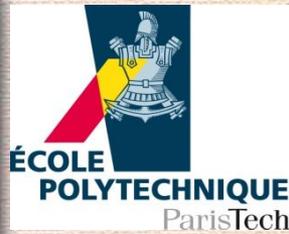


Prix Pierre Londe 2014



Analyse expérimentale et modélisation micromécanique de la déformation et de l'endommagement des argilites sous chargements hydrique et mécanique combinés

Linlin WANG

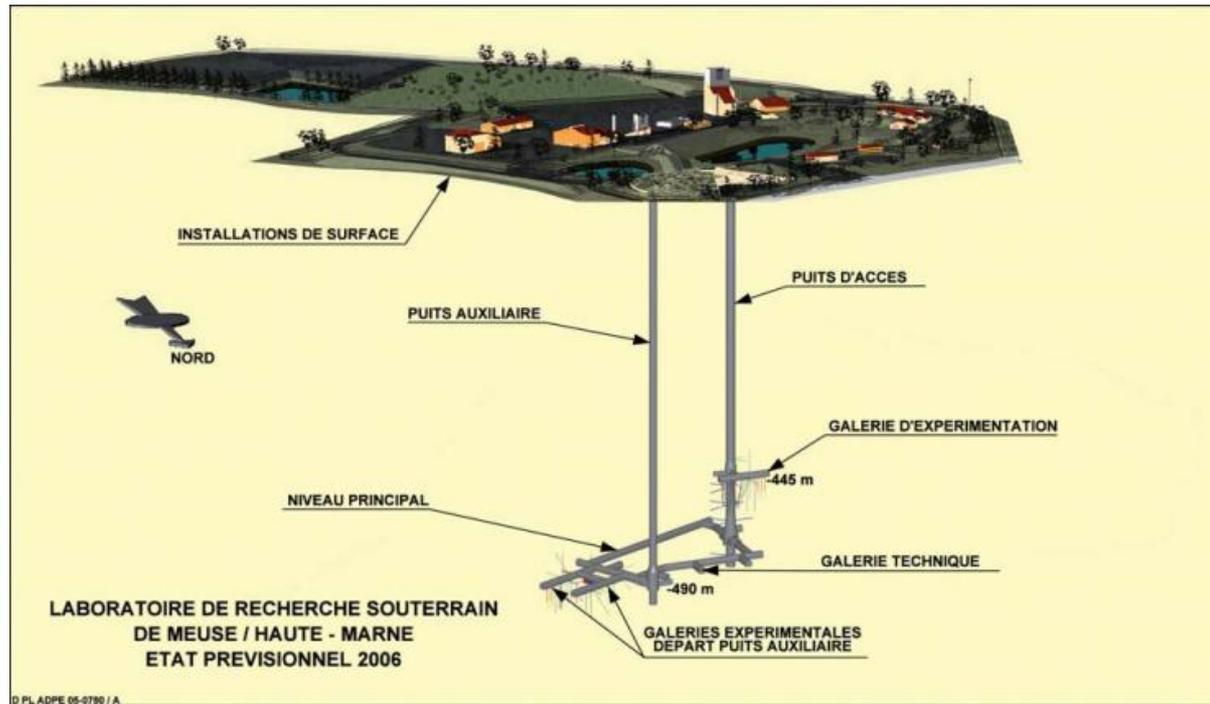
Directeur : Bernard HALPHEN

Co-directeurs : Michel BORNERT, Ahmad POUYA



Contexte

- ❖ Argilites : Roche-hôte potentielle pour le stockage souterrain des déchets radioactifs



Fiabilité du stockage à long terme

Argilites: un matériau extrêmement compliqué

❖ Déformation

- ❑ Inapproprié du poroélasticité conventionnel

Coefficient de Biot: 0,5 – 1 (Bemer, 2004, Homand, 2004, Cariou, 2012)

- ❑ Gonflement non linéaire (Pham, 2006; Valès, 2008)

- ❑ Le linéarité initial du contrainte-déformation présentant la déformation irréversible (Abou-Chakra Guéry, 2008)

❖ Endommagement et rupture

- ❑ Peu de observation (location, nucleation, propagation)

- ❑ Rupture fragile ou ductile dépendant du teneur en eau (Yang, 2012)

❖ Fluage

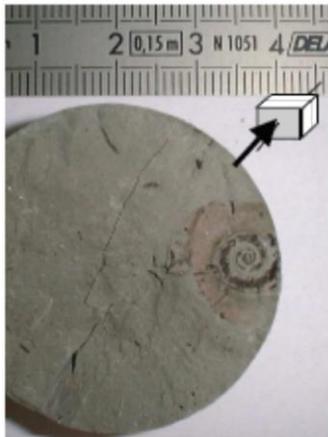
- ❑ La connaissance des mécanismes est absent

- ❑ Fluage sous faible contrainte (Zhang, 2012)

Comportement hydromécanique

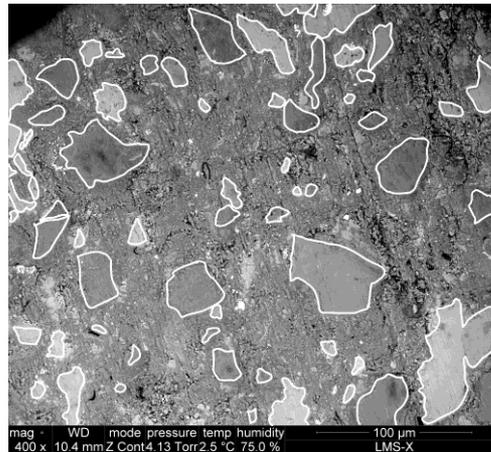
- ☐ Minéraux argileux actifs
- ☐ Hétérogénéité multi-échelle

cm/mm



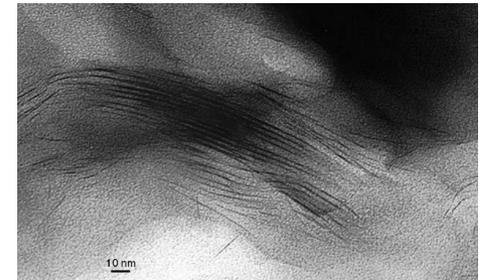
Matériau
« homogène »

1-100 μ m



Composite
inclusion-matrice

nm



(Laird, 2006)

Objectif :

Identifier les mécanismes associés à l'échelle de la microstructure composite

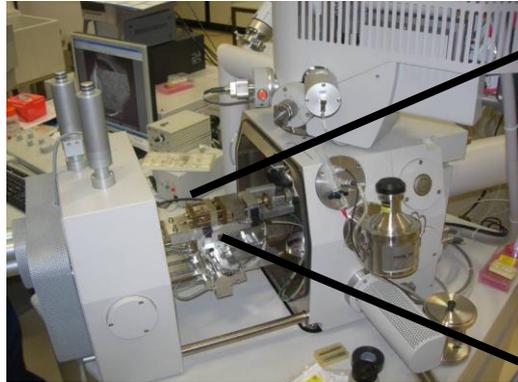
Plan

- ❑ Méthodologie expérimentale
- ❑ Comportement sous chargement hydrique
- ❑ Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique
- ❑ Comportement sous chargement mécanique
- ❑ Conclusions

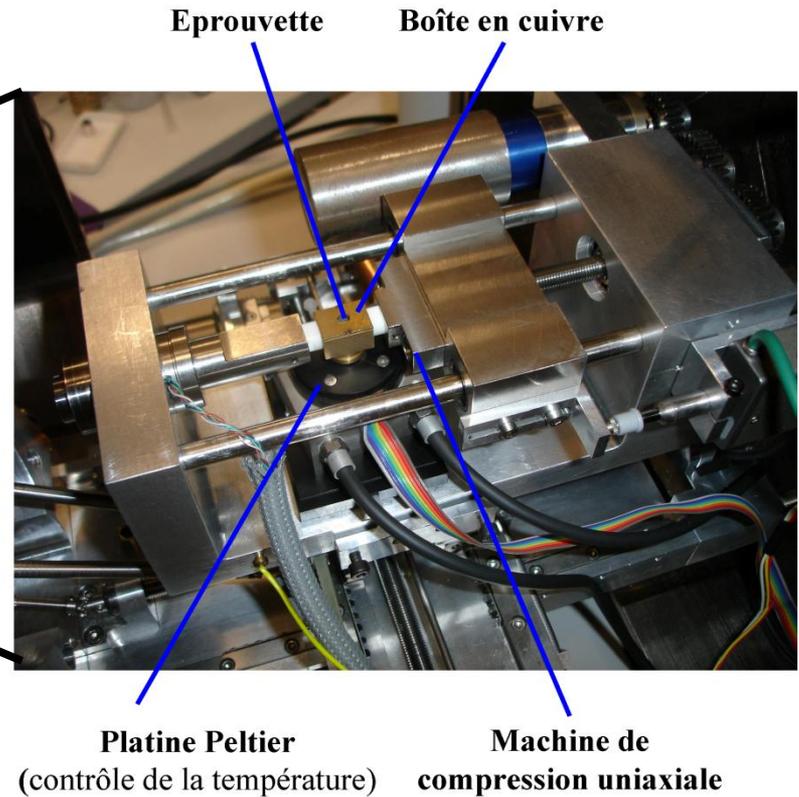
Plan

- ❑ ***Méthodologie expérimentale***
- ❑ Comportement sous chargement hydrique
- ❑ Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique
- ❑ Comportement sous chargement mécanique
- ❑ Conclusions

Matériels



Microscopie électronique à balayage environnemental (MEBE)



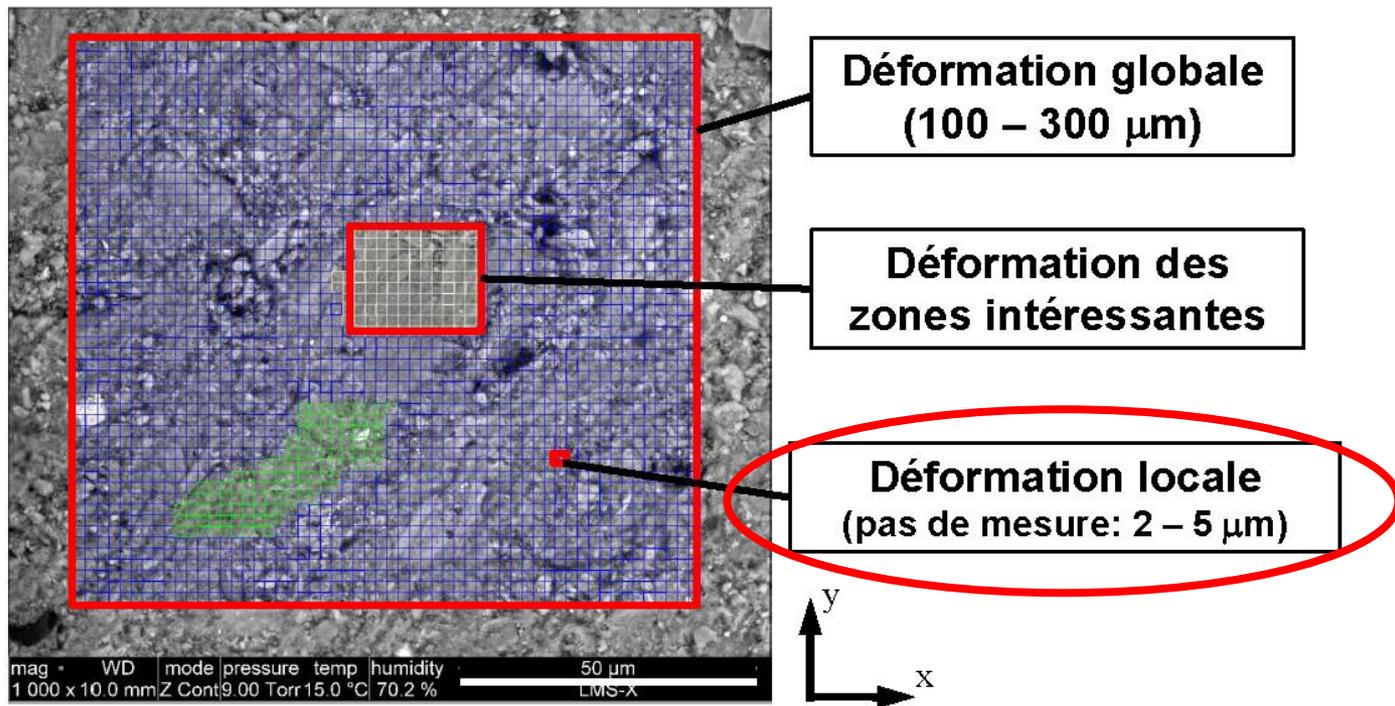
Chargement hydrique et mécanique combinés



Observation à micro-échelle

Corrélation des images numériques (CIN)

- ❖ Mesure des champs de déformation : CMV (LMS + Navier)



MEME + CIN sur les argilites : un travail extrêmement délicat

❑ Faible déformation à mesurer (10^{-3} pour 10%HR)

❑ Condition défavorable pour l'imagerie du MEME (vapeur)

Une étude systématique sur les **erreurs de mesure de déformation**

- Bruit des images
- Erreur géométrique
- Erreur systématique



Précision de mesure appropriée :

- Déformation globale : 3×10^{-4}
- Déformation locale : 1×10^{-3}

Wang, L.L., Bornert, M., Héripré, E., Chanchole, S., Tanguy, A. 2014. Full-field measurements on low-strained geomaterials using environmental scanning electron microscopy and digital image correlation: improved imaging conditions. *Strain*, DOI: 10.1111/str.12076.

Plan

- ❑ Méthodologie expérimentale
- ❑ ***Comportement sous chargement hydrique***
 - Mécanismes de déformation
 - Phénomènes irréversibles
 - Anisotropie de déformation
 - Déformation non linéaire
- ❑ Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique
- ❑ Comportement sous chargement mécanique
- ❑ Conclusions

Champ de la déformation hétérogène

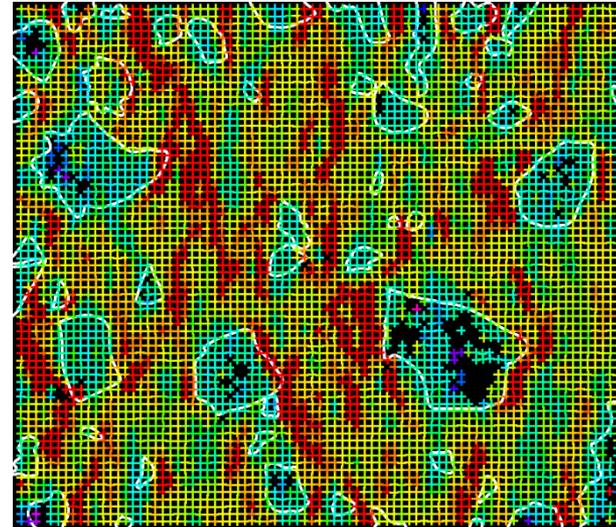
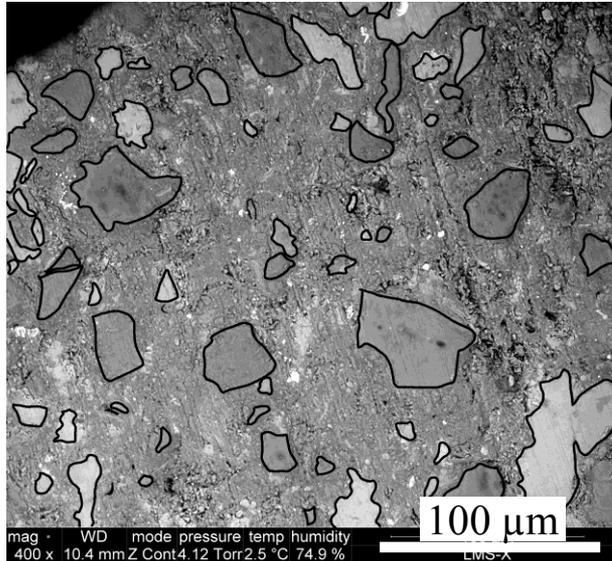
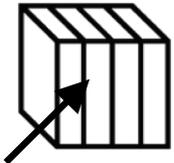
Exx(%)

-3,0

0,0

3,0

6,0



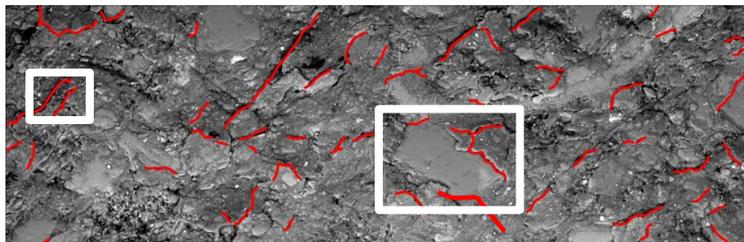
75% - 99%HR

Interaction entre la matrix argileuse gonflante et les inclusions non-gonflants

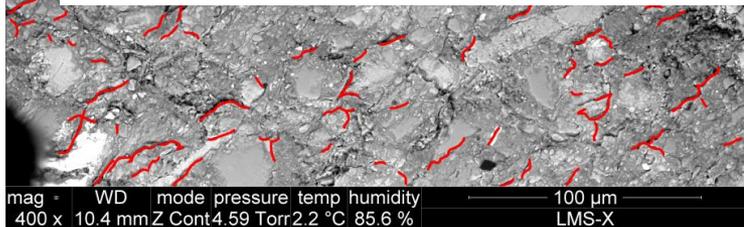
Wang, L.L. et al. Microscale experimental investigation of deformation of argillaceous rocks under hydric loads. *Applied Clay Science* (soumis).

Endommagements

Microfissuration due à l'humidification

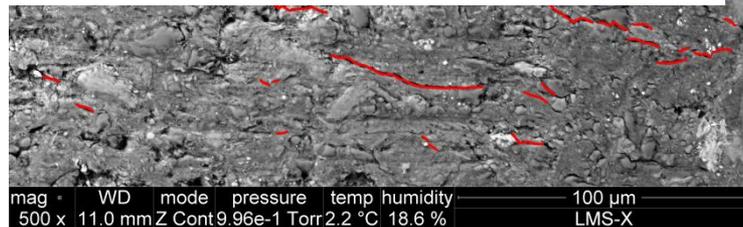
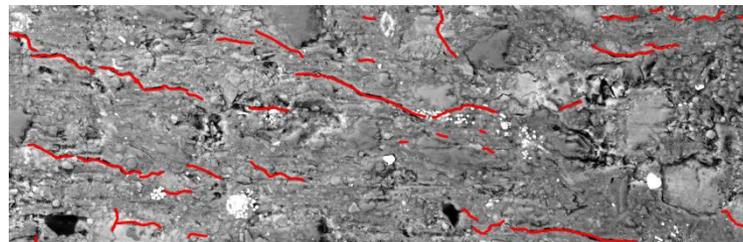


Pourquoi la microfissuration à l'interface inclusion-matrice apparaît-elle en cas d'humidification, mais pas en cas de séchage ?



ouverture $< 1\mu\text{m}$

Microfissuration due au séchage

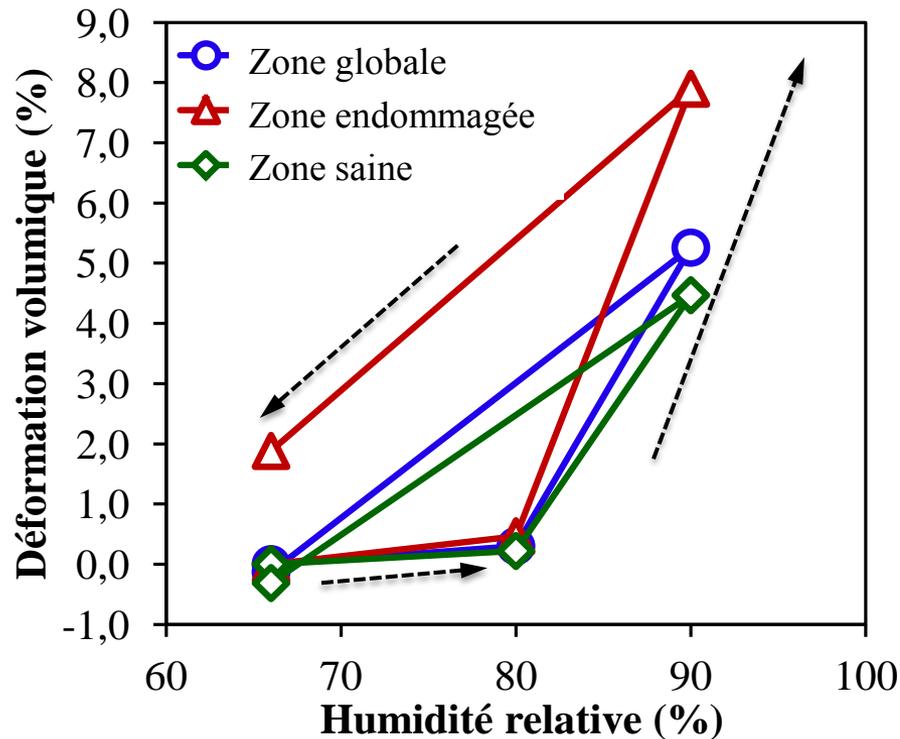


- Aux interfaces inclusion-matrice
- Dans la matrice argileuse
- Dans la matrice argileuse

Wang, L.L., Bornert, M., Héripré, E., Yang, D.S., Chanchole, S. Irreversible deformation and damage in argillaceous rocks induced by wetting/drying. *Journal of Applied Geophysics* DOI:j.jappgeo.2014.05.015.

Comportement macro avec les phénomènes irréversibles

❖ Chargement hydrique cyclique



Déformation globale quasi-réversible malgré des phénomènes irréversibles

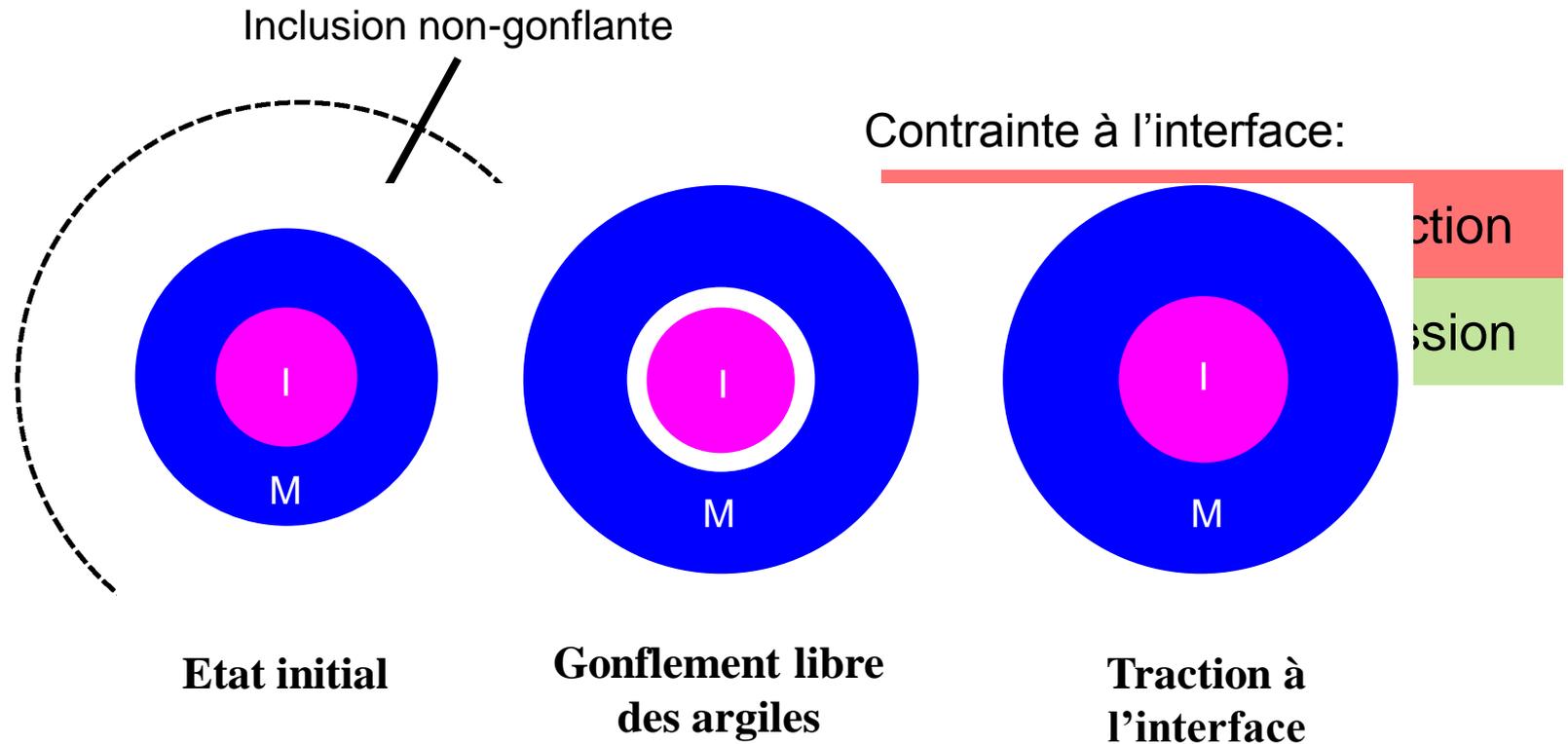
Plan

- ❑ Méthodologie expérimentale
- ❑ Comportement sous chargement hydrique
- ❑ ***Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique***
- ❑ Comportement sous chargement mécanique
- ❑ Conclusions

Interaction inclusion-matrice

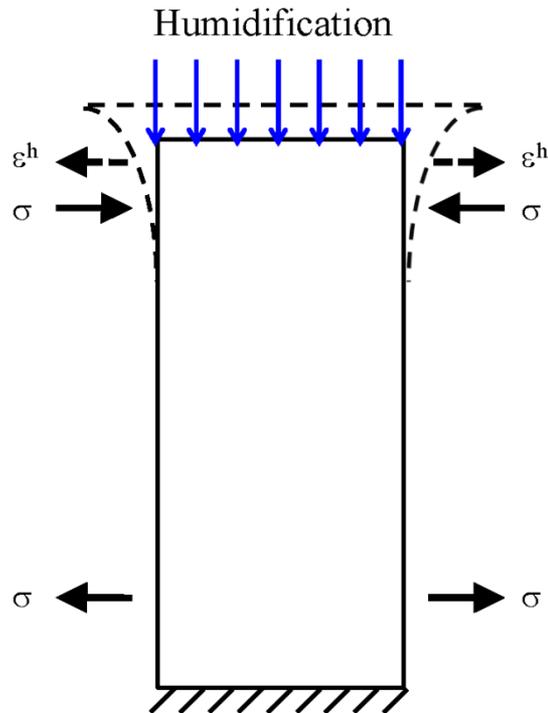
Observations

- 1) Micro-fissuration au interface inclusion-matrix en cas d'humidification, mais pas en cas de séchage.
- 2) Micro-fissuration fortement contrôlée par le vitesse de chargement hydrique



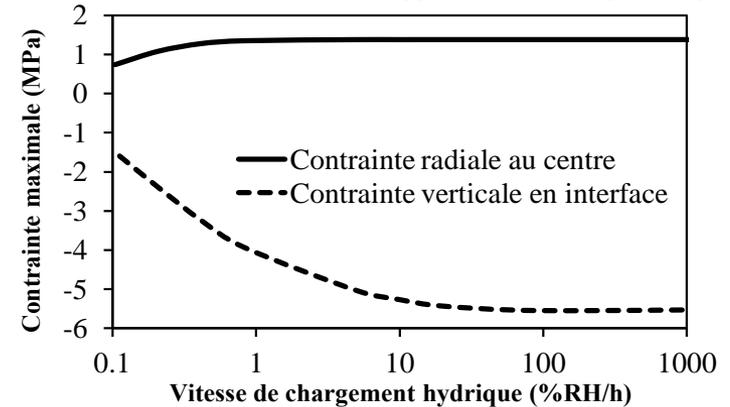
Wang, L.L., Pouya, A., Halphen, B., Bornert, M. 2014. Modeling the internal stress field in argillaceous rocks under humidification/desiccation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* DOI:10.1002/nag.2267.

Auto-contrainte



Explication du résultat
expérimental

□ Vitesse de chargement hydrique



Auto-contrainte Interaction inclusion-matrix

Humidification

compression

traction

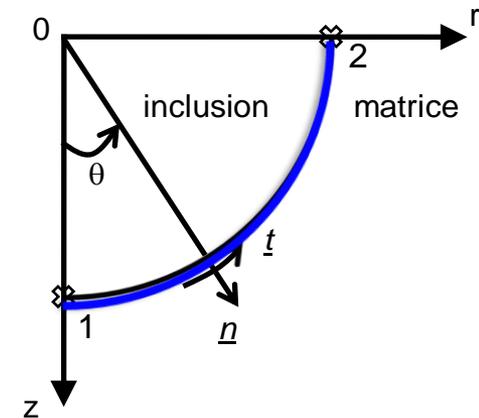
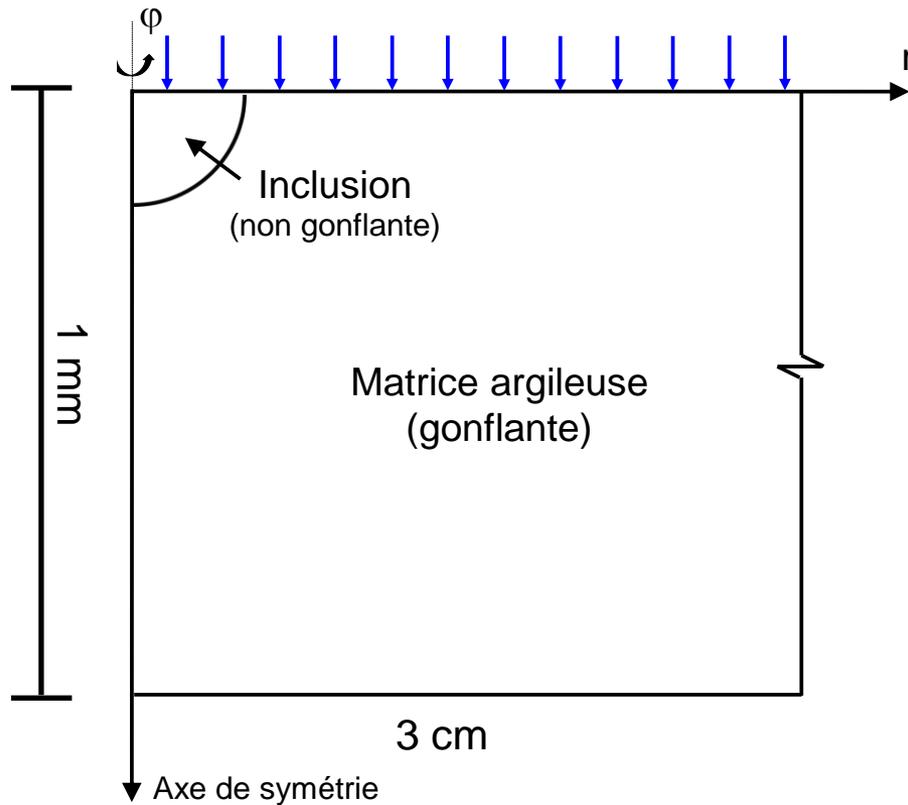
Séchage

traction

compression

Combinaison des deux effets inverses

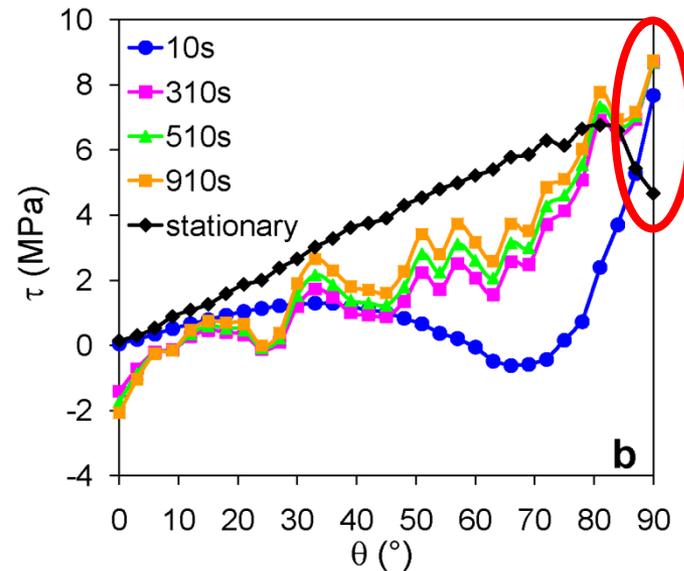
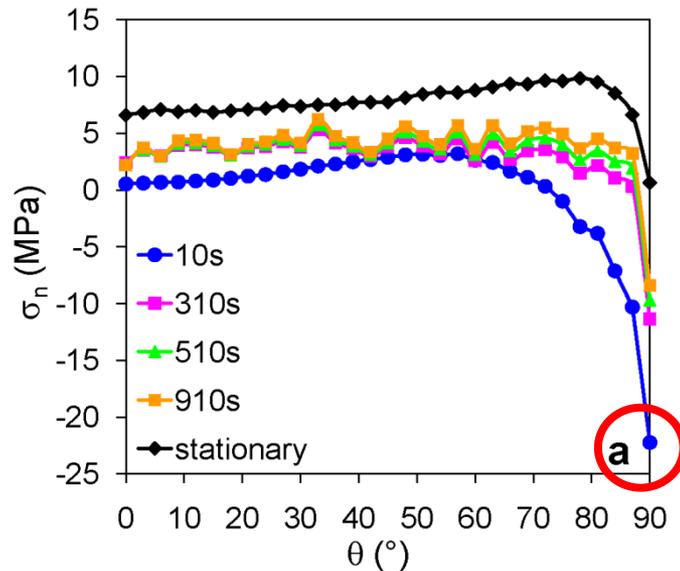
Simulation du test de humidification



Wang, L.L., Pouya, A., Halphen, B., Bornert, M. 2014. Modeling the internal stress field in argillaceous rocks under humidification/desiccation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* DOI:10.1002/nag.2267.

Effet de la surface libre

Fort cisaillement



Evolution de la contrainte normale (gauche) et du cisaillement (droite) à l'interface.

Pourquoi la microfissuration à l'interface inclusion-matrice se trouvent au cas d'humidification, pas au cas de séchage?

☐ Résistance à la traction de la matrice < Résistance au cisaillement de l'interface

Plan

- ❑ Méthodologie
- ❑ Comportement sous chargement hydrique
- ❑ Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique
- ❑ ***Comportement sous chargement mécanique***
 - Mécanismes de déformation et d'endommagement
 - Influence de l'humidité sur le comportement mécanique
- ❑ Conclusions

Essais

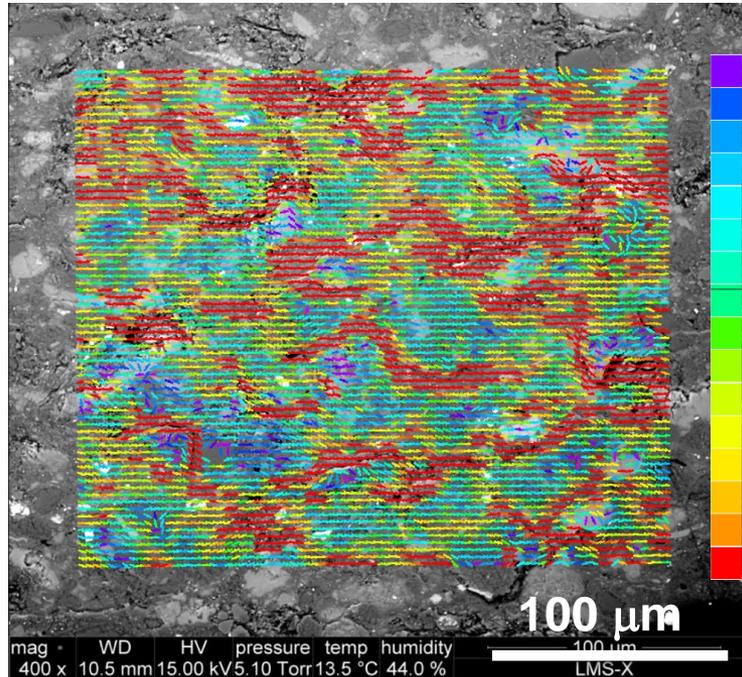
Essai	Conditions H et M	Etat hydrique
Essai n° 1	Etat hydrique constant , chargement mécanique	W= 2.2%
Essai n° 2		W= 3.1% HR=44%
Essai n° 3		W= 3.8% HR=44%
Essai n° 4		W= 5.4% HR=91%
Essai n° 5		W=7.4% HR=98%
Essai n° 6		W=10.1% HR=98%
Essai n° 7	hydrique et mécanique couplé	21%RH, 80%RH, 99%RH

Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq

(%)

0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17,8 MPa)

mag · WD HV pressure temp humidity
400 x 10.5 mm 15.00 kV 5.10 Torr 13.5 °C 44.0 %

100 μm

100 μm
LMS-X

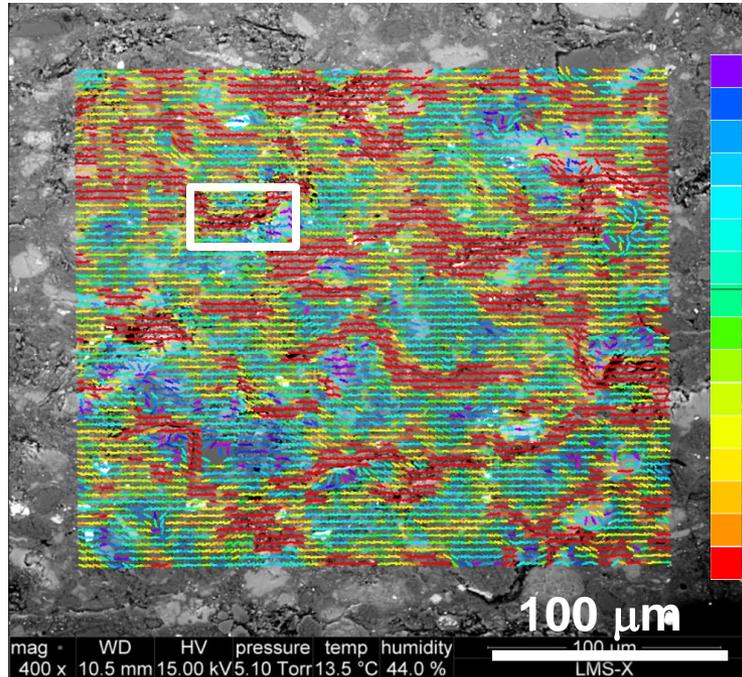
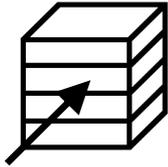


Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq (%)

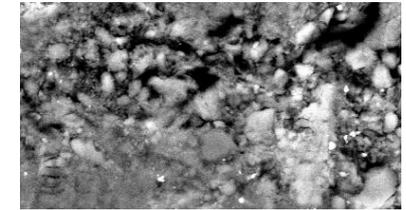
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17,8 MPa)



Bande horizontale

**Compaction des macropores
et des fissures pré-existants**

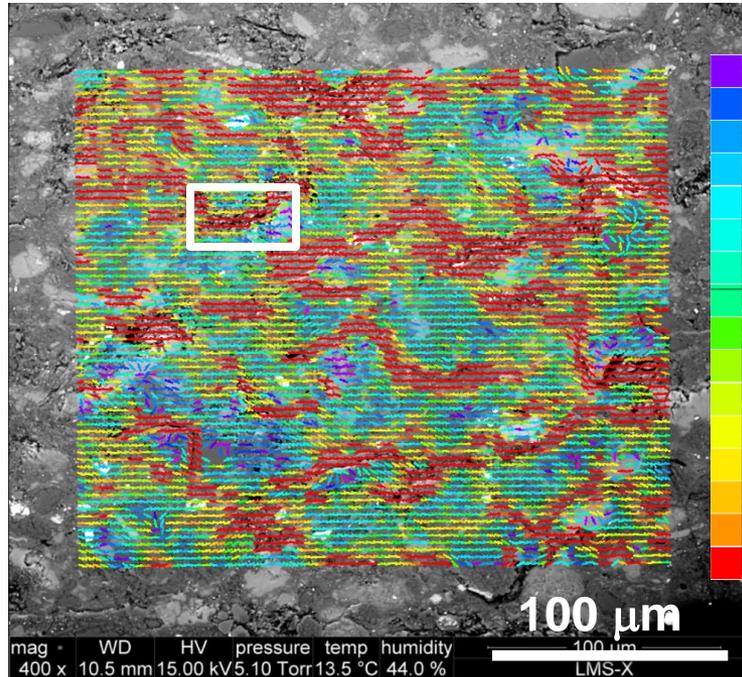
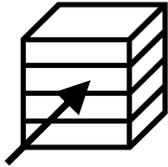


Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq (%)

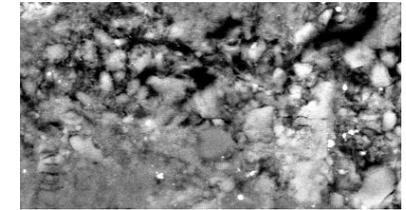
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17,8 MPa)



Bande horizontale

**Compaction des macropores
et des fissures pré-existants**

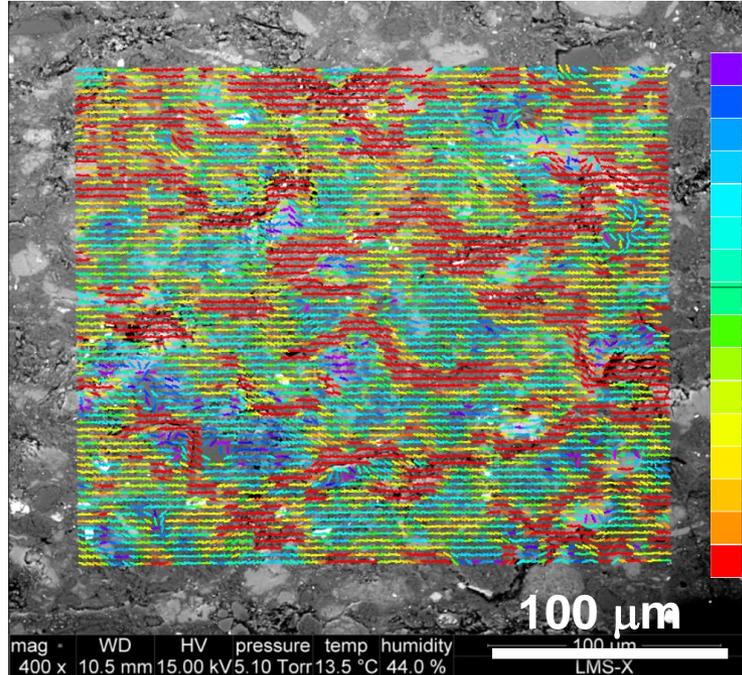
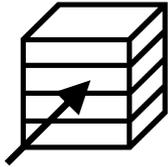


Mode de déformation

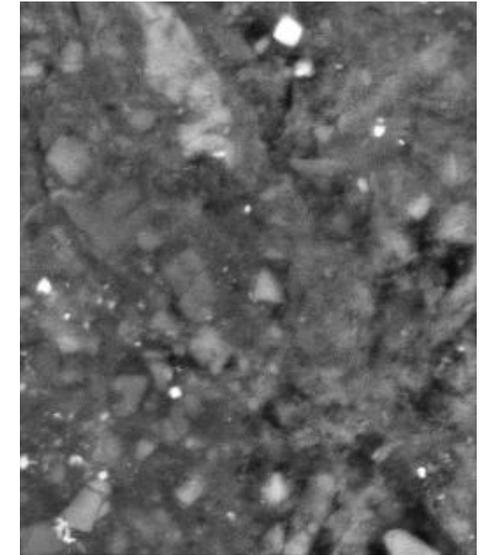
❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq (%)
0.0
0.7
1.4
2.1



(0 – 17,8 MPa)

Bande horizontale

Bande inclinée



**Compaction des macropores
et des fissures pré-existants**

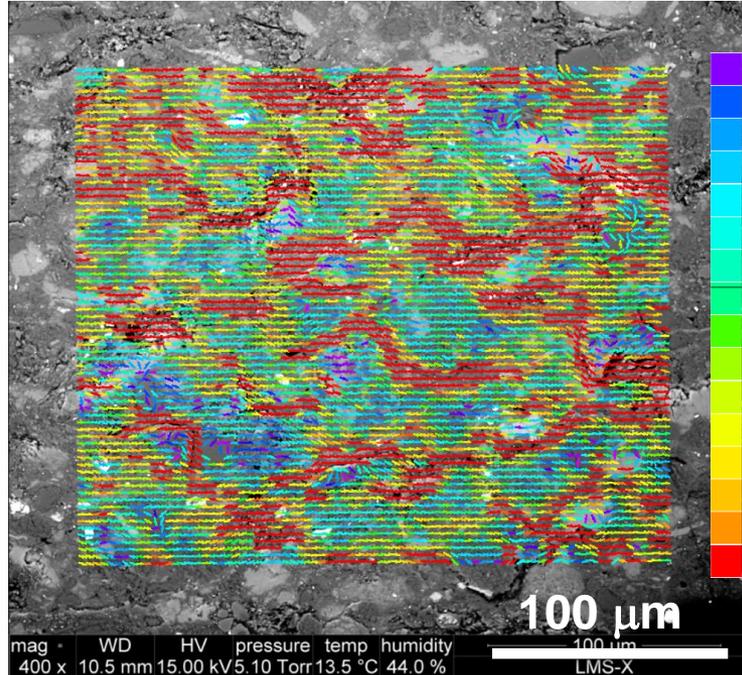
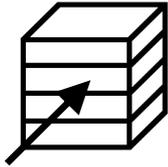
Cisaillement

Mode de déformation

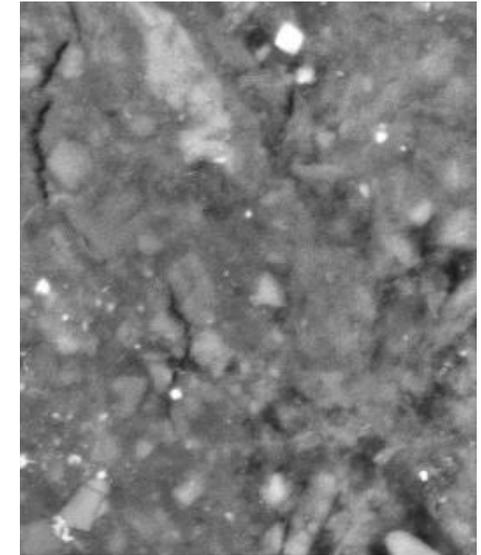
❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq (%)
0.0
0.7
1.4
2.1



(0 – 17,8 MPa)

Bande horizontale

Bande inclinée



**Compaction des macropores
et des fissures pré-existants**

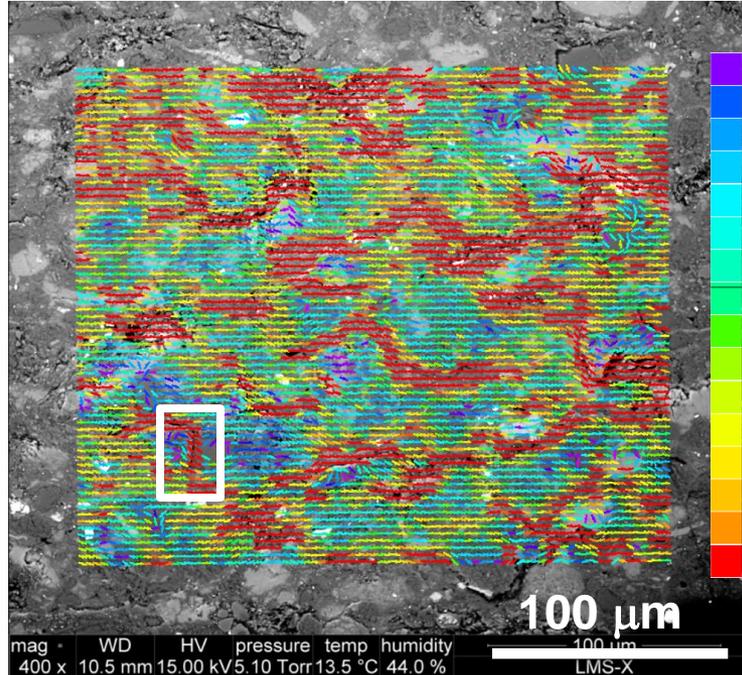
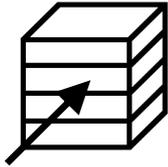
Cisaillement

Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq

(%)

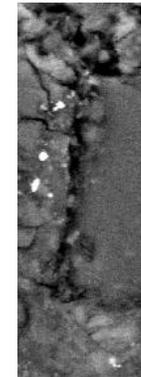
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17,8 MPa)



Bande horizontale

Bande inclinée

Bande verticale



**Compaction des macropores
et des fissures pré-existants**

Cisaillement

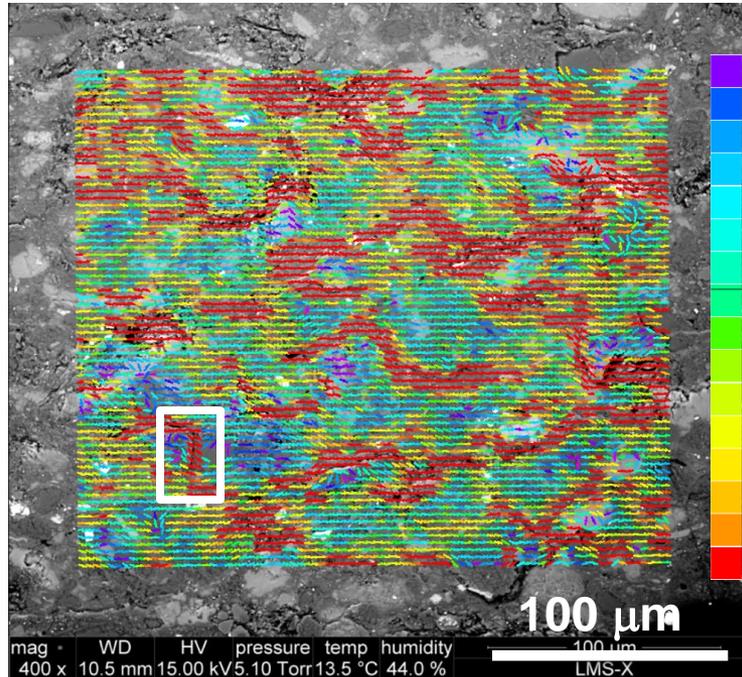
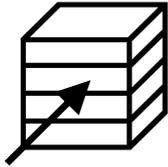
**Microfissures sub-parallèles
à la charge**

Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq

(%)

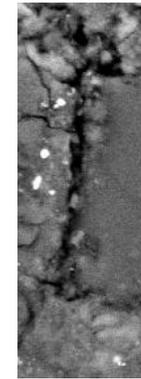
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17.8 MPa)



Bande horizontale

Bande inclinée

Bande verticale

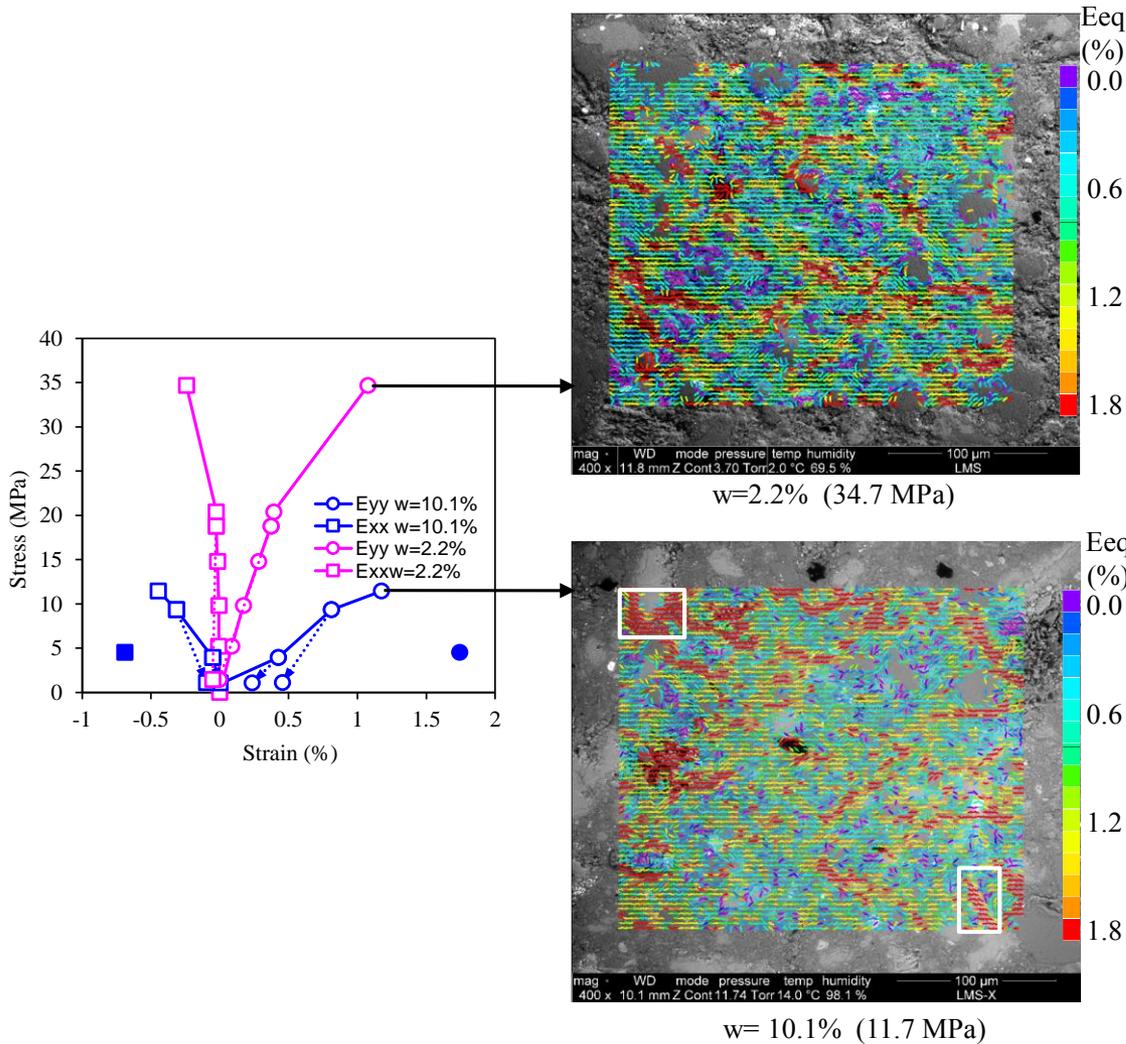


**Compaction des macropores
et des fissures pré-existants**

Cisaillement

**Microfissures sub-parallèles
à la charge**

Comportement mécanique



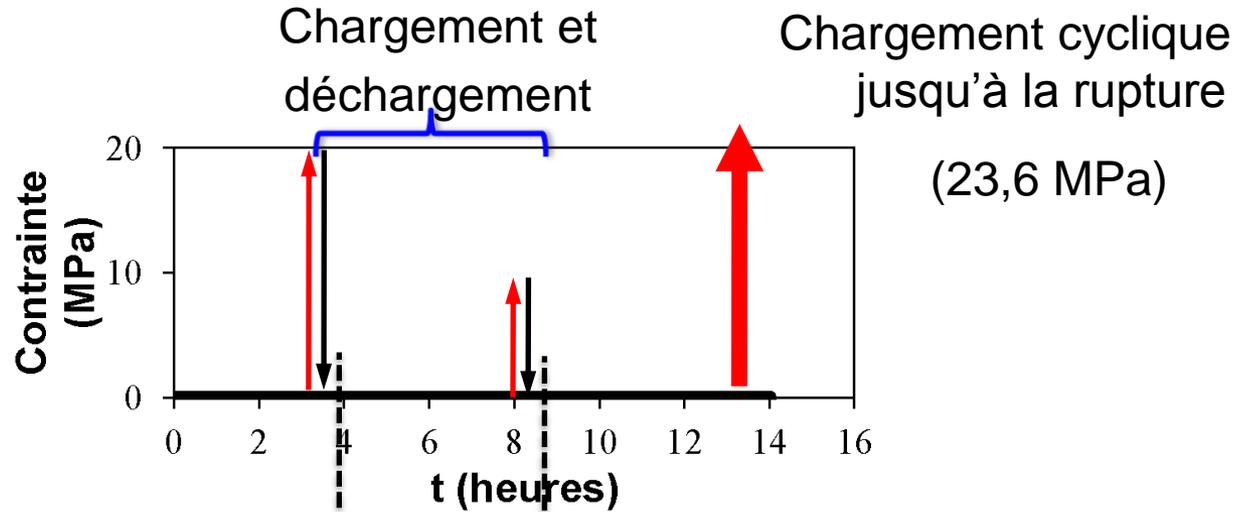
44%HR (test #3)



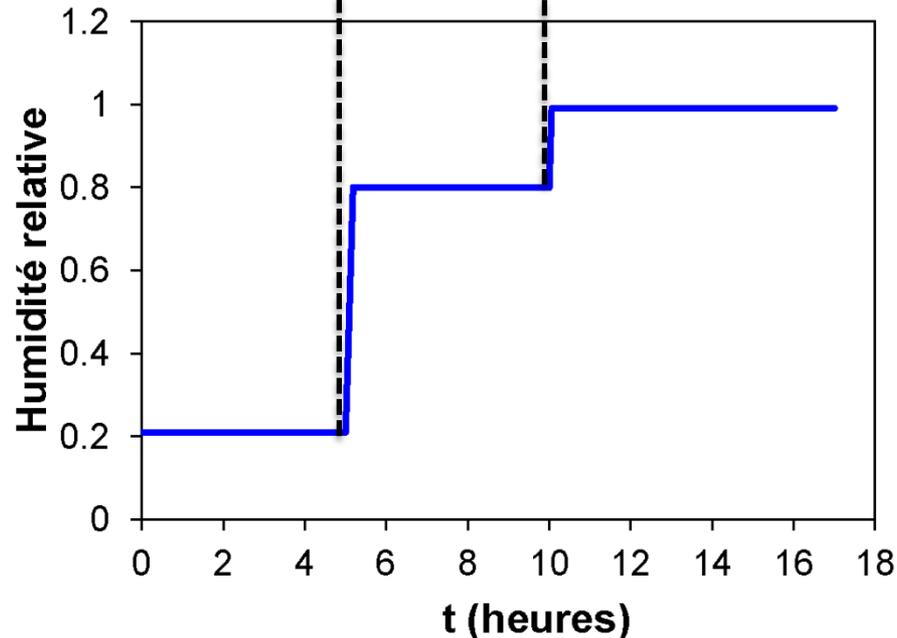
99%HR (test #7)

Chargement hydrique et mécanique combinés (essai #7)

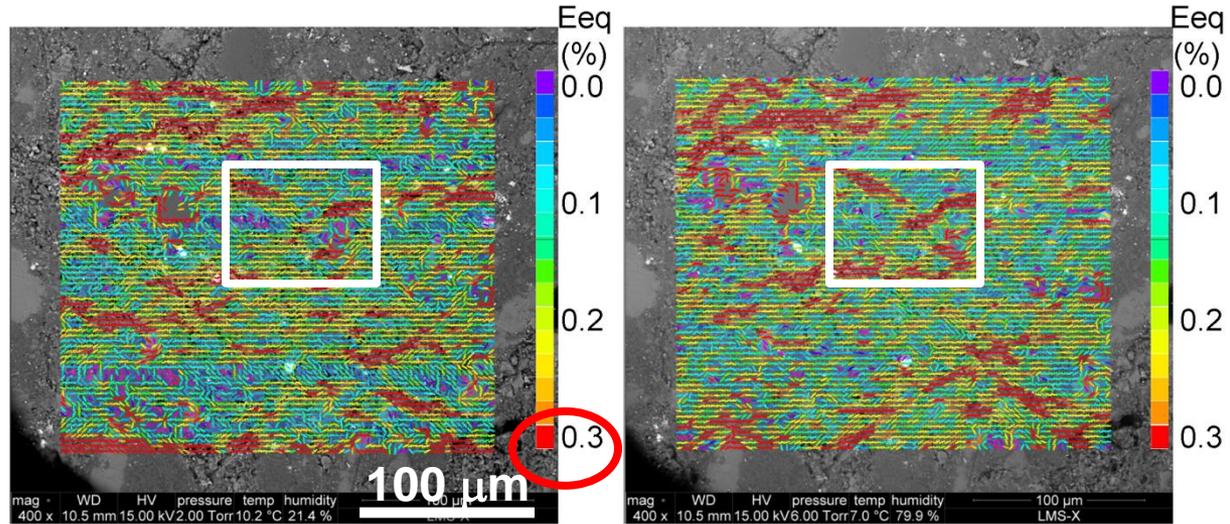
Chargement
mécanique



Chargement
hydrique

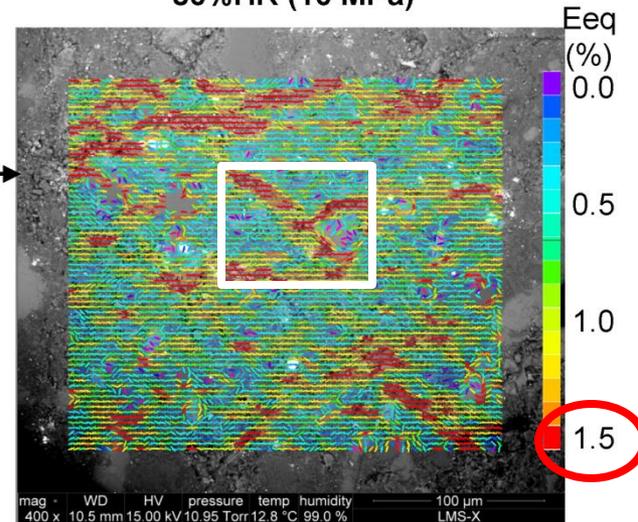
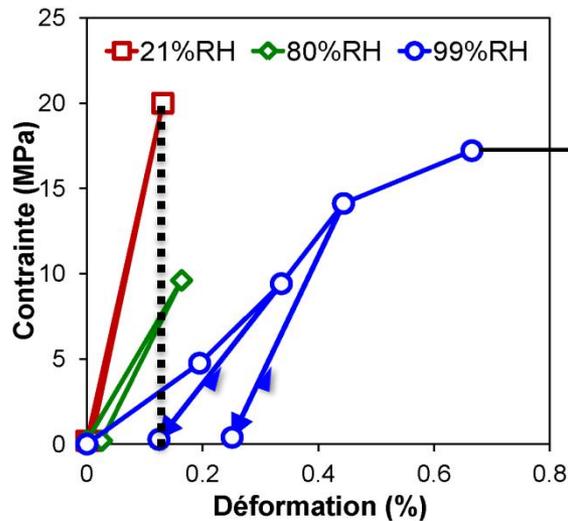


Influence de l'humidité sur le comportement mécanique



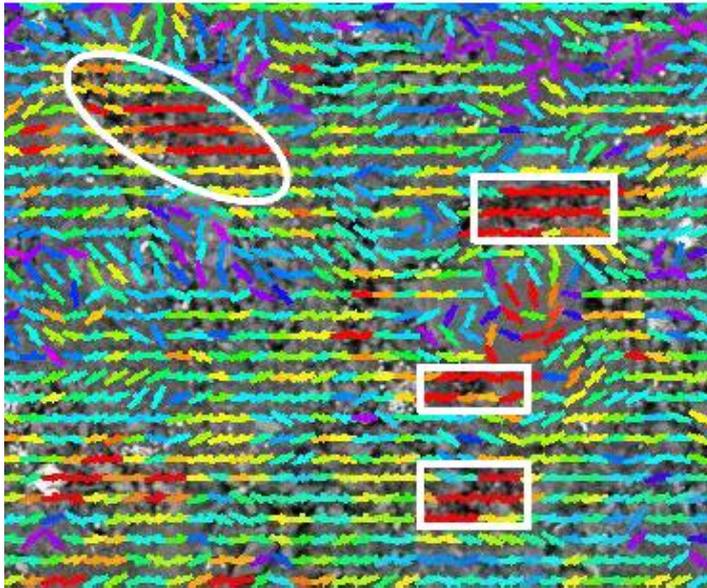
21%HR (20 MPa)

80%HR (10 MPa)

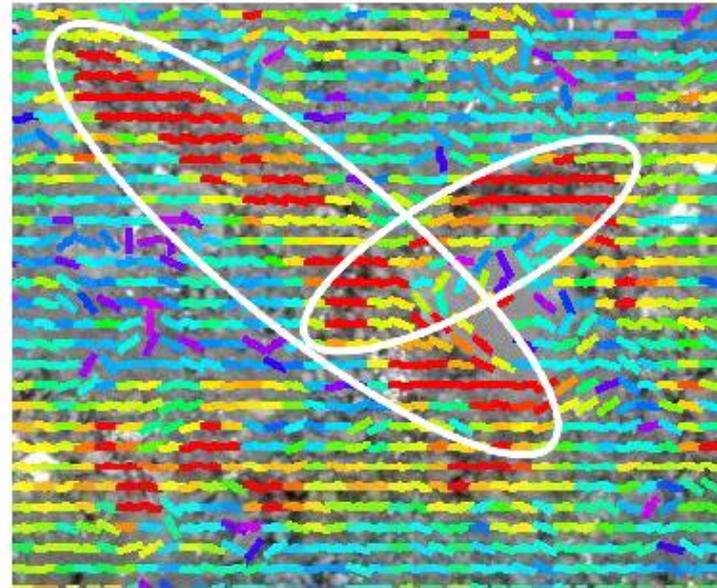


99%HR (17 MPa)

Une humidité relative élevée est favorable à l'apparition de bandes de cisaillement



21%HR



99%HR

Humidité relative



- ❑ Le module de cisaillement diminue
- ❑ La contrainte effective diminue (pression capillaire)

Plan

- ❑ Méthodologie
- ❑ Comportement sous chargement hydrique
- ❑ Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique
- ❑ Comportement sous chargement mécanique
- ❑ ***Conclusions***

Conclusions

Originalité de la méthode expérimentale

- ❑ **MEBE + CIN**
- ❑ **Chargements hydrique et mécanique combinés dans MEBE**
- ❑ Optimisation de la mesure de déformation
- ❑ Etude à micro-échelle de la **microstructure composite**

Conclusions

Comportement hydrique

- ❑ Mécanisme de déformation :
Gonflement libre, contrainte interne (hétérogénéité et auto-contrainte)
- ❑ Anisotropie de déformation :
Anisotropie du gonflement + orientation préférentielle des particules
- ❑ Déformation non linéaire :
Microfissuration + gonflement non linéaire des argiles
- ❑ Phénomènes irréversibles :
Endommagement (humidification et séchage), déformation irréversible



Modélisation

- ❑ **Interaction inclusion-matrice** (effets des inclusions voisines et de la surface libre)
- ❑ **Auto-contrainte** (vitesse de chargement, taille d'échantillon)
- ❑ **Explication des résultats expérimentaux**

Conclusions

Comportement hydromécanique

- ❑ Mécanismes de déformation sous chargement mécanique :
Bandes de compaction et de cisaillement, microfissuration
- ❑ Influence de l'humidité :
Gonflement, diminution des modules d'élasticité, microfissuration hydrique
Couplage hydromécanique
Champs de déformation : rôle de la microstructure



Merci pour votre attention

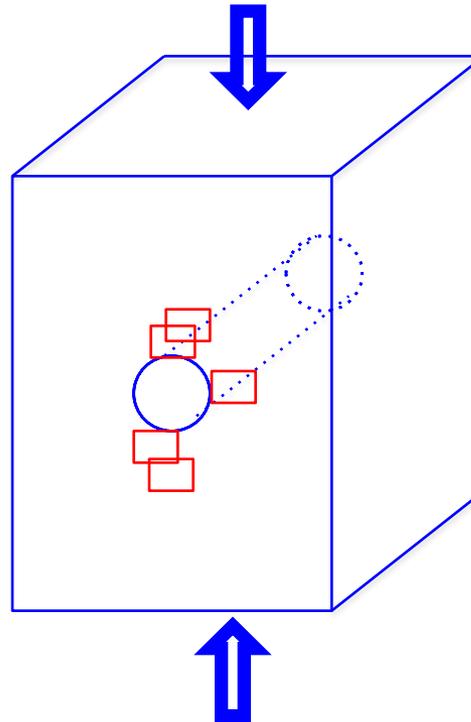
ESEM+DIC – Essais de fissuration

Echantillons ~ 5,5x5,5x11 mm, Trou foré de diam. 1mm

Compression in situ sous HR contrôlée

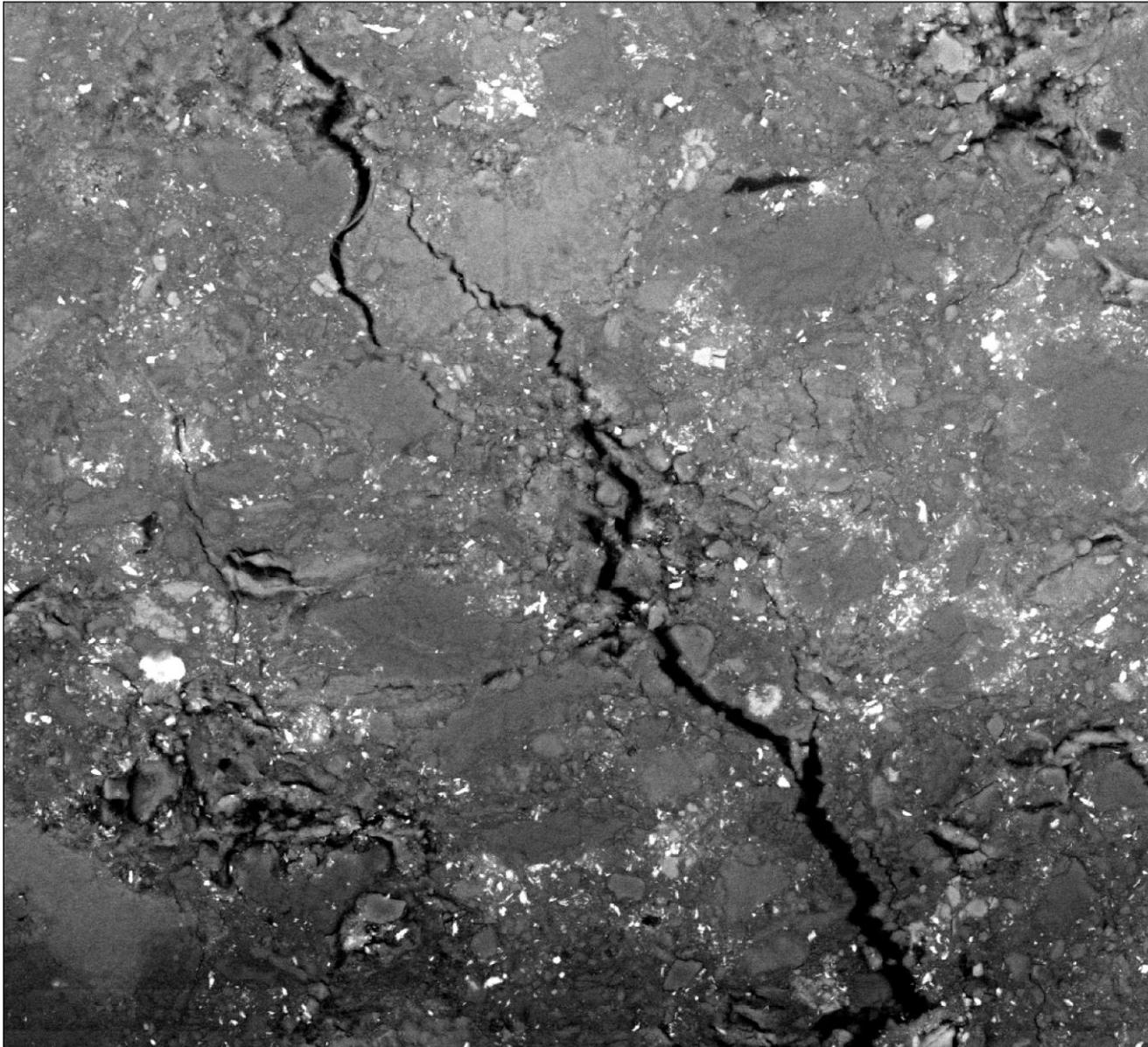
1 éch. 30,4% (5° C, 2 Torr) et 2 éch. 98,5% (12° C, 10,4 Torr)

(juillet 2013)



Images  (x500 – x600 – x800 – x1200 – x1600 – x6000)
à divers niveaux de charge/décharge

ESEM+DIC – Essai de fissuration



HR 98,5%

0 N

150 N

350 N décharge

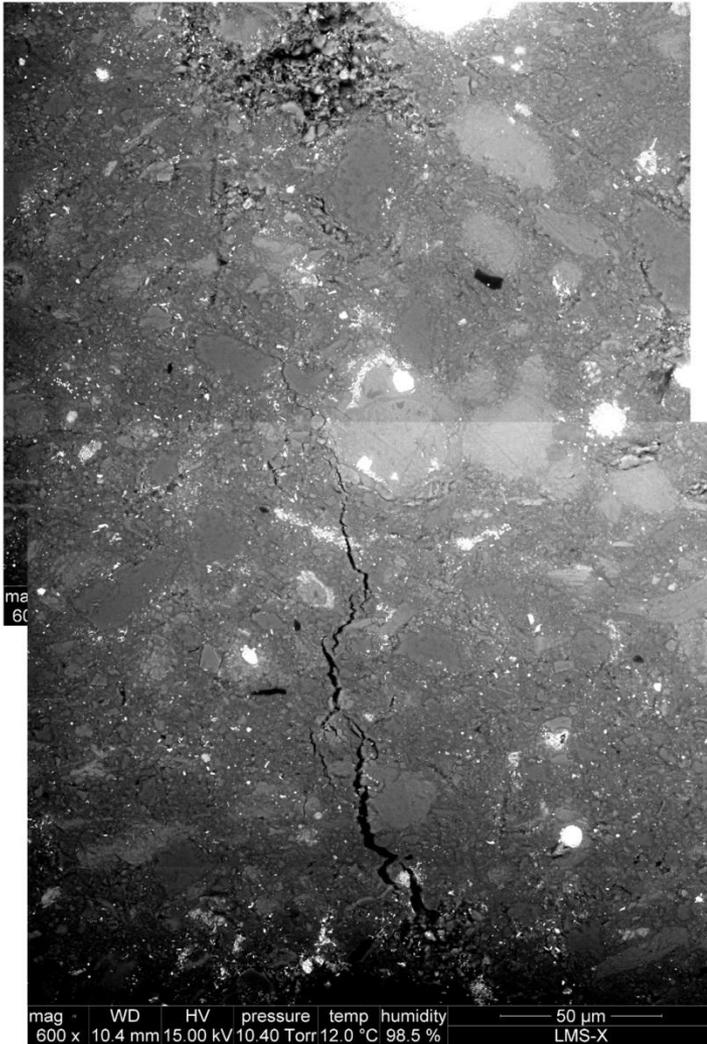
350 N recharge

410 N

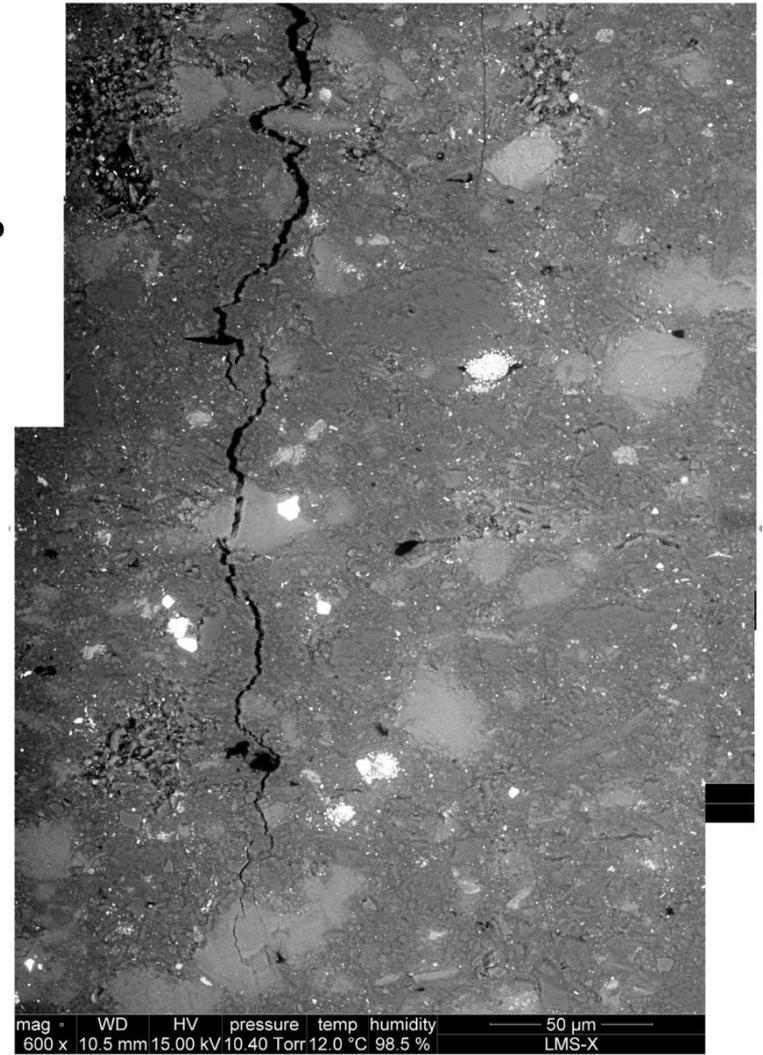
410 N décharge

ESEM+DIC – Essai de fissuration – HR 98%

HR 98,5%
325N

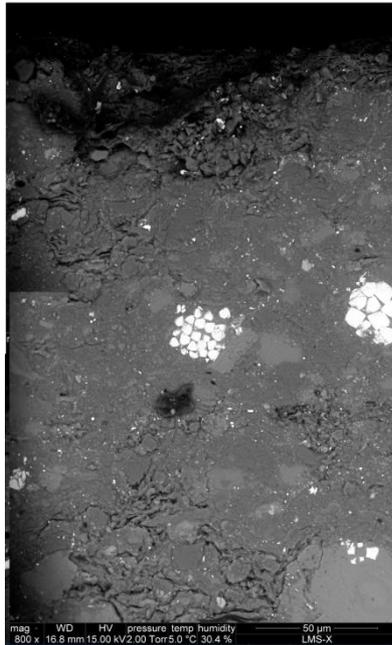


(fissure supérieure)



(fissure inférieure)

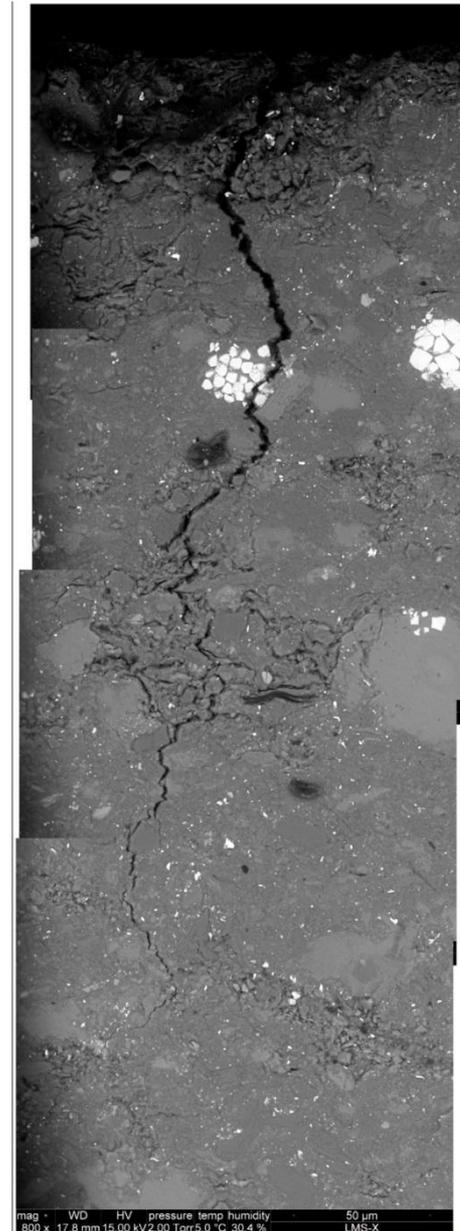
ESEM+DIC – Essai de fissuration – HR 30%



HR 30,4%

- 0 N
- 20 N
- 30 N
- 45 N
- 60 N
- 100 N
- 260 N
- 700 N

(fissure inférieure)



900 N