

Soutenance de thèse de Maxime TEIL

Contrat doctoral de l'école doctorale IMEP2 - Université Grenoble Alpes

Imagerie 3D et simulation numérique pour l'étude multi-échelles de la compression d'une poudre constituée de grains déformables

Le 09 décembre 2019

En présence de :

Saïd EL YOUSOUFI
Jean-Philippe PONTHOT
(Rapporteurs)

Anne-Sophie CARO-BRETELLE
Pascal VILLARD
(Examinateurs)

Barthélémy HARTHONG
Didier IMBAULT
Robert PEYROUX
(Encadrants)

Sommaire

Présentation du projet de thèse

Travaux expérimentaux

Traitement numérique de l'imagerie 3D

Simulations numériques

Conclusions et perspectives

Sommaire

Présentation du projet de thèse

Travaux antérieurs

Objectif des travaux de thèse

Méthodes

Travaux expérimentaux

Compression triaxiale

Tomographie

Corrélation d'images 3D

Traitement numérique de l'imagerie 3D

Retouche des images 3D

Processus de segmentation

Génération d'un maillage

Simulations numériques

Conditions initiales

Comportement mécanique mésoscopique

Comparaison de la cinématique

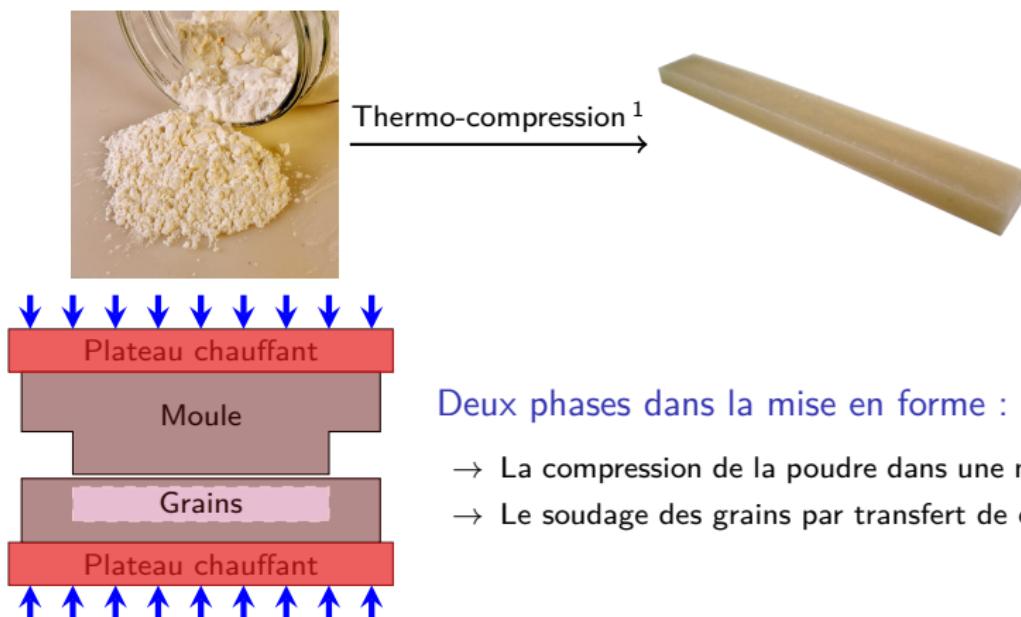
Propriétés mécaniques du matériau constitutif des grains

Conclusions et perspectives

Projet scientifique

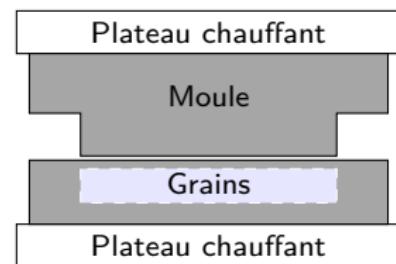
Projet COMPACT - Institut Carnot PolyNat - 2014/2015

Étude de la mise en forme d'un matériau biosourcé à partir de grains natifs d'amidon.



Travaux réalisés avant la thèse

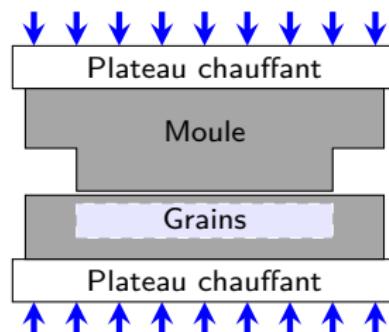
Deux phases dans la mise en forme :



Travaux réalisés avant la thèse

Deux phases dans la mise en forme :

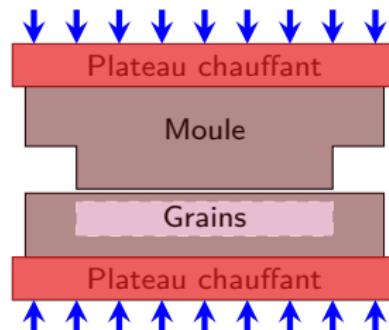
La compression de la poudre dans une matrice ;



Travaux réalisés avant la thèse

Deux phases dans la mise en forme :

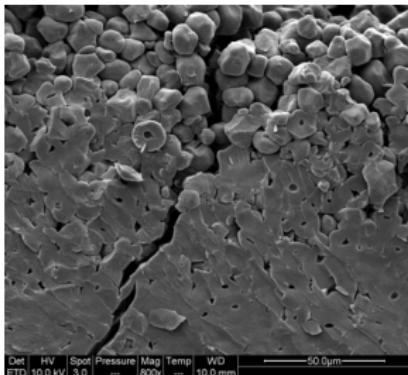
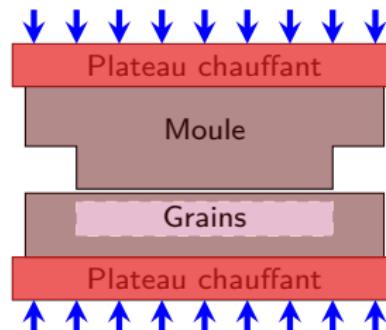
- La compression de la poudre dans une matrice ;
- Le soudage des grains par transfert de chaleur.



Travaux réalisés avant la thèse

Deux phases dans la mise en forme :

- La compression de la poudre dans une matrice ;
- Le soudage des grains par transfert de chaleur.



Analyse des pièces fracturées :

État de densité hétérogène ;

Fissurations intra/inter-granulaires en fonction de l'état de densité ;

Propriétés mécaniques dépendantes de l'état de densité et du changement de phase de l'amidon.

Étude de la phase de compression d'une poudre polymère

Problématique

Il est nécessaire de comprendre le comportement mécanique en compression d'un ensemble de grains dont les géométries sont complexes, variées et déformables.

Objectifs

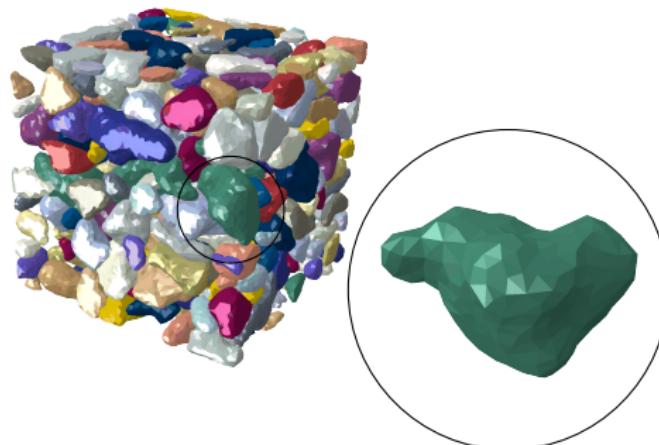
Utiliser une méthode numérique pour simuler la densification du milieu granulaire en considérant :

- le caractère déformable des grains constituant le milieu ;
- la géométrie des grains ;
- l'évolution de la microstructure.

- ⇒ **À partir du comportement mécanique individuel des grains, connaître le comportement mécanique de l'ensemble de grains.**
- ⇒ **S'appuyer sur l'expérience pour comparer les états comprimés.**

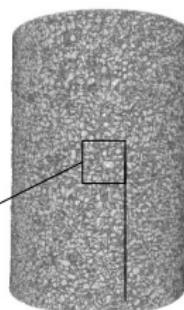
Méthode expérimentale et numérique

→ Création d'un échantillon numérique ;

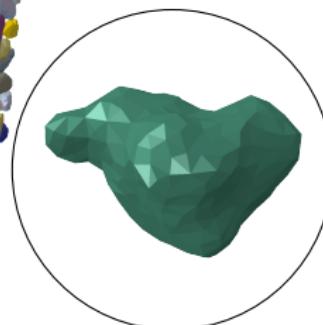
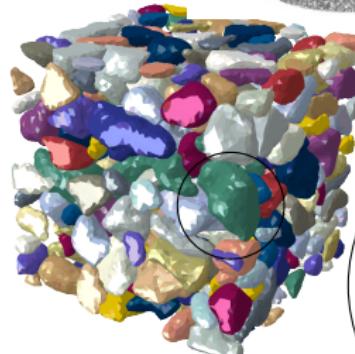


Méthode expérimentale et numérique

Tomographie

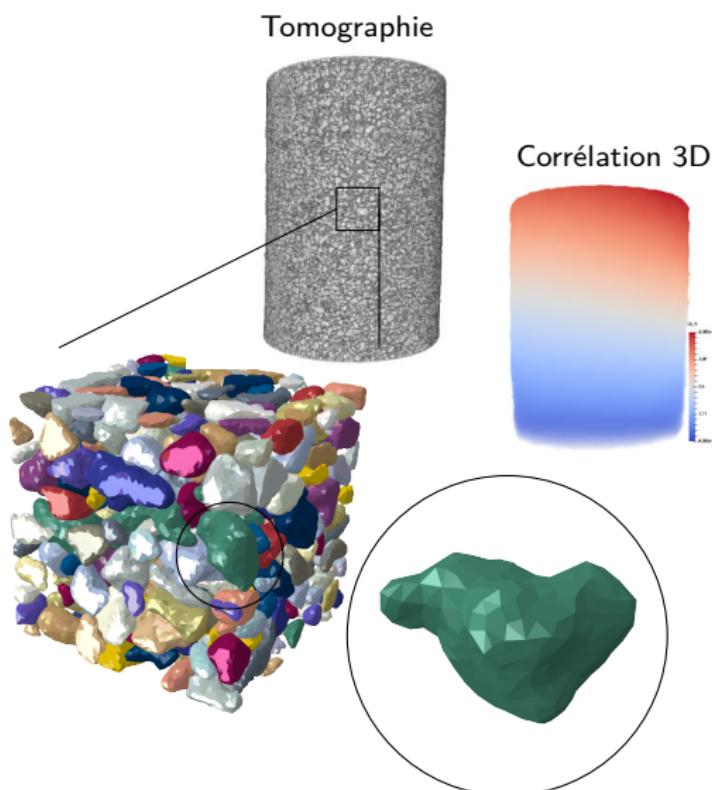


- Création d'un échantillon numérique ;
- Enregistrement de la microstructure ;



Méthode expérimentale et numérique

- Création d'un échantillon numérique ;
- Enregistrement de la microstructure ;
- Utilisation de l'expérience pour créer la simulation ;
- Simulation sur un sous-volume : comportement mécanique mésoscopique.



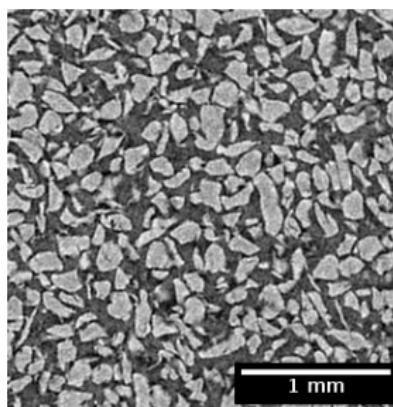
Matériaux granulaires étudiés

Le polystyrène comme matériau modèle

Compte tenu des capacités du tomographe du laboratoire, une poudre de polystyrène a été choisie comme matériau modèle :

- taille de grains de l'ordre de 150 µm (20 µm pour l'amidon) ;
- géométrie des grains très complexe ;
- composition polymérique ;
- propriétés mécaniques similaires à celles de grains d'amidon.

Fournisseur : Goodfellow (UK) - Référence : ST316051/4

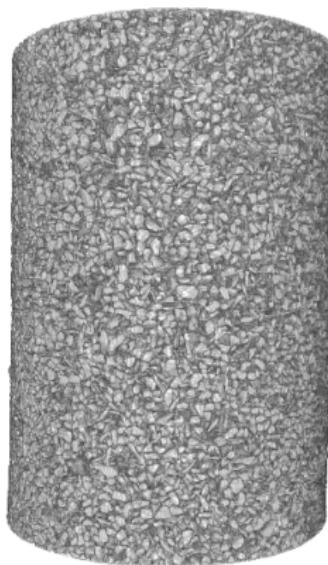


Imagerie 3D - tomographie à rayons X

Projections

Imagerie 3D - tomographie à rayons X

Assemblage des projections
→
et reconstruction



Corrélation de volumes - calcul de la cinématique

Utilisation du code TomoWarp2¹ permettant la corrélation d'images 3D par une méthode de recherche d'imagettes 3D.

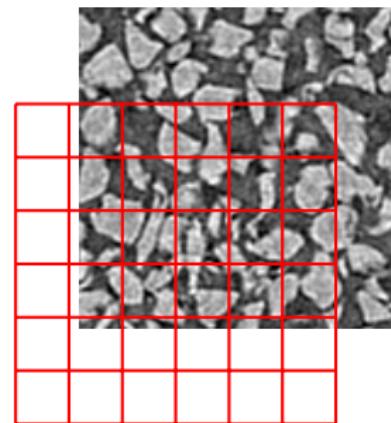
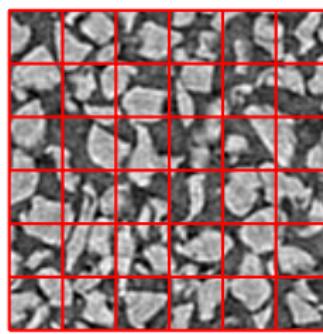


Illustration en 2D d'un mouvement de corps rigide

Corrélation de volumes - calcul de la cinématique

Utilisation du code TomoWarp2¹ permettant la corrélation d'images 3D par une méthode de recherche d'imagettes 3D.

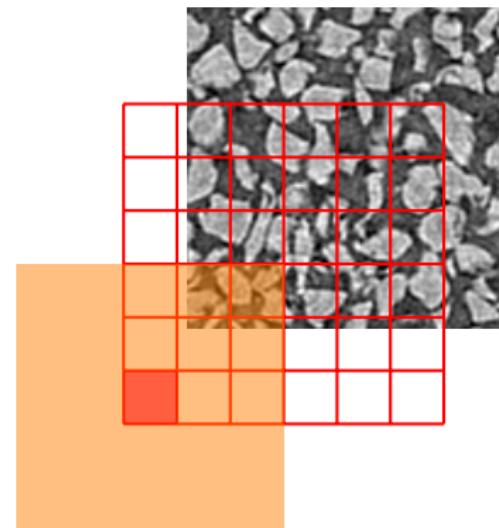
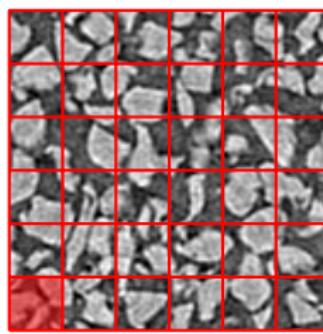


Illustration en 2D d'un mouvement de corps rigide

Corrélation de volumes - calcul de la cinématique

Utilisation du code TomoWarp2¹ permettant la corrélation d'images 3D par une méthode de recherche d'imagettes 3D.

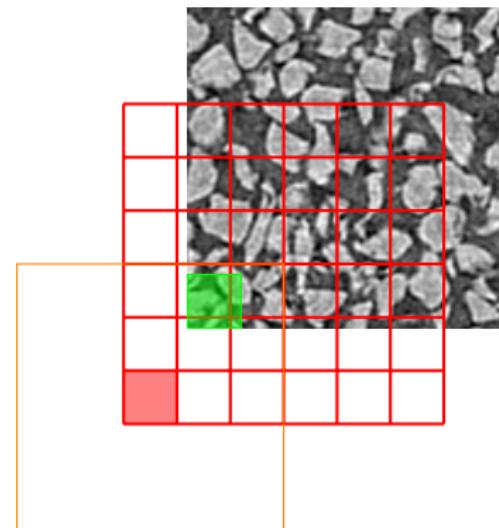
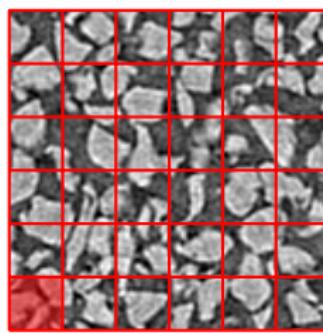


Illustration en 2D d'un mouvement de corps rigide

Corrélation de volumes - calcul de la cinématique

Utilisation du code TomoWarp2¹ permettant la corrélation d'images 3D par une méthode de recherche d'imagettes 3D.

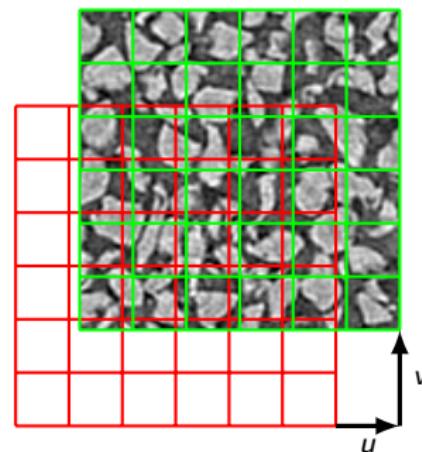
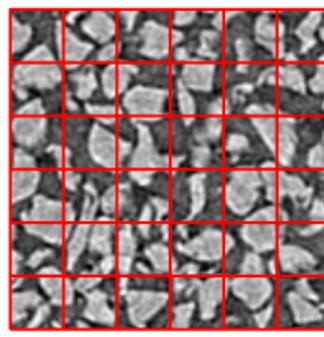


Illustration en 2D d'un mouvement de corps rigide

Méthodes numériques - simulation des milieux granulaires

Méthode des éléments discrets (DEM)

Inconvénient : éléments discrets indéformables.

Méthode des éléments finis (FEM)

Inconvénient : adaptée aux milieux continus.

Méthode des éléments finis multi-particules (MP-FEM)

Adaptée à l'étude des milieux continus
constituant les particules d'un milieu granulaire et leur déformation.

Video Nouha

Gestion des interactions de surface dans les zones de contact.

Sommaire

Présentation du projet de thèse

Travaux antérieurs

Objectif des travaux de thèse

Méthodes

Travaux expérimentaux

Compression triaxiale

Tomographie

Corrélation d'images 3D

Traitements numériques de l'imagerie 3D

Retouche des images 3D

Processus de segmentation

Génération d'un maillage

Simulations numériques

Conditions initiales

Comportement mécanique mésoscopique

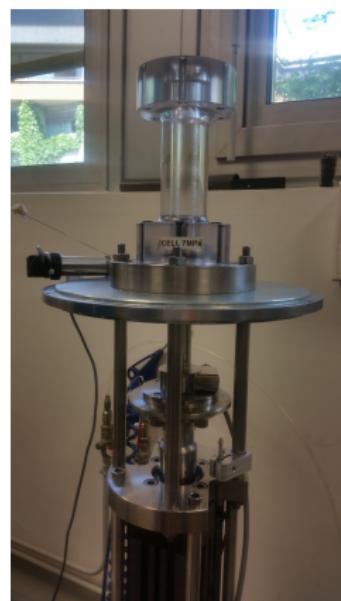
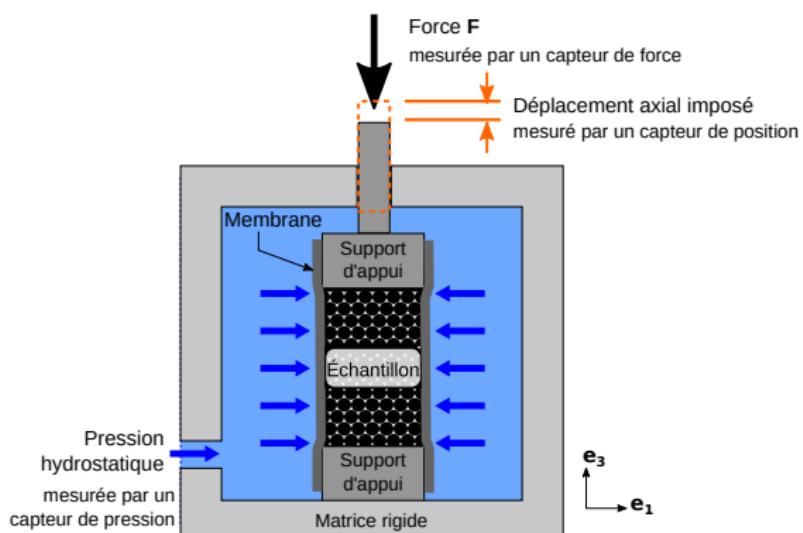
Comparaison de la cinématique

Propriétés mécaniques du matériau constitutif des grains

Conclusions et perspectives

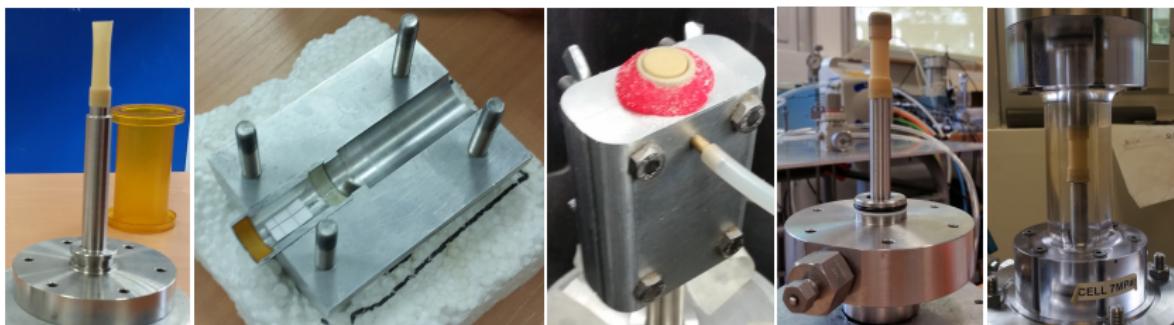
Essai de compression triaxiale de révolution

Cellule de chargement triaxial



Protocole expérimental

Mise en place de l'essai



Déroulement de l'essai

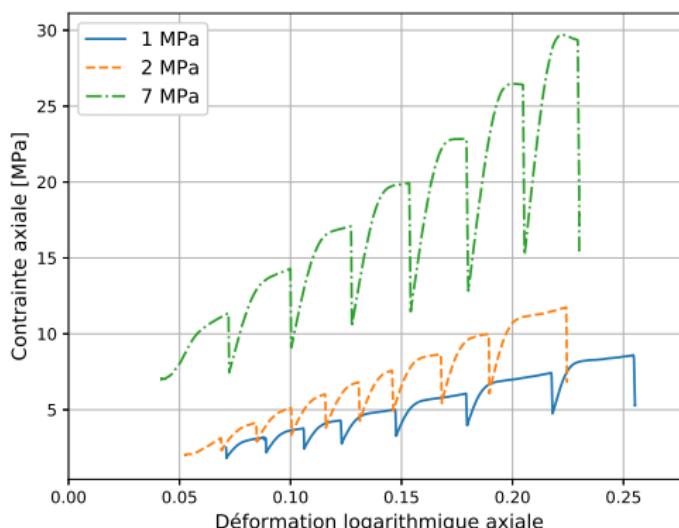
- Vitesse de chargement axial : $2 \mu\text{m/s}$
- Déformation logarithmique axiale finale : ≈ 0.25

Campagne d'essais

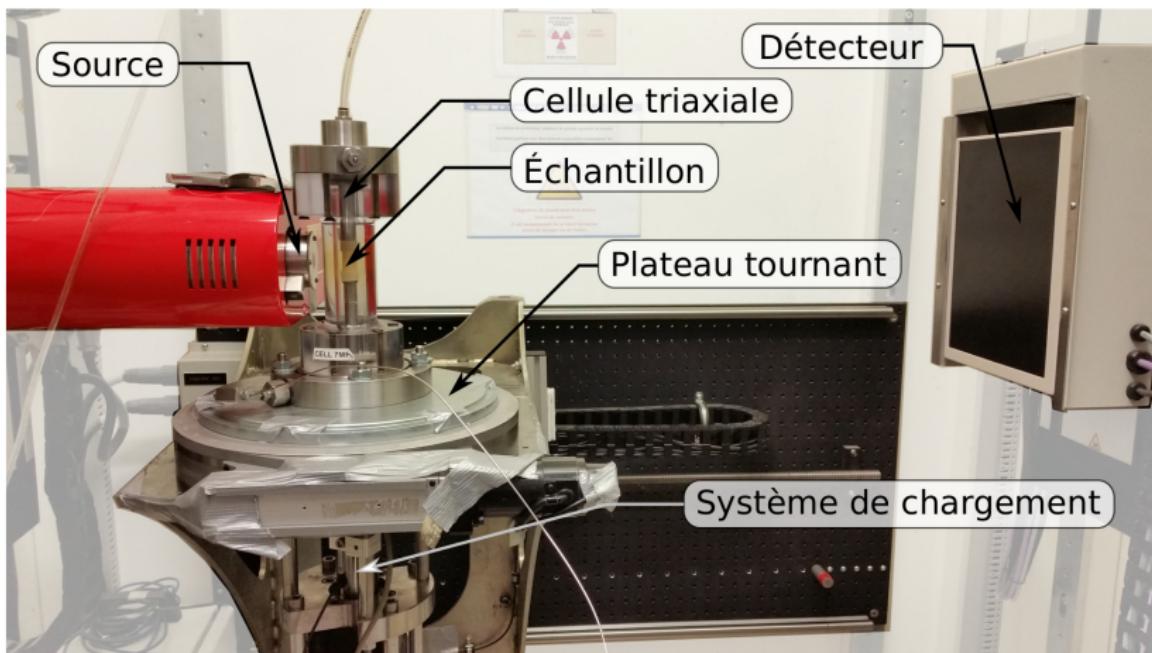
Plusieurs pressions de confinement

Trois essais ont été menés à trois pressions de confinement différentes :

- $P_C = 1 \text{ MPa}$ avec surconsolidation à 2 MPa
- $P_C = 2 \text{ MPa}$
- $P_C = 7 \text{ MPa}$



Compression triaxiale in-situ

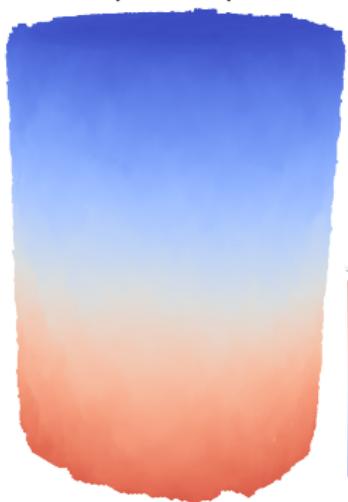


Résolution maximale permettant une taille de voxel de 9 μm .

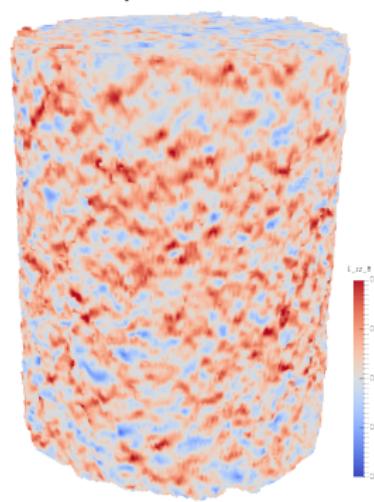
Corrélation de volumes - Utilisation de TomoWarp2

Le code TomoWarp2¹, libre d'accès, a été utilisé pour les calculs de corrélation d'images volumiques entre chaque état de compression successif.

Champs de déplacement

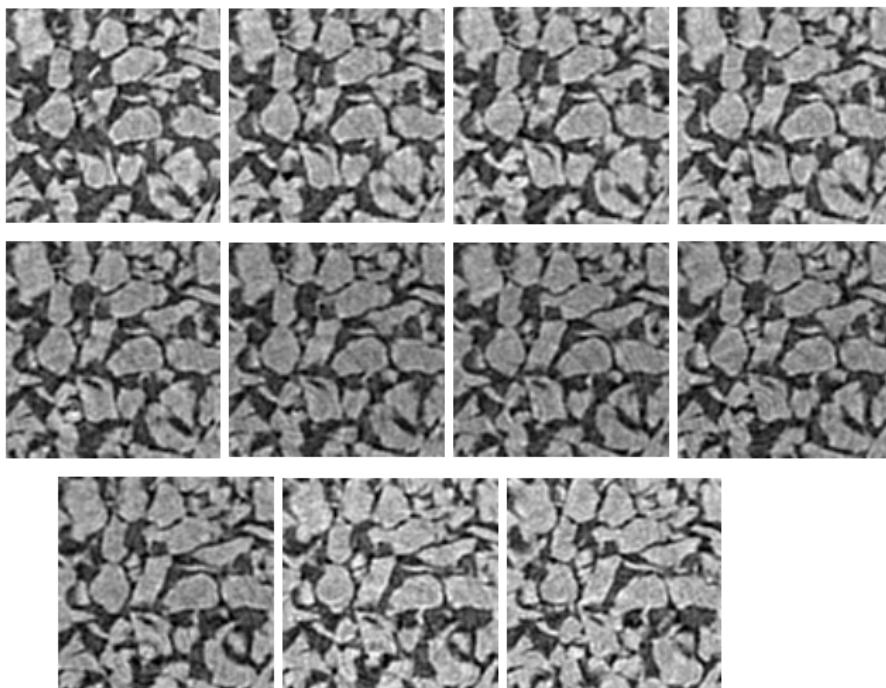


Champs de déformation



Green-Lagrange

Déplacement dans l'échantillon



Sommaire

Présentation du projet de thèse

Travaux antérieurs

Objectif des travaux de thèse

Méthodes

Travaux expérimentaux

Compression triaxiale

Tomographie

Corrélation d'images 3D

Traitement numérique de l'imagerie 3D

Retouche des images 3D

Processus de segmentation

Génération d'un maillage

Simulations numériques

Conditions initiales

Comportement mécanique mésoscopique

Comparaison de la cinématique

Propriétés mécaniques du matériau constitutif des grains

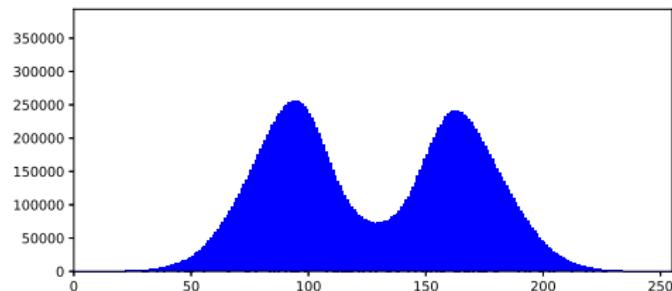
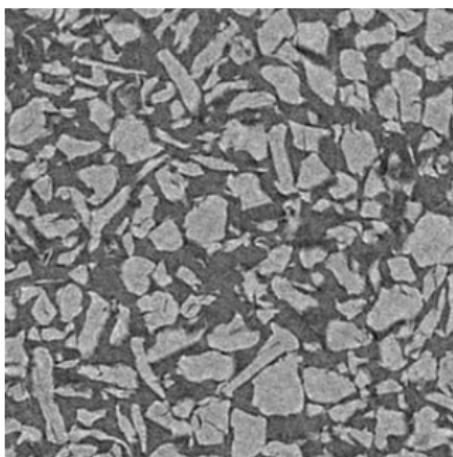
Conclusions et perspectives

Amélioration des images issues de tomographie

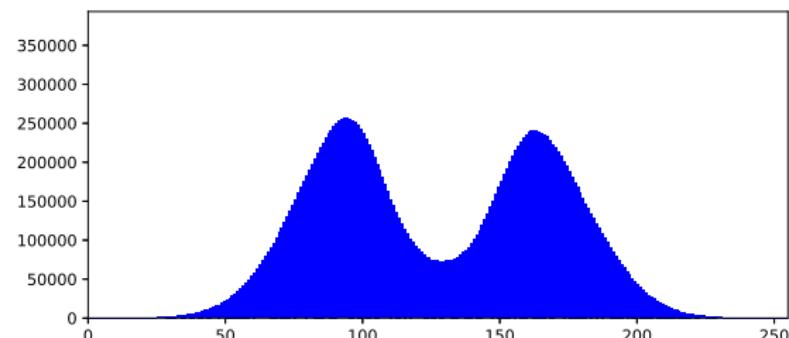
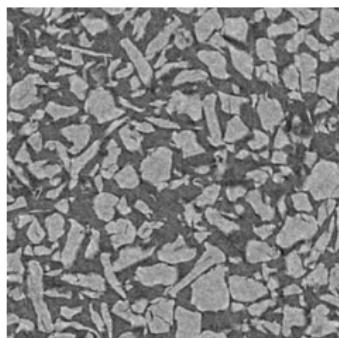
Image d'origine

De manière générale, l'image issue directement de la reconstruction de tomographie présente :

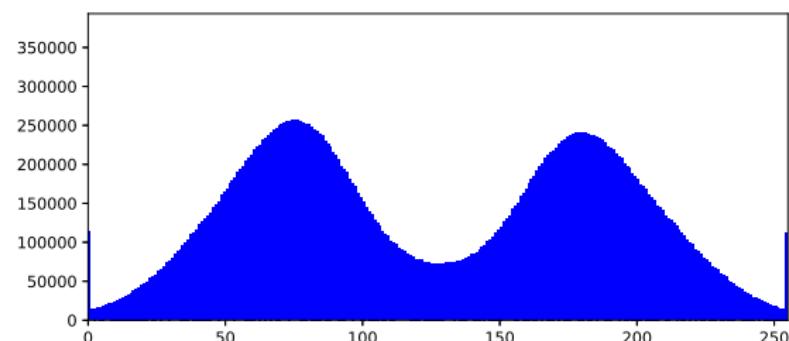
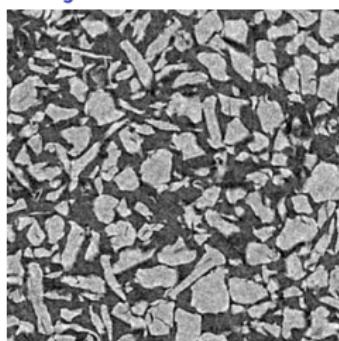
- un signal bruité (détecteur, expérience, méthode d'acquisition, ...)
- des artefacts liés à la reconstruction ("ring")



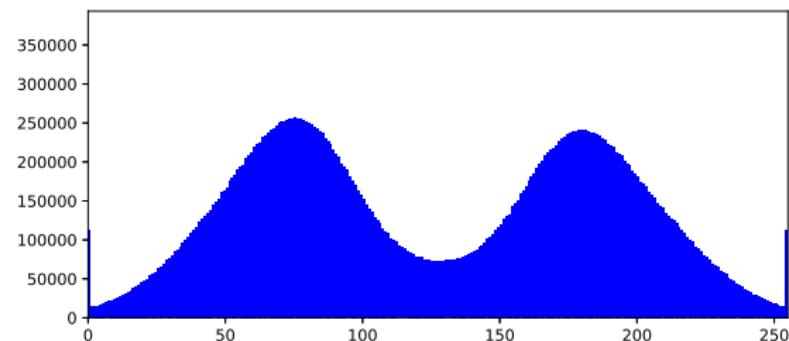
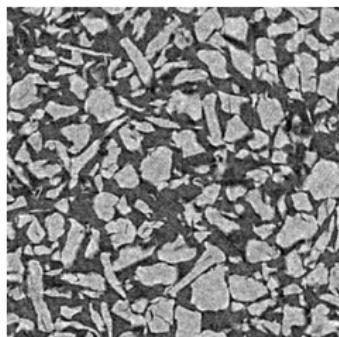
Amélioration des images issues de tomographie



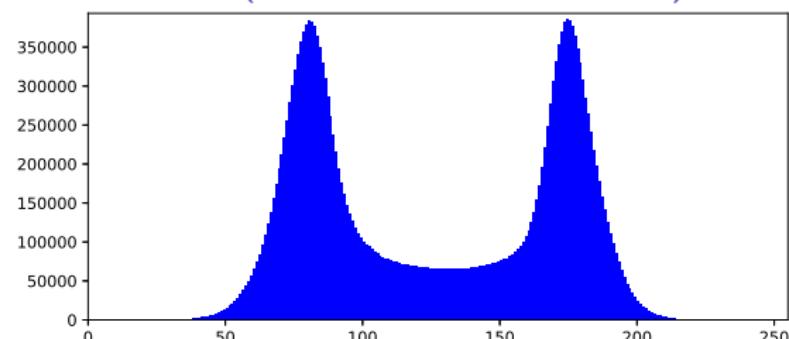
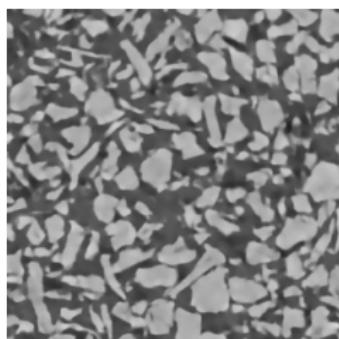
Réajustement du contraste



Amélioration des images issues de tomographie



Flou avec conservation des bordures (bilatéral + variation totale)



Amélioration des images issues de tomographie

Image d'origine

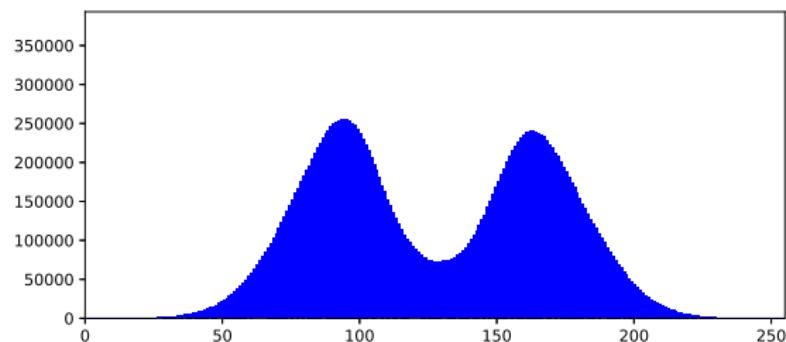
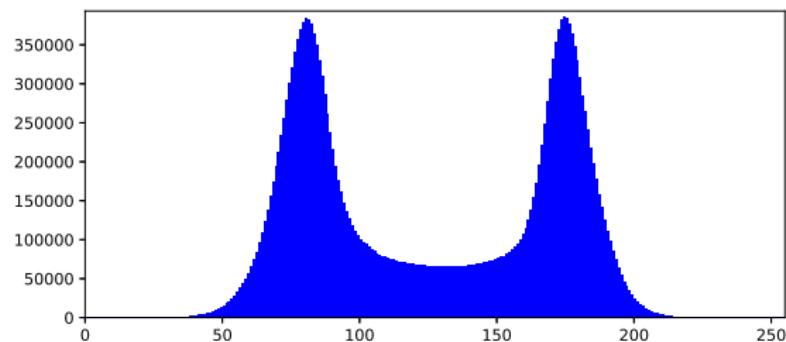


Image améliorée



Segmentation - objectif

C'est quoi ?

La séparation et l'identification des particules.

Comment ?

En attribuant à chaque voxel un label qui dépend de la particule considérée.

Pourquoi ?

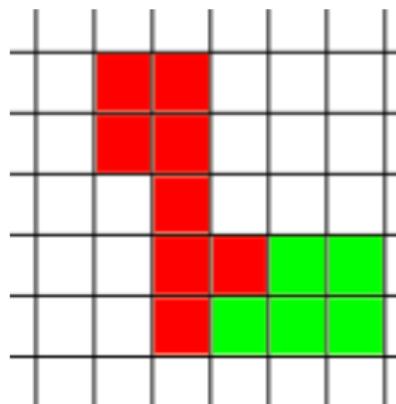
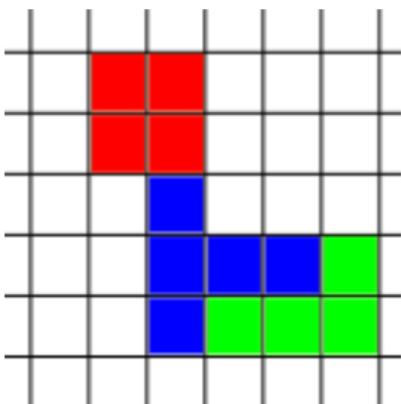
Sélectionner des particules et les analyser et/ou les extraire.

Quelques difficultés

- | | |
|---------------------|---|
| → Contacts | → Les grains n'ont pas une forme régulière et convexe |
| → Faible résolution | → Les grains peuvent avoir des porosités internes |
| → Diffusion | → Le milieu peut être très polydisperse |
| ... | |

Segmentation - Problématique

Trouver le nombre correct de particules et les frontières réelles



Problématique qui se généralise à 3 dimensions !

Segmentation - Quelques fonctions de base

Seuillage automatique

Le seuillage automatique permet d'identifier différentes phases dans une image à partir des intensités de voxels en niveaux de gris et du type de signal (histogramme).

Dans le cas d'une image représentant deux phases, deux méthodes sont réputées :

- La méthode d'Otsu¹ donne une valeur de seuillage S_O
- La méthode de Kittler² donne une valeur de seuillage S_K

Les deux méthodes fonctionnent correctement mais ne s'accordent pas sur la valeur du seuillage ($S_O \neq S_K$).

Une moyenne pondérée entre les deux méthodes est réalisée :

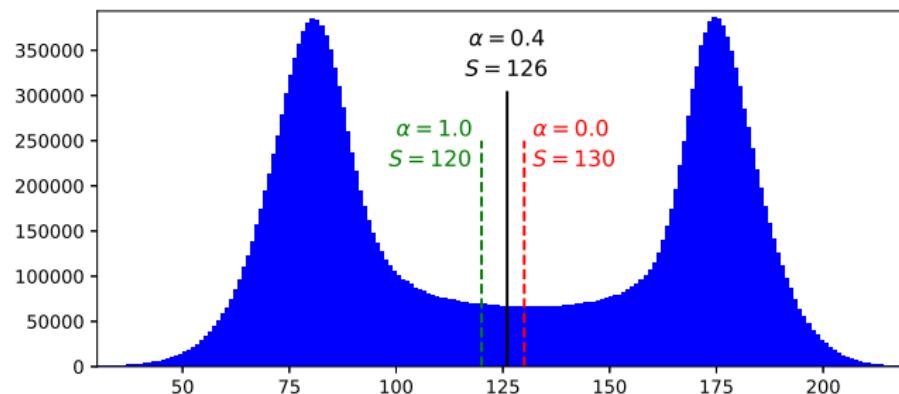
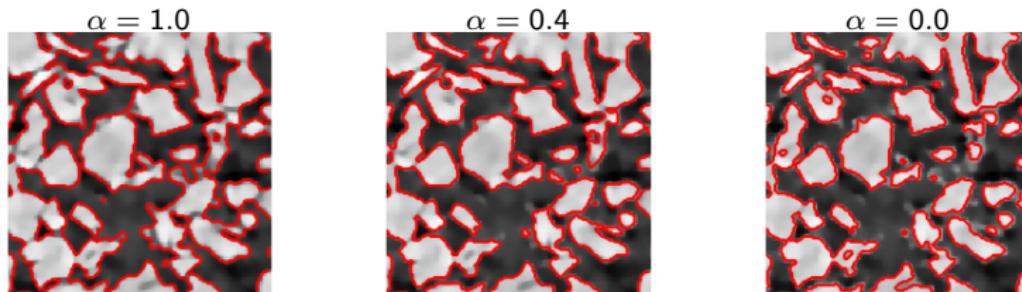
$$S = \alpha \times S_O + (1 - \alpha) \times S_K$$

1. N. Otsu, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 1979

2. J. Kittler et J. Illingworth, *Pattern Recognition*, 19, 1986

Segmentation - Quelques fonctions de base

Seuillage automatique



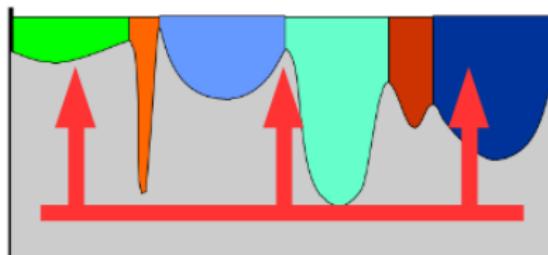
Segmentation - Quelques fonctions de base

Propagation des marqueurs - Watershed

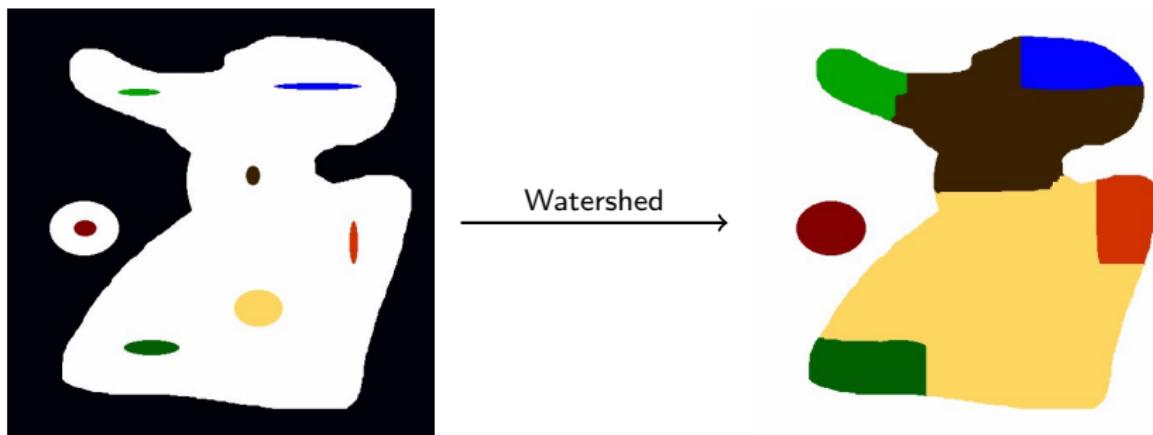
Image \Leftrightarrow Carte topographique

Propagation des marqueurs \Leftrightarrow Élévation des eaux

- Un marqueur = un nombre = un minimum = un lac
- Propagation des marqueurs qui dépend du voisinage = crue qui dépend de l'altitude
- Les marqueurs se propageant ne peuvent pas atteindre une valeur seuil = haut plateau
- Quand deux marqueurs se rencontrent, il y a toujours deux marqueurs = création de digues artificielles



Segmentation - Maxima locaux et Watershed



Avantages

- Les plus petites particules ne sont pas oubliées ;
- Capacité de trouver des particules avec de grandes zones de contact.

Inconvénient

- Nombre de particules surestimé.

Segmentation - Correction des contacts

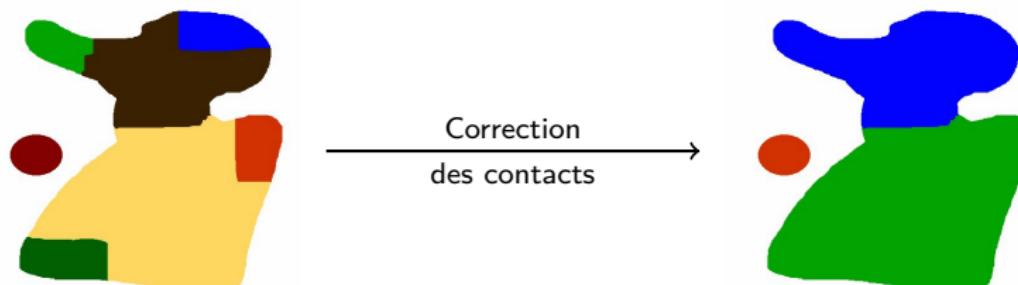
Détection et analyse de chaque paire de contact

Pour une paire de contact entre les labels A et B , on définit :

- N_A (resp. N_B) le nombre de voxels caractérisant la surface du grain A (resp. B) ;
- $N_C(A, B)$ le nombre de voxels caractérisant la surface de contact entre les deux particules.

Une condition est utilisée pour déterminer la nature du contact et corriger la segmentation :

$$\text{Si } \frac{N_C(A, B)}{\min(N_A, N_B)} > S_C \text{ alors } A = B$$

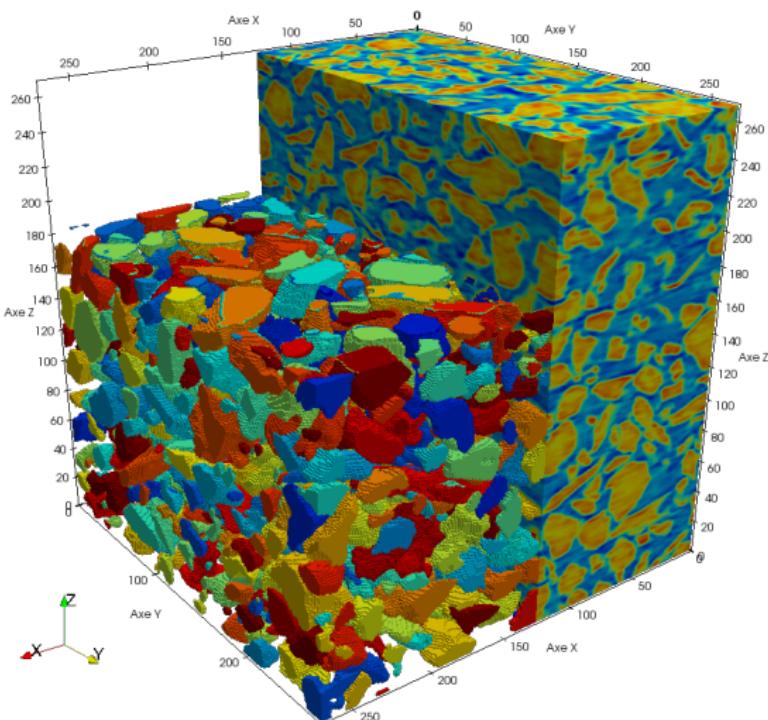


Segmentation - Résultats sur les images de tomographie

Le choix des paramètres de segmentation est qualitatif et se base sur la comparaison visuelle de l'image segmentée avec celle issue de la tomographie.



Segmentation - Résultats sur les images de tomographie

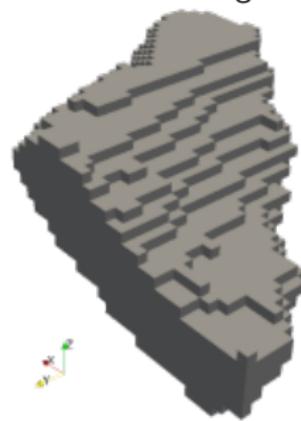


Utilisation du mailleur iso2mesh (Matlab/Octave)

Le mailleur *iso2mesh*¹ basé sur un langage de programmation Matlab/Octave permet de générer des maillages surfaciques ou volumiques à partir d'images 3D.

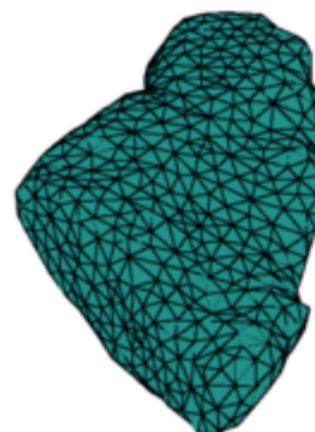
Entrée

Image 3D améliorée
en niveaux de gris



Sortie

Maillage volumique
constitué de tétraèdres

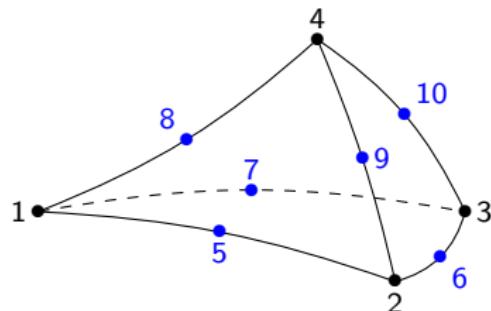
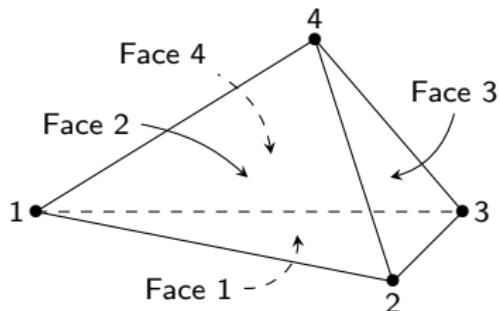


Processus de maillage

Génération du maillage dans *iso2mesh* :

- Création, réparation, nettoyage et simplification d'un maillage surfacique ;
- Génération d'un maillage volumique à partir du maillage surfacique ;
- Enregistrement de la liste des nœuds et table de connectivité.

Création d'éléments quadratiques



Modification du volume des grains maillés

Objectifs :

- Éviter les changements de volume liés aux phases de segmentation et de maillage ;
- lorsque les grains sont introduits dans une simulation, permettre une densité apparente du milieu la plus proche possible de celle mesurée dans l'échantillon réel.

Modification du volume des grains maillés

Objectifs :

- Éviter les changements de volume liés aux phases de segmentation et de maillage ;
- lorsque les grains sont introduits dans une simulation, permettre une densité apparente du milieu la plus proche possible de celle mesurée dans l'échantillon réel.

Effet de la génération du maillage - Échelle du grain

Le volume de chaque grain segmenté est calculé puis comparé au volume du même grain maillé. Si l'écart relatif entre les deux volume est supérieur à 0.1 % alors une homothétie est réalisé sur le grain maillé afin de respecter la tolérance.

Modification du volume des grains maillés

Objectifs :

- Éviter les changements de volume liés aux phases de segmentation et de maillage ;
- lorsque les grains sont introduits dans une simulation, permettre une densité apparente du milieu la plus proche possible de celle mesurée dans l'échantillon réel.

Effet de la génération du maillage - Échelle du grain

Le volume de chaque grain segmenté est calculé puis comparé au volume du même grain maillé. Si l'écart relatif entre les deux volume est supérieur à 0.1 % alors une homothétie est réalisé sur le grain maillé afin de respecter la tolérance.

Effet de la segmentation - Échelle de l'ensemble de grains

Le volume de l'ensemble des grains seuillés constituant le milieu est calculé puis comparé au volume du même ensemble de grains maillés. Si l'écart relatif entre les deux volume est supérieur à 0.1 % alors une homothétie est réalisé sur l'ensemble des grains maillés afin de respecter la tolérance.

Sommaire

Présentation du projet de thèse

Travaux antérieurs

Objectif des travaux de thèse

Méthodes

Travaux expérimentaux

Compression triaxiale

Tomographie

Corrélation d'images 3D

Traitement numérique de l'imagerie 3D

Retouche des images 3D

Processus de segmentation

Génération d'un maillage

Simulations numériques

Conditions initiales

Comportement mécanique mésoscopique

Comparaison de la cinématique

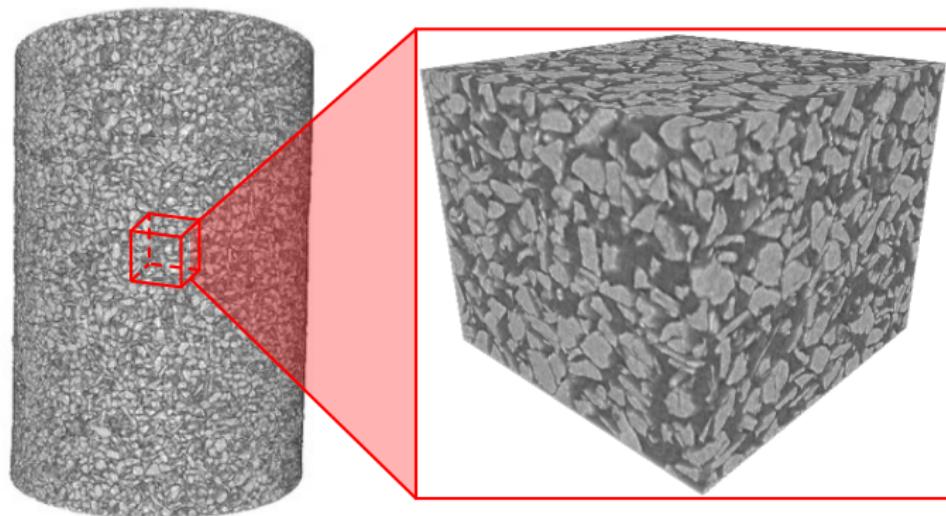
Propriétés mécaniques du matériau constitutif des grains

Conclusions et perspectives

Mise en place de l'échantillon numérique

Volume mésoscopique

L'ensemble des simulations est mené sur un volume parallélépipédique qui correspond à un sous-volume de l'image 3D de l'échantillon réel obtenu par tomographie à rayon-X.



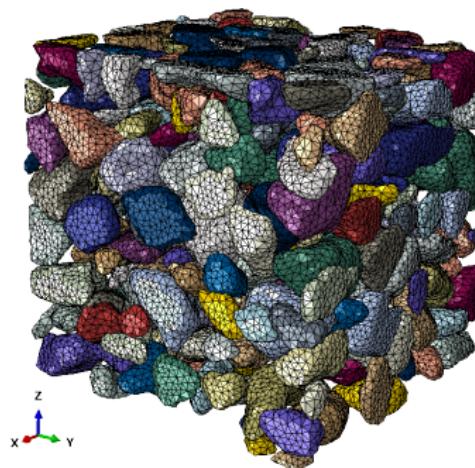
Mise en place de l'échantillon numérique

Lors de la segmentation

- Enregistrement des positions des boîtes qui englobe chacun des grains segmentés.

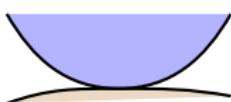
Dans Abaqus

- Insertion des grains maillés aux positions enregistrées lors de la phase de segmentation.

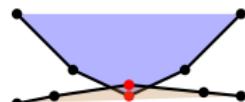


Correction des contacts initiaux

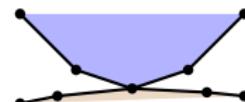
Lors de la numérisation et du maillage de chacun des grains, de légers changements de géométrie peuvent intervenir. Lorsque les grains sont positionnés dans le volume mésoscopique de la simulation, des interpénétrations peuvent apparaître avant le commencement de la simulation.



Grains dans
l'échantillon



Grains maillés
insérés sans correc-
tion des contacts



Grains maillés
insérés avec correc-
tion des contacts

Définition du matériau constitutif des grains

Loi de comportement élastoplastique avec écrouissage isotrope

Propriétés matériau considérées pour le polystyrène¹ :

- Masse volumique : 1.05 g/cm³
- Module de Young : 2.9 GPa
- Coefficient de Poisson : 0.38
- Limite élastique : 45 MPa
- Module d'écrouissage : 8.35 MPa

Gestion des contacts inter-granulaires

- Coefficient de friction PS-PS^{1, 2} : 0.5
- Contacts rigides
- Pas de cohésion des contacts

1. Wypych, *Handbook of Polymers*, 2016.

2. Matweb, Engineering ToolBox

Conditions aux frontières

Définition d'une zone de pilotage des grains

La zone de pilotage des grains correspond à une bordure sur le volume mésoscopique permettant de définir les grains qui seront pilotés en déplacement. Tous les grains qui sont présents au moins en partie dans cette zone verront un déplacement imposé.

Schématisation d'un volume mésoscopique avec une coupe sur la hauteur

Conditions aux frontières

Création des nœuds de référence

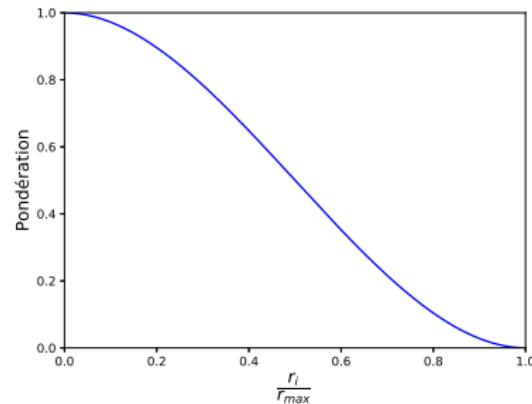
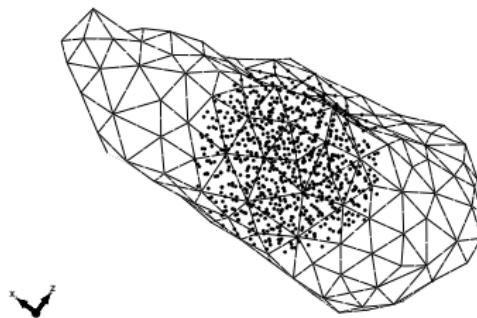
Pour chacun des grains pilotés, un nœud de référence est créé au centre de masse.
C'est le nœud de référence qui sera piloté en déplacement.

Conditions aux frontières

Couplage distributif des nœuds de référence

Pour chacun des grains pilotés en déplacement :

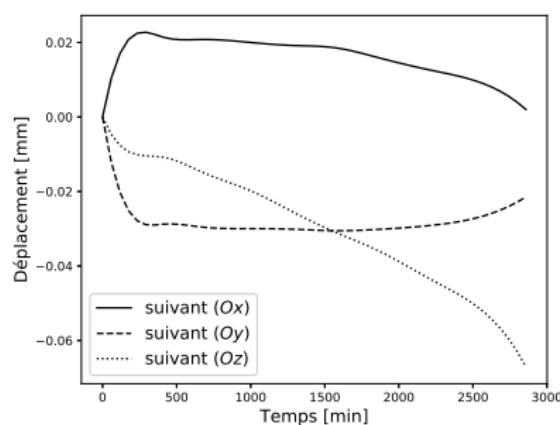
- Une zone d'influence est définie : sphère centrée au nœud de référence ($R = 50 \mu\text{m}$) ;
- Chaque nœud du maillage se trouvant dans la zone d'influence est couplé au nœud de référence associé : l'ensemble des efforts subis par le nœud de référence est distribué aux nœuds concernés ;
- Le couplage suit un profil de distribution cubique, qui détermine la poids de chaque couplage en fonction de la distance des nœuds au centre de masse.



Conditions aux frontières

Pilotage en déplacement des nœuds de référence

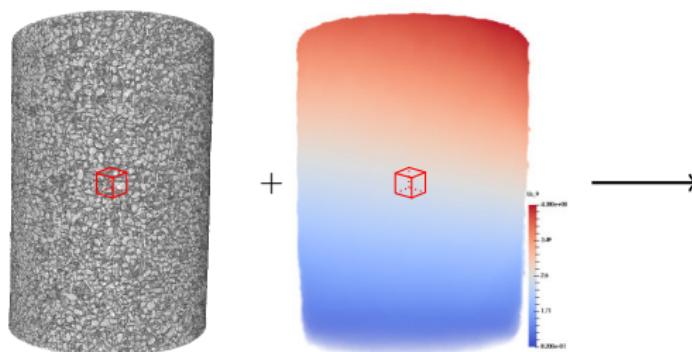
Pour chacun des nœuds de référence la position du nœud est retrouvée dans chacun des champs de déplacement issus de la corrélation d'image. Pour cela, une interpolation 3D linéaire est réalisée. L'ensemble des positions du nœud au cours de l'expérience réelle détermine son déplacement au cours du temps.



Campagnes de simulations

Campagnes de simulation

L'ensemble des étapes numériques présentées jusqu'ici sont automatisées et l'utilisation d'un unique script permet de mener des simulations sur plusieurs sous-volumes de l'échantillon réel.



Enregistrement

- Champ de déplacement de chaque noeuds ;
- Forces de contact pour chaque paire de contact ;
- Position et déplacement de centres de masse de chaque grain.

Déformation moyenne du volume mésoscopique

À partir de la connaissance de :

- La position de chacun des centres de masse ;
- Le déplacement de chacun des centres de masse.

Comment ?

Le tenseur gradient des déplacements est approximé par une méthode des moindres carrés. La définition du tenseur de Green-Lagrange est ensuite utilisée.

$$\underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} (\underline{\underline{H}} + \underline{\underline{H}}^T + \underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{H}})$$

Avec,

$$\forall i, j = 1, 2, 3 \quad H_{ij} = \underline{\underline{B}} \cdot \underline{\underline{A}}^{-1}$$

et,

$$A_{ij} = \sum_{\text{grains}} x_i x_j \quad \text{et} \quad B_{ij} = \sum_{\text{grains}} u_i x_j$$

- x : position du centre de masse
- u : déplacement du centre de masse

Contrainte moyenne du volume mésoscopique

À partir de la connaissance de :

- La force de contact de chacune des paires de contact ;
- La position d'un point de référence dans chacun des grains en contact.

Comment ?

En reprenant les travaux de Love¹ et Weber², il est possible de déterminer un tenseur des contraintes moyennes :

$$\overline{\sigma_{ij}} = \frac{1}{V} \sum_{\text{contacts}} f_i I_j$$

- V : volume mésoscopique ($= V_0 \times \det(\underline{F})$)
- f : force de contact
- I : vecteur reliant les deux points de référence des grains en contact.

1. Love, *A Treatise of Mathematical Theory of Elasticity*, 1927

2. Weber, *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, 1966

Domaine de validité des conditions aux limites

Déformations analysées

- Déformation axiale $\varepsilon_a = E_{33}$;
- Déformation déviatoire
- $$\varepsilon_d = \sqrt{\frac{2}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}_d^2)};$$
- Déformation volumique ε_v .

Comparaison

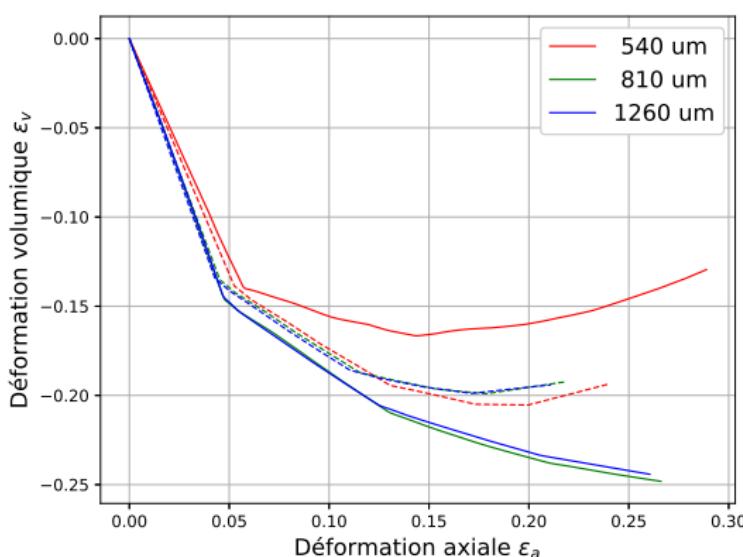
- Le volume mésoscopique simulé ;
- Les données de la corrélation d'images 3D sur le même volume mésoscopique (même méthode de calcul).

Analyse de sensibilité

- Taille du sous-volume étudié (540 - 1260 μm / 87 - 829 grains) [990 μm par défaut] ;
- Pression de confinement (1, 2 et 7 MPa) [2 MPa par défaut] ;
- Taille de la zone de pilotage des grains (45 - 225 μm) [63 μm par défaut].

Taille du volume mésoscopique

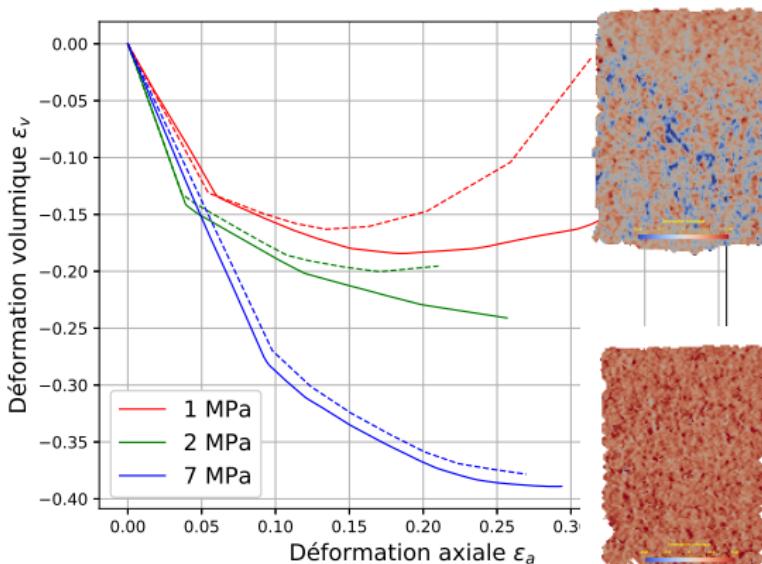
Résultats qui convergent vers des valeurs cohérentes pour des volumes suffisamment grands : 5 à 6 fois la taille moyenne d'un grain / volume constitué d'approximativement 250 grains.



Traits continus : simulation / Traits pointillés : corrélation.

Pression de confinement

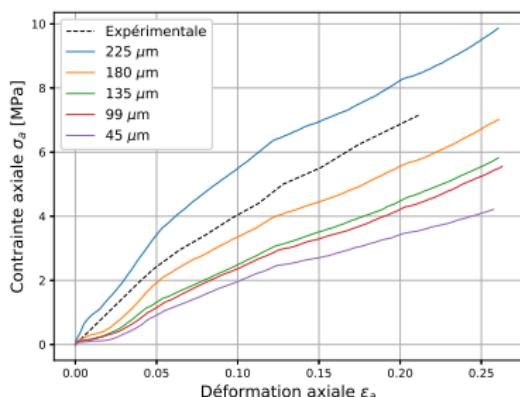
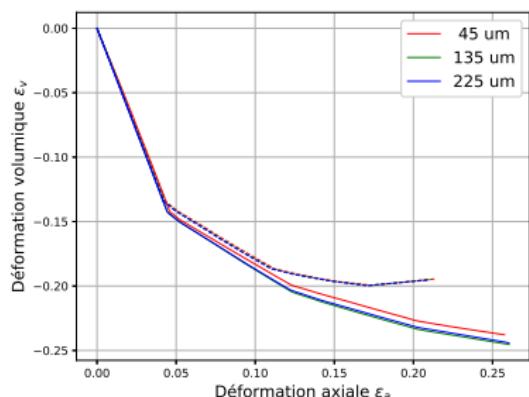
Sensibilité à l'effet de dilatance (observée sur la fin de l'essai à 1 MPa)



Traits continus : simulation / Traits pointillés : corrélation.

Taille de la zone de pilotage

Aucune sensibilité des conditions aux limites à la taille de la zone de pilotage.
L'augmentation de la zone de pilotage des grains engendre des sur-contraintes dans l'échantillon numérique.



Traits continus : simulation / Traits pointillés : corrélation.

Analyse des effets matériau

Volume mésoscopique étudié

- Taille du volume : 900 μm - 6 grains/arête ;
- Pression de confinement : 2 MPa ;
- Taille de la zone de pilotage des grains : 63 μm .

Propriétés matériau étudiées

- Module de Young : 0.9, 2.9 et 4.9 GPa.
- Limite élastique : 30, 45, 60 et 75 GPa.
- Coefficient de frottement : 0.1, 0.3, 0.5 et 0.7 GPa.
- Écrouissage : 0 à 25 MPa (**Sans effet**).

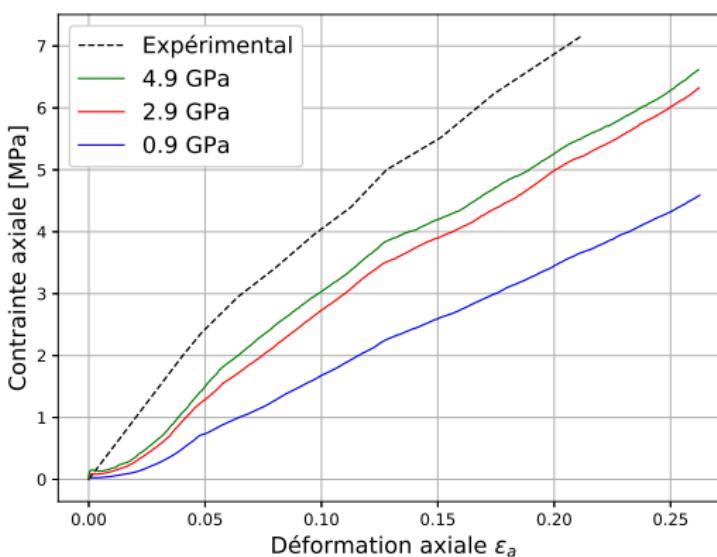
Courbes de comportement

- Contrainte axiale $\sigma_a = \sigma_{33}$;
- Contrainte déviatoire $q = \sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}_d^2)}$;
- Contrainte moyenne $p = \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}})/3$.

Module de Young

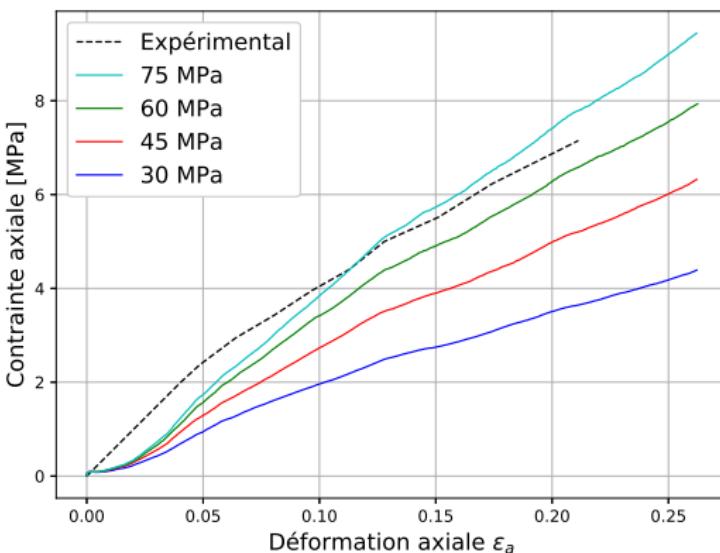
Changement de comportement significatif entre les valeurs faibles et moyennes du module de Young (relativement à la famille des polymères). Pour les plus grandes valeurs, l'écart est faible.

La valeur de 2.9 GPa semble cohérente.



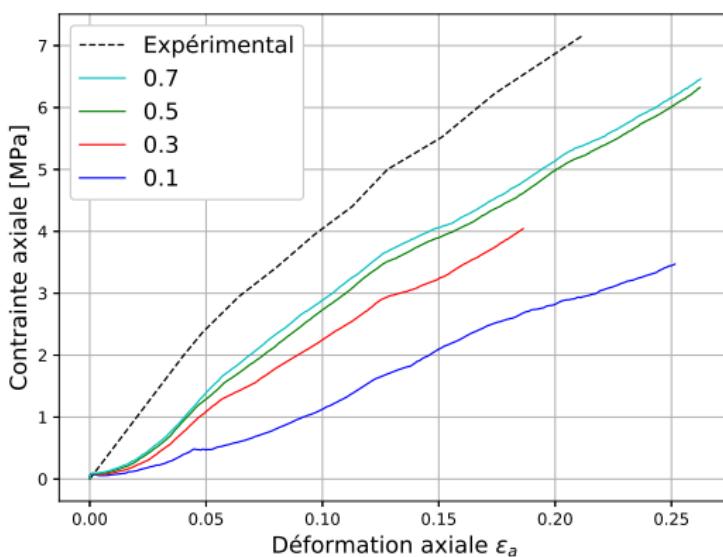
Limite élastique

Réponse mécanique du milieu quasi-proportionnelle à la limite élastique.
Une valeur de 60 MPa semble plus appropriée que celle obtenue sur des essais de traction.



Coefficient de frottement

Changement de comportement significatif entre les valeurs faibles et moyennes du coefficient de friction. Pour les plus grandes valeurs, l'écart est faible.
Une valeur de 0.5 semble cohérente.



Sommaire

Présentation du projet de thèse

Travaux antérieurs

Objectif des travaux de thèse

Méthodes

Travaux expérimentaux

Compression triaxiale

Tomographie

Corrélation d'images 3D

Traitements numériques de l'imagerie 3D

Retouche des images 3D

Processus de segmentation

Génération d'un maillage

Simulations numériques

Conditions initiales

Comportement mécanique mésoscopique

Comparaison de la cinématique

Propriétés mécaniques du matériau constitutif des grains

Conclusions et perspectives

Conclusions

La méthode développée dans ces travaux

Permet l'analyse du comportement d'un ensemble de grains en considérant :

- la déformabilité des grains ;
- des géométries complexes et réalistes de grains ;
- la loi de comportement du matériau constitutif des grains.

Pour ce faire

Des simulations numériques ont été menées grâce à l'utilisation de données expérimentales :

- Les essais de compression triaxiale de révolution ont permis d'établir le chemin de chargement subi par le milieu granulaire ;
- Grâce à la tomographie à rayon-X et au traitement d'images 3D, la microstructure a été enregistrée ;
- Grâce à la corrélation d'images, l'évolution de la microstructure a été connue ;
- La méthode des éléments finis multi-particules a permis de mener à bien des simulations sur des sous-volumes numérisés de l'échantillon réel.

Perspectives

- Considération de l'aspect visqueux des polymères ;
- Optimisation du choix de la taille de la zone de pilotage des grains ;
- Utilisation d'une méthode de corrélation discrète ;
- Considération des conditions environnantes (humidité / température).

Merci de votre attention

Corrélation de volumes - calcul de la cinématique

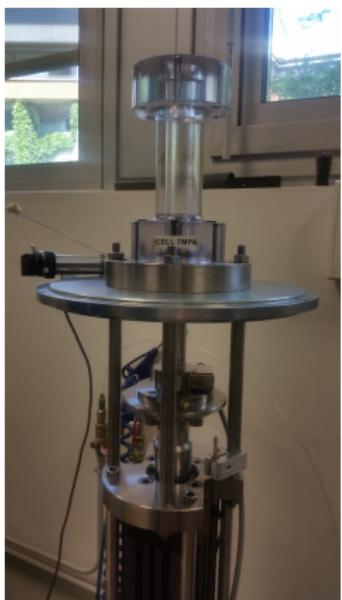
Choix du déplacement des imagettes

Pour chaque recherche d'imagette, un coefficient de corrélation normalisé CCN est calculé en fonction des positions (x, y, z) de l'imagette de référence I_1 et $(x + u, y + v, z + w)$ de l'imagette à comparer I_2 :

$$\text{CCN} = \frac{\sum_{x,y,z} I_1(x, y, z) \cdot I_2(x + u, y + v, z + w)}{\sqrt{\sum_{x,y,z} I_1(x, y, z) \cdot \sum_{x,y,z} I_2(x + u, y + v, z + w)}}$$

Le déplacement réellement considéré est celui qui maximise CCN.

Dispositif expérimental - Compression triaxiale



- Capteur de force HBM C2 de 5 kN
- Capteur de déplacement LVDT HBM WI 10 mm
- Pompe hydraulique Sanchez Technologies VPSSH 6-700 avec capteur de pression
- Membrane cylindrique en caoutchouc naturel de diamètre intérieur 10 mm, hauteur 25 mm et épaisseur 0.4 mm
- Cellule en PMMA supportant un chargement de 7 MPa

Campagne d'essais

	$P_C = 1 \text{ MPa}$	$P_C = 2 \text{ MPa}$	$P_C = 7 \text{ MPa}$
Diamètre [mm]	10.10	10.00	10.15
Hauteur [mm]	21.30	23.30	22.70
Nb projections	1440	1440	1120
Img / projections	3	3	6
Résolution [$\mu\text{m}/\text{vx}$]	9	9	9
Voltage [V]	80	80	80
Ampérage [A]	112	113	125
Dimension volume [vx·vx·vx]	1445x1445x1600	1445x1445x1600	1444x1444x1650
Aperçu			