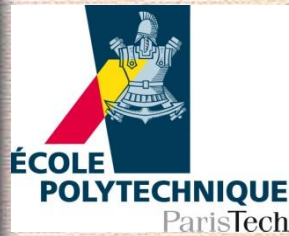


*Prix Pierre Londe 2014*



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

Linlin WANG

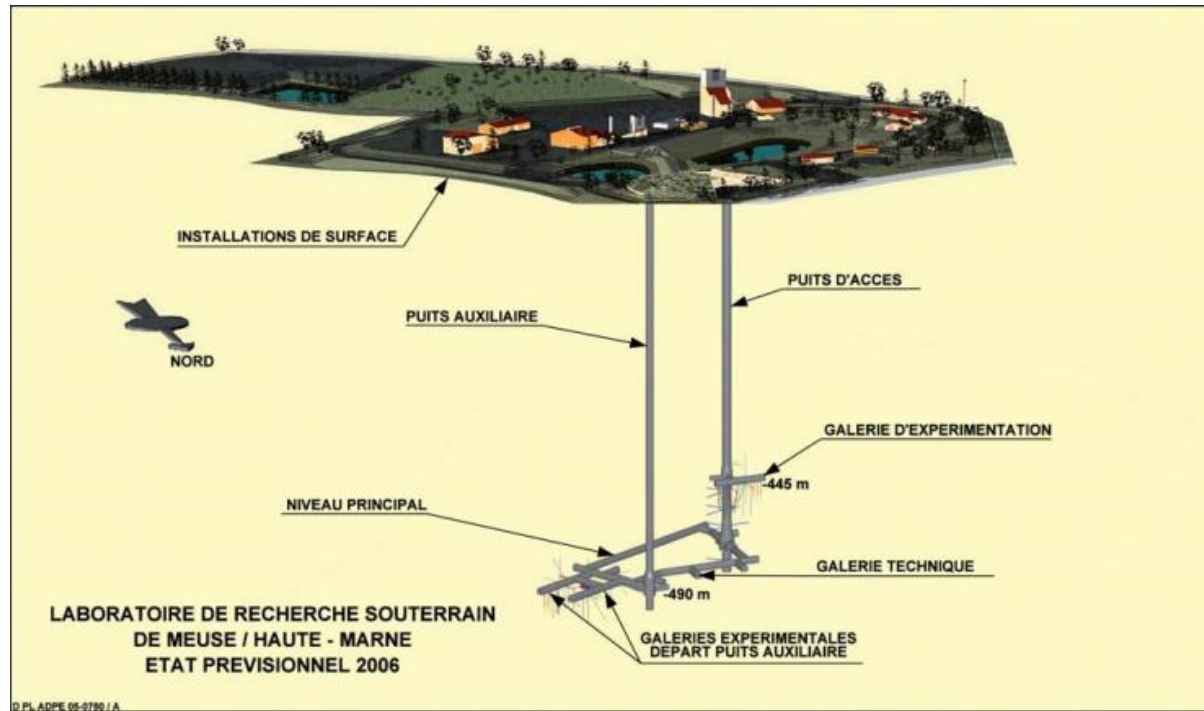
Directeur : Bernard HALPHEN

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

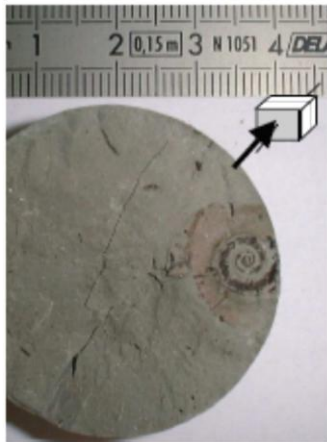
- ❑ La connaissance des mécanismes est absent

- ❑ Fluage sous faible contrainte (Zhang, 2012)

# Comportement hydromécanique

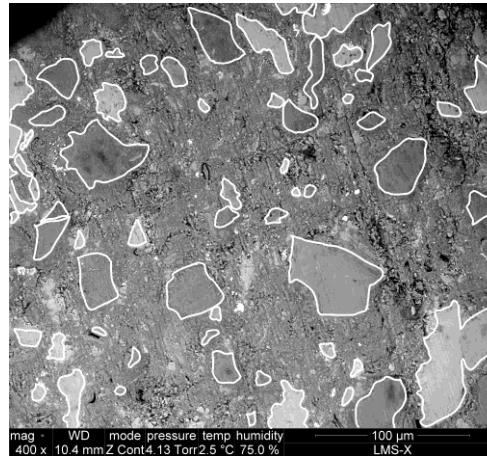
- ☐ Minéraux argileux actifs
- ☐ Hétérogénéité multi-échelle

cm/mm



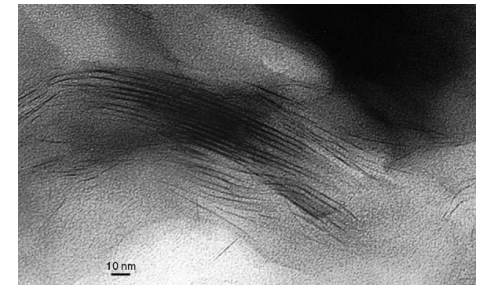
Matériau  
« homogène »

1-100 $\mu$ m



Composite  
inclusion-matrice

nm



(Laird, 2006)

## Objectif :

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

# Plan

---

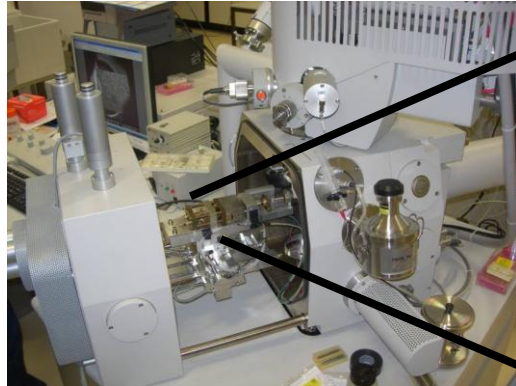
- ❑ Méthodologie expérimentale
- ❑ Comportement sous chargement hydrique
- ❑ Modélisation de la contrainte interne sous chargement hydrique
- ❑ Comportement sous chargement mécanique
- ❑ Conclusions

# Plan

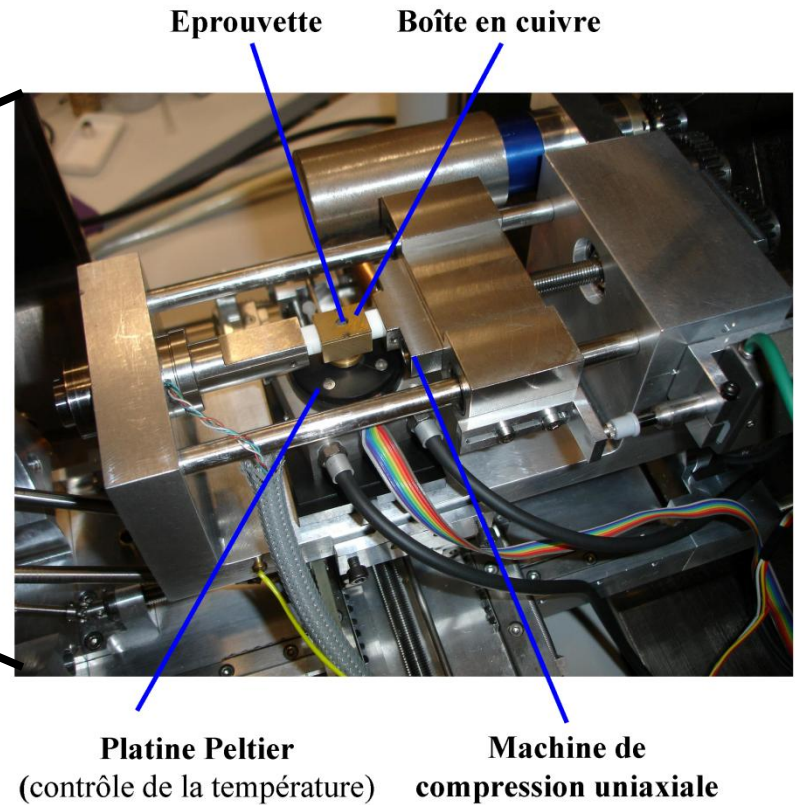
---

- ❑ ***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)



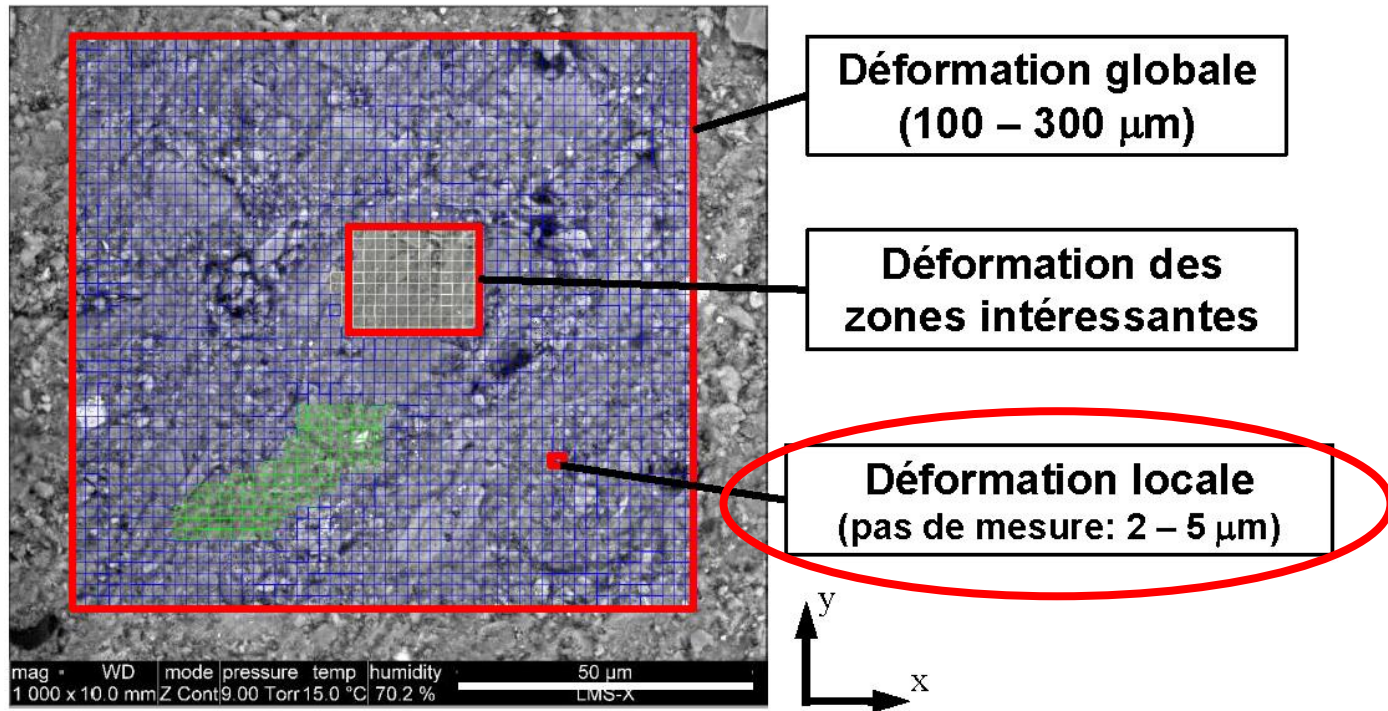
**Chargement hydrique et mécanique combinés**



**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 :  $3 \times 10^{-4}$
- Déformation locale :  $1 \times 10^{-3}$

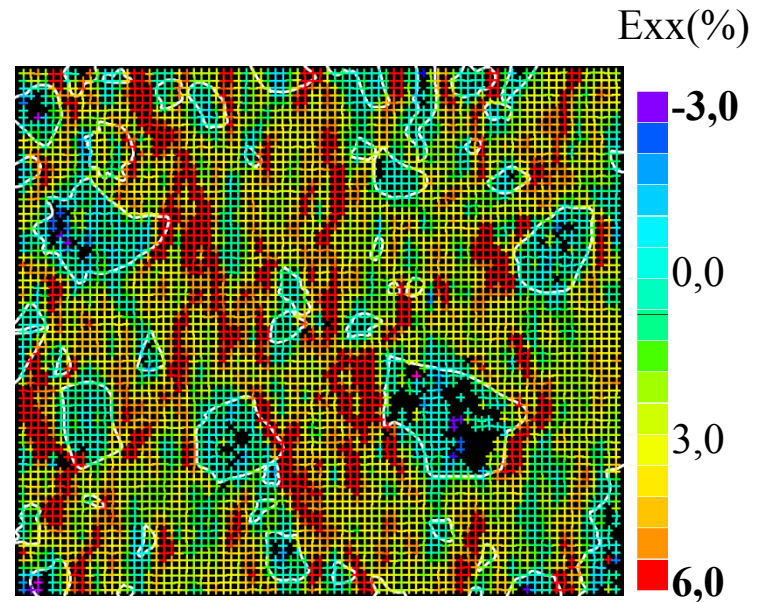
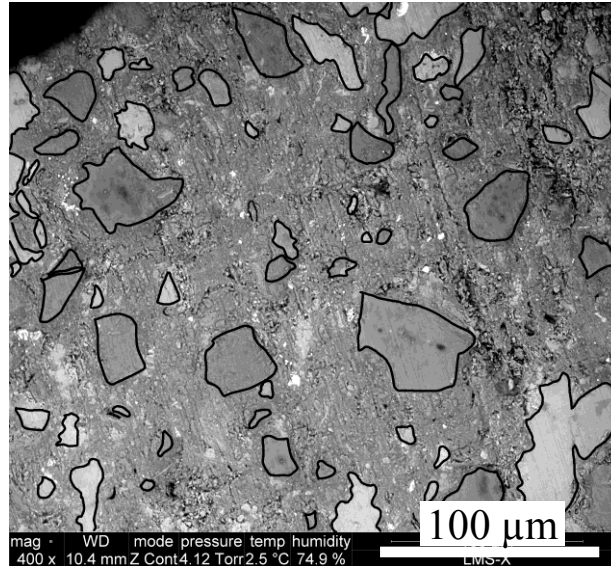
**Wang, L.L.**, Bornert, M., Héripré, E., Chanchole, S., Tanguy, A. 2014. Full-field measurements on low-strained geomaterials using environmental scanning electron microscopy and digital image correlation: improved imaging conditions. *Strain*, DOI: 10.1111/str.12076.

# 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



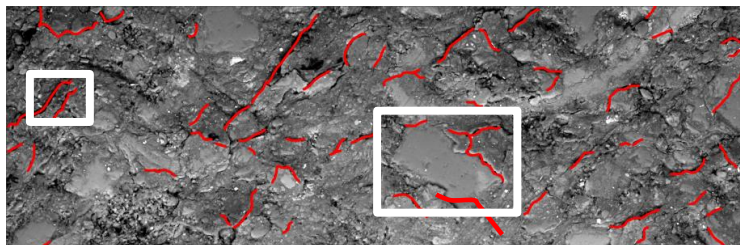
75% - 99%HR

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

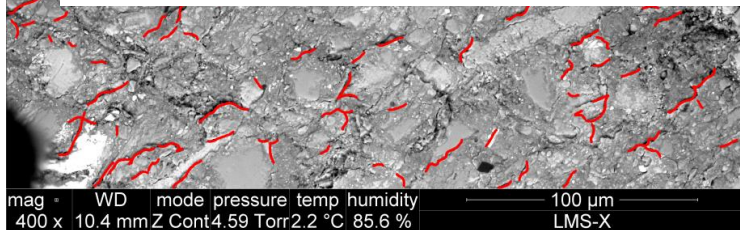
Wang, L.L. et al. Microscale experimental investigation of deformation of argillaceous rocks under hydric loads. *Applied Clay Science* (soumis).

# Endommagements

Microfissuration due à l'humidification

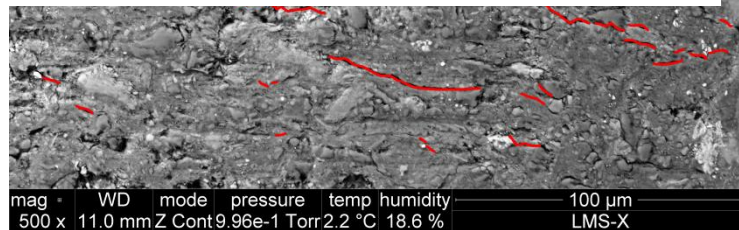
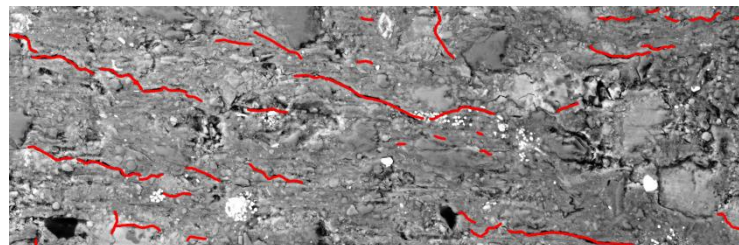


**Pourquoi la microfissuration à l'interface inclusion-matrice apparaît-elle en cas d'humidification, mais pas en cas de séchage ?**



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

Microfissuration due au séchage

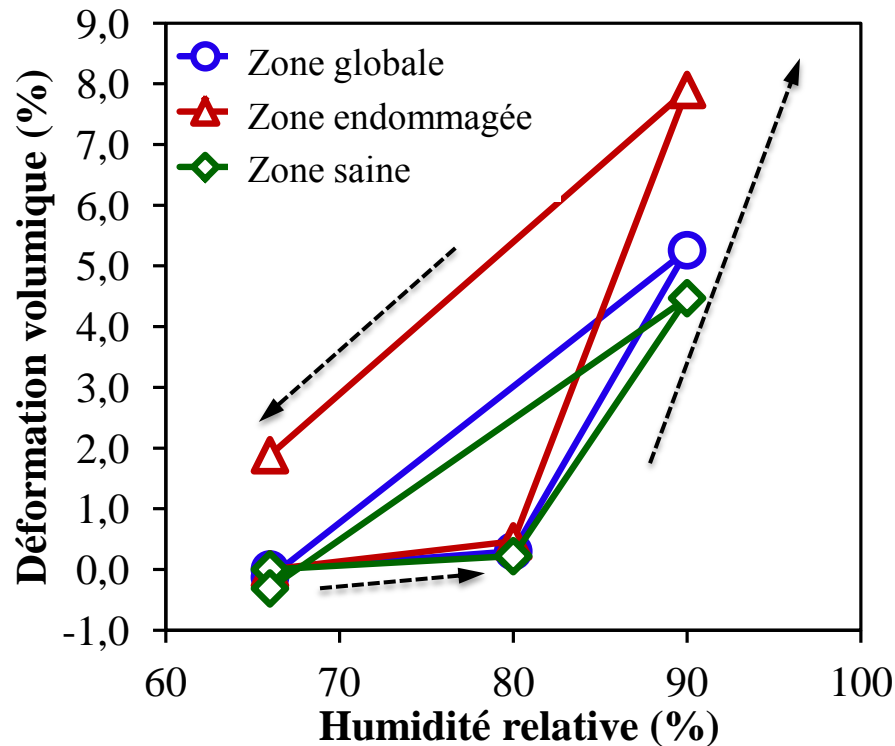


- Aux interfaces inclusion-matrice
- Dans la matrice argileuse
- Dans la matrice argileuse

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

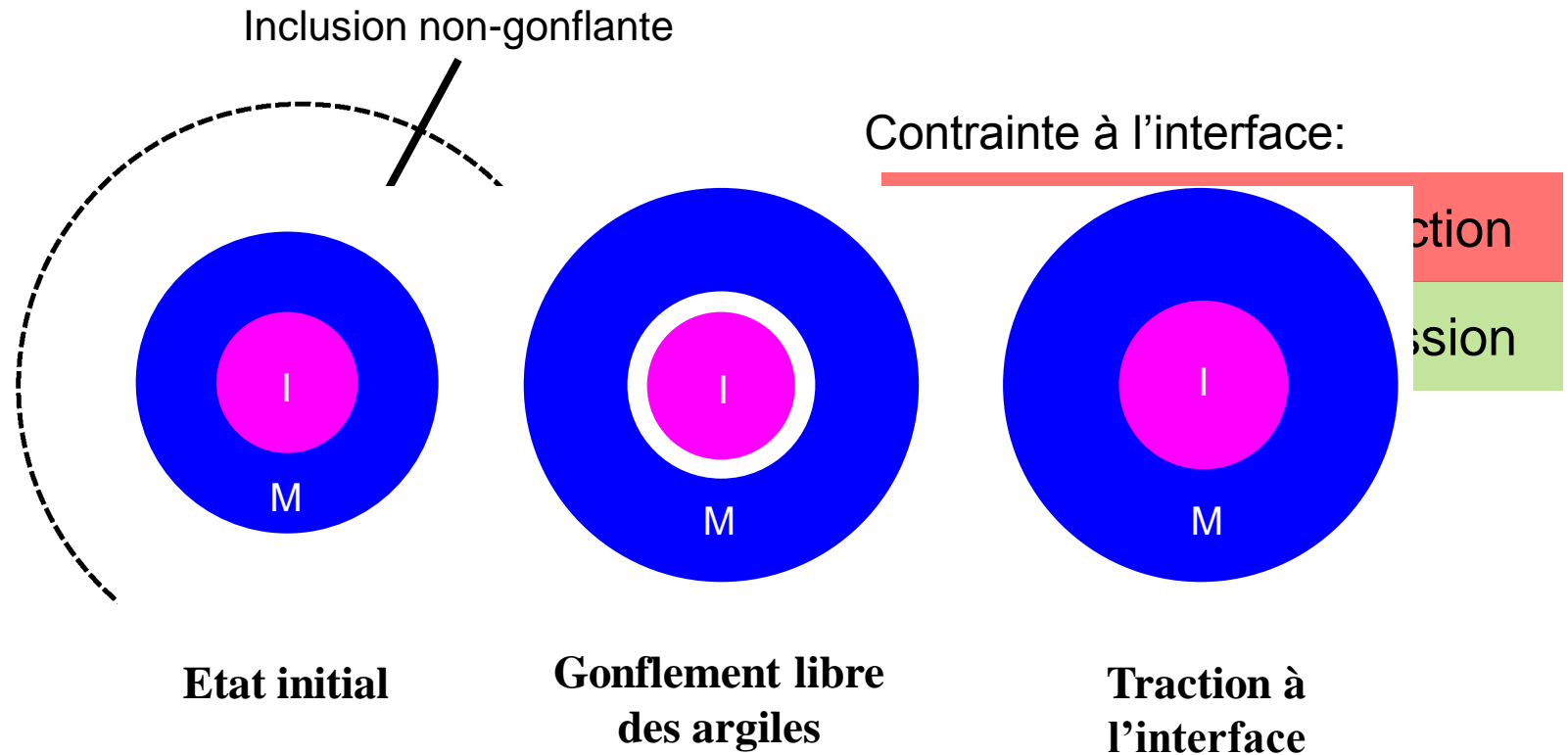
---

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

# Interaction inclusion-matrice

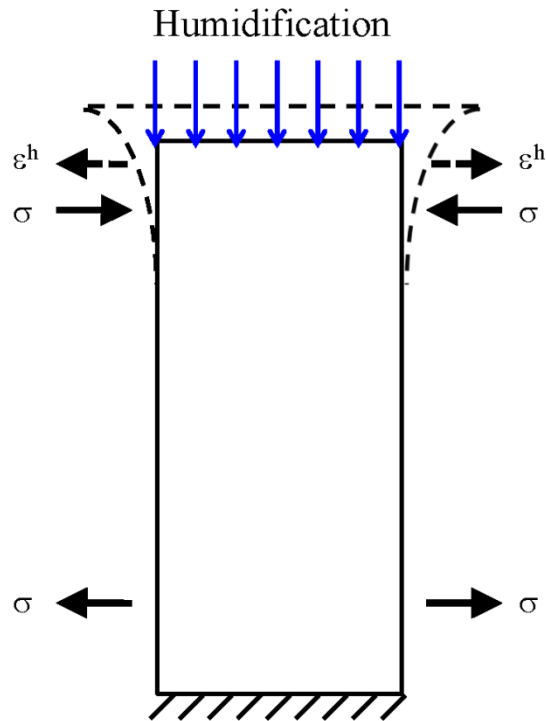
## Observations

- 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



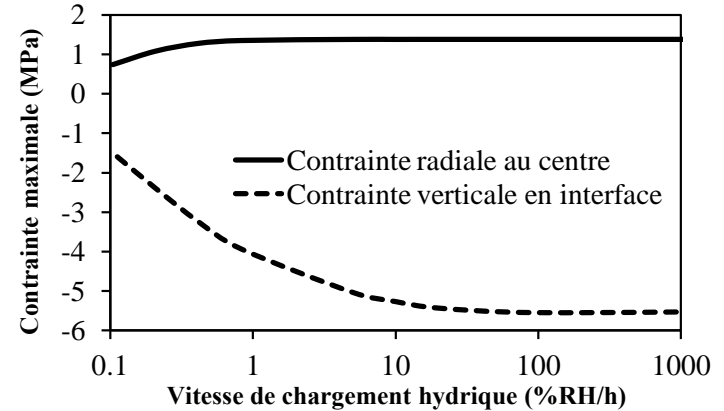
Wang, L.L., Pouya, A., Halphen, B., Bornert, M. 2014. Modeling the internal stress field in argillaceous rocks under humidification/desiccation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* DOI:10.1002/nag.2267.

# Auto-contrainte



Explication du résultat expérimental

▣ Vitesse de chargement hydrique



Auto-contrainte    Interaction inclusion-matrix

Humidification

compression

traction

Séchage

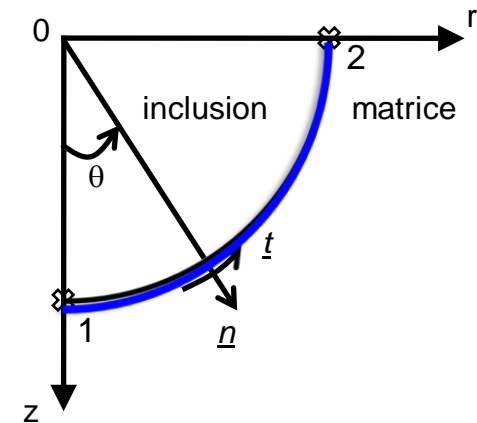
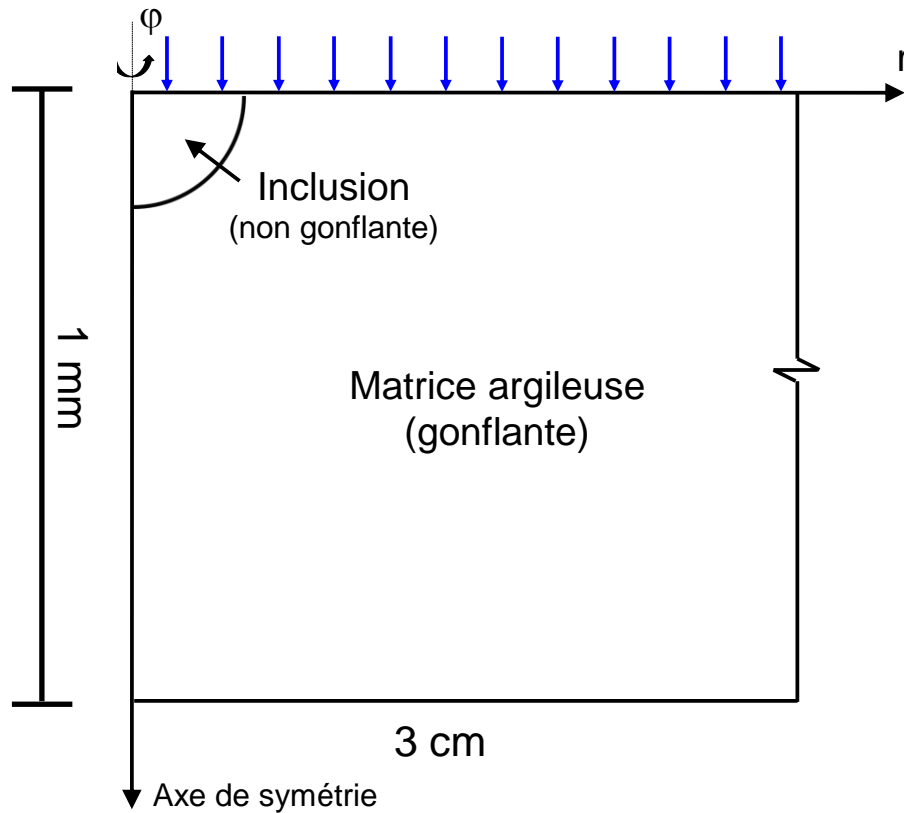
traction

compression

Combinaison des deux effets inverses



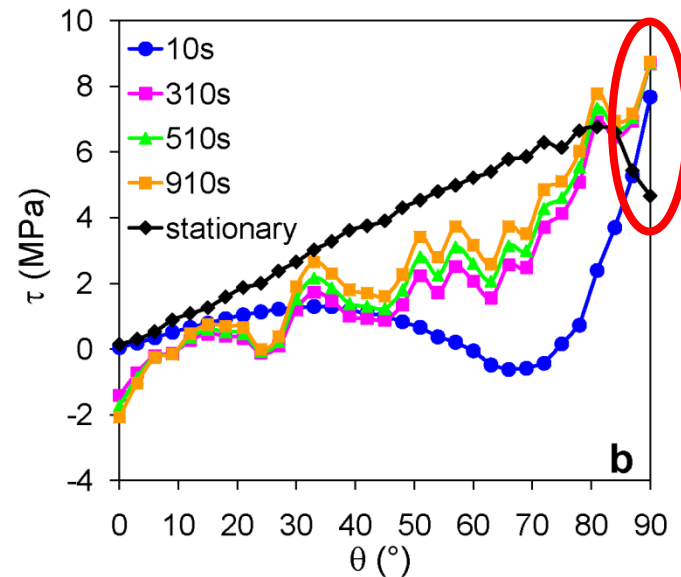
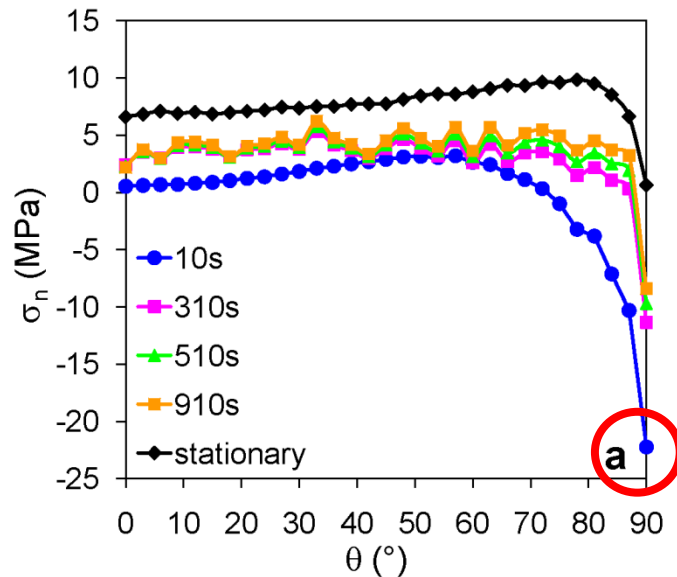
# Simulation du test de humidification



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

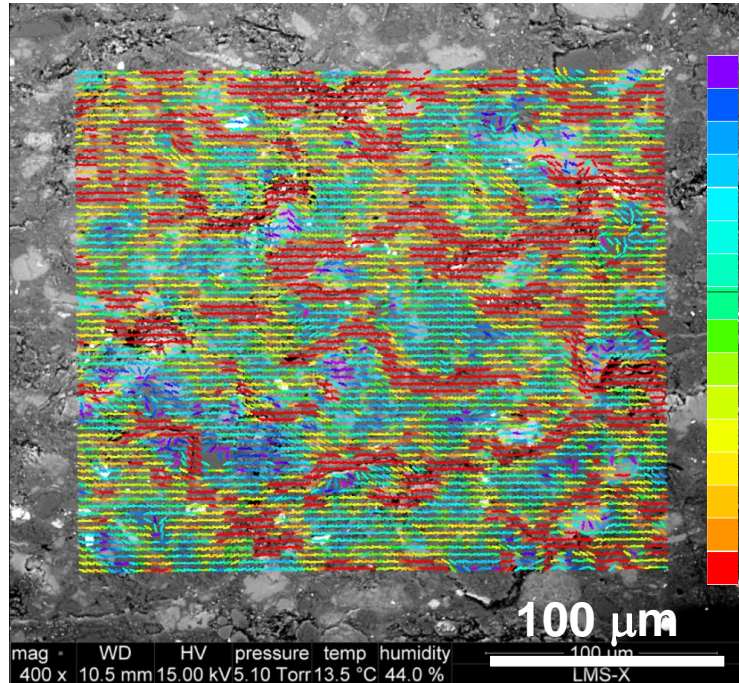
Essai	Conditions H et M	Etat hydrique
Essai n° 1	Etat hydrique constant , chargement mécanique	W= 2.2%
Essai n° 2		W= 3.1% HR=44%
Essai n° 3		W= 3.8% HR=44%
Essai n° 4		W= 5.4% HR=91%
Essai n° 5		W=7.4% HR=98%
Essai n° 6		W=10.1% HR=98%
Essai n° 7	hydrique et mécanique couplé	21%RH, 80%RH, 99%RH

# 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

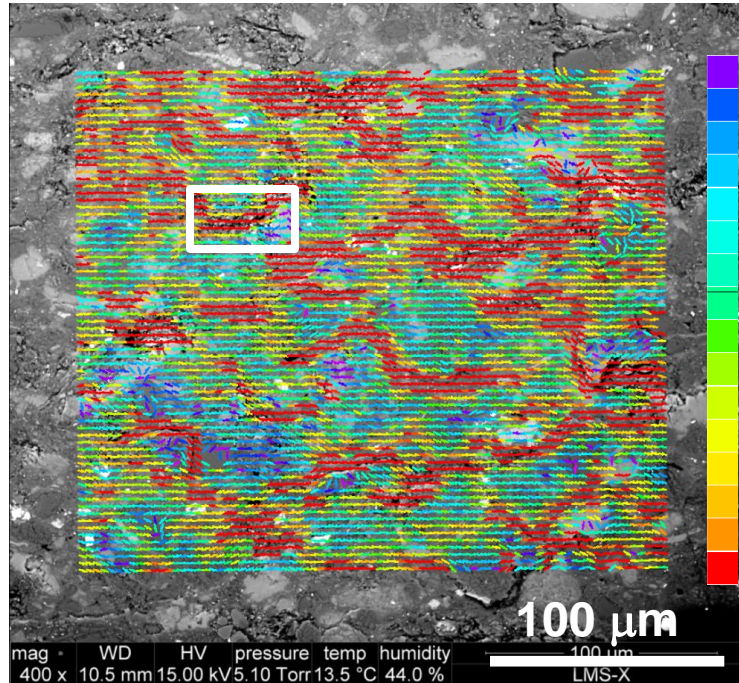


# Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq (%)

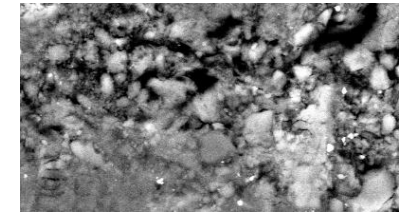
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17,8 MPa)



**Bande horizontale**

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

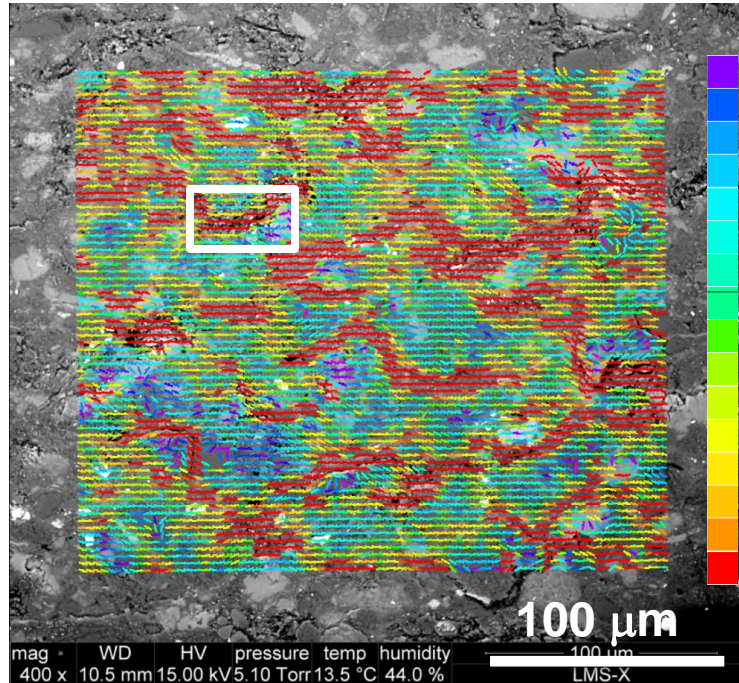


# Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq (%)

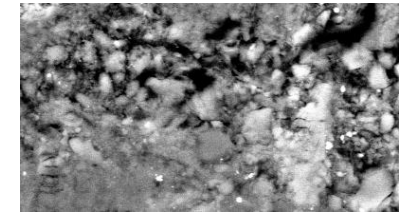
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17,8 MPa)



**Bande horizontale**

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

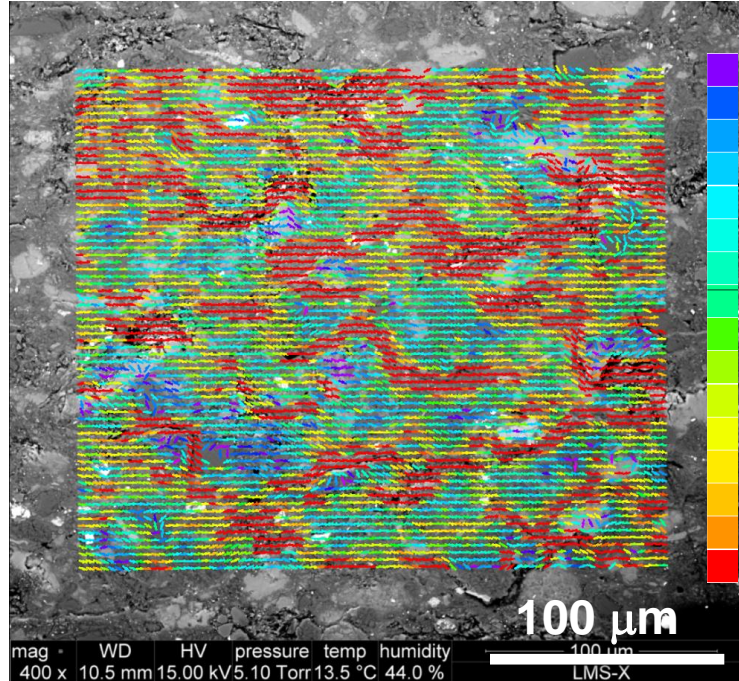


# Mode de déformation

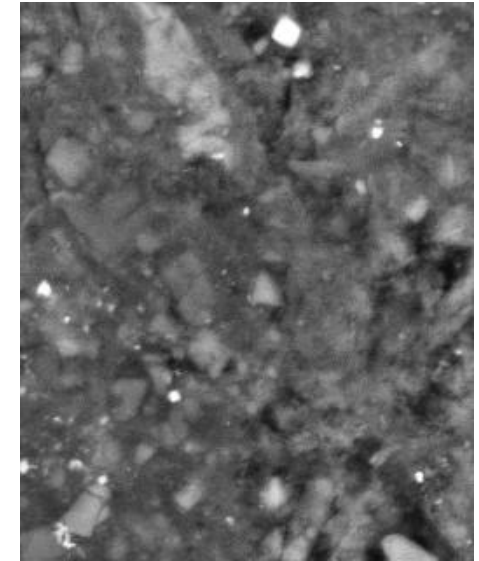
❖ Essai #3 (w=3,8%)



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**

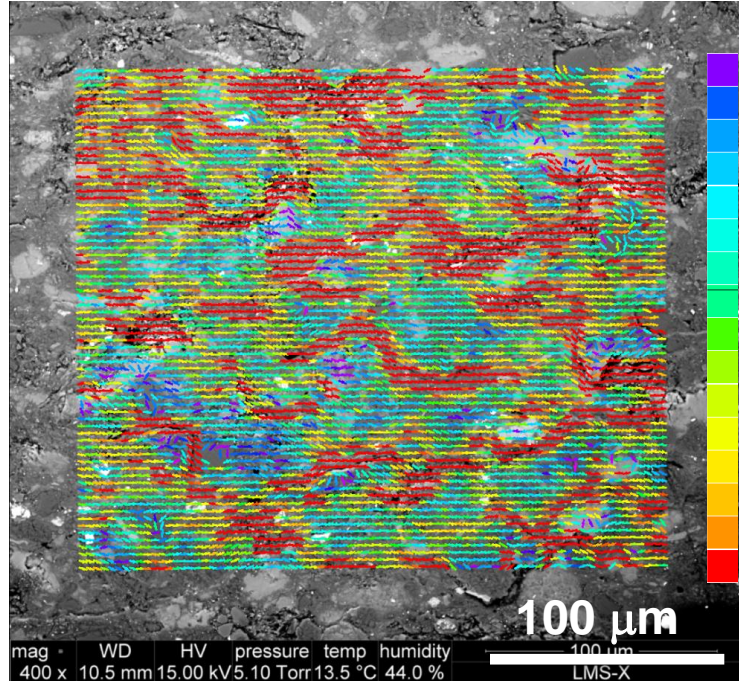


# Mode de déformation

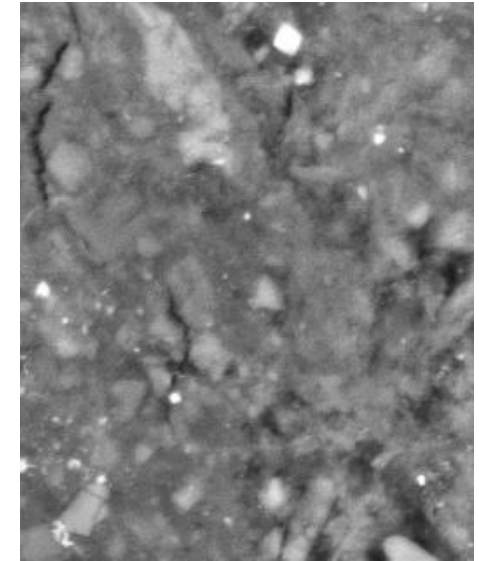
❖ Essai #3 (w=3,8%)



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**

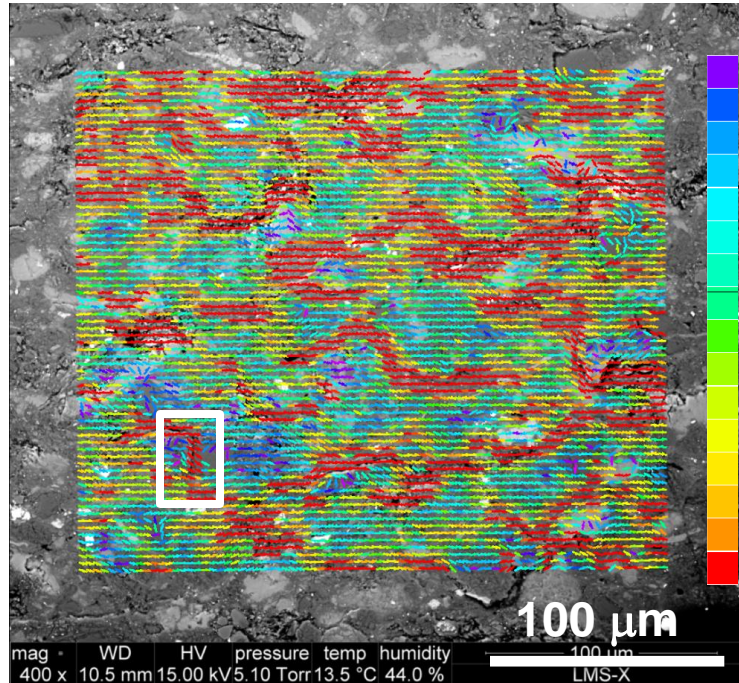
**Cisaillement**

# Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq

(%)

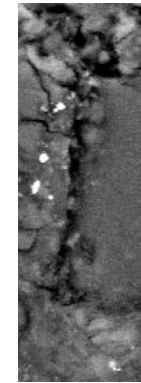
0.0

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**

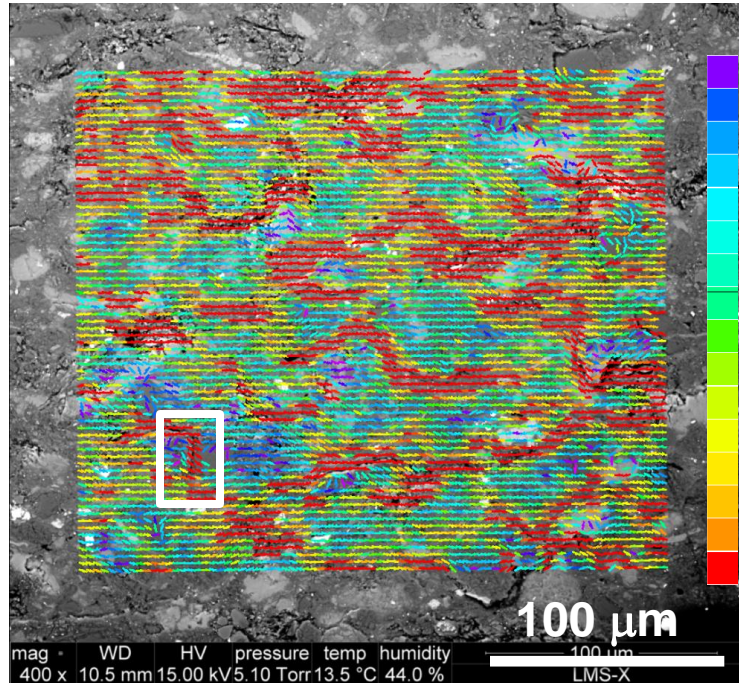
**Microfissures sub-parallèles  
à la charge**

# Mode de déformation

❖ Essai #3 (w=3,8%)



chargement



Eeq

(%)

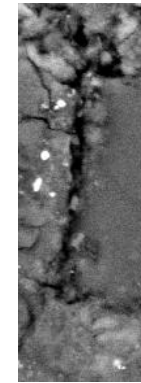
0.0

0.7

1.4

2.1

(0 – 17.8 MPa)



**Bande horizontale**

**Bande inclinée**

**Bande verticale**

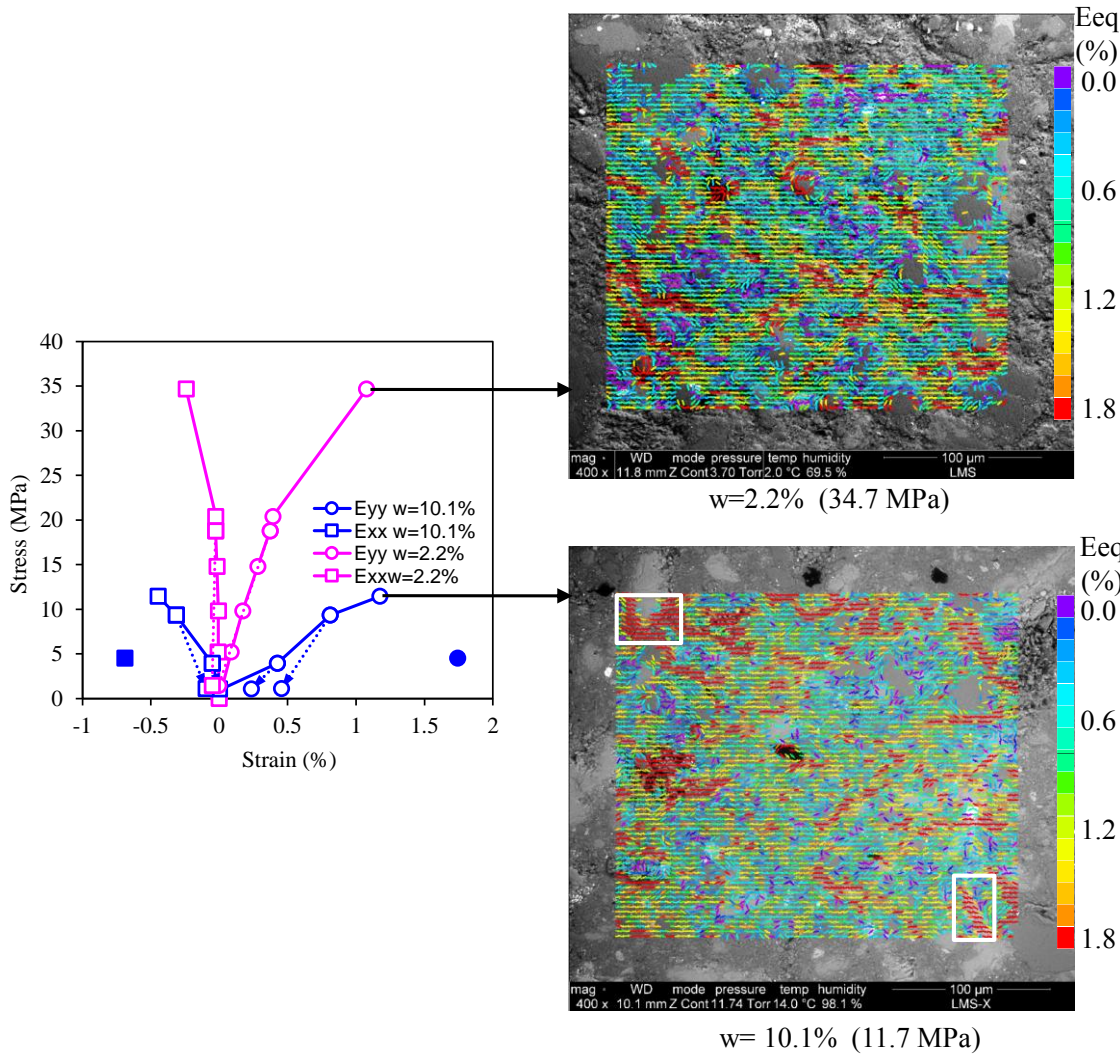


**Compaction des macropores  
et des fissures pré-existants**

**Cisaillement**

**Microfissures sub-parallèles  
à la charge**

# Comportement mécanique



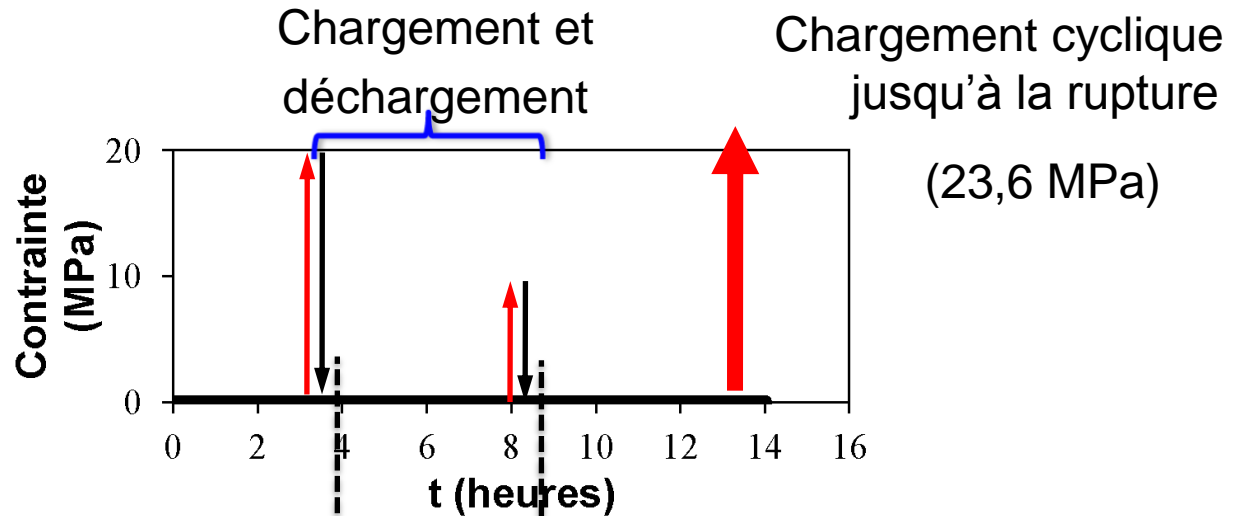
44%HR (test #3)



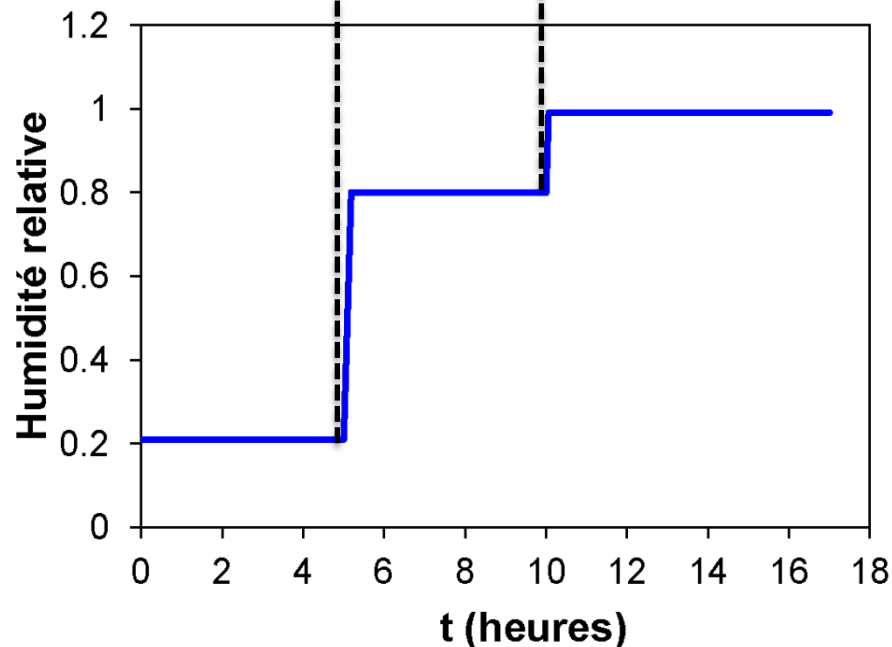
99%HR (test #7)

# Chargement hydrique et mécanique combinés (essai #7)

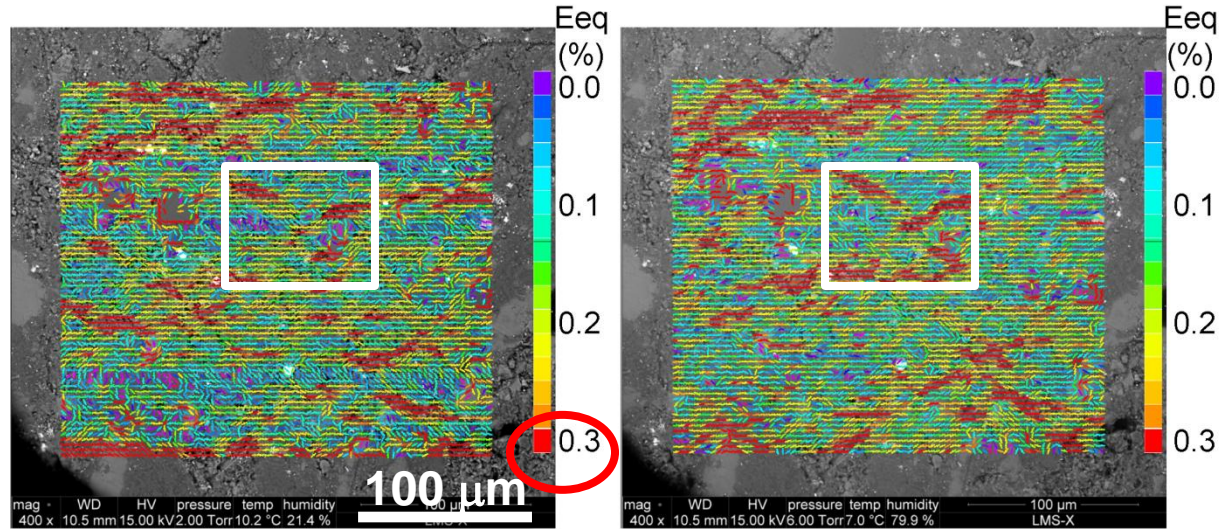
Chargement  
mécanique



Chargement  
hydrique

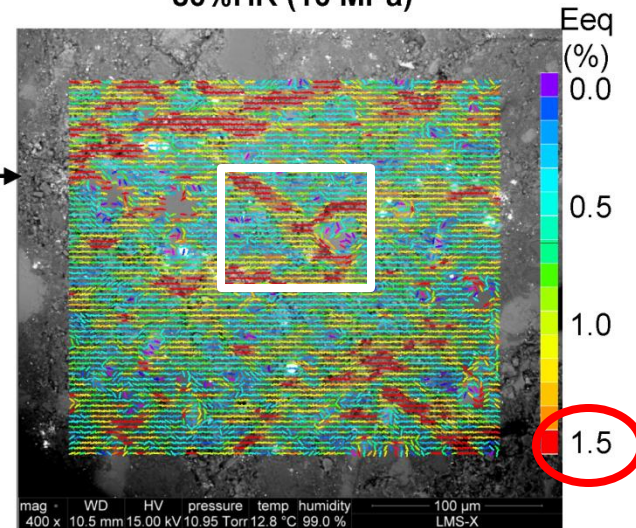
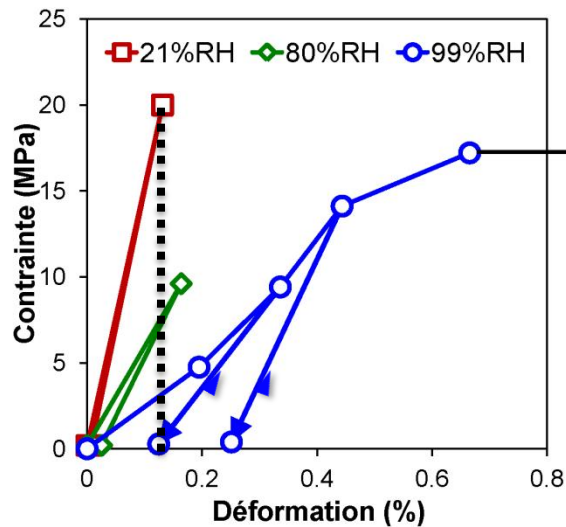


# Influence de l'humidité sur le comportement mécanique



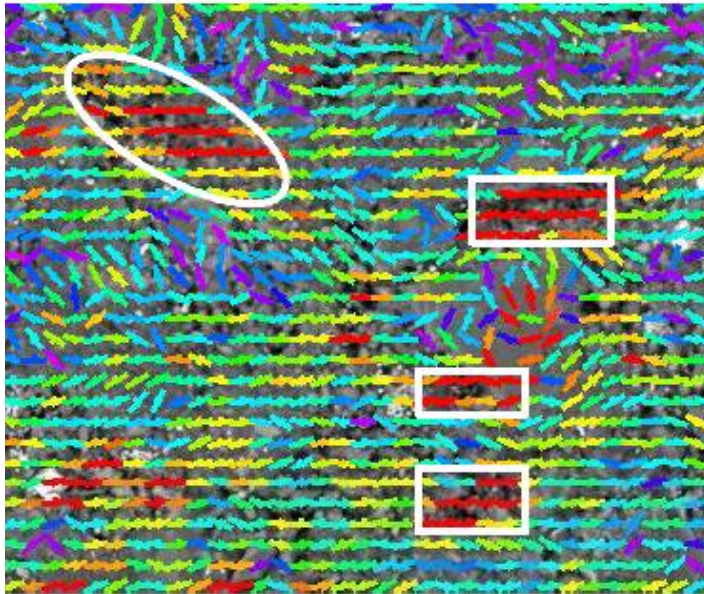
21%HR (20 MPa)

80%HR (10 MPa)

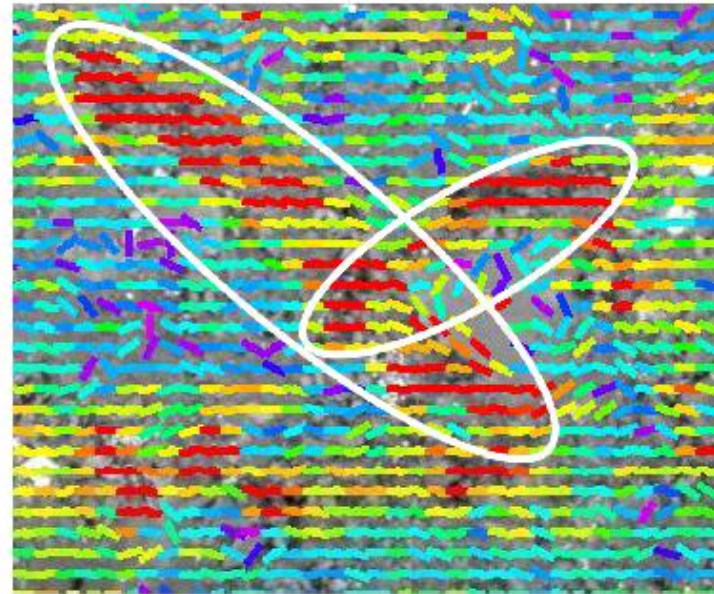


99%HR (17 MPa)

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



21%HR



99%HR

Humidité relative



- ❑ Le module de cisaillement diminue
- ❑ Le 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**

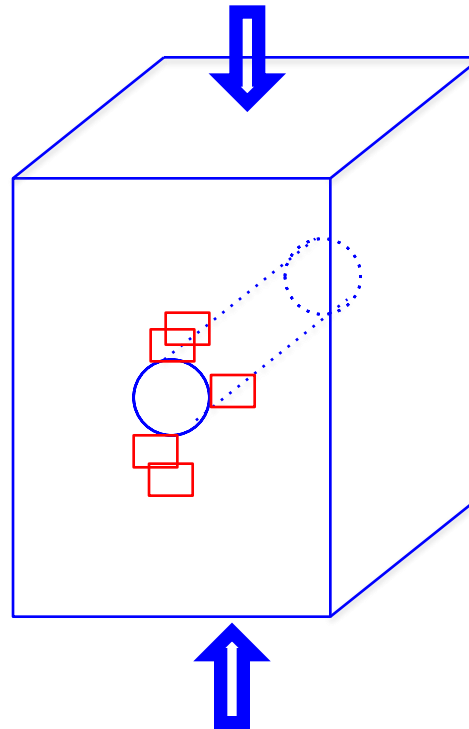
## ESEM+DIC – Essais de fissuration


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

Compression in situ sous HR contrôlée

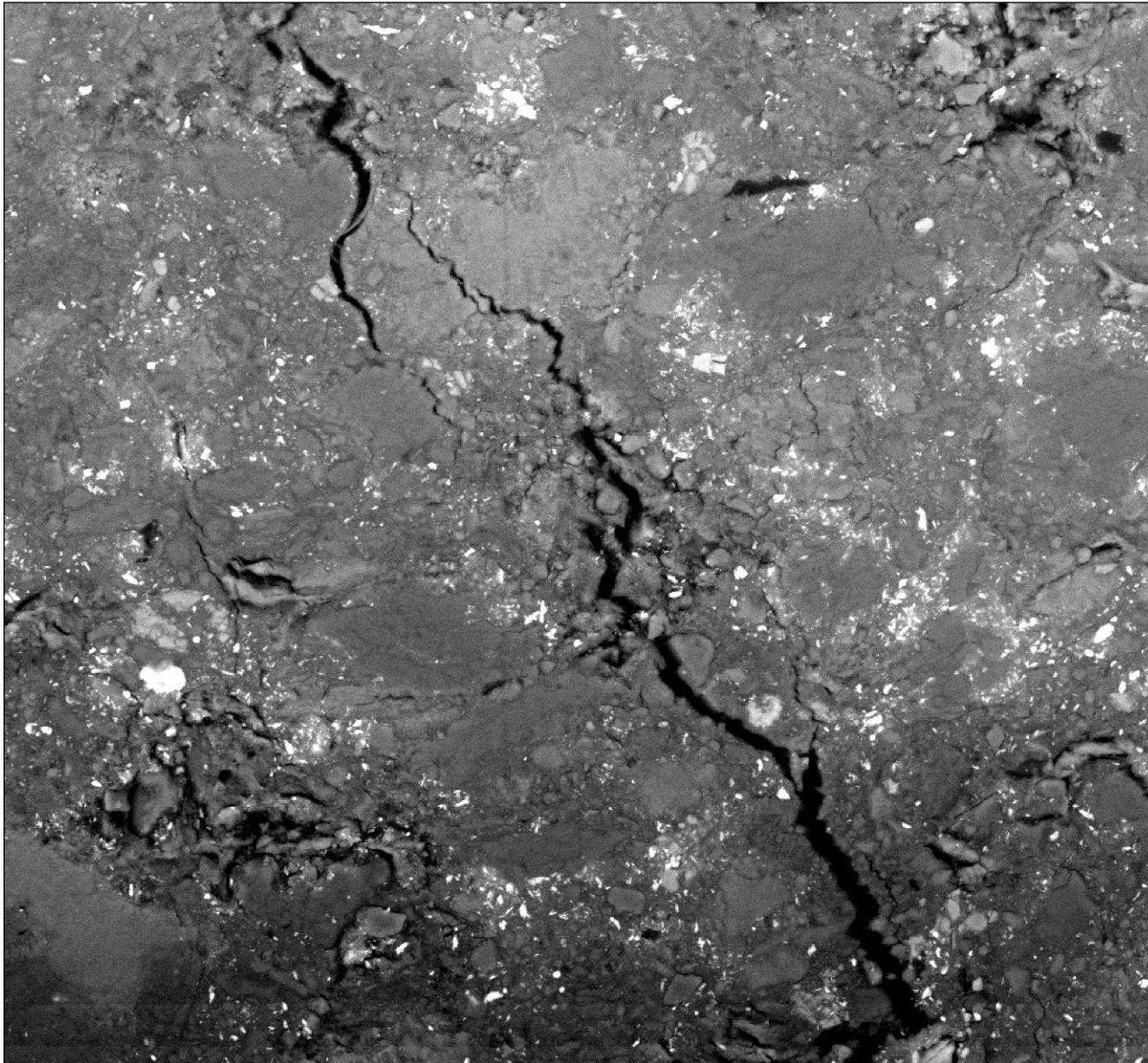
1 éch. 30,4% (5° C, 2 Torr) et 2 éch. 98,5% (12° C, 10,4 Torr)

(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

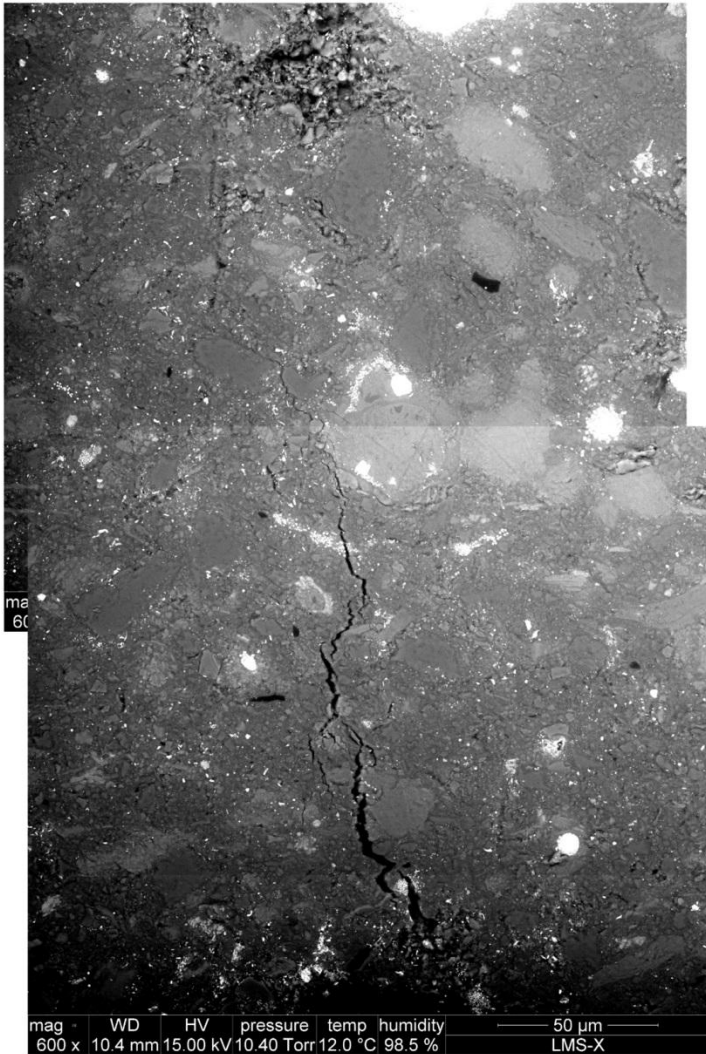
350 N recharge

410 N

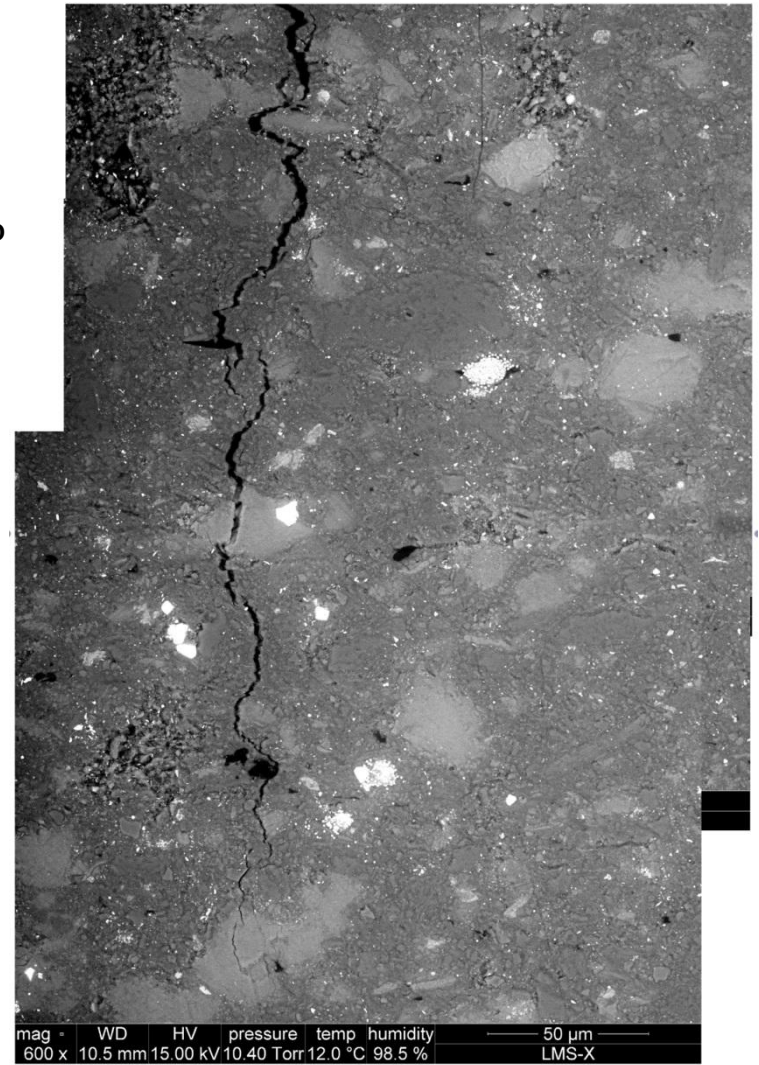
410 N décharge

## ESEM+DIC – Essai de fissuration – HR 98%

HR 98,5%  
325N

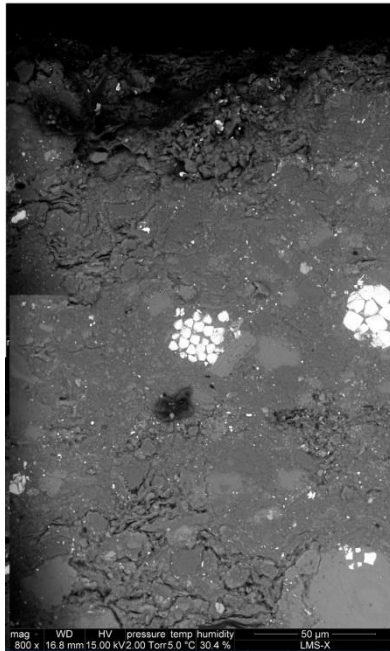


(fissure supérieure)



(fissure inférieure)

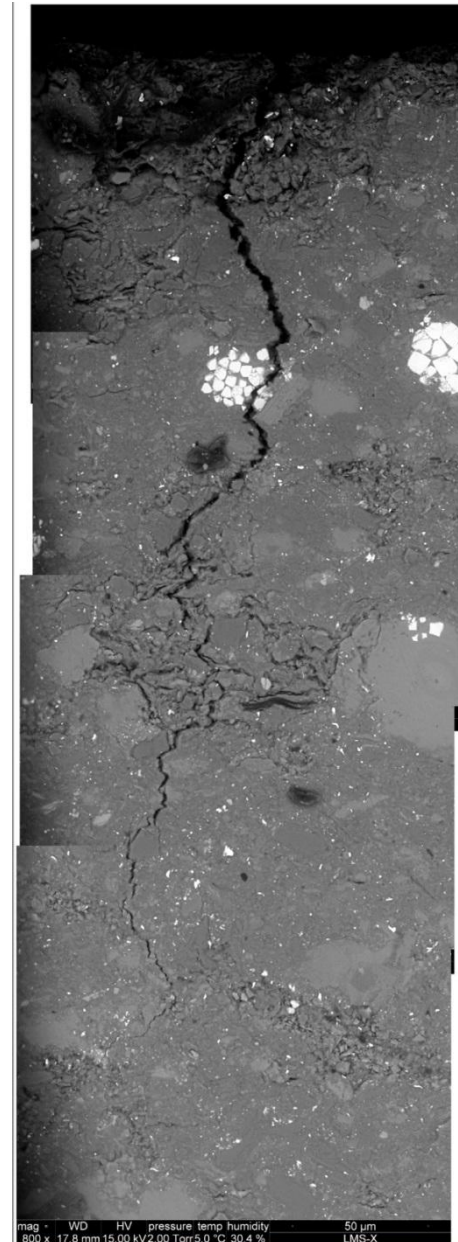
# ESEM+DIC – Essai de fissuration – HR 30%



HR 30,4%

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

(fissure inférieure)



900 N