

Etudes micromécaniques des instabilités dans un milieu granulaire en quasi-2D

Clerc Adriane

Encadrants : Stéphane Bonelli, Antoine Wautier,
François Nicot

14/11/2019





Plan de l'exposé

I Introduction : sujet de thèse

II Méthodologie appliquée

III Simulations numériques réalisées

IV Post-Processing d'une bouffée d'énergie cinétique

V Conclusion et objectifs

*Plan de
l'exposé*

Le sujet

*Méthodologie
appliquée*

*Simulations
numériques*

*Post
Processing*

*Conclusion &
Objectifs*

Le sujet

Micromécanismes
de la
transition inertielle
dans les
milieux granulaires

Étude à l'échelle micro.
pour comprendre un
comportement aux conséquences
macro.

Transition d'un régime
quasistatique à un régime inertielle
Étude des instabilités matérielles
(bouffées d'énergie cinétique)

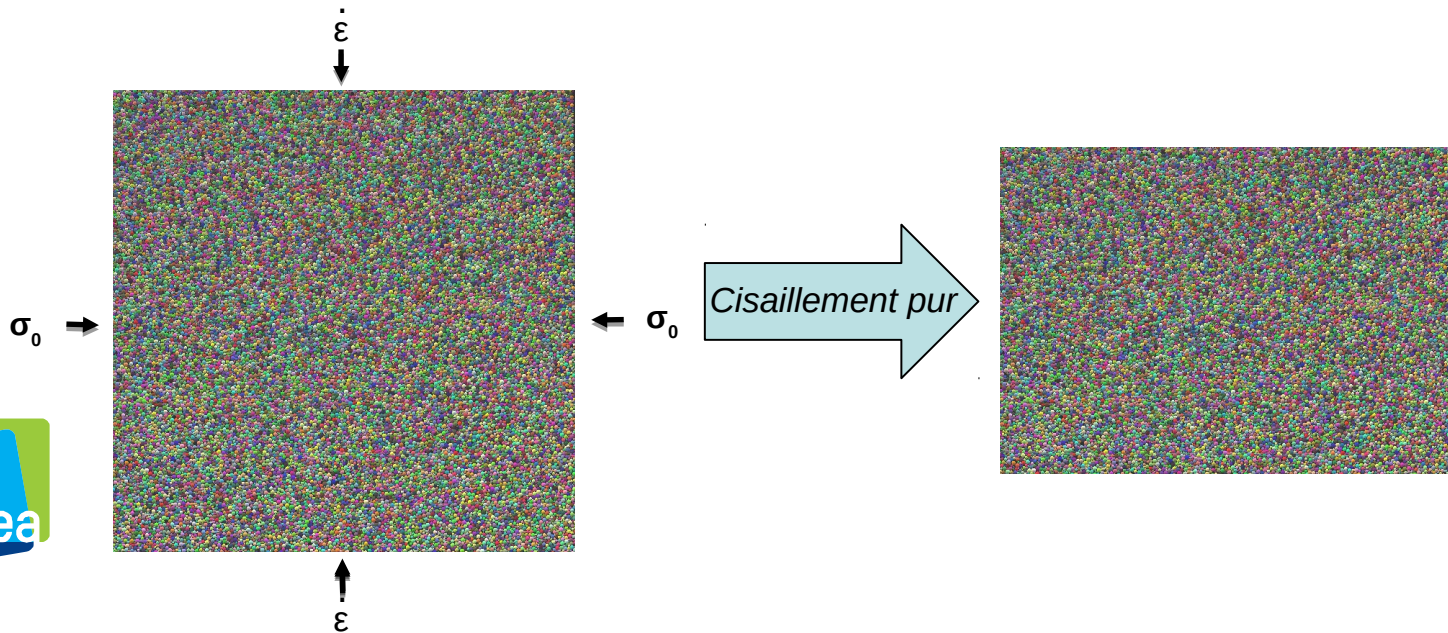
Matériaux complexes et subtiles
de par leur nature discrète
Comportement de solide et de
liquide

- **Outils** : logiciel Yade (Discrete Element Method)
- **Applications** : mouvements de terrain , déstabilisation mécanique ou érosion interne d'un barrage, stockage industriel



Méthodologie appliquée

- i. Création d'un échantillon de 25000 particules quasi 2D
- ii. Simulations numériques en quasi 2D : essai biaxial
- iii. Post-processing : repérage de plusieurs bouffées d'énergies cinétiques, étude des mésostructures (chaines de forces, cycles de grains) et de leur rôles dans la stabilité et les réarrangements induits par une perturbation localisée ou non.

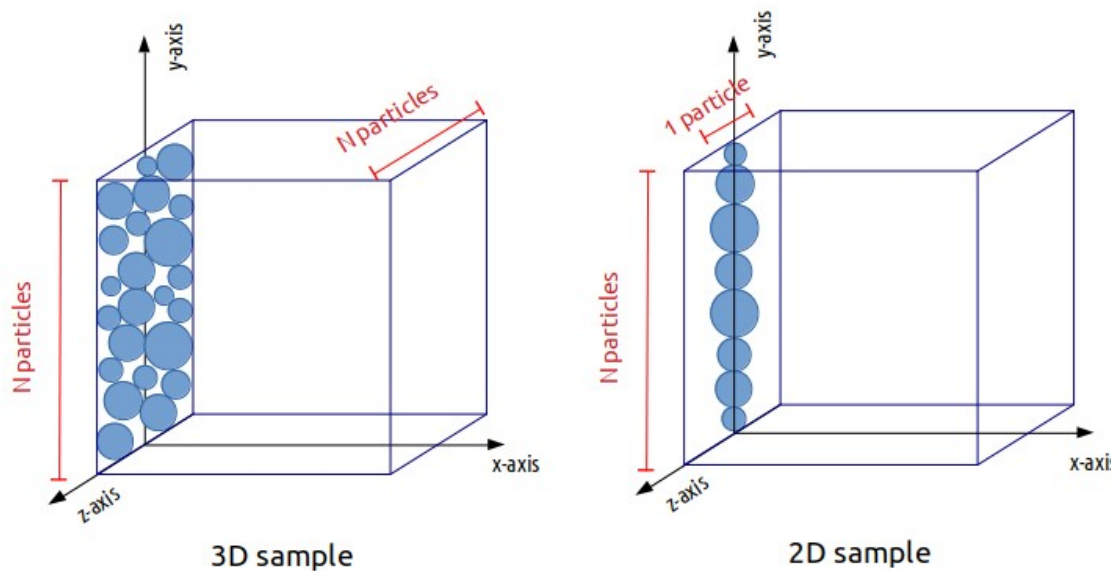


Simulations numériques

● Rappels sur les essais quasi 2D :

- _ Sphères 3D dans un plan (x,y)
- _ Conversion contrainte 3D / contrainte 2D :

$$\sigma_{3D} = N^2 * F_{3D} / (N^2 * D^2) = F_{3D} / D^2 \quad \sigma_{2D} = N * F_{2D} / (N * D * 1) = F_{2D} / D$$



3D sample

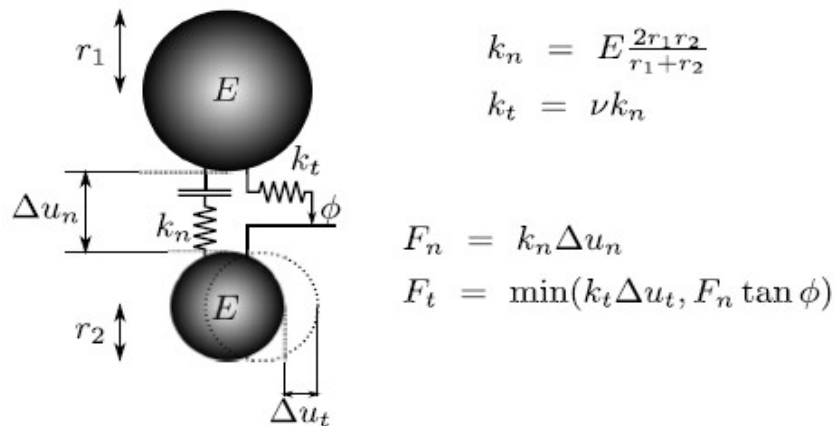
2D sample

Donc si les mêmes forces sont appliquées :

$$F_{2D} = F_{3D} \leftrightarrow \sigma_{2D} * D = \sigma_{3D} * D^2 \leftrightarrow \sigma_{2D} = \sigma_{3D} * D$$

Simulations numériques

- Quelques principes du logiciel DEM Yade :
 - _ la géométrie des grains
 - _ les forces d'interaction



- **2 paramètres à indiquer :
- _ ν : « coefficient de Poisson »
 - _ E : « module de Young »

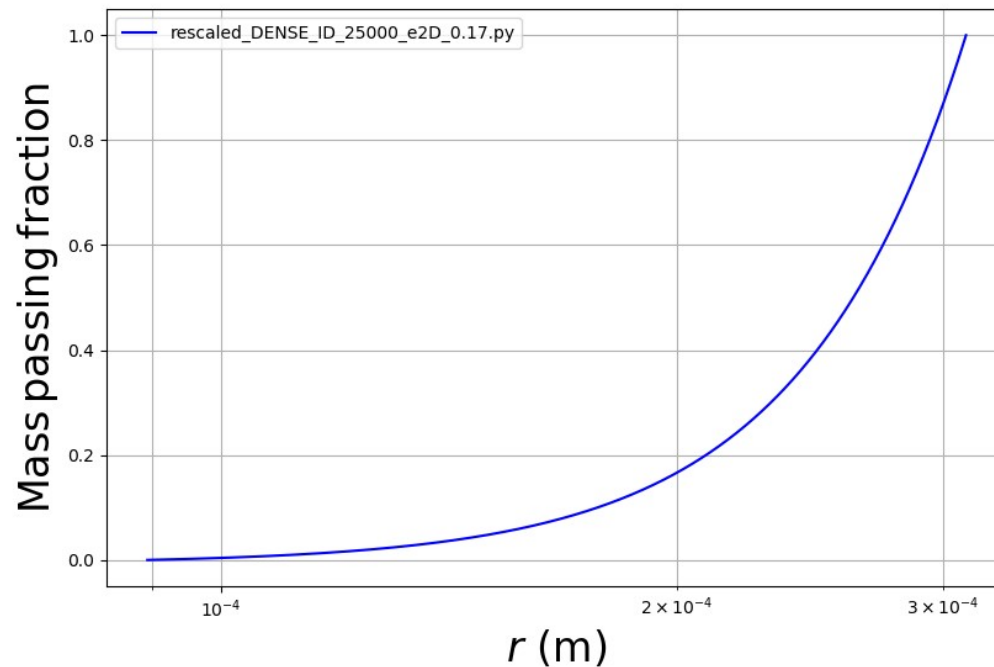


Simulations numériques

Un type d'échantillon « type A » :

Un couple dense/lâche de rapport $R_{\max}/R_{\min} = 3,5$

Density	3000 kg.m^{-3}
Young Modulus**	356MPa
Stiffness ratio**	0.42
Internal Friction Angle	35°
Loading rate	0.01 s^{-1}



Plan de l'exposé

Le sujet

Méthodologie appliquée

Simulations numériques

Post Processing

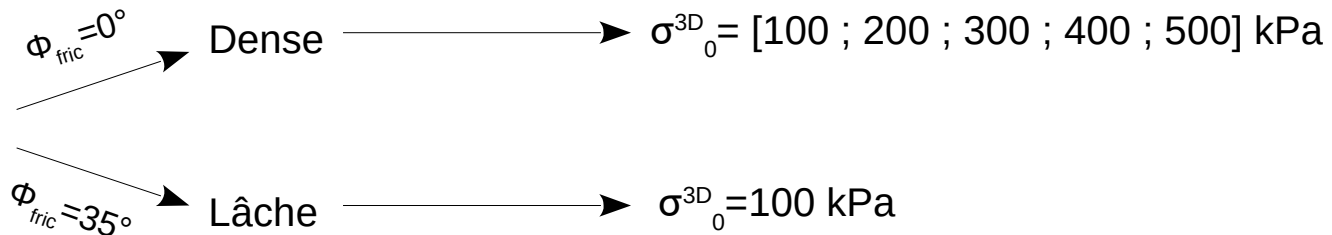
Conclusion & Objectifs

Simulations numériques

Déroulement complet de la création d'un échantillon à l'essai biaxial :

Essais quasi 2D, en cisaillement pur, sur des échantillons de taille suffisante pour être considérés comme REV (25000 particules)

1. Pression de confinement isotrope σ_0^{3D}
2. Contrôle en déformation (vitesse de déformation ϵ imposée) sur l'axe y, contrôle en contrainte σ_0^{3D} sur l'axe x



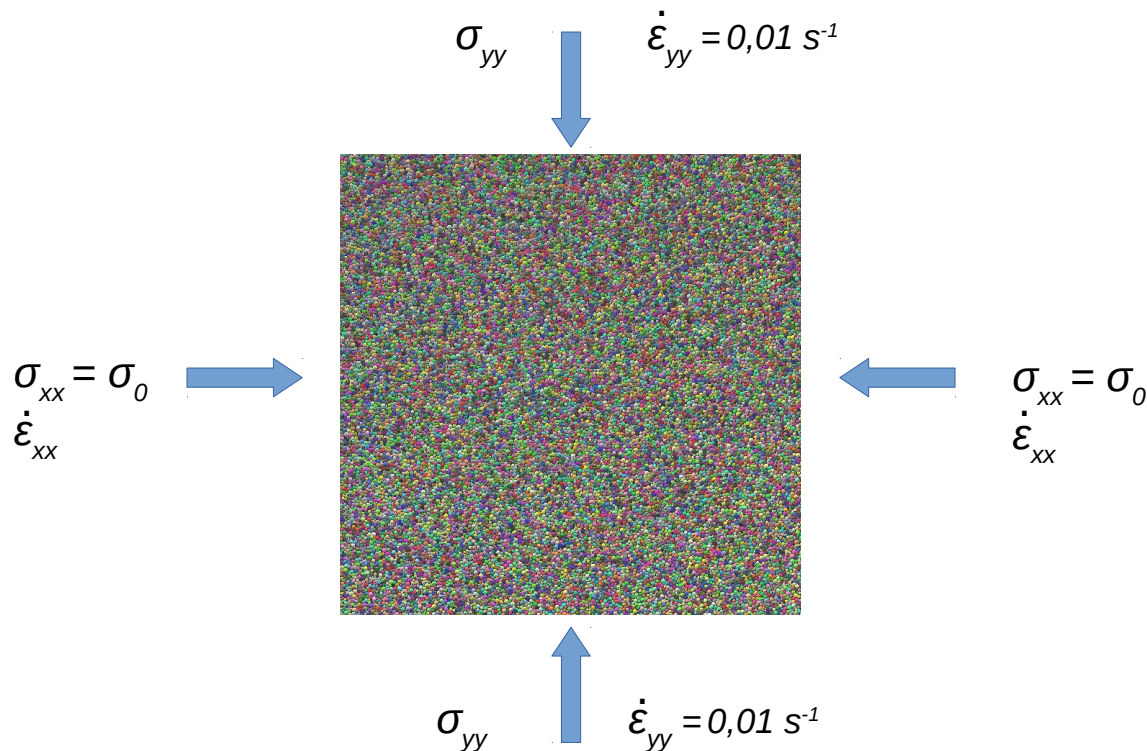


Simulations numériques

Grandeurs caractéristiques :

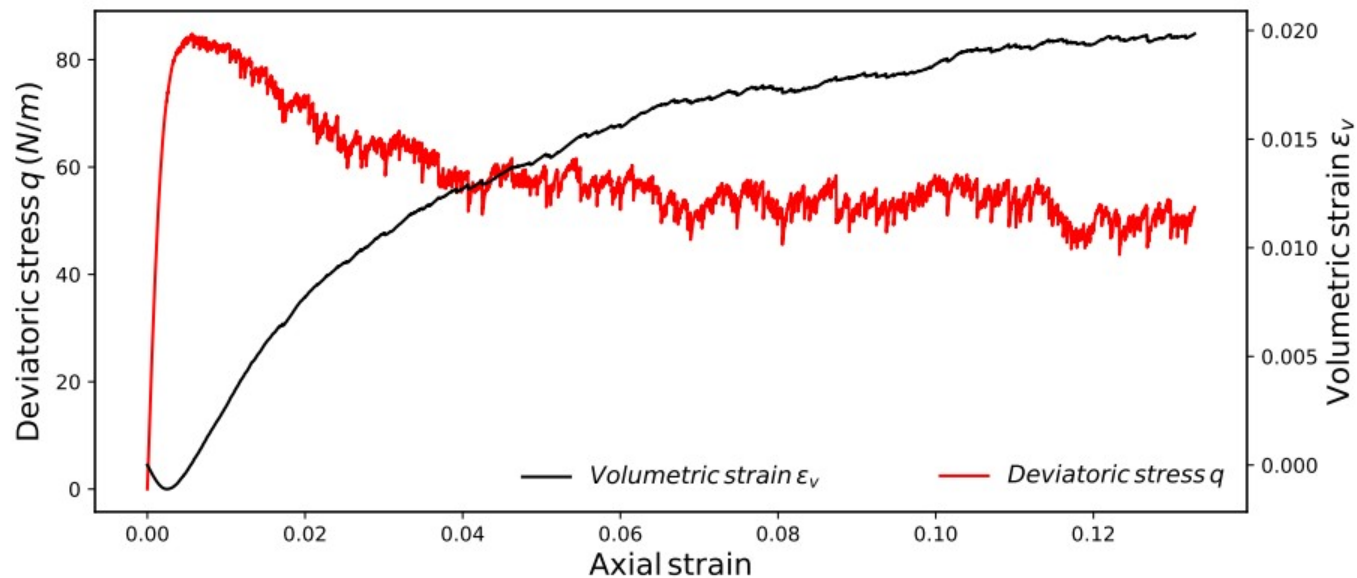
Contrainte déviatorique q : $q = \sigma_{yy} - \sigma_{xx}$

Déformation volumique ε_v : $\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$



Simulations numériques

1. Essai sur échantillon dense (A), $\sigma_0 = 100$ kPa



Plan de l'exposé

Le sujet

Méthodologie appliquée

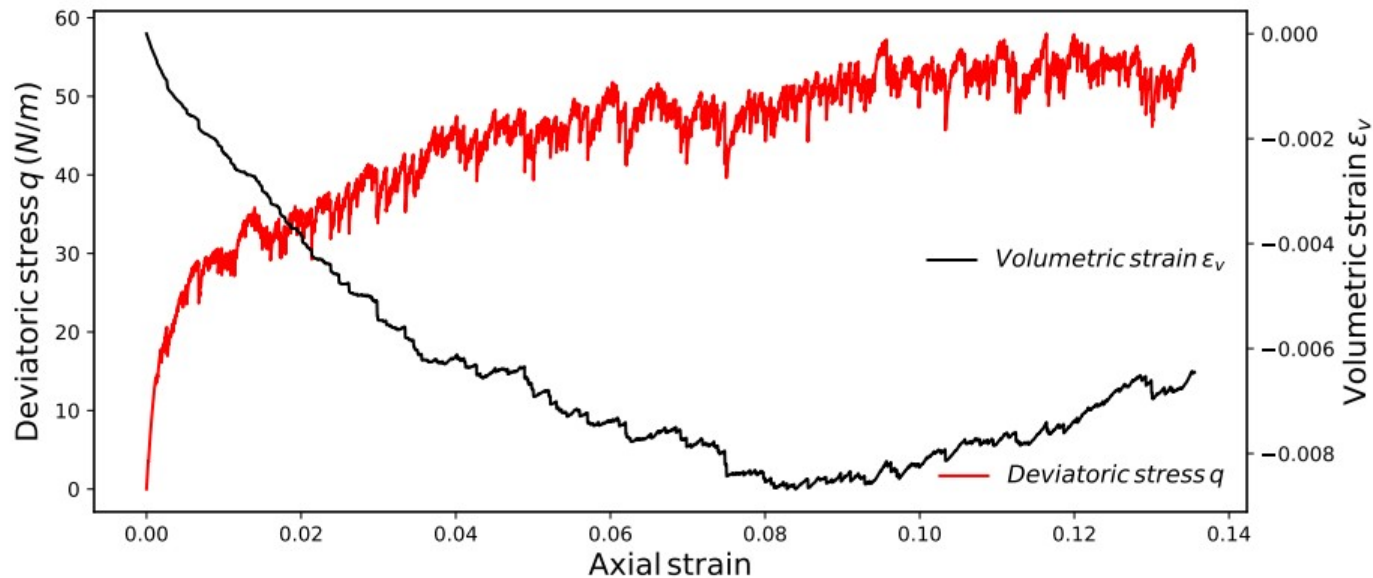
Simulations numériques

Post Processing

Conclusion & Objectifs

Simulations numériques

2. Essai sur échantillon lâche (A), $\sigma_0 = 100$ kPa



Plan de
l'exposé

Le sujet

Méthodologie
appliquée

Simulations
numériques

Post
Processing

Conclusion &
Objectifs

Post Processing : Mesostructures

Chaines de forces :

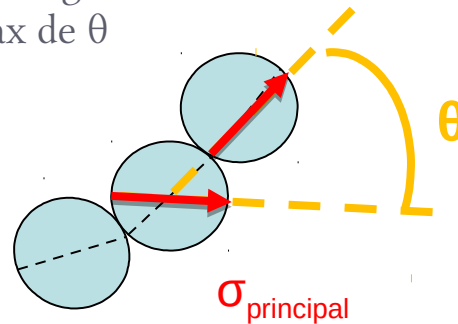
Définition de Peter et al. (2005)

i. Les grains de plus forte contrainte sont considérés (i.e. dont la contrainte principale majeure > contrainte majeure moyenne de l'échantillon)

$$\langle \sigma_{grain} \rangle = \begin{pmatrix} \sigma_1^{grain} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^{grain} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^{grain} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{principal}^{grain} = \max_{i \in \{1,2,3\}} (\sigma_i^{grain}) > \sigma_{mean\ major\ principal}$$

ii. Les contraintes principales des grains en contact et remplissant la condition i) doivent être alignés avec un angle max de θ



iii. La chaîne doit contenir au moins 3 grains

Les chaînes de forces font parties du « réseau fort » Elles tiennent un rôle dans la stabilité de l'échantillon

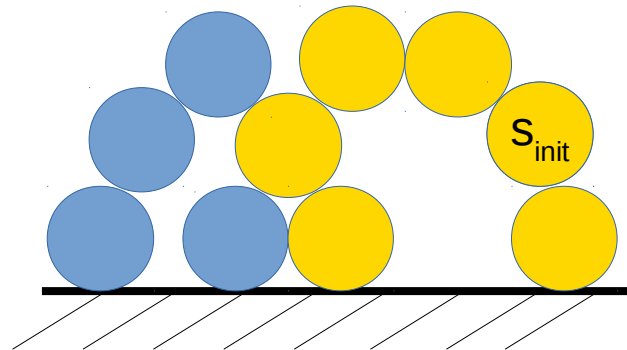
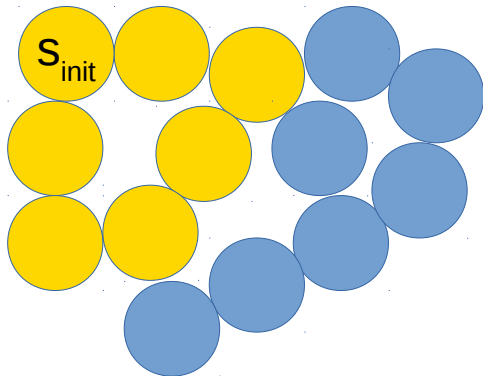


Post Processing : Mesostructures

Cycles de grains :

On définit un algorithme qui cherche les voisins d'un grain donné, et qui sélectionne celui qui permet de « tourner le plus à gauche (minimisation d'un angle)

L'algorithme définit prend en compte les murs pour éviter de fixer une longueur maximale arbitraire aux cycles (pour éviter les cycles infinis)



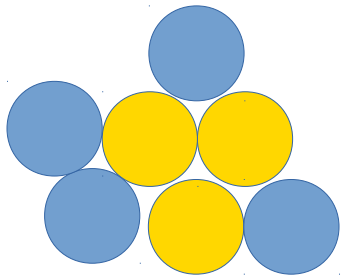
Les cycles de grains appartiennent au
« réseau faible »

Ils tiennent un rôle dans les
réorganisations de la microstructure

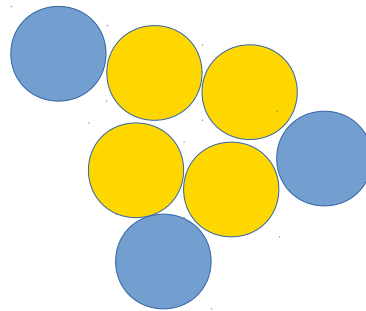
Post Processing : Mesostructures

Cycles de grains :

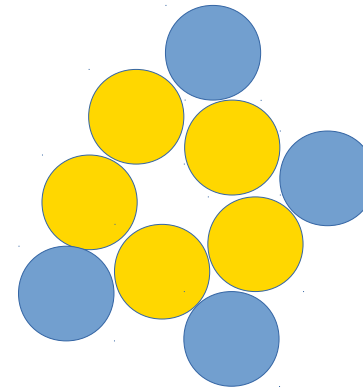
Quatre grands sous groupes de cycles sont définis :



Cycles à 3 grains L_3

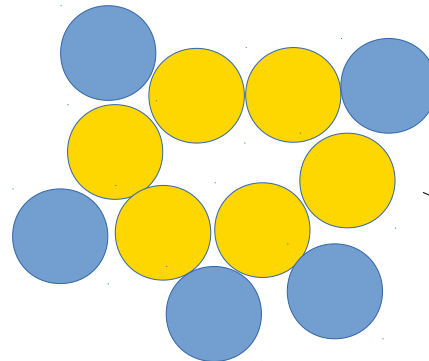


Cycles à 4 grains L_4



Cycles à 5 grains L_5

Cycles cinématiquement
« stables »

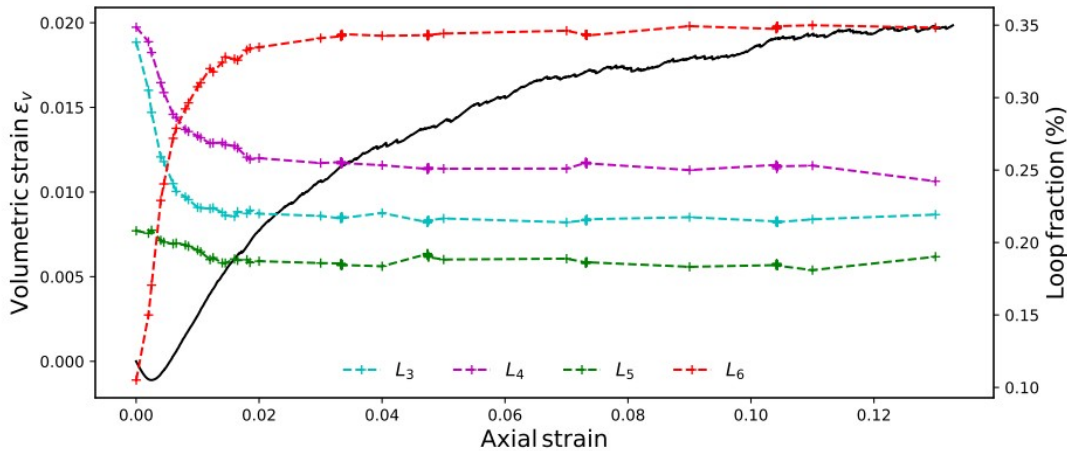
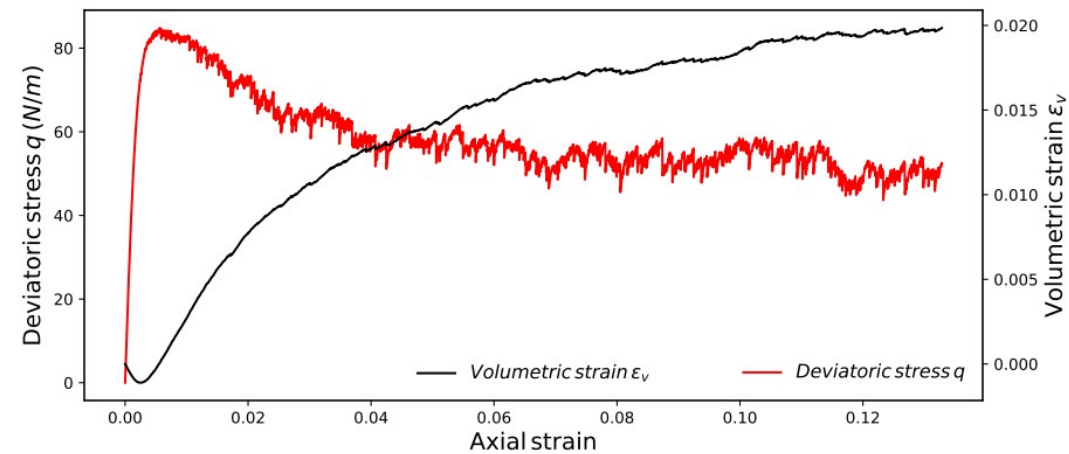


Cycles à 6 grains ou plus, L_{6P}

Cycles cinématiquement
« instables »

Post Processing : Mesostructures

Cycles de grains et essai sur échantillon dense (A), $\sigma_0 = 100$ kPa:



Plan de l'exposé

Le sujet

Méthodologie appliquée

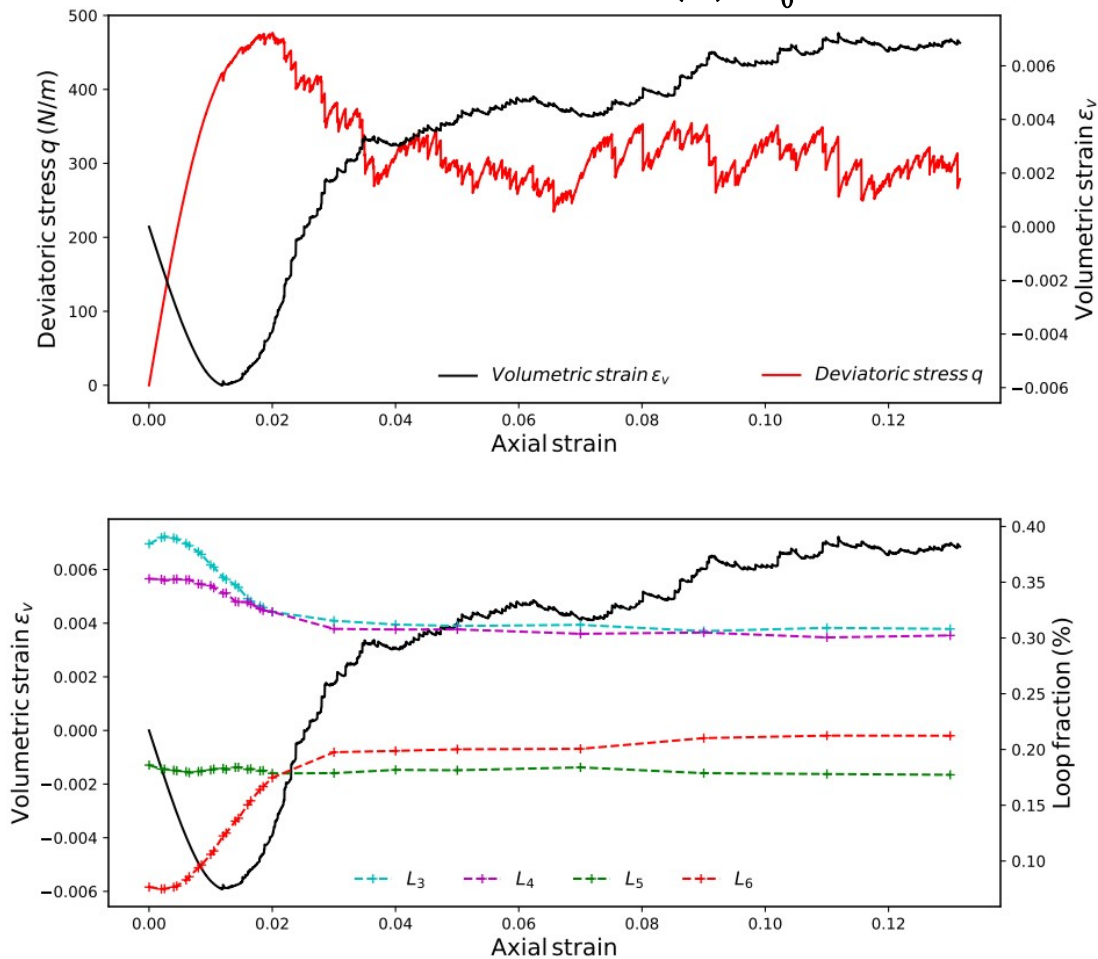
Simulations numériques

Post Processing

Conclusion & Objectifs

Post Processing : Mesostructures

Cycles de grains et essai sur échantillon dense (A), $\sigma_0 = 500$ kPa:



Plan de l'exposé

Le sujet

Méthodologie appliquée

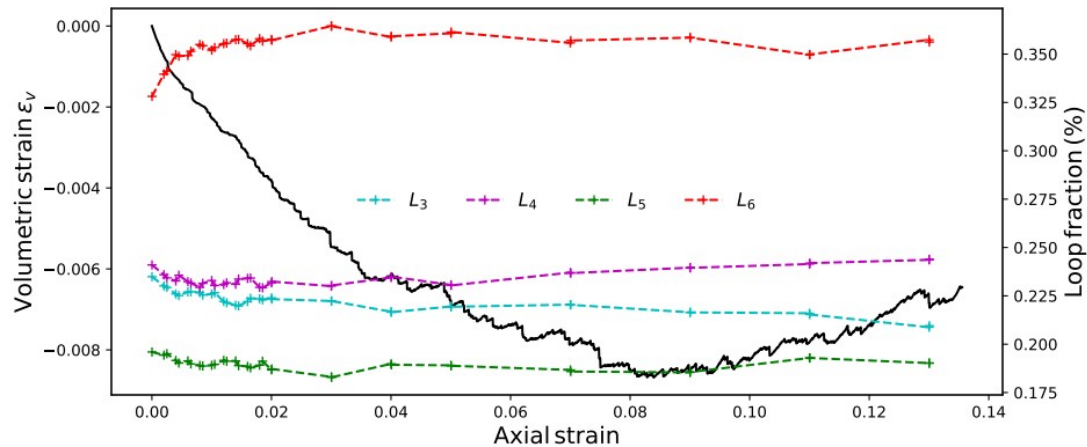
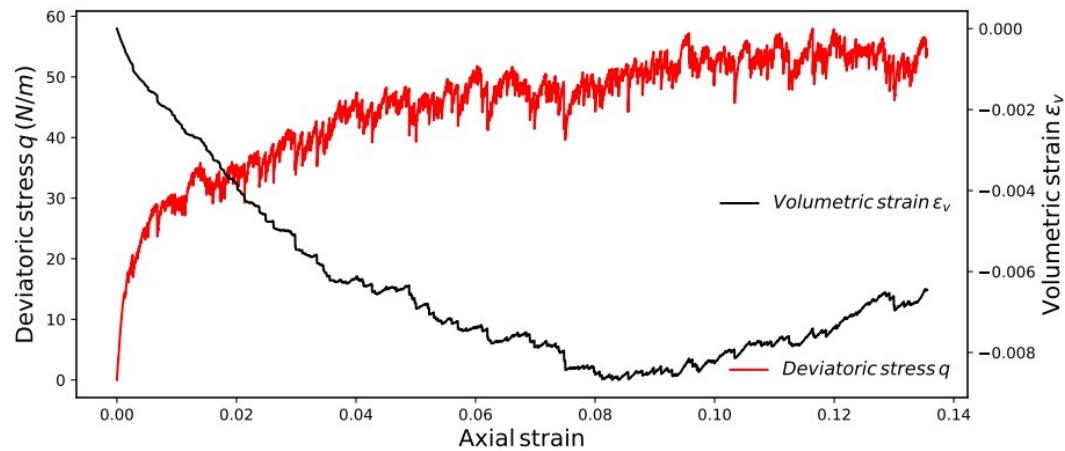
Simulations numériques

Post Processing

Conclusion & Objectifs

Post Processing : Mesostructures

Cycles de grains et essai sur échantillon lâche (A), $\sigma_0 = 100$ kPa:



Plan de l'exposé

Le sujet

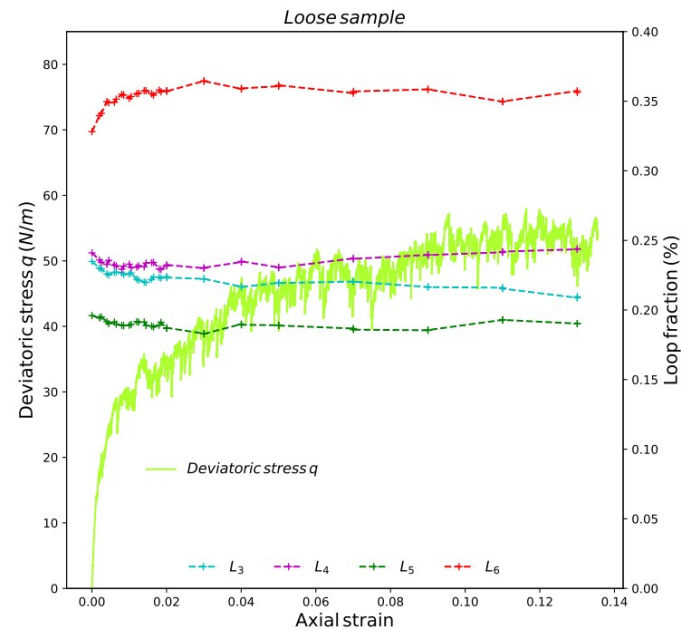
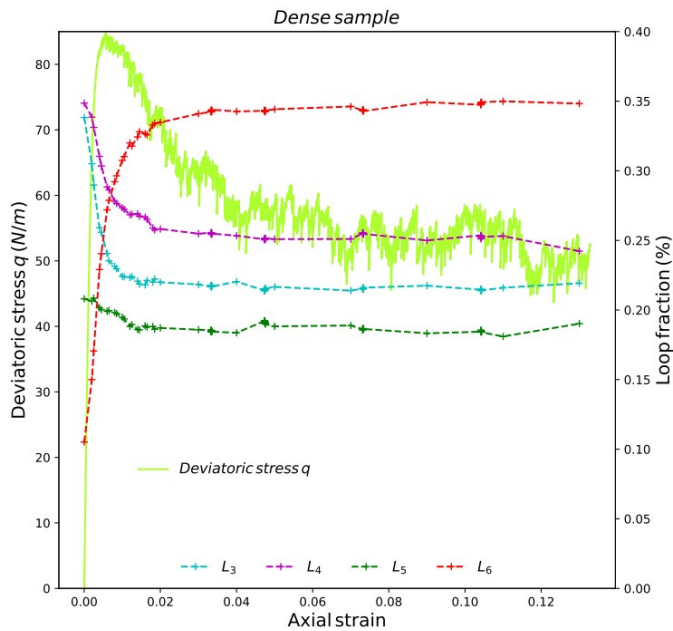
Méthodologie appliquée

Simulations numériques

Post Processing

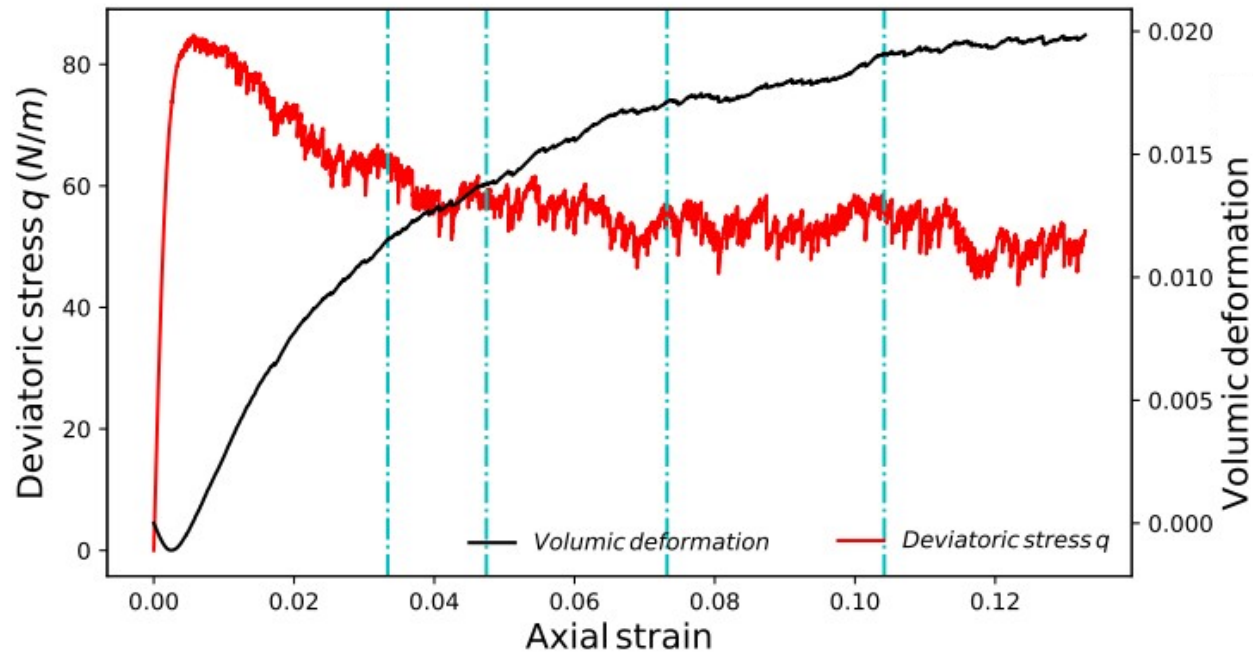
Conclusion & Objectifs

Etat critique et microstructure critique atteinte ?

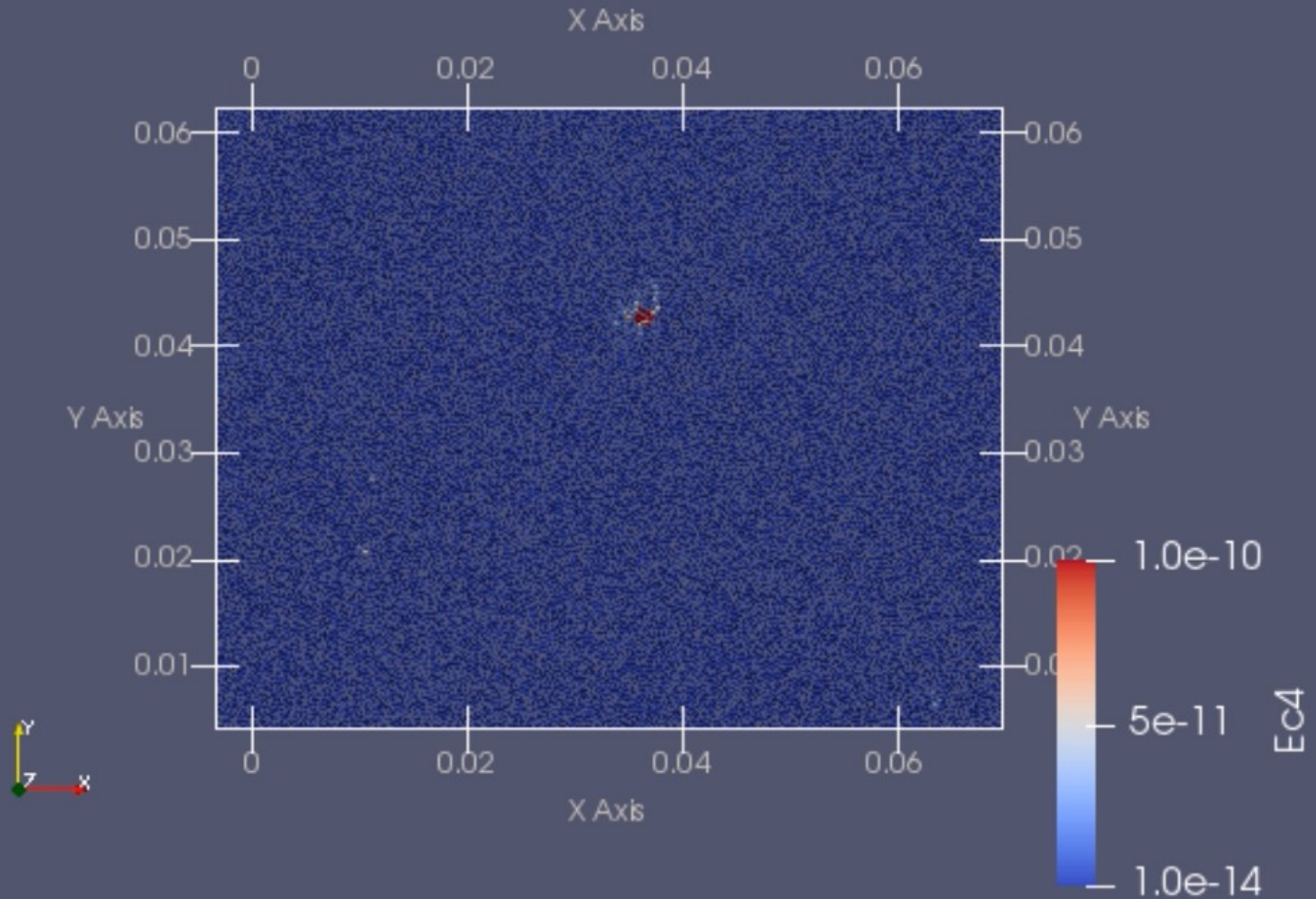


1. La contrainte déviatorique atteint un plateau de même valeur dans les deux cas (dense et lâche)
2. Les proportions des différents types de cycles atteignent aussi les mêmes valeurs
→ microstructure critique ?

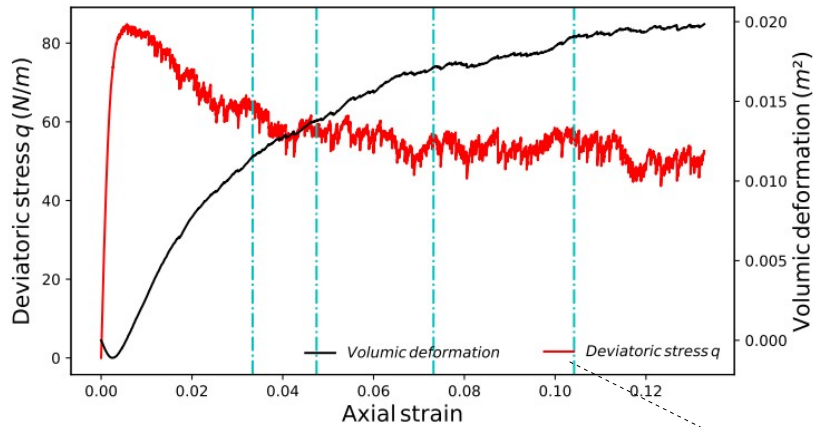
Post Processing : Bouffée d'Ec n°4



1. Repérage de 4 bouffées d'énergies sur l'échantillon dense (A) $\sigma_0 = 100$ kPa
2. Relance de la simulation pour une sauvegarde plus fine (pas de 0,00002 de déformation autour de la bouffée)
3. Nouvelle relance de la simulation (pas de $1 \cdot 10^{-6}$)

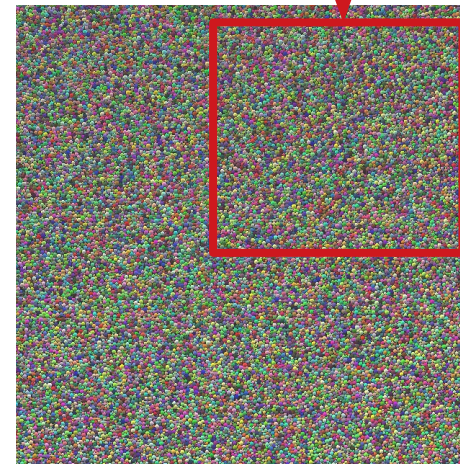


Post Processing : Bouffée d'Ec n°4



Bouffée d'Ec n°4

Zone où l'énergie cinétique se propage



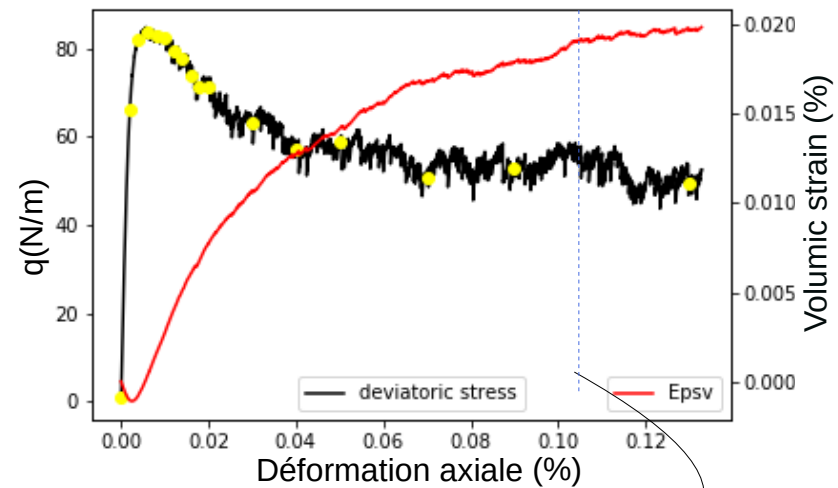
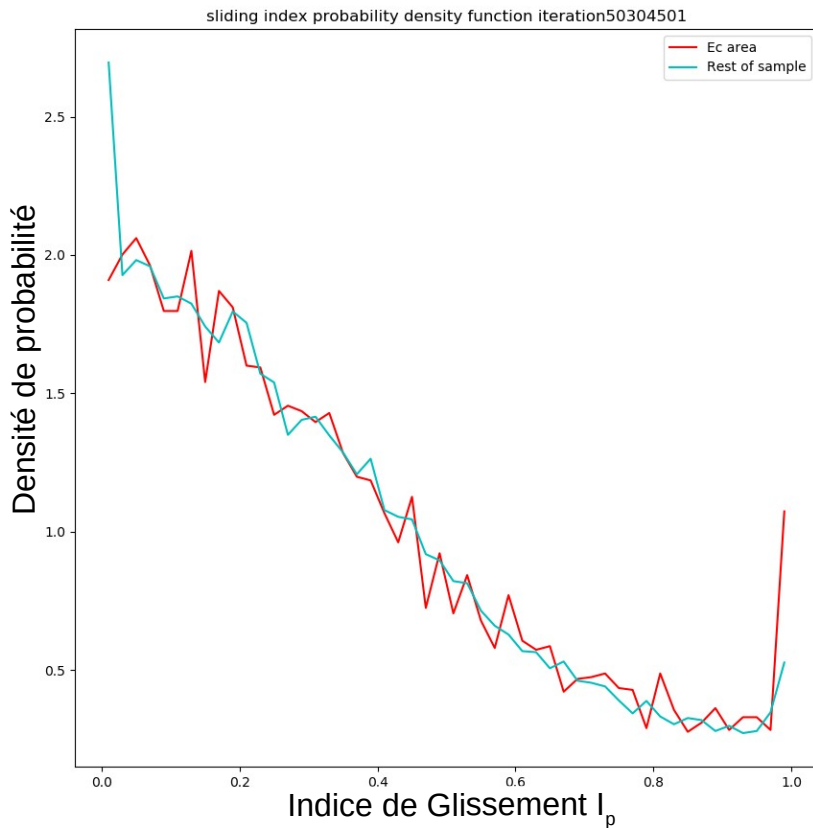
- Création d'une boîte virtuelle qui correspond à la zone où l'énergie cinétique se propage.
- Le comportement des sphères à l'intérieur de cette boîte est comparé à celui des autres sphères de l'échantillon, durant la durée de la propagation comptée en pas de temps (itérations).



Post-processing de BEC 4 « Essai »

Distance au glissement

$$I_p = (\|F_t\| / \|F_n\|) / \tan \phi$$



Plan de l'exposé

Le sujet

Méthodologie appliquée

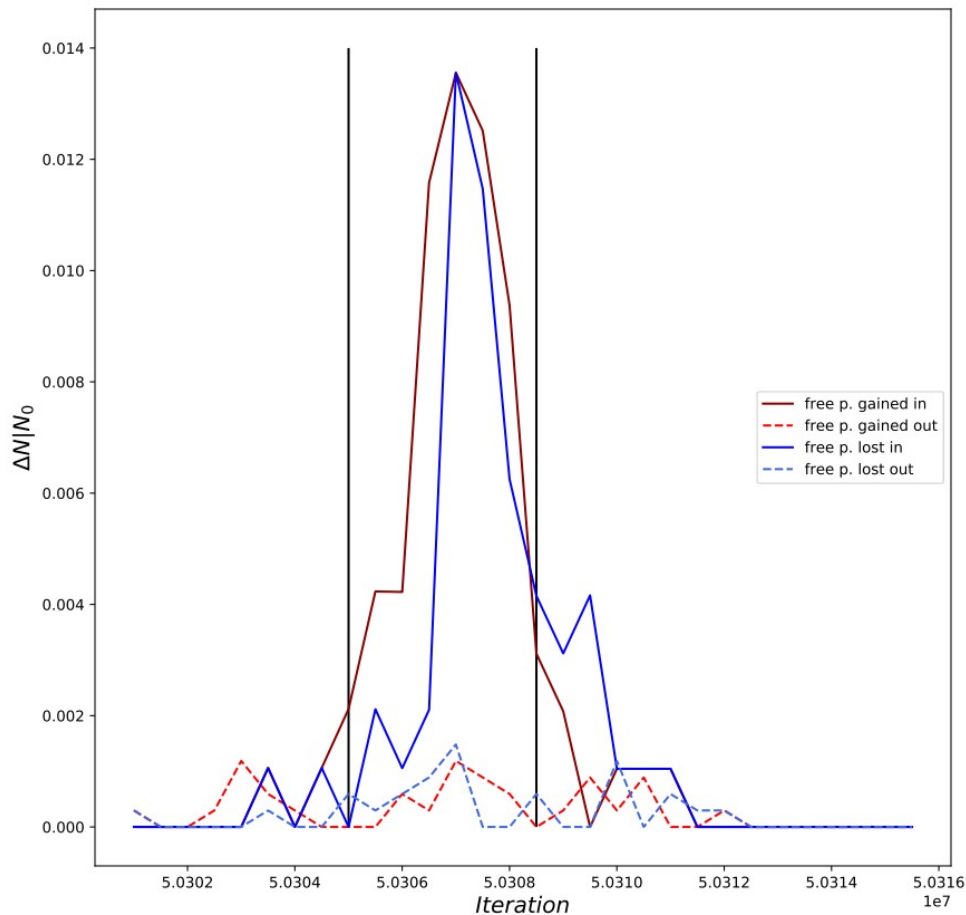
Simulations numériques

Post Processing

Conclusion & Objectifs

Post-processing de BEC 4

Evolution des particules libres près de la bouffée d' E_c et dans le reste de l'échantillon :



1. Particules libres

Post-processing de BEC 4

Plan de l'exposé

Le sujet

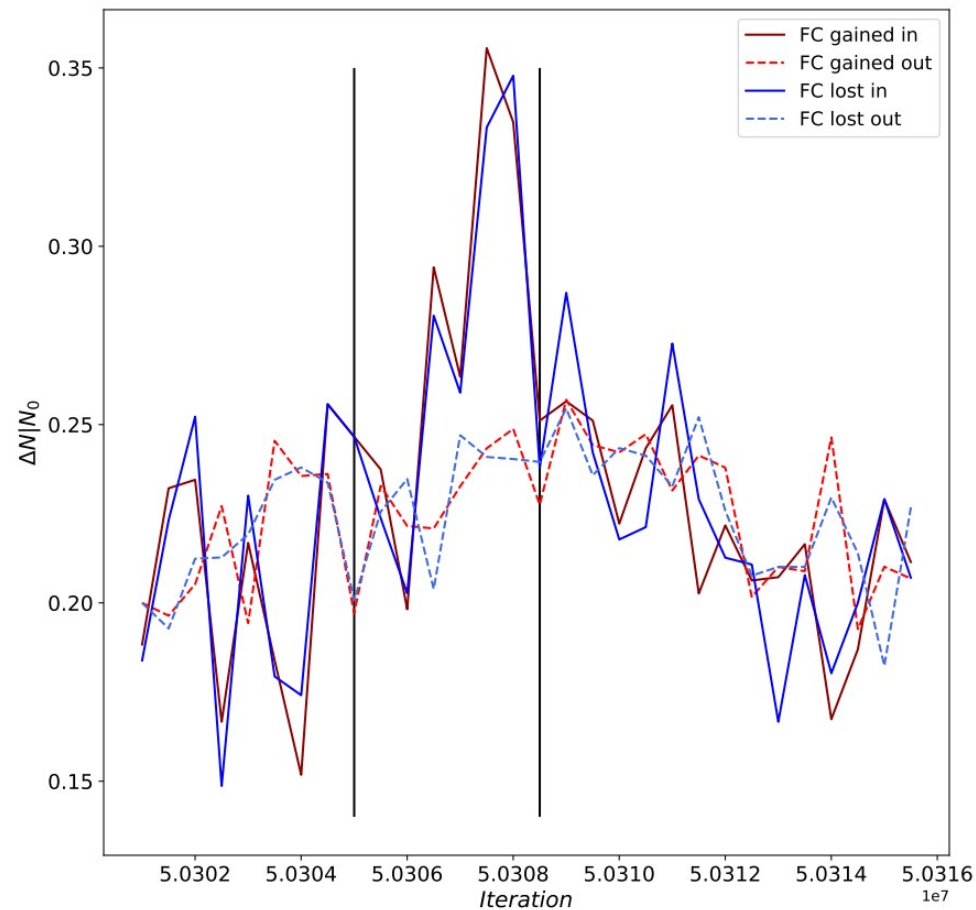
Méthodologie appliquée

Simulations numériques

Post Processing

Conclusion & Objectifs

Evolution des chaines de forces près de la bouffée d' E_c et dans le reste de l'échantillon :

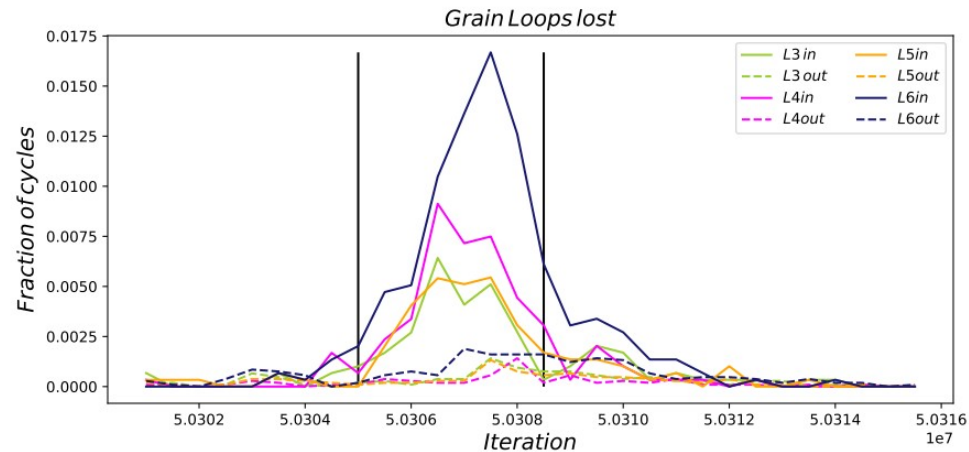
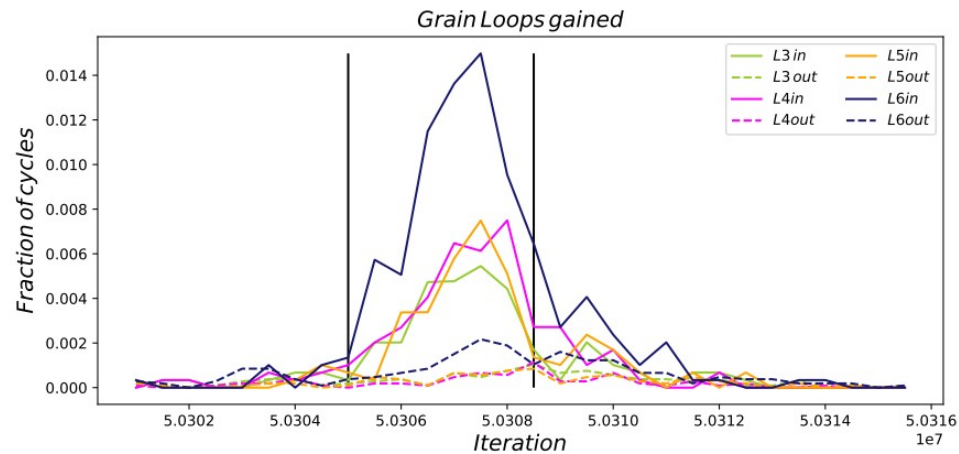


2. Chaines de forces

Post-processing de BEC 4

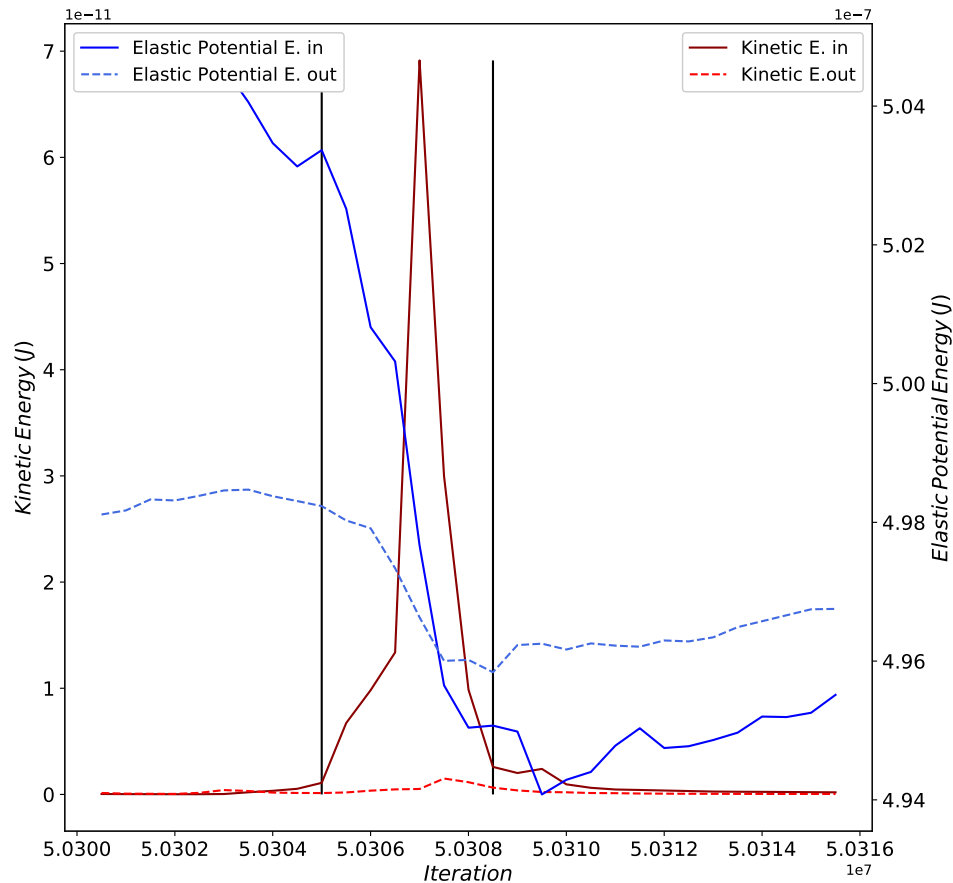
Evolution des cycles de grains près de la bouffée d' E_c et dans le reste de l'échantillon :

3. Cycles de grains



Post-processing de BEC 4

Evolution de l'énergie cinétique et potentielle élastique près de la bouffée d' E_c et dans le reste de l'échantillon :



Plan de l'exposé

Le sujet

Méthodologie appliquée

Simulations numériques

Post Processing

Conclusion & Objectifs



Conclusion & Objectifs

CONCLUSION :

- Les premiers résultats issus du post processing sont encourageants, ils soulignent le fait qu'une analyse micromécanique est délicate compte tenu du petit nombre de changements (mais qui ont leurs conséquences)

OBJECTIFS :

- Améliorer et continuer le post-processing (comparaison cycles de grains/ chaînes de force/ énergie cinétique, quelles sont les particules qui participent à la propagation de l' E_c ? À quels types de mesostructures appartiennent elles ?...)
- Calculer la contrainte incrémentale locale (au niveau des cycles) pour pouvoir faire le calcul du travail du second ordre localement
- Mieux visualiser l'énergie potentielle élastique
- Généraliser le post-processing aux autres bouffées d'énergie cinétique de l'échantillon dense, et faire le même type de travail sur l'échantillon lâche
- Appliquer un autre mode de cisaillement (cylindrique Couette, et cisaillement gravitaire)



Merci pour votre attention !



Annexes





Formations / Valorisations

Passées :

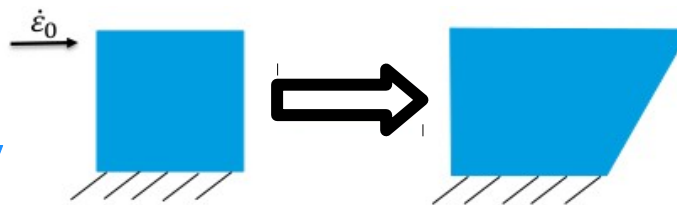
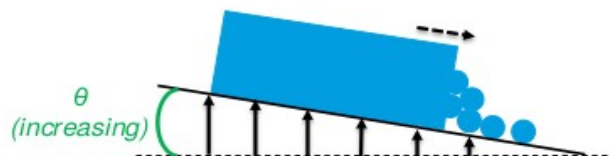
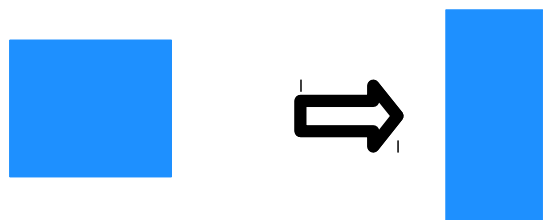
- Participation à de nombreuses conférences et workshops (GdRI GeoMech, MécaPhyGéo (IRSTEA), ALERT)
- Formation sur Python et R, cours de l'école doctorale « Mécanique et les risques en génie civil », école doctorale d'ALERT 2019
- Participations aux journées des doctorants de l'UR ETNA (IRSTEA Grenoble) (30/05) et de l'IRSTEA Aix (14/06)
- Organisation de la journée des doctorants de l'IRSTEA Aix, animateur aux journées de la sciences à Arbois (10/10)

Envisagées :

- Participation et présentation 14th World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress 2020 (Paris, July 19-24 2020)
- Poster à la journée des doctorants de l'ED 353 UMA
- Formation « Multiscale approaches and multiphysics couplings in fluid and solid mechanics » by Labex TEC21, Grenoble, January 2020
or Multyphysics and Multi-scale Couplings in Geo-environmental Mechanics » by CSIM institute, Udine, May 2020

Type of shear

Type of shear

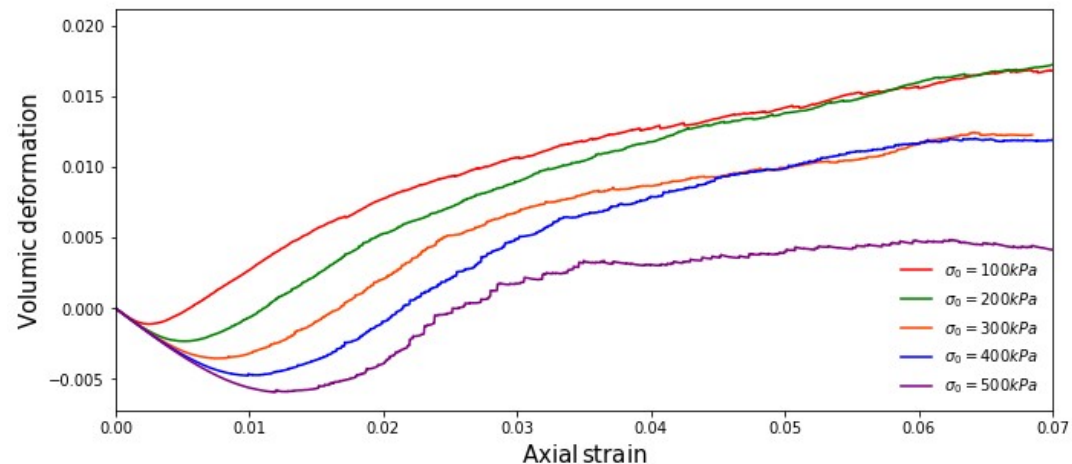
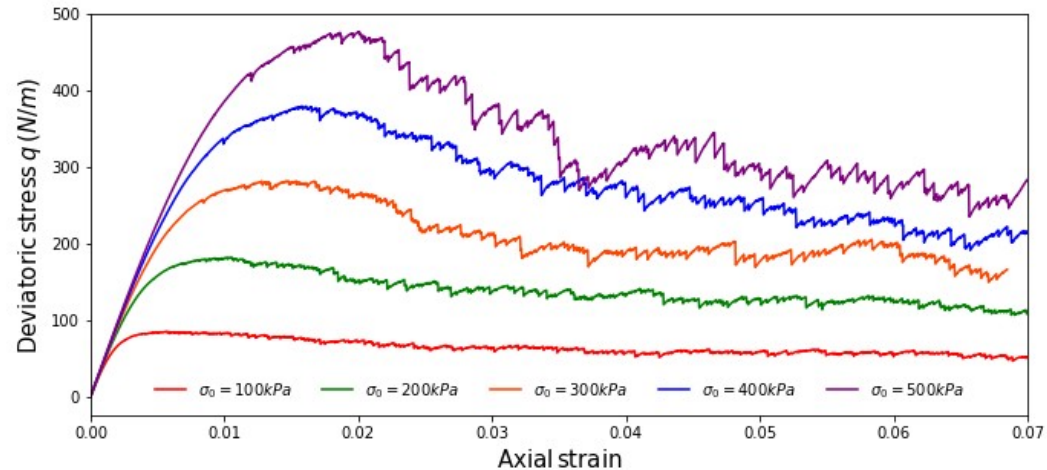


Simulations numériques

Influence de la contrainte de confinement σ_0 (échantillon dense A) :

_ Le pic de la contrainte déviatorique arrive plus tard (pour une déformation axiale plus importante) et est plus important quand σ_0 est plus grand

_ De même pour le point caractéristique



→ lien entre pic de contrainte, point caractéristique et point d'inflexion ?