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 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 de 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.

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 :

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

- 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 (Figure 1.3.1-1) entre $t=0$ et $t=100$, de valeur finale $\epsilon_{zz}=20\%$

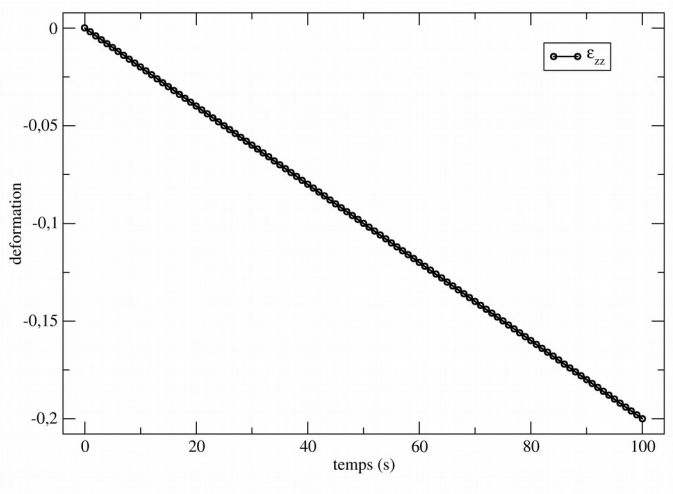


Figure 1.3.1-1: Trajet de chargement 1

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 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).

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

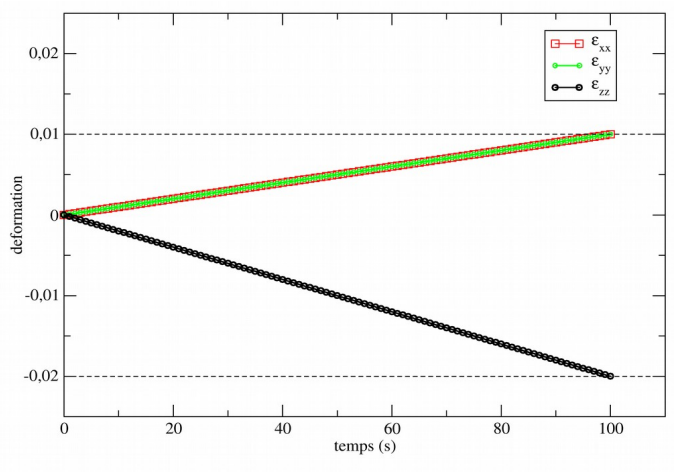


Figure 1.3.2-1: Trajet de chargement 2

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 σ_{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, σ^0 la pression latérale maintenue constante, et σ_{zz} la contrainte totale imposée (Figure 1.3.3-1)

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

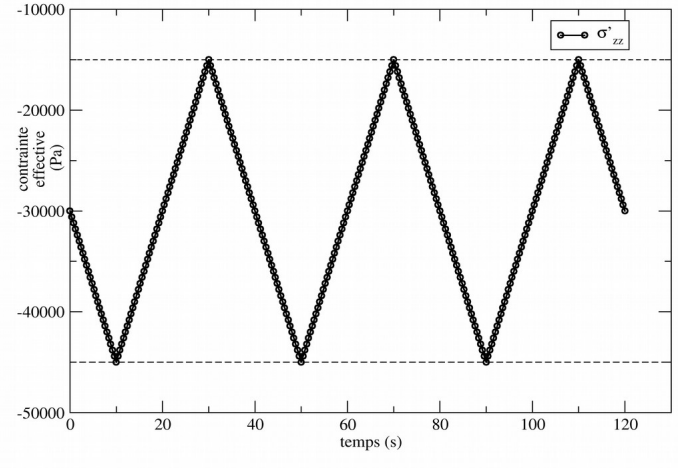


Figure 1.3.3-1: Trajet de chargement 3

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 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.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=50\,kPa$, tout en imposant pour ε_{zz} le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.4-1, d'amplitude $2\,\%$ et de valeur moyenne 0.

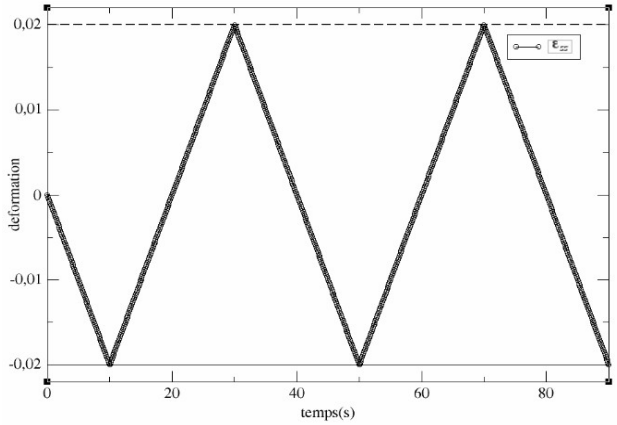


Figure 1.3.4-1: Trajet de chargement 4

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

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

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 ε_{zz} le chargement cyclique illustré à la Figure 1.3.5-1, d'amplitude $2\,\%$ et de valeur moyenne $\varepsilon_{zz}=1\,\%$;

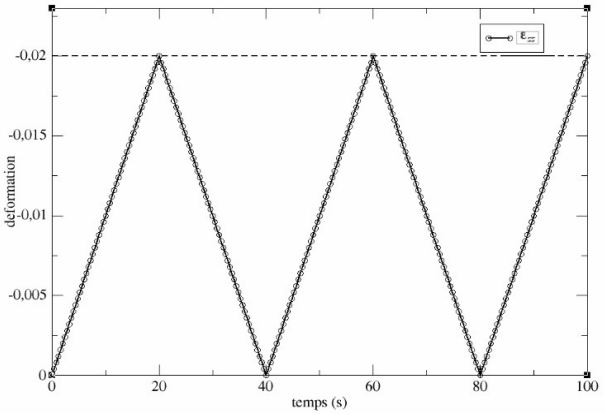


Figure 1.3.5-1: Trajet de chargement 5

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

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

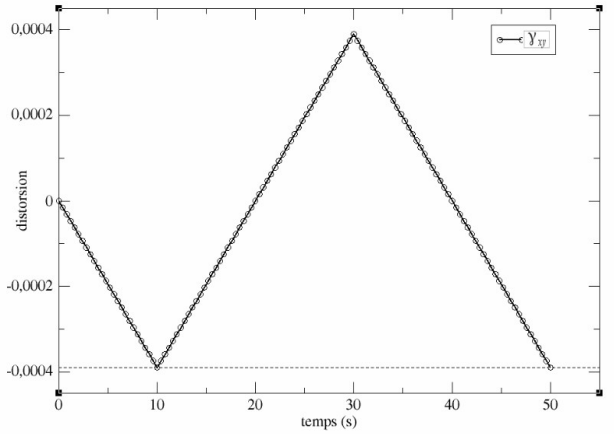


Figure 1.3.6-1: Trajet de chargement 6

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 σ'_{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 : $60\,kPa$.
-

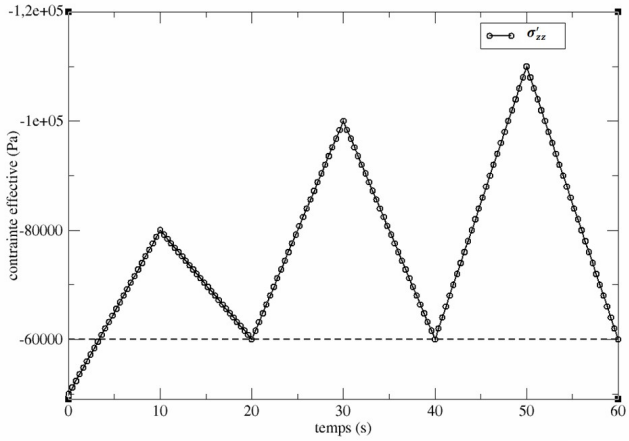


Figure 1.3.7-1 : Trajet de chargement 7

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$=50\,kPa$

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

- 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.

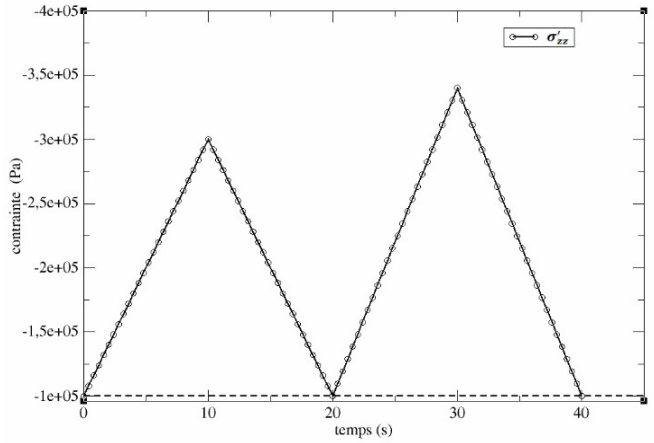


Figure 1.3.8-1 : Trajet de chargement 8

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=$(200,\ 240)\ [kPa]$
- 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 ϵ_{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, σ^0 la pression latérale maintenue constante ;

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

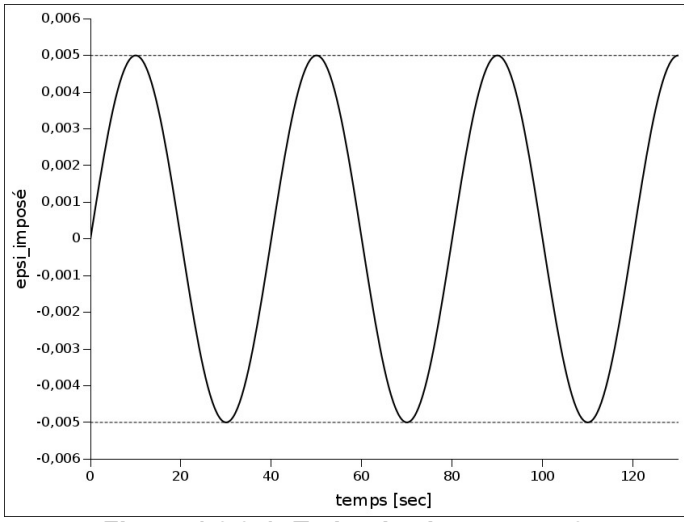


Figure 1.3.9-1: Trajet de chargement 9

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.

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

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)

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

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

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.%

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

$\varepsilon_{zz}=2.\%$	'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.%
$\varepsilon_{zz}=1.\%$	'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'

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

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 ϵ_{vol} .

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

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%

ϵ_{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%

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

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 ϵ_{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%
$t=50.\,s$	'NON_REGRESSION'	-14.29862 E+04 Pa	0.0001%

ϵ_{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 σ_{xy} à différents instants du chargement.

σ_{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 ϵ_{vol} et la contrainte σ_{xx} à différents instants du chargement.

ϵ_{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%

σ_{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)

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 les valeurs de la déformation volumique ϵ_{vol} sont comparées aux résultats du cas test ssnv204a à différents instants du chargement.

ϵ_{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%

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 ϵ_{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%

ϵ_{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

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

3 Problème de référence pour la modélisation B

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

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

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.

On réalise pour ce faire un essai triaxial drainé monotone à déplacement imposé **ESSAI_TRIA_DR_M_D**.

Le le nombre d'incréments temporels est égal à 300. La pression de confinement initial 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 σ_{zz} et horizontale σ_{xx} , et récapitulées dans le tableau suivant :

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

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

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

5 Problème de référence pour la modélisation C

5.1 Géométrie

La géométrie est $0\mathrm{D}$ (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 $K_e=1.\mathrm{E}12\,Pa$ (coefficient de compressibilité $1/K_e=1.\mathrm{E}\text{-}12\,Pa^{-1}$)

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].

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 imosée

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

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

- 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 σ_{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 :

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

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

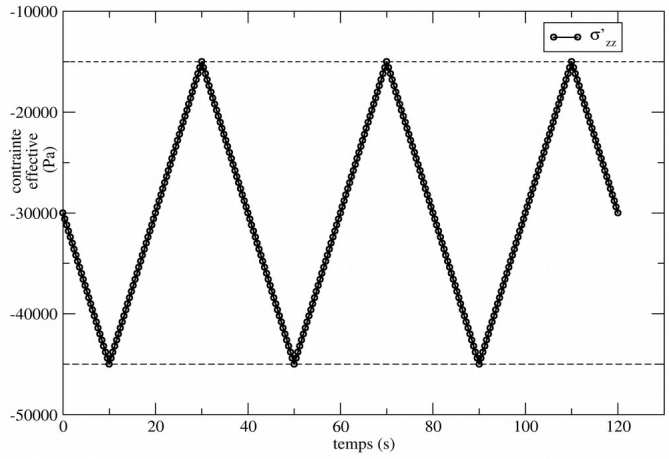


Figure 5.3.1-1: Trajet de chargement 3

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.

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

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 :

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

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)

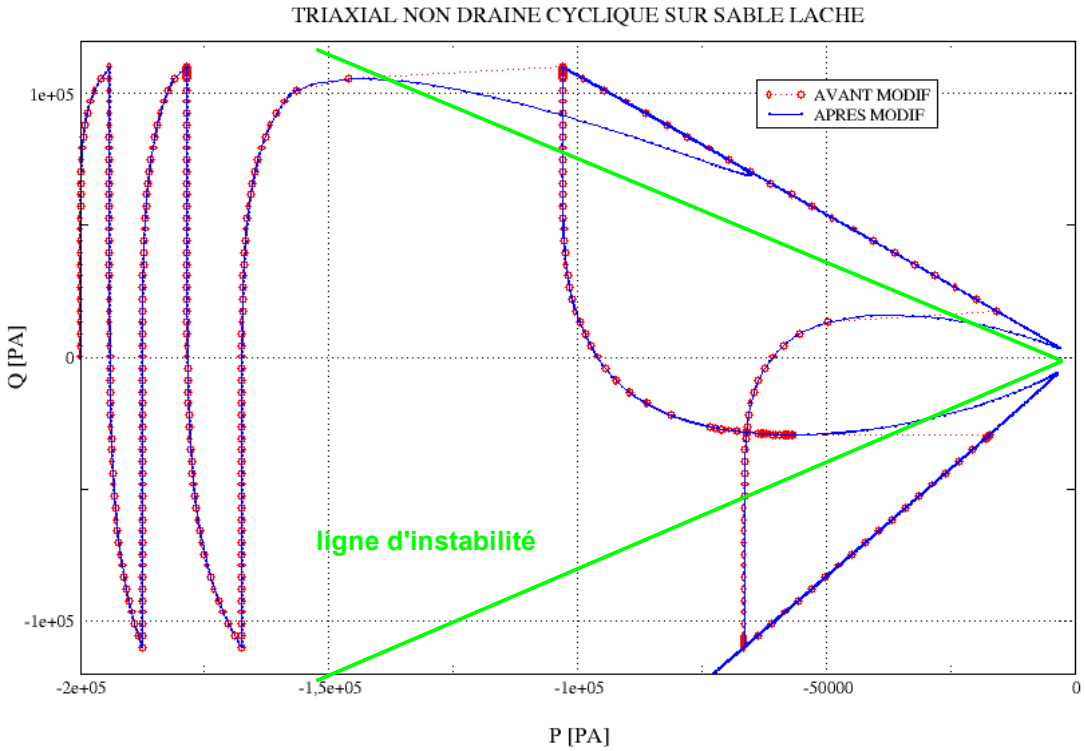


Figure 6.3-1: Comparaison de la solution en contrainte contrôlée (rouge) et en déformation contrôlée (bleue) lors de la traversée de la ligne d'instabilité

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

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%

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

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

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 σ_{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 :
$$\begin{cases}\sigma'_{xx}+K_e tr(\boldsymbol{\epsilon})=K_0\sigma^0\\ \sigma'_{yy}+K_e tr(\boldsymbol{\epsilon})=K_0\sigma^0\\ \sigma'_{zz}+K_e tr(\boldsymbol{\epsilon})=\sigma_{zz}\end{cases}$$
où K_e désigne le module de compressibilité de l'eau, σ^0 la pression latérale maintenue constante, et σ_{zz} la contrainte 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 $\text{RU_MAX}=\frac{\Delta u_w}{\sigma_{zz}^0}=0.705$;
- Le critère en seuil de déformation axiale absolue en compression dit « single amplitude strain » $\text{EPSI_ABSO_MAX}=\epsilon_{zz}^{SA}=5\%$;
- Le critère en amplitude de déformation axiale sur un cycle dit « double amplitude strain » $\text{EPSI_RELA_MAX}=\Delta\epsilon_{zz}^{DA}=1\%$;

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

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

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 : $\mathrm{RU_MAX}=0.705$

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

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

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

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

11 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)