PRES_CONF} = 150\,kPa$ | 'NON_REGRESSION' | 1 | 0.0001% |



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

# 11 Modélisation F

## 11.1 Caractéristiques de la modélisation

Simulation au point matériel. L'objectif est de valider la compatibilité de CALC_ESSAI_GEOMECA avec la loi MohrCoulombAS. On réalise, pour ce faire, un essai triaxial drainé monotone à déplacement imposé ESSAI_TRIA_DR_M_D. Le nombre de pas de temps est de 200 ; la pression de confinement est de $\sigma_0 = 50\,kPa$ ; la déformation axiale maximale est égale à $\epsilon_{zz}^{max} = 0{,}03\,\%$ . Le critère de convergence est $10^{-10}$.

Les paramètres matériaux sont « identiques » à ceux de la modélisation B :

- YoungModulus : $E = 619.3\,MPa$
- PoissonRatio : $\nu = 0.3$
- C ohesion : $C = 1\,kPa$
- FrictionAngle : $\varphi = 33°$
- Dilat ancy Angle : $\psi = 27°$
- TransitionAngle : $\theta_T = 29.999°$
- TensionCutOff : $a = 0.01\,C/\tan(\varphi)$
- HardeningCoef : $h_C = 0$

Les valeurs de $\theta_T$ et $a$ sont choisies de manière à se rapprocher des résultats obtenus dans la modélisation B ( loi MOHR_COULOMB ) .

## 11.2 Grandeurs testées et résultats

Deux tests de non-regression sont réalisés en fin d'essai sur les composantes SIG_LAT (contrainte latérale, SIXX ou SIYY) et SIG_AXI (contrainte axiale, SIZZ ). La contrainte axiale obtenue en fin d'essai (« inconnue » du problème, puisque déplacement imposé ; donc résultant de la loi de comportement ) est également comparée à celle obtenue dans la modélisation B ( MOHR_COULOMB ) et à la solution analytique présentée dans V6.04.232 .

| $t = 30\,sec$ | MOHR_COULOMB | MohrCoulombAS | Solution analytique |
|---|---|---|---|
| SIG_AXI ( $\sigma_{zz}$ , kPa) | 173.2895416041 | 173.2874344989 | 173.2895416041 |
| SIG_LAT ( $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ , kPa) | 50 | 50 | 50 |

**Tableau 11.2-1 : Validation des résultats pour la modélisation F**

# 12 Modélisation G

## 12.1 Caractéristiques de la modélisation

Simulation au point matériel. L'objectif est de valider la compatibilité de CALC_ESSAI_GEOMECA avec la loi NLH_CSRM. On réalise, pour ce faire, un essai triaxial drainé monotone à déplacement imposé ESSAI_TRIA_DR_M_D. Le nombre de pas de temps est de 200 ; la pression de confinement est de $\sigma_0 = 5\,MPa$ ; la déformation axiale maximale est égale à $\epsilon_{zz}^{max} = 2\,\%$ . Le critère de convergence est $10^{-10}$.

Les paramètres matériaux, donnés dans le Système International, sont :

- YoungModulus=7.0e9
- PoissonRatio=0.3
- I soCompElasLim=50.0e6
- IsoTensElasLim=0.1e6
- MCCSlopeCSL=0.5
- NLHIndex =1.0
- mBigoCritCoef=10.0
- aBigoCritCoef=0.75



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

- IncompIndex =15.0
- Tau =2.0e2
- PerzynaExpo=2.0
- NLHModulusP =7.0e9/2.5
- NLHModulusV =0.01*7.0e9

## 12.2 Grandeurs testées et résultats

Deux tests de non-regression sont réalisés en fin d'essai sur les composantes SIG_LAT (contrainte latérale, SIXX ou SIYY) et SIG_AXI (contrainte axiale, SIZZ ).

| $t=30\,sec$ | NLH_CSRM |
|---|---|
| SIG_AXI ($\sigma_{zz}$, Pa) | 5.0e6 |
| SIG_LAT ($\sigma_{xx}=\sigma_{yy}$, Pa) | 27433365.80434943 |

**Tableau 12.2-1 : Validation des résultats pour la modélisation G**

# 13 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]).



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