

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 oedométrique 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 comparées 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.

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.

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

Les propriétés hydrauliques sont :

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

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].

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 : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = 50 \text{ kPa}$, et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 50 \text{ kPa}$, tout en imposant une rampe de déformation verticale (Figure 1.3.1-1) entre $t=0$ et $t=100$, de valeur finale $\epsilon_{zz} = 20\%$

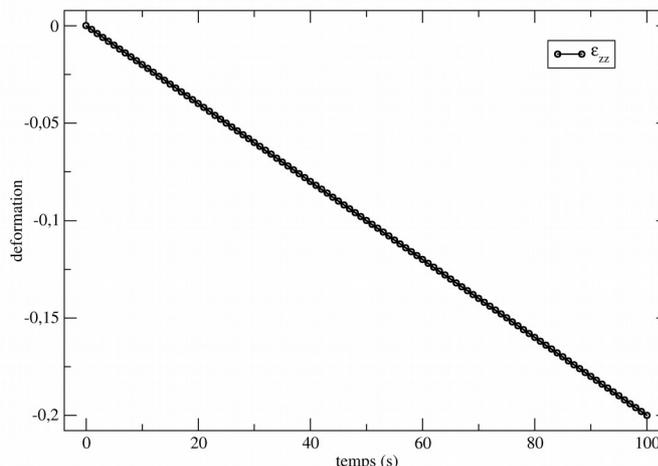


Figure 1.3.1-1: Trajet de chargement 1

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

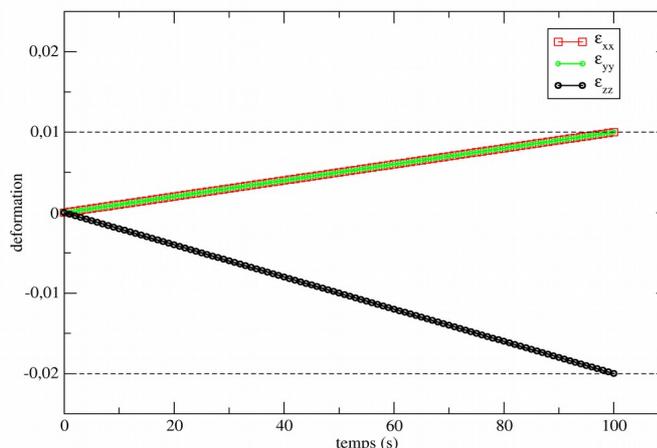


Figure 1.3.2-1: Trajet de chargement 2

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 :

- $PRES_CONF = 50\text{ kPa}$
- $EPSI_IMPOSE = 0.02$

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

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

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 1.3.3-1)

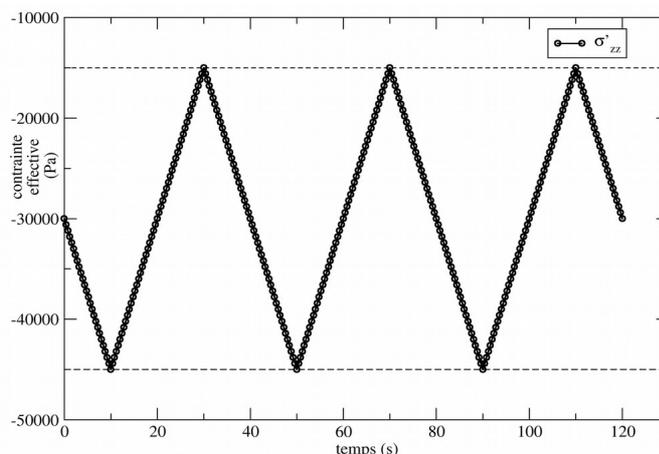


Figure 1.3.3-1: Trajet de chargement 3

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 :

- $PRES_CONF = 30\text{ kPa}$
- $SIGM_IMPOSE = -15\text{ kPa}$ (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 : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = 50\text{ kPa}$, et d'un état de déformations nulles.
- on maintient ensuite la pression latérale : $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 50\text{ kPa}$, 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.

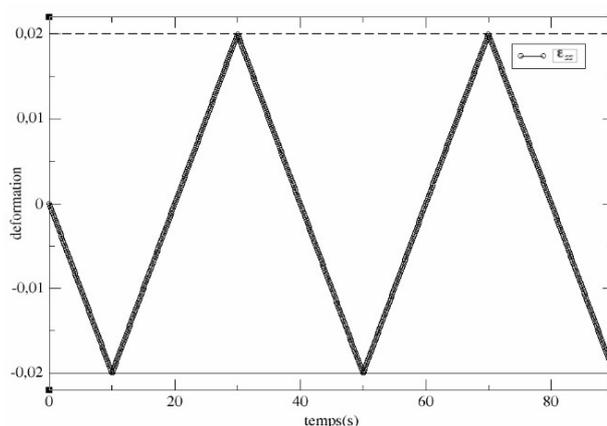


Figure 1.3.4-1: Trajet de chargement 4

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 :

- $PRES_CONF = 50\text{ kPa}$
- $EPSI_MAXI = 0.02$
- $EPSI_MINI = -0.02$
- $NB_CYCLE = 2$

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

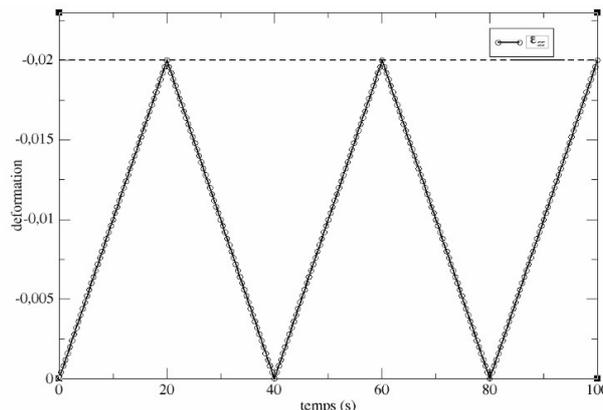


Figure 1.3.5-1: Trajet de chargement 5

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

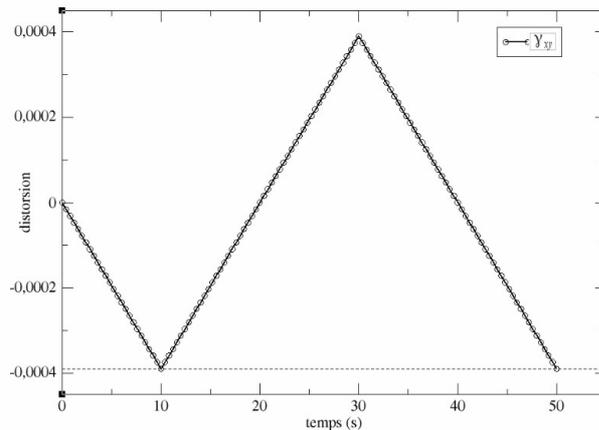


Figure 1.3.6-1: Trajet de chargement 6

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 :

- $PRES_CONF = 50\text{ kPa}$
- $GAMMA_IMPOSE = 3.9 \times 10^{-4}$
- $NB_CYCLE = 1$

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

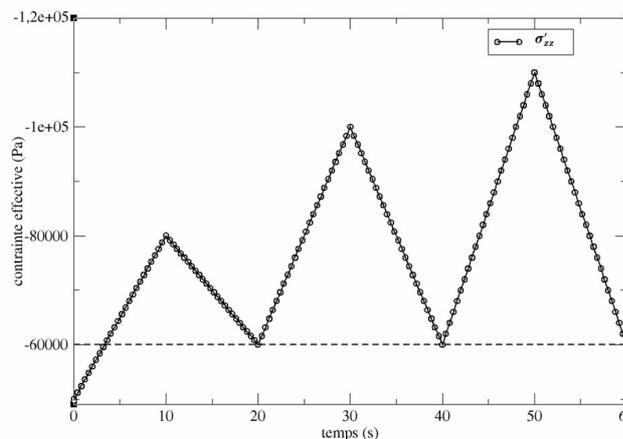


Figure 1.3.7-1 : Trajet de chargement 7

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 :

- $PRES_CONF = 50\text{ kPa}$

- 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 : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = 100 \text{ kPa}$, 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.

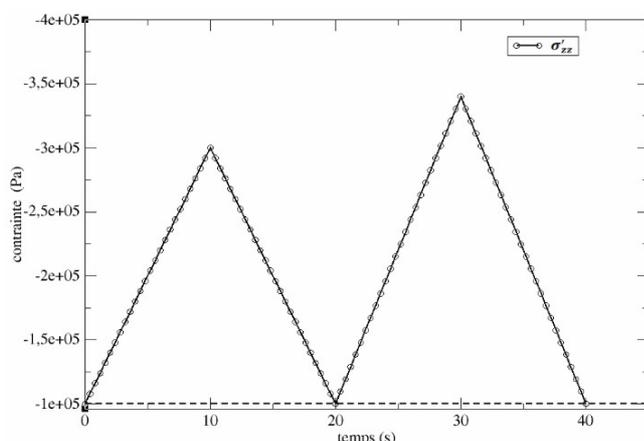


Figure 1.3.8-1 : Trajet de chargement 8

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

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

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

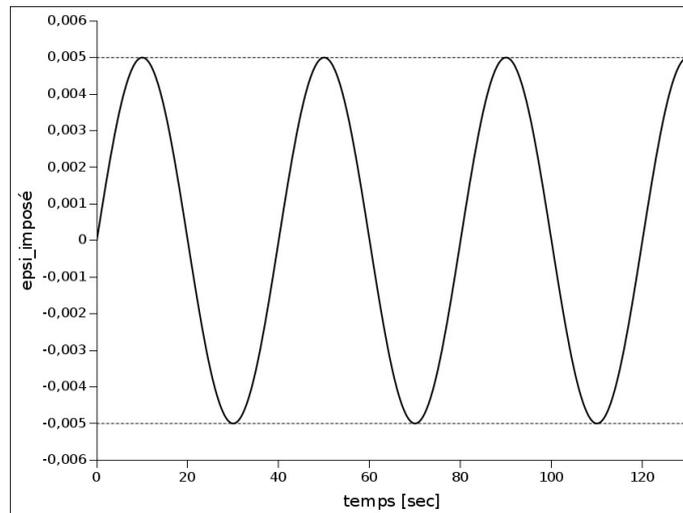


Figure 1.3.9-1: Trajet de chargement 9

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 :

- $PRES_CONF = 30\text{ kPa}$
- $EPSI_MAXI = 0.005$
- $EPSI_MINI = -0.005$
- $NB_CYCLE = 3$

Le critère de liquéfaction utilisée est $RU_MAX = 0.8$ 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)

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

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

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

$$\epsilon_v = \text{tr}(\epsilon)$$

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

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' .

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\epsilon_{zz} = 0.1\%$	'SOURCE_EXTERNE'	31547 Pa	3.0%
$\epsilon_{zz} = 0.2\%$	'SOURCE_EXTERNE'	40129 Pa	2.0%
$\epsilon_{zz} = 0.5\%$	'SOURCE_EXTERNE'	51937 Pa	1.0%
$\epsilon_{zz} = 1.0\%$	'SOURCE_EXTERNE'	68286 Pa	1.0%

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

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

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'

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

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} .

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

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 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%

$$\epsilon_{vol}$$

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 $\bar{\sigma}_{xy}$ à différents instants du chargement.

$$\bar{\sigma}_{xy}$$

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 ϵ_{vol} et la contrainte $\bar{\sigma}_{xx}$ 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%

$$\bar{\sigma}_{xx}$$

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 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} .

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

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%

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

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

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.

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

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 σ_{zz} et horizontale σ_{xx} , et récapitulées dans le tableau suivant :

$t = 30 \text{ sec}$	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

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 : $\phi = 40^\circ$
- angle de dilatance : $\psi = 40^\circ$
- pression critique : $P_{cr,0} = -150 \text{ kPa}$
- pression de référence : $P_{ref} = -1000 \text{ kPa}$
- rayon élastique du mécanisme isotrope : $r_{éla}^s = 0.006$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire : $r_{éla}^d = 0.06$
- $a_{mon} = 0.0024$
- $a_{cyc} = 0.00024$
- $c_{mon} = 0.01$
- $c_{cyc} = 0.005$
- $r_{hys} = 0.15$
- $r_{mob} = 0.9$
- $x_m = 2.5$
- $\alpha = 2$

Les propriétés hydrauliques sont :

- coefficient de Biot : $B = 1$.
- module de compressibilité de l'eau $K_e = 1.E12 \text{ Pa}$ (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 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 triaxial 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 : $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0 = \sigma^0 = 200 \text{ kPa}$, 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 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 :

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

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)

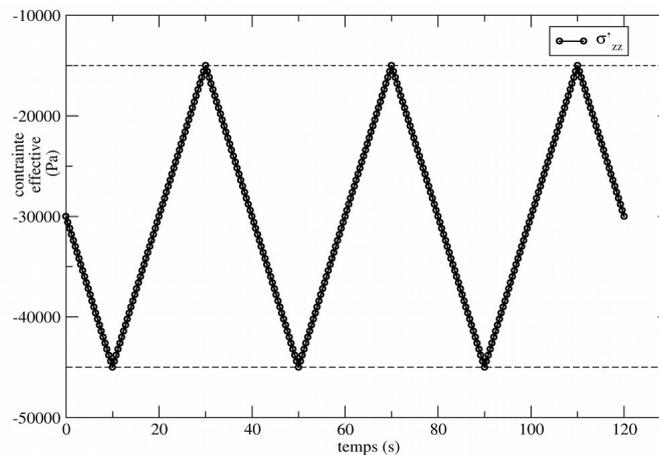


Figure 5.3.1-1: Trajet de chargement 3

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 `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 :

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

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).

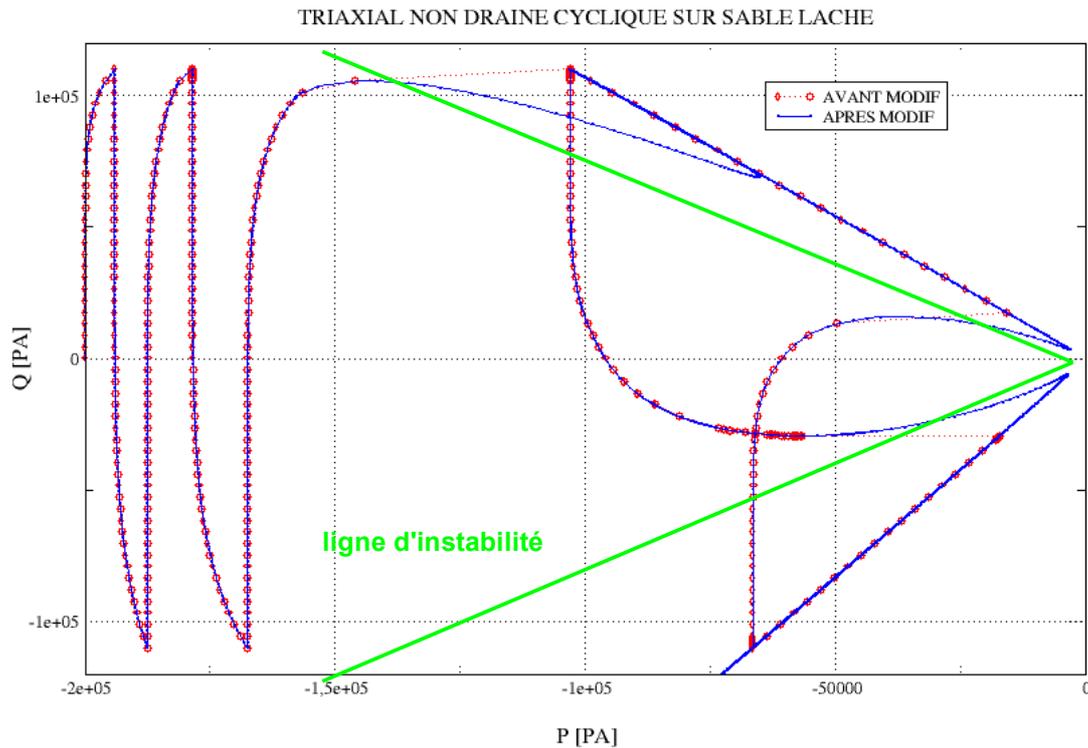


Figure 6.3-1: Comparaison de la solution en contrainte contrôlée (rouge) et en déformation contrôlée (bleue) lors de la traversée de la ligne d'instabilité

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'incrémentations temporels est égal à 200. La pression de confinement initial est de $\sigma_0 = 50 \text{ kPa}$. 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 : $d\epsilon_{xy} = 2e-5$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
<i>SIXY - INST = 5</i>	'AUTRE_ASTER'	-1297.65875776	0.5%
<i>SIXY - INST = 10</i>	'AUTRE_ASTER'	-2343.93741663	0.5%
<i>SIXY - INST = 30</i>	'AUTRE_ASTER'	2343.86416193	0.5%
<i>SIXY - INST = 50</i>	'AUTRE_ASTER'	-2343.86423947	0.5%

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

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

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
<i>SIXY - INST = 5</i>	'AUTRE_ASTER'	-19270.5640459	0.5%
<i>SIXY - INST = 10</i>	'AUTRE_ASTER'	-23316.7694931	0.5%
<i>SIXY - INST = 20</i>	'AUTRE_ASTER'	15228.3800807	0.5%
<i>SIXY - INST = 30</i>	'AUTRE_ASTER'	23315.5132772	0.5%
<i>SIXY - INST = 40</i>	'AUTRE_ASTER'	-15228.1639186	0.5%
<i>SIXY - INST = 50</i>	'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 triaxial 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 :

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

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 :

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

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.

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 : $RU_MAX = 0.705$

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
PRES_CONF = 50 kPa	'NON_REGRESSION'	0	0.0001%
PRES_CONF = 100 kPa	'NON_REGRESSION'	1	0.0001%
PRES_CONF = 150 kPa	'NON_REGRESSION'	1	0.0001%

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

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
PRES_CONF = 50 kPa	'NON_REGRESSION'	0	0.0001%
PRES_CONF = 100 kPa	'NON_REGRESSION'	3	0.0001%
PRES_CONF = 150 kPa	'NON_REGRESSION'	1	0.0001%

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]).