# SSNV207 – Essai de cisaillement cyclique incluant des micro-décharges

**Résumé**

On réalise un essai de cisaillement cyclique contrôlé en force en mécanique pure (équivalent à des conditions hydrauliques drainées) pour deux lois de comportement : Hujeux (modélisation A) et Iwan (modélisation B). Durant les cycles de charge-décharge, des micro-décharges sont réalisées pour tester la capacité de lois à retrouver le module de cisaillement écroui avant cette micro-décharge. Les solutions calculées sont comparées à des résultats issus de *Code_Aster* pour un trajet de chargement cyclique identique sans les micro-décharges.



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

# 1 Problème de référence

## 1.1 Géométrie

L'essai de cisaillement cyclique est effectué sur un unique point de Gauss. L'essai est donc contrôlé intégralement en contraintes et déformations imposées.

## 1.2 Propriétés de matériaux du sable d'Hostun

Les propriétés élastiques sont :
- module de compressibilité isotrope : $K=516\,MPa$
- module de cisaillement : $\mu=238\,MPa$

Les propriétés anélastiques (modèle de Hujeux, modélisation A) ont été établies par F.Lopez-Caballero **[1]** :
- puissance de la loi élastique non-linéaire : $n_e=0.4$ (–> élastique linéaire)
- $\beta=24.$
- $d=2.5$
- $b=0.2$
- angle de frottement : $\phi=33°$
- angle caractéristique : $\Psi=33°$
- pression critique : $P_{CO}=-1000\,kPa$
- pression de référence : $P_{ref}=-1000\,kPa$
- rayon élastique du mécanisme isotrope : $r_i^{ela}=10^{-3}$
- rayon élastique du mécanisme déviatoire : $r_d^{ela}=0.005$
- $a_{mon}=0.008$
- $a_{cyc}=0.0001$
- $c_{mon}=0.18$
- $c_{cyc}=0.09$
- $r_{hys}=0.05$
- $r_{mob}=0.9$
- $x_m=1.$
- $dila=1.$

Pour la modélisation B, les paramètres suivants sont considérés
- $\gamma_{ref}=2.00\text{e-}4$
- $n=0.78$

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

L'essai de cisaillement cyclique présenté ici est réalisé en conditions mécaniques pures, via la commande SIMU_POINT_MAT, mot-clé SUPPORT='ELEMENT'. On impose au niveau local sur le point de Gauss considéré une contrainte de cisaillement $\sigma_{xy}$, variable durant l'essai. Les composantes $\sigma_{xx}$, $\sigma_{yy}$, $\sigma_{zz}$ sont constantes durant l'essai et égales à la valeur de pression de confinement de $P_0=-50\,kPa$. L'essai réalisé correspond à un essai de cisaillement direct.

Dans le modèle considéré, les contraintes imposées sont donc les suivantes :
- Pression de confinement constante :
$$P_0=\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}=-50\,kPa$$
- Les conditions de chargement :



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

$\sigma_{xy}=F1(t)$ , $t$ correspondant au temps fictif de la modélisation.

Le chargement s'effectue en deux phases :

- Un état de contraintes isotrope, $P_o=-50\,kPa$ , est affecté initialement au point de Gauss considéré ;
- Une contrainte de cisaillement, $\sigma_{xy}$ , est imposée et varie entre $t=0.$ et $t=40$ selon la fonction $F1(t)$ .

Un essai de non régression est réalisé avec *Code_Aster* où on réalise également un essai de cisaillement direct cyclique mais sans les micro-décharges. Les contraintes de cisaillement suivant alors la fonction $F2(t)$ .

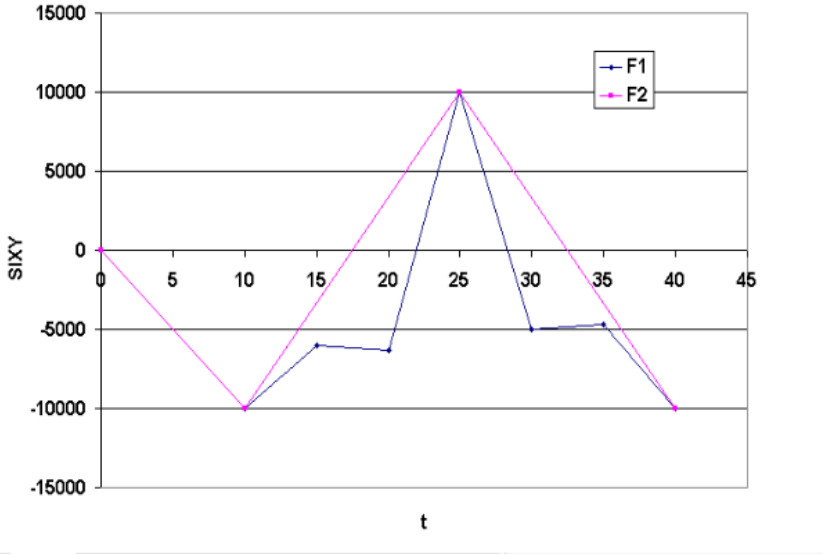



**Figure 1.3-a**: Évolution de $F1$ et $F2$ en fonction de $t$

## 1.4 Résultats

Pour la modélisation A, les solutions sont post-traitées au point de Gauss, en termes de distorsion $\varepsilon_{xy}$ , de déformation volumique plastique cumulée, $\varepsilon_v^p\,\%$ , et de coefficients d'écrouissage déviatoire cyclique, $r_d^c$ . Pour la modélisation B, on compare uniquement la distorsion $\varepsilon_{xy}$ .

La validation est effectuée par comparaison à la solution obtenue pour le trajet de chargement sans les micro-décharges via *Code_Aster*.



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

# 2 Modélisation A

## 2.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation est tridimensionnelle $3D$ et statique non-linéaire.

L'essai de cisaillement cyclique avec micro-décharges est contrôlé en contraintes, via $\sigma_{xy}$, tout en imposant une pression de confinement constante, $P_0 = -50\,kPa$. La subdivision automatique du pas de temps est activée uniquement pour gérer les situations de non convergence de l'intégration locale.
Dans l'intégration des équations d'équilibre, on demande une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Hujeux et accélère considérablement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps (commande DEFI_LIST_INST) pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. Cette fonctionnalité est *grandement recommandée*.

## 2.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point de Gauss et comparées à des références Code_Aster pour un trajet de chargement identique sans les micro-décharges. Elles sont données en termes de déformations $\varepsilon_{xy}$, de déformation volumique plastique cumulée $\varepsilon_v^p$ et de coefficients d'écrouissage déviatoire cyclique $\left(r_{ela}^{d,c} + r_{dev}^{c}\right)$, et récapitulées dans le tableaux suivants :

$\varepsilon_{xy}$

| $\sigma_{xy}$ [ $Pa$ ] | Type de Référence | Valeur de Référence | Tolérance ( % ) |
|---|---|---|---|
| $-1E4$ | AUTRE_ASTER | $-1.95E-4$ | 1.0 |
| $1E4$ | AUTRE_ASTER | $1.94E-4$ | 1.0 |
| $-1E4$ | AUTRE_ASTER | $1.95E-4$ | 1.0 |

$\varepsilon_v^p$

| $\sigma_{xy}$ [ $Pa$ ] | Type de Référence | Valeur de Référence | Tolérance ( % ) |
|---|---|---|---|
| $-1E4$ | AUTRE_ASTER | $-1.35E-5$ | 2.0 |
| $1E4$ | AUTRE_ASTER | $-4.28E-5$ | 1.0 |
| $-1E4$ | AUTRE_ASTER | $-7.21E-5$ | 1.0 |

$\left(r_{ela}^{d,c} + r_{dev}^{c}\right)$ (Plan $XY$ )

| $\sigma_{xy}$ [ $Pa$ ] | Type de Référence | Valeur de Référence | Tolérance ( % ) |
|---|---|---|---|
| $1E4$ | AUTRE_ASTER | $0.23$ | 1.0 |
| $-1E4$ | AUTRE_ASTER | $0.23$ | 1.0 |

## 2.3 Commentaires

La comparaison entre les solutions avec ou sans micro-décharge est particulièrement bonne, avec généralement moins de $1\%$ d'erreur.



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

# 3 Modélisation B

## 3.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation est tridimensionnelle $3D$ et statique non-linéaire.

L'essai de cisaillement cyclique avec micro-décharges est contrôlé en contraintes, via $\sigma_{xy}$, tout en imposant une pression de confinement constante, $P_0 = -50\,kPa$. On demande la subdivision du pas de temps (commande DEFI_LIST_INST) pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. Cette fonctionnalité est *grandement recommandée*.

## 3.2 Grandeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point de Gauss et comparées à des références *Code_Aster* pour un trajet de chargement identique sans les micro-décharges. Elles sont données en termes de déformations $\varepsilon_{xy}$ et récapitulées dans le tableaux suivants :

$\varepsilon_{xy}$

| $\sigma_{xy}$ [ $Pa$ ] | Type de Référence | Valeur de Référence | Tolérance ( % ) |
|---|---|---|---|
| -1e4 | AUTRE_ASTER | -1.73e-4 | 2.0 |
| 1e4 | AUTRE_ASTER | 1.73e-4 | 2.0 |
| -1e4 | AUTRE_ASTER | -1.73e-4 | 2.0 |

## 3.3 Commentaires

La comparaison entre les solutions avec ou sans micro-décharge est particulièrement bonne, avec généralement moins de $2\%$ d'erreur.



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

# 4 Synthèse des résultats

Pour cette partie, on s'intéresse particulièrement aux résultats de la modélisation A. On représente à titre d'information dans les courbes suivantes les différentes comparaisons entre Code_Aster pour les deux types de chargement énoncés dans le document ( $AD$ : Avec décharge ; $SD$ : Sans décharge) et GEFDYN, le logiciel éléments finis développé au laboratoire MSSMat de l'Ecole Centrale Paris. Les courbes reprennent les quantités testées préalablement dans la section précédente, à savoir $\varepsilon_{xy}$ (figure 4-a), $\varepsilon_v^p$ (figure 4-b) et $\left(r_{ela}^{d,c}+r_{dev}^{c}\right)$ (figure 4-c).

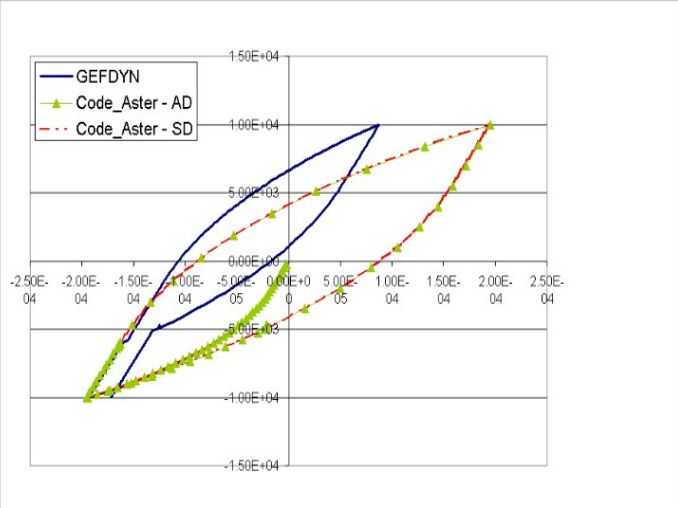



Figure **4-a** : *Contrainte déviatoire en fonction de la distorsion : comparaison des solutions de Code_Aster et GEFDYN*

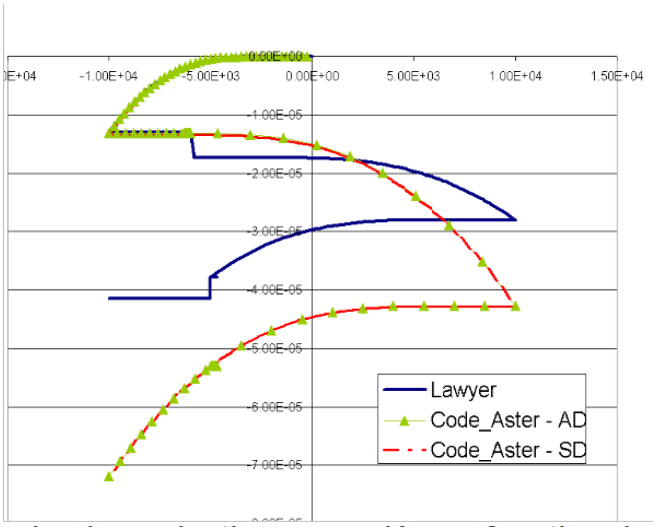



Figure **4-b** : *déformation volumique plastique cumulée en fonction de la contrainte déviatoire : comparaison entre les solutions de Code_Aster et GEFDYN.*



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

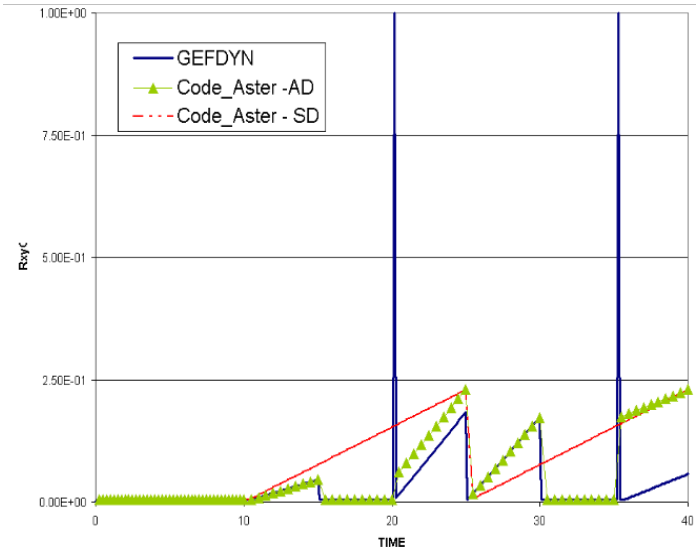



Figure **4-c**: *rayon déviatoire cyclique en fonction du temps fictif: comparaison entre les solutions de Code_Aster et GEFDYN.*

Les différences observées entre GEFDYN et Code_Aster mettent en avant une gestion suspecte par GEFDYN de l'écrouissage des cercles déviatoires cycliques dans le plan de cisaillement imposé. Alors que le modèle prédit une micro-décharge élastique, GEFDYN propose un écrouissage complet du cercle déviatoire cyclique jusqu'à la plasticité parfaite, avant de définir un cercle déviatoire cyclique à rayon élastique. Le comportement du Code_Aster respecte le caractère élastique de cette décharge et reprend en sortie de cette micro-décharge une pente d'écrouissage identique à celle obtenue auparavant.

L'équipe de développement de GEFDYN est avisée des divergences constatées entre les deux codes de calcul.

**[1] Lopez Caballero F**. « Influence du Comportement Non Linéaire du Sol sur les Mouvements Sismiques Induits dans des Géo-Structures ». Thèse de Docteur, École Centrale Paris, Châtenay Malabry, France, 2003



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