



Séance technique Roches Tendres, Sols Indurés



Analyse microstructurale de la transition frottement - cohésion dans les sables biocimentés

F. Emeriault, C. Geindreau, A. Naillon,
M. Abbas, M. Sirkis

Jeudi 18 Mars 2021



BOREAL



Biocimentation

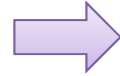
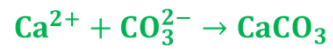
Biocimentation

Bactéries + solution calcifiante

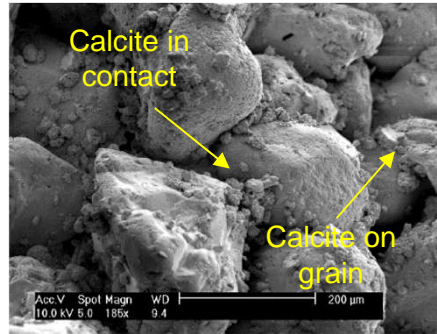
S.pasteurii + Urée + Chlorure de calcium



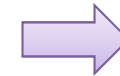
Précipitation de Calcite



Modification de la Microstructure



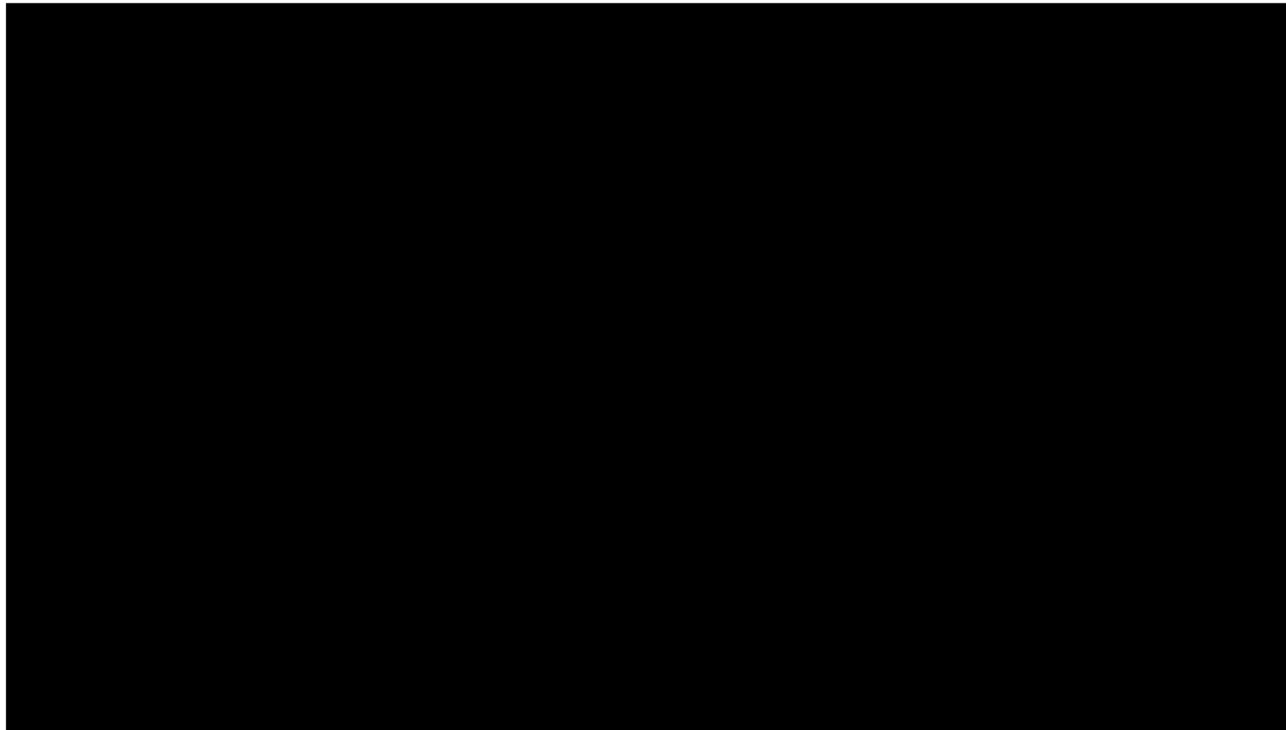
(Cheng et al, 2016)



Propriétés physiques et mécaniques

- Cohésion
- Angle de frottement
- Propriétés élastiques
- Perméabilité

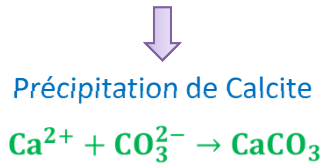
(Cheng et al, 2013, Feng et al, 2015, Dursaisamy, 2015, Al Qabany, et al 2013, Dadda et al 2017)



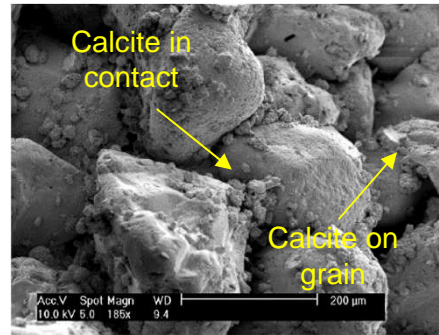
Objectifs

Biocimentation

Bacteries + solution calcifiante
S.pasteurii + Urée + Chlorure de calcium



Modification de la Microstructure



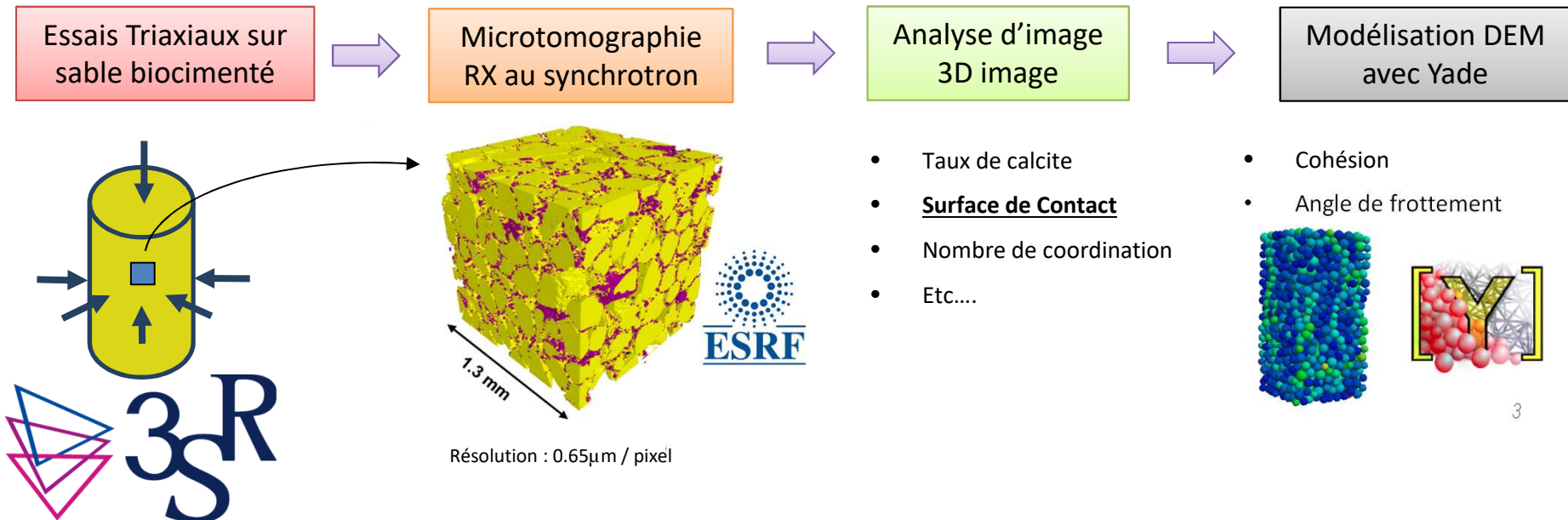
(Cheng et al, 2016)

Propriétés physiques et mécaniques

- Cohésion
- Angle de frottement
- Propriétés élastiques
- Perméabilité

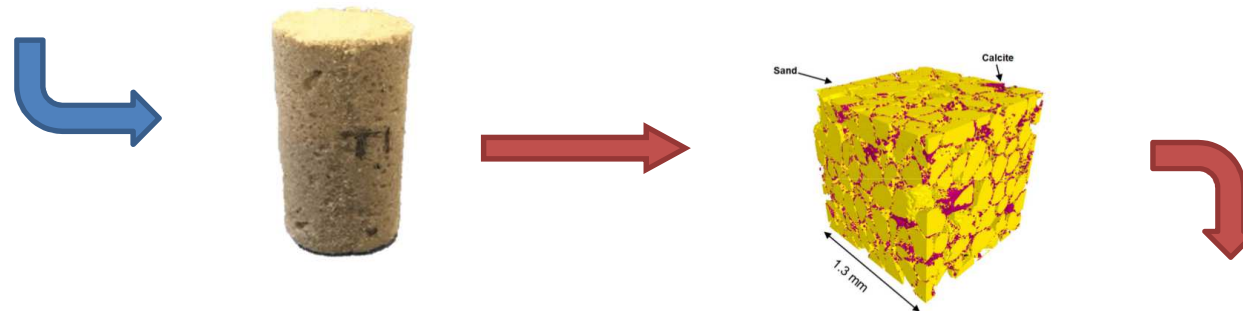
(Cheng et al, 2013, Feng et al, 2015, Dursaisamy, 2015, Al Qabany, et al 2013, Dadda et al 2017)

Modification de la Microstructure \longleftrightarrow ? \longleftrightarrow Propriétés macroscopiques



Données expérimentales

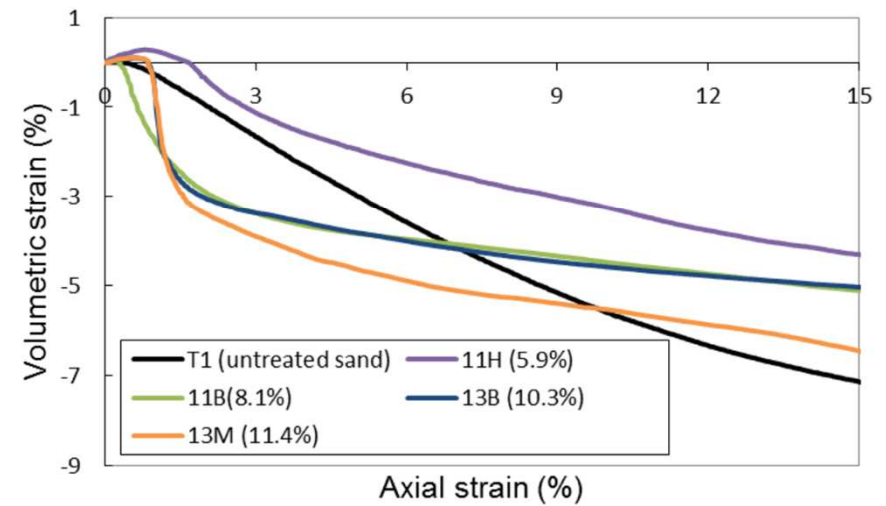
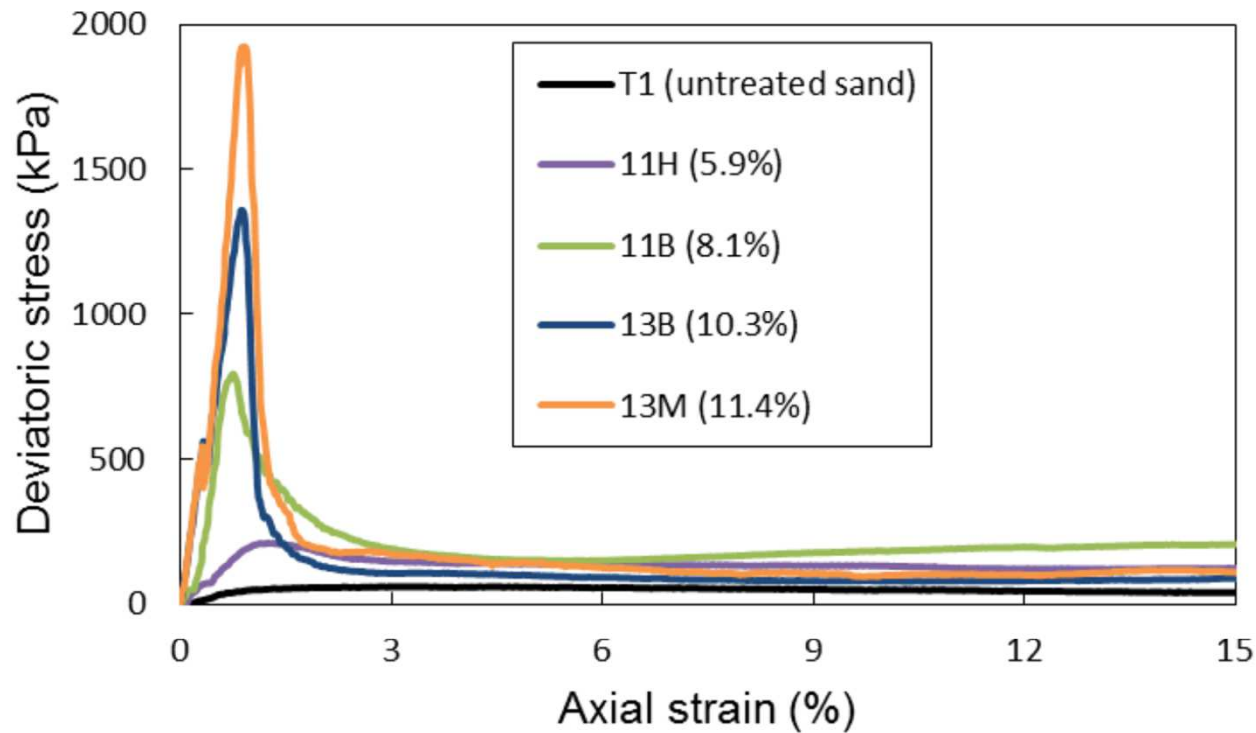
Sand	Mean Diameter D_{50} (mm)	Uniformity coefficient C_u	Minimum void ratio e_{min}	Maximum void ratio e_{max}	Weight of sand grains ρ_s (Kg/ m^3)	Shape
Fontainebleau sand (NE34)	0.21	1.5	0.549	0.886	2650	Sub-rounded



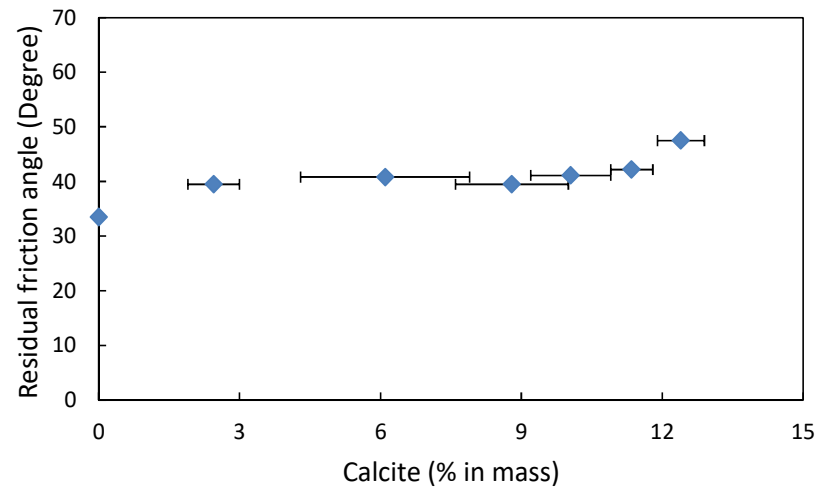
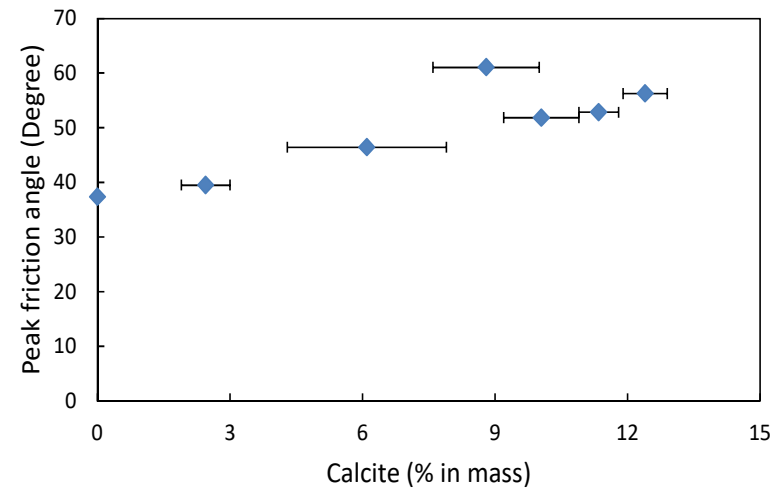
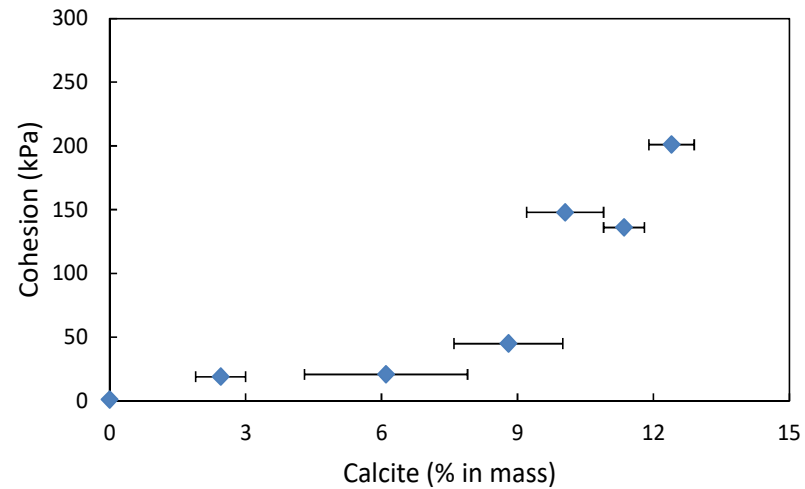
Subsample	2T	2MB	13TT	11BB	13BT	13MB
Volume fraction of calcite f_c (%)	1.9	3.2	4.7	6.2	8.8	14.9
Mass fraction of calcite m_c (%)	3	5	7	9	12.7	16.9
Initial porosity ϕ_0	40	38	38	38	37	38
Solid volume fraction f_s	0.62	0.63	0.65	0.66	0.69	0.75
Total contact surface area S_a (μm^2)	875	1236	2365	1809	2415	5053
Mean cohesive contact surface S_c (μm^2)	307	704	1248	1080	1607	3511
Mean cohesive contact radius a (μm)	9.9	15	20	18.5	22.6	33.4
Mean coordination number \bar{Z}_a	7.1	7.8	8.5	8.5	8.1	9.2



Observations expérimentales à l'échelle macroscopique

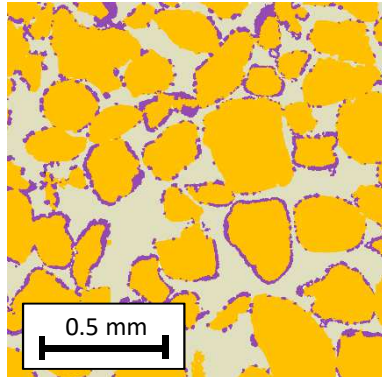


Observations expérimentales à l'échelle macroscopique



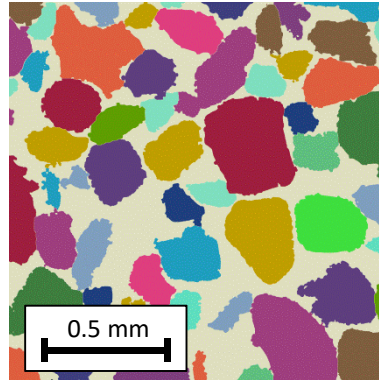
Processus d'analyse d'images 3D

3D image : identification des phases



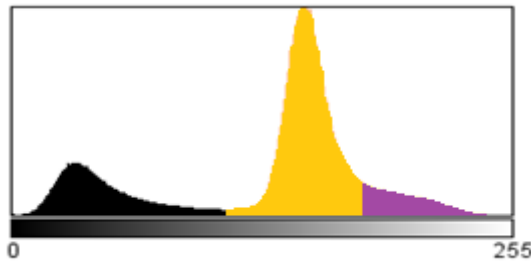
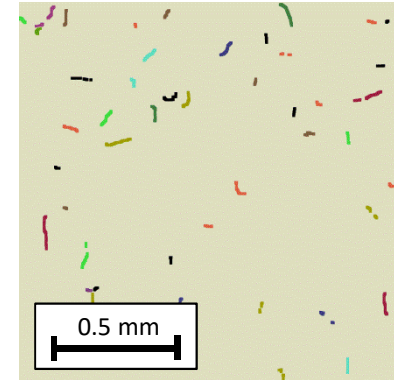
Visilog
3D watershed

Séparation des grains



Matlab
Neighbor scanning

Détermination des contacts et surfaces associées



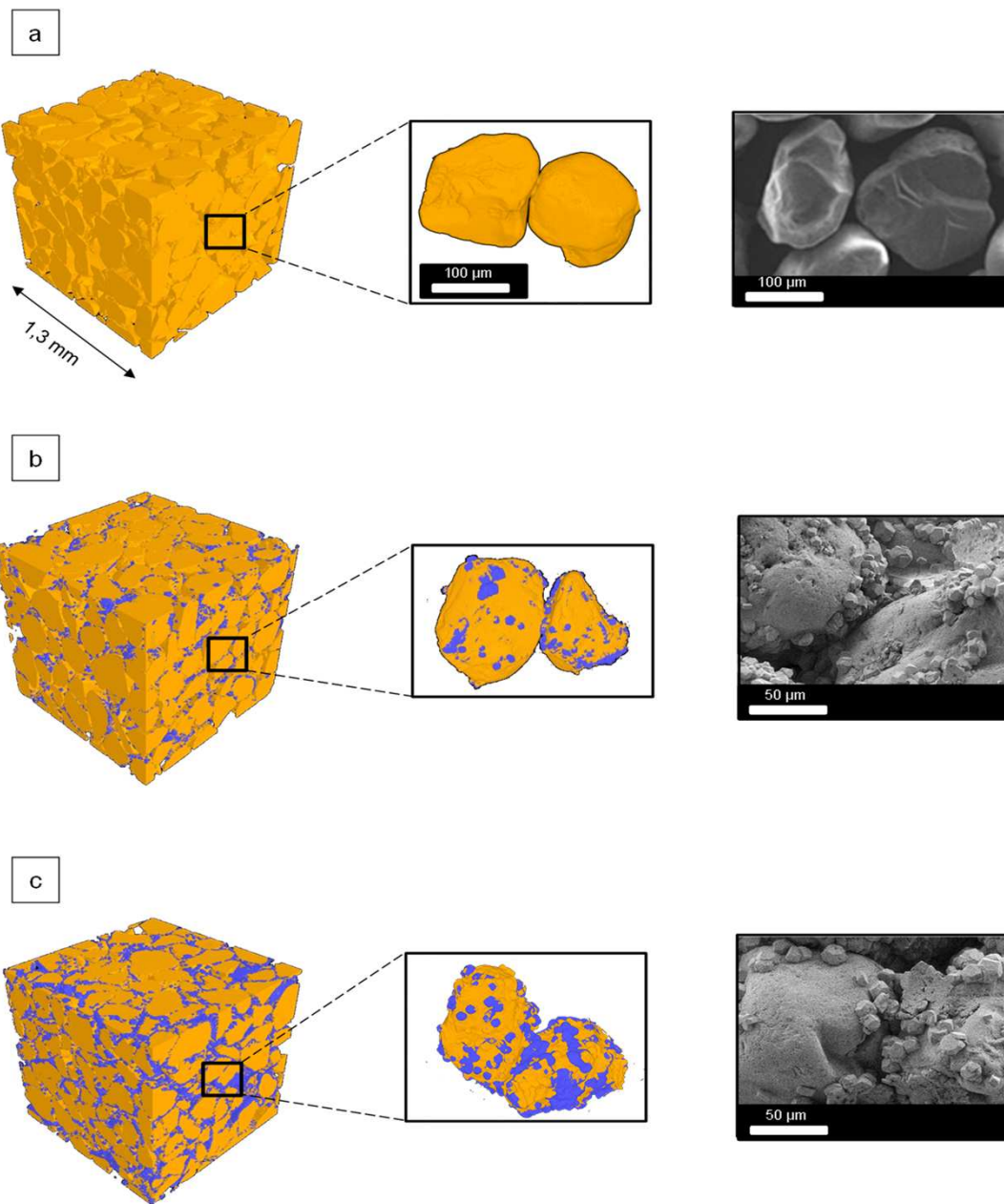
Propriétés microstructurales moyennes

- Fraction volumique de calcite
- Porosité
- Surface spécifique (totale ou calcite seulement)

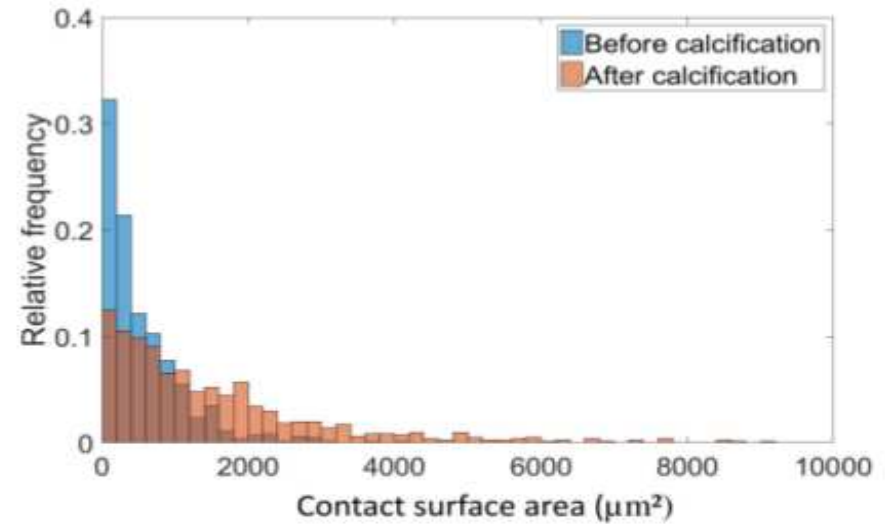
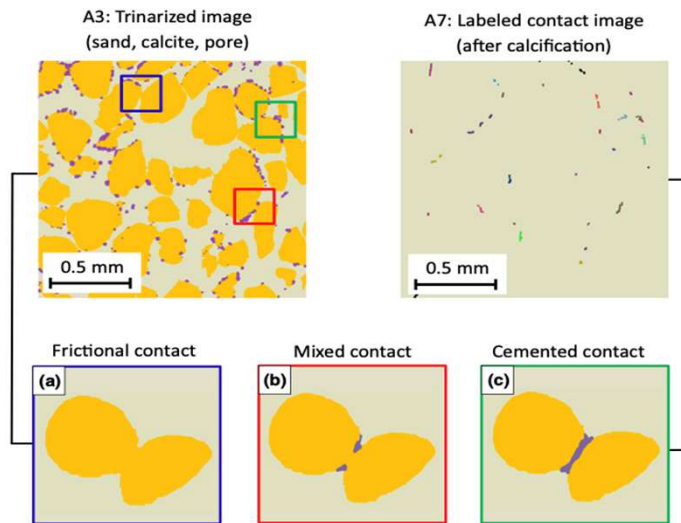
Propriétés microstructurales discrètes

- Nombre de coordination
- **Surface de contact (totale, % de calcite..)**
- **Type de contact (cohésif, pont de calcite)**
- Orientation de contact

Imagerie tomographie RX vs SEM



Propriétés de la microstructure



- Nombre et type de contacts
- N_t nombre total
- N_c nombre de contacts cimentés

Surface de contact – surface de contact cimenté

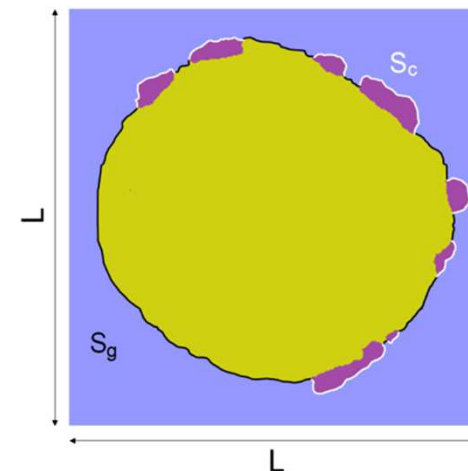
- S_c surface totale de contact cimenté
- S_b surface totale de contact avant traitement

Surface spécifique totale

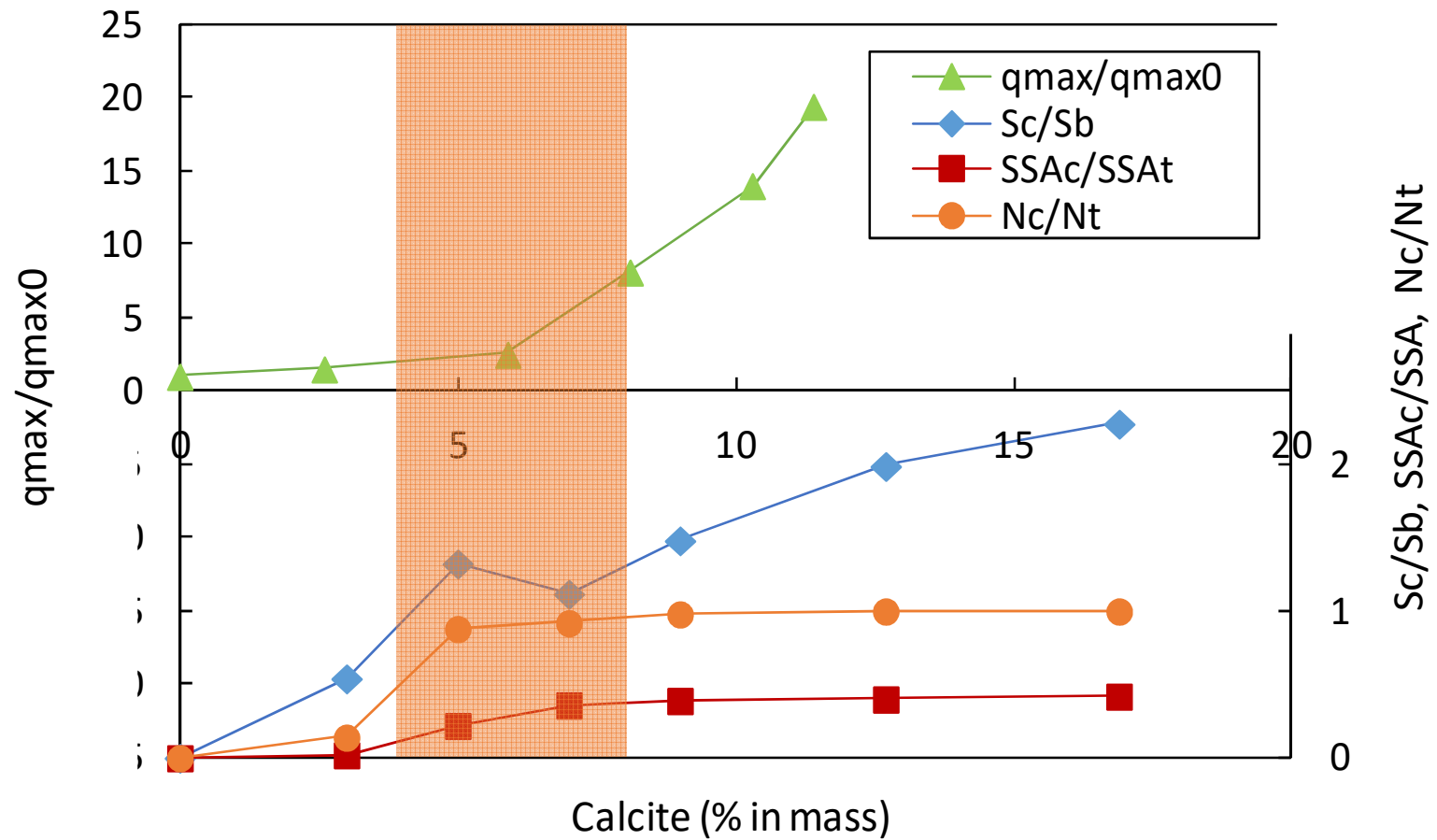
$$(S_g + S_c)/V$$

Surface spécifique de calcite

$$S_c/V$$

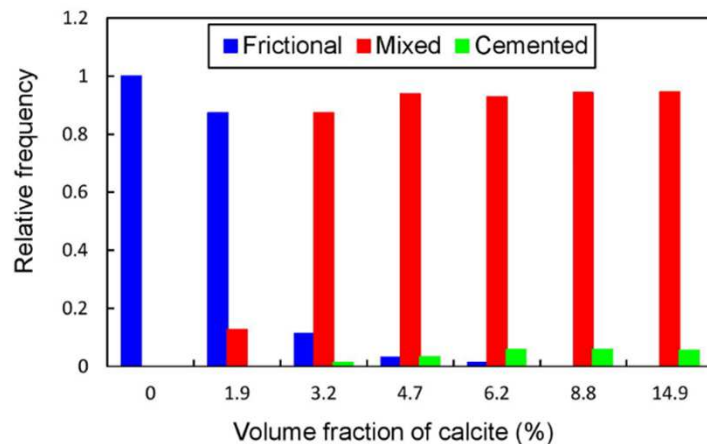


Lien entre propriétés de la microstructure et résistance mécanique

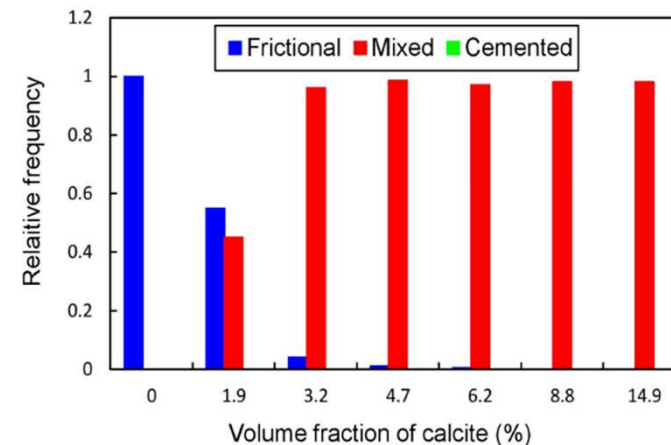


Distribution des types de contact

- Pour les **fractions de calcite moyennes et élevées**, tous les contacts sont cohésifs:
 - contacts initialement existants
 - contacts créés par le processus de biocalcification
- Pour les **fractions de calcite faibles**, une partie seulement des contacts sont calcifiés (les autres restent frottant) mais ils représentent environ 50% de la surface de contact.



Nombre de contacts

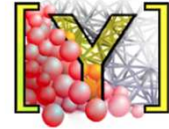


Surface de contact



Modélisation numérique DEM – Loi de contact

Loi de contact cohésive définie dans Yade (Bourrier et al. 2013)

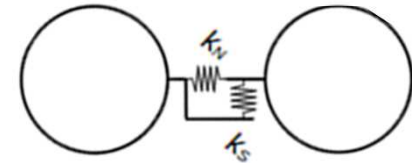


Rigidités de contact élastiques linéaires:

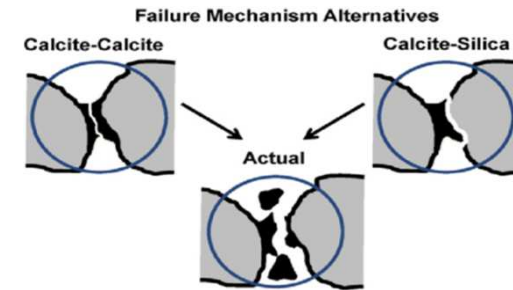
- K_n rigidité normale
- K_s rigidité tangentielle ou en cisaillement
- E module d'Young
- D diameter de la particule
- ν rapport de rigidité

$$K_n = \frac{E_1 D_1 E_2 D_2}{E_1 D_1 + E_2 D_2}$$

$$K_s = \nu K_n$$



Résistance du contact définie par le critère classique de Mohr-Coulomb



DeJong et al., 2010

Adhésion normale $f_n = a_n = S_c \sigma_{ten}$

- S_c surface de contact cohésive d'un lien cimenté
- σ_{ten} résistance en traction, ici $\sigma_{ten} = 2.75$ MPa

Adhésion tangentielle $a_s = \frac{S_\tau}{S_n} a_n$

- Les paramètres de rigidité normale et en cisaillement S_n et S_τ sont calculées avec les équations de Dvorkin and Nur (1996).

Cohésion normale

$$C_n = \frac{S_c \sigma_{ten}}{\min(R_1, R_2)^2}$$

Cohésion en cisaillement

$$C_s = \frac{S_\tau}{S_n} C_n = 2.4 C_n$$

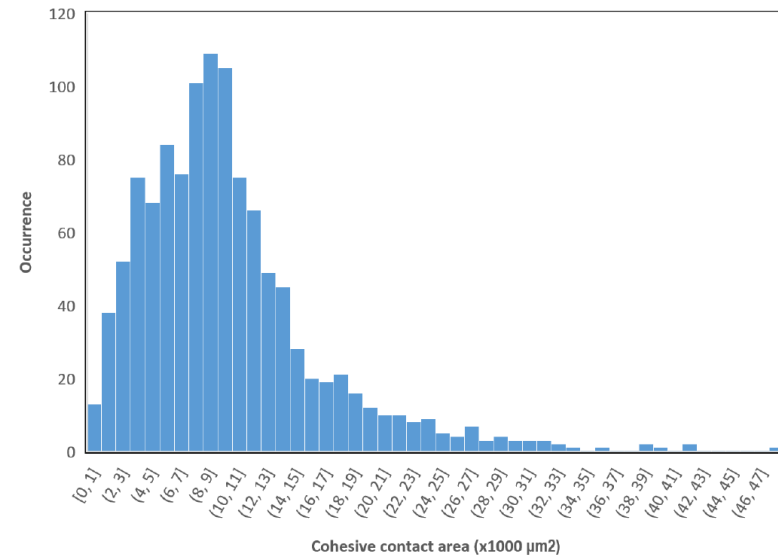


Subsample	$a(\mu m)$	S_n	S_τ	S_τ/S_n
2T	19.33	0.046	0.112	2.43
13TT	34.81	0.080	0.193	2.41
13MB	52.34	0.118	0.277	2.35
Average				2.40

Prise en compte de la distribution des surfaces de contact cohésives

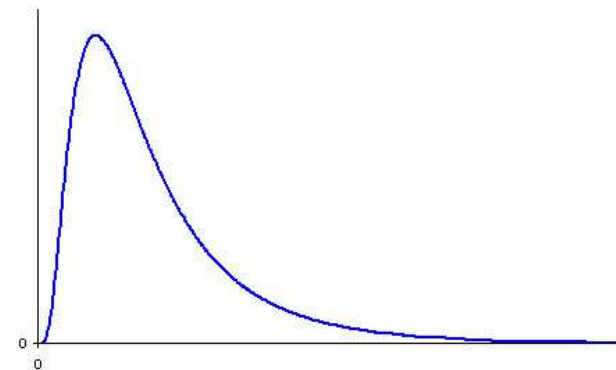
La distribution des **surfaces de contact cohésives** est obtenue en soustrayant à chaque surface de contact **après traitement** la surface de contact **avant traitement**.

La surface de contact cohésive moyenne $\overline{S_c}$ et l'écart-type correspondant σ_{std} sont déterminés pour chaque échantillon.



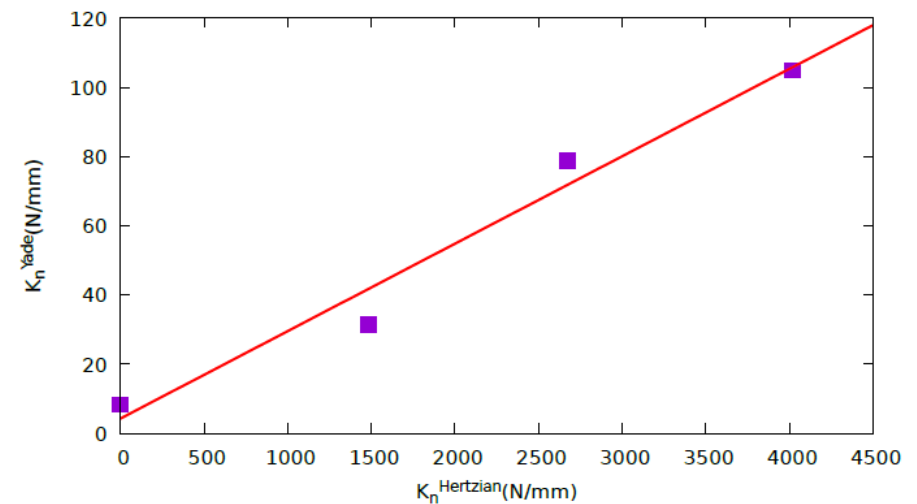
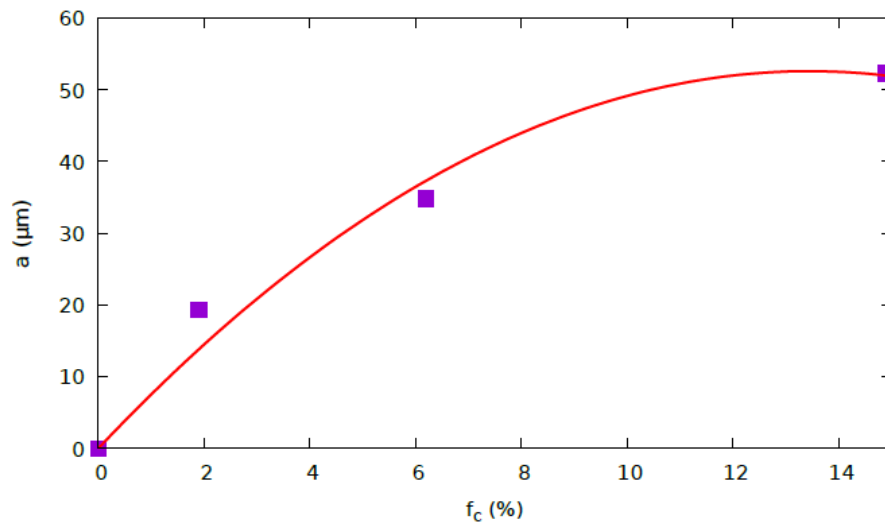
Ces informations sont utilisées pour construire une distribution log-normale équivalente.

Des valeurs prises aléatoirement dans cette distribution sont affectées aux contacts entre grains dans les simulations numériques.



Rigidité de contact

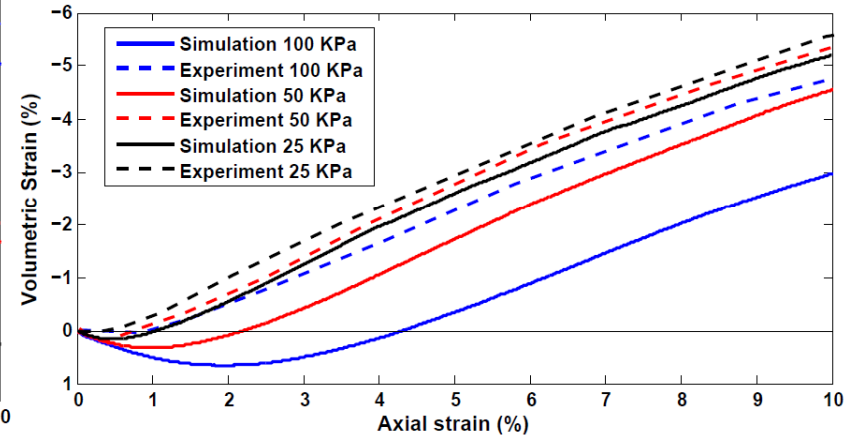
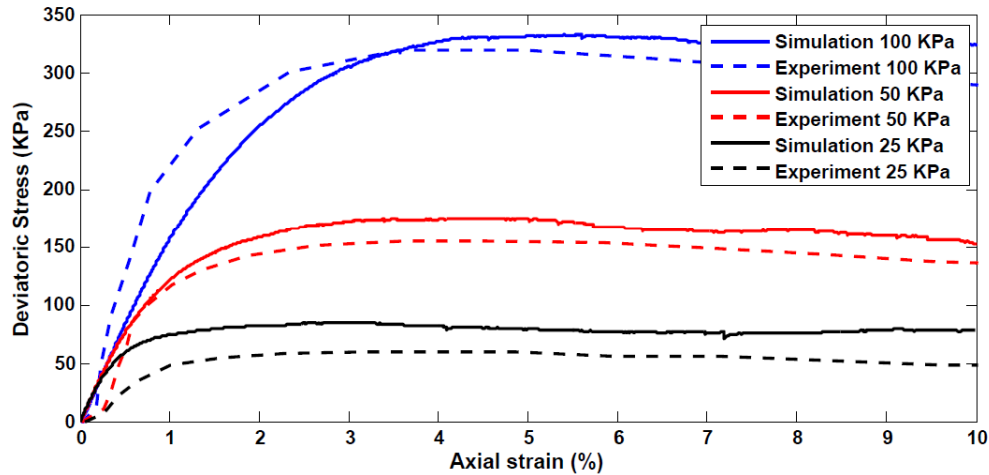
- La rigidité normale du contact K_n dépend de la quantité de calcite précipitée au niveau du contact.
- Selon une approche de contact de Hertz, la rigidité est proportionnelle au rayon du contact a
- Ce rayon est identifié à partir des images 3D en relation avec le taux de calcite.



- La valeur de E considérée dans les calculs Yade se base sur la relation entre K_n et $a = \text{fonction de } f_c$

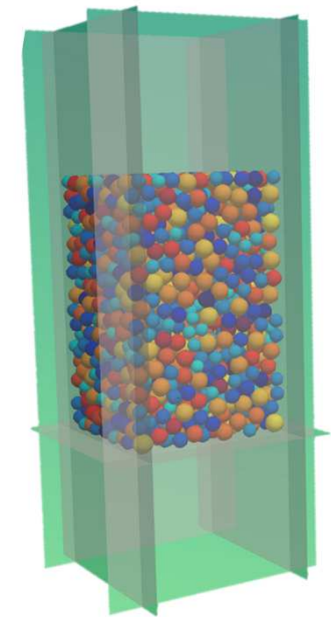


Sable non traité

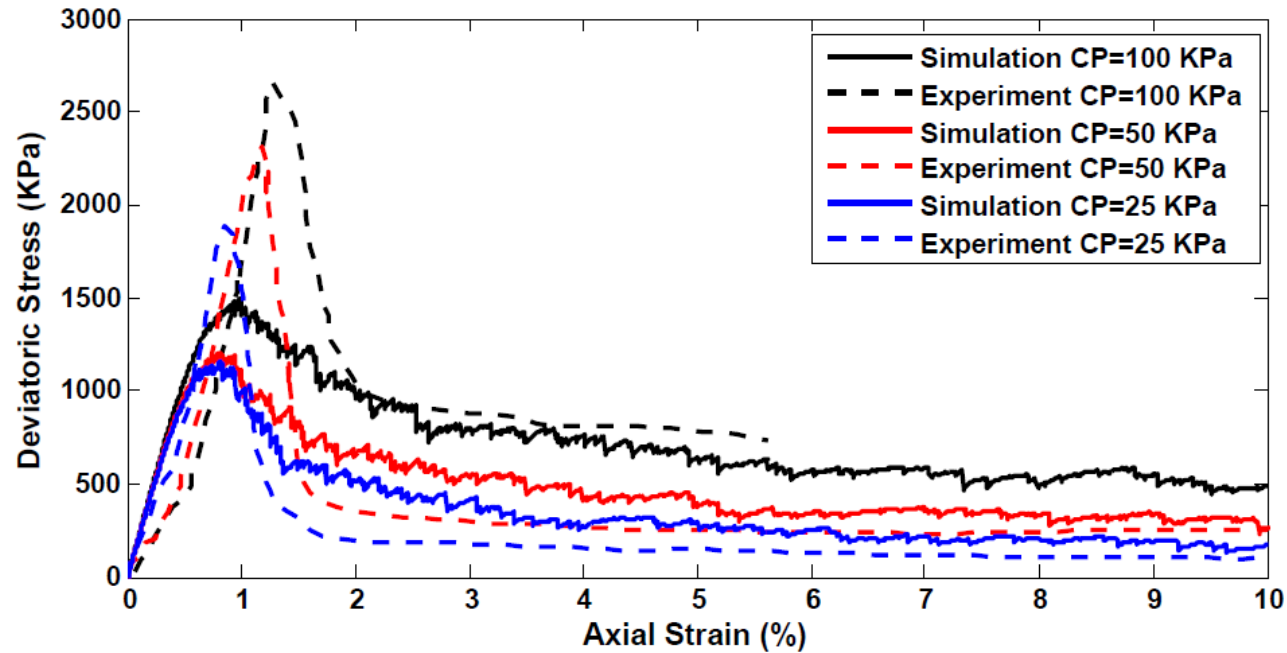


Paramètres calibrés pour une pression de confinement de 50 kPa:

- Module d'Young: $E = 80 \text{ MPa}$
- Angle de frottement au contact: $\varphi = 20^\circ$



Taux de calcite élevé



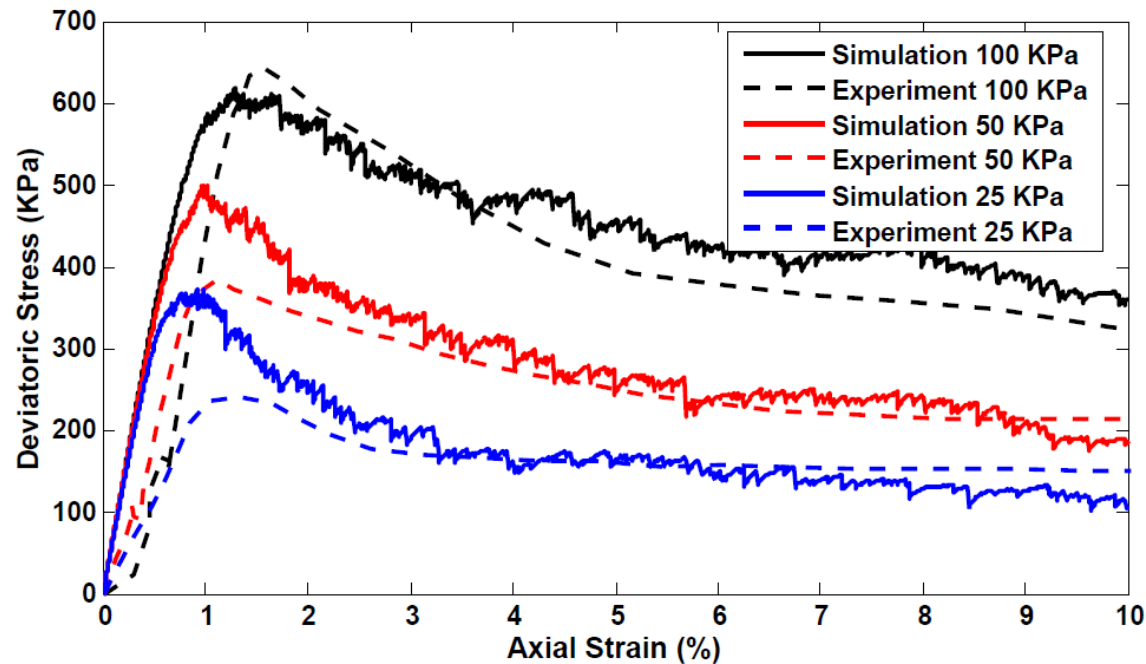
Paramètres:

- Module d'Young: $E = 1 \text{ GPa}$
- Angle de frottement de contact: $\varphi = 20^\circ$
- Adhésion normale: Calculée sur la base de la distribution réelle des surfaces de contacts
- Adhésion en cisaillement: $a_s = 2.4 a_n$
- Pourcentage of contacts cohésifs: 100%

**Echantillon 13MB
= 16,9% calcite**



Taux de calcite faible



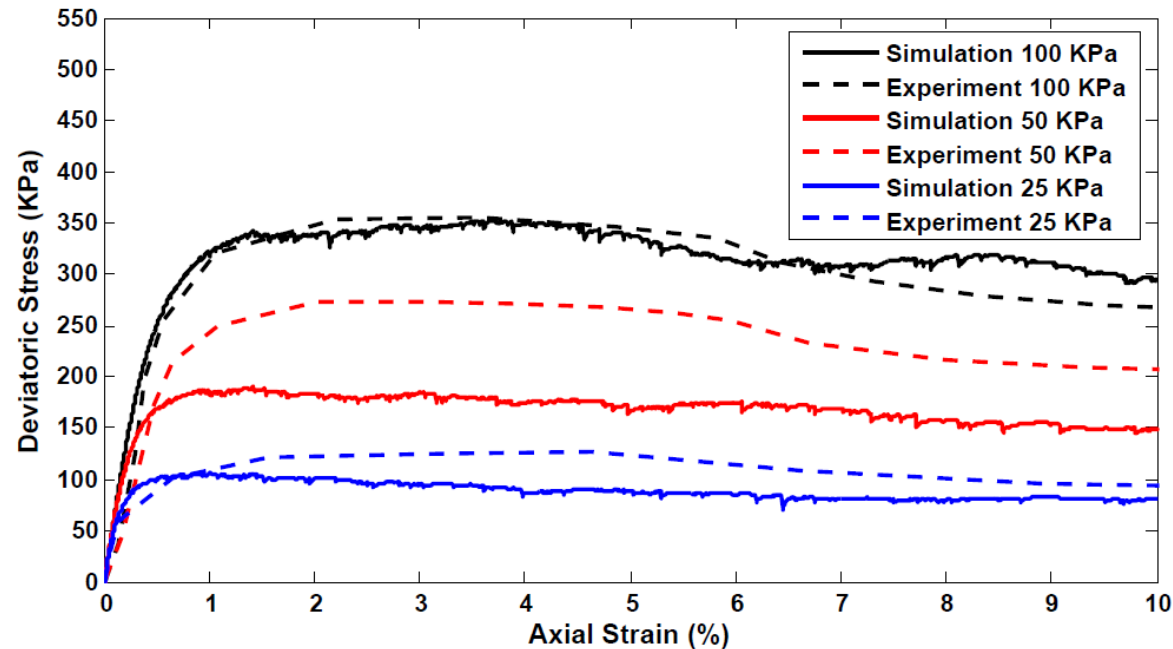
Paramètres:

- Module d'Young: $E = 300 \text{ MPa}$
- Angle de frottement de contact: $\varphi = 20^\circ$
- Adhésion normale: Calculée sur la base de la distribution réelle des surfaces de contacts
- Adhésion en cisaillement: $a_s = 2.4 a_n$
- Pourcentage of contacts cohésifs: 85%

**Echantillon 2MB
= 5% calcite**



Taux de calcite faible



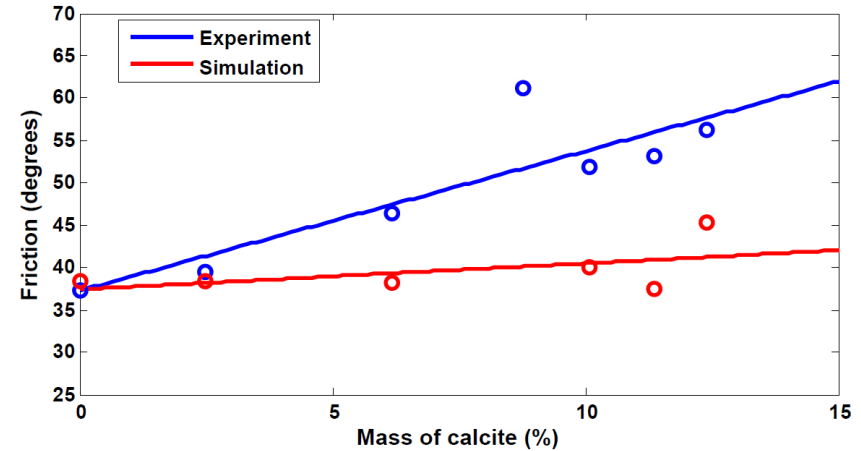
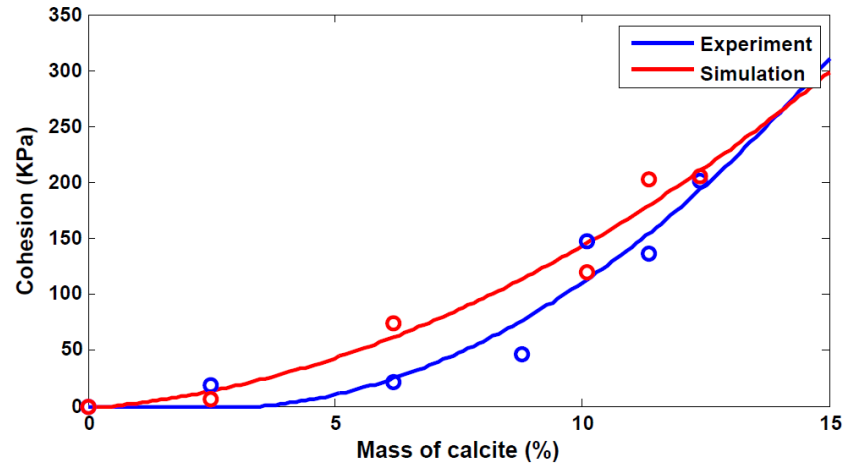
Paramètres:

- Module d'Young: $E = 300 \text{ MPa}$
- Angle de frottement de contact: $\varphi = 20^\circ$
- Adhésion normale: Calculée sur la base de la distribution réelle des surfaces de contacts
- Adhésion en cisaillement: $a_s = 2.4 a_n$
- Pourcentage of contacts cohésifs: **20%**

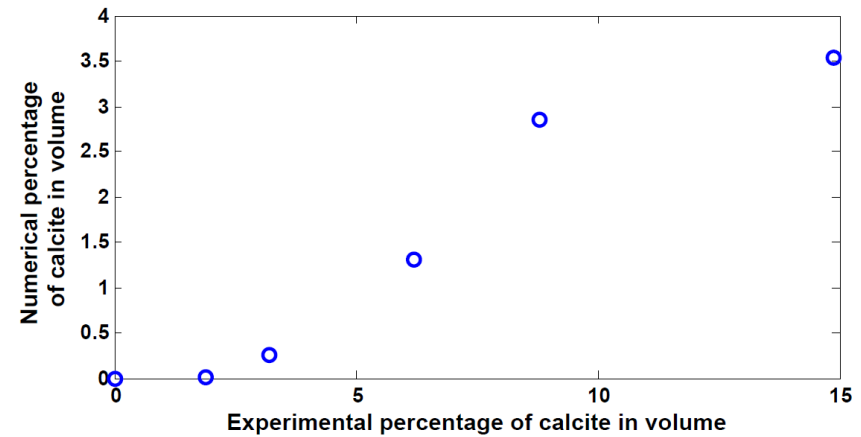
**Echantillon 2T =
3% calcite**



Propriétés mécaniques

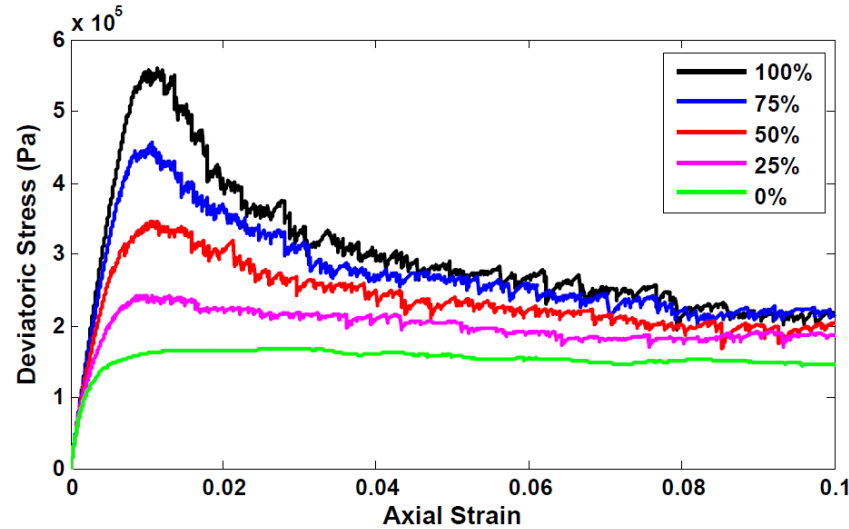


- Macro-propriétés:
- - Cohésion
- - Angle de frottement de pic
- - Angle de frottement résiduel
- comparés avec les résultats expérimentaux.

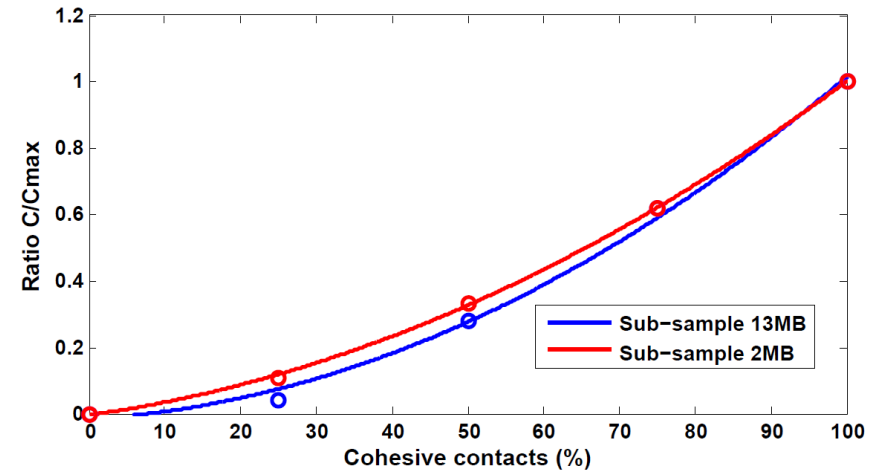


- Evolution de la quantité de calcite numérique/réelle

Influence du % de contacts cimentés



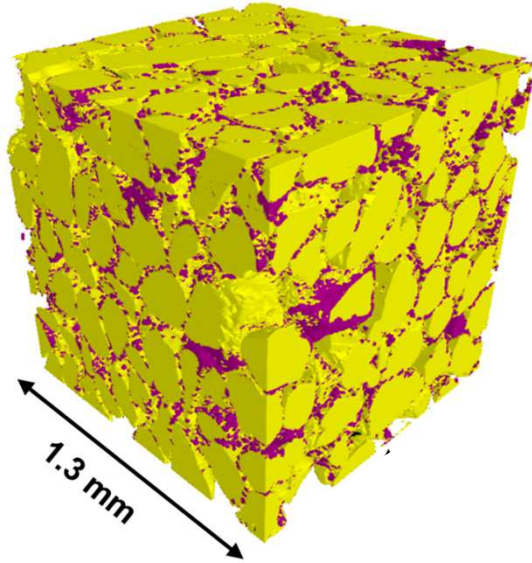
Echantillon 2MB
= 5% calcite



Echantillons 2MB = 5% calcite
Et 13MB = 16,9% calcite



Conclusion



- Images 3D de sable biocimentés obtenues par tomographie RX à haute résolution
- Développement de méthodes de traitement d'images spécifiques
 - Propriétés microstructurales moyennes
 - Propriétés microstructurales discrètes (contact)
- Identification de la transition entre frottement – cohésion et lien avec le pourcentage de contacts cimentés
- Application de la modélisation par DEM avec les propriétés de contact identifiées expérimentalement comme données d'entrée
- Bonne comparaison avec les résultats expérimentaux
- Nécessité de considérer le pourcentage de contacts réellement cimentés pour les faibles taux de calcite



Merci de votre attention !

Des questions ?

