

Localisation des déformations : cas d'une roche multi-phasées (argilite) à différentes saturations imposées

F. Valès, M. Bornert, H. Gharbi, J.-C. Eytard, D. Nguyen Minh

Laboratoire de Mécanique des Solides UMR7649

Ecole Polytechnique - Palaiseau - France



Étude supportée par ATIP



"Micromécanique des Matériaux Géologiques sous sollicitation THM" et



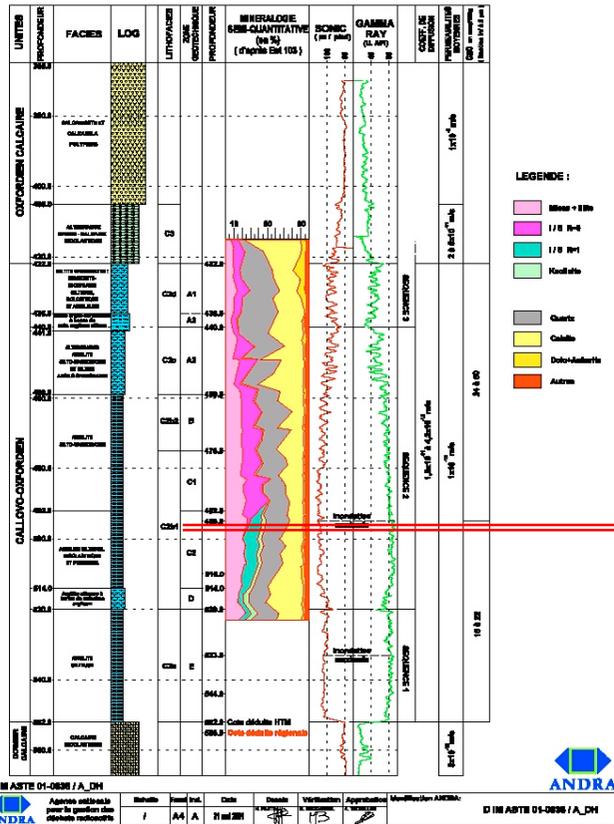
- Type de roche et contexte général de l'étude
- Techniques : principe, montages et limitations :
 - Extensométrie optique (Digital Image Correlation)
 - Émission acoustique
- Exemples : suivi des déformations et endommagement
 - succion pure
 - compression uniaxiale à différents degrés de saturation
- Conclusions et perspectives

- **Type de roche et contexte général de l'étude**
- Techniques : principe, montages et limitations :
 - Digital Image Correlation
 - Émission acoustique
- Exemples : suivi des déformations et endommagement
 - succion pure
 - compression uniaxiale à différents degrés de saturation
- Conclusions et perspectives

1 – Roche type : argilite de Meuse/Haute-Marne

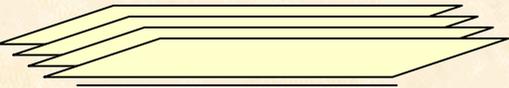
Tome 4 Faciès lithologiques du Callovo-Oxfordien argileux Figure 1.1-01

(Profondeurs à l'aplomb du puits d'accès principal du laboratoire)



- sondage : EST 205
2 cellules T1 contiguës [5659 - 5655]
profondeur : 481m
- données physiques :
taux d'argile : 45%,
minéraux autres : CaCO₃: 26,8%, SiO₂: 25%
teneur en eau : 6,7%
porosité Hg : 15,8% (séchage étuve)
vitesse V_p : 2800m/s
- stratification sub-horizontale

Matériau multi-échelles et multi-hiérarchisé



qq Å au μm

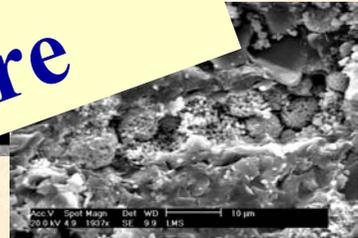
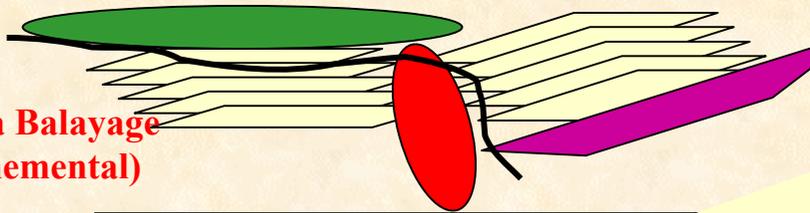
Microscope Électronique à Transmission ...

échelle nano : feuillets et amas de feuillets

Microscope Optique

Microscope Électronique à Balayage
(conventionnel et environnemental)

Accélérateur (ESRF, SOLEIL ...)



du μm au ...

échelle micro/méso : ... argileuse + renforts minéraux

... (microfissures ...)

Echelles investiguées au laboratoire

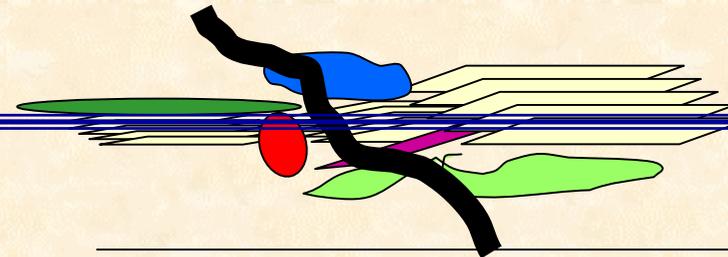


réseau de fissures sub
horizontales en front de taille
d'origine hydrique

1m



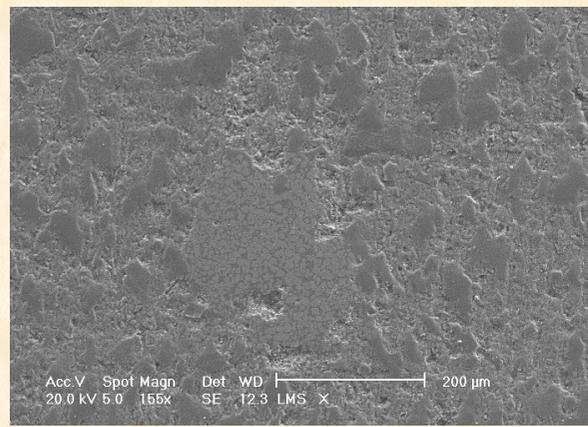
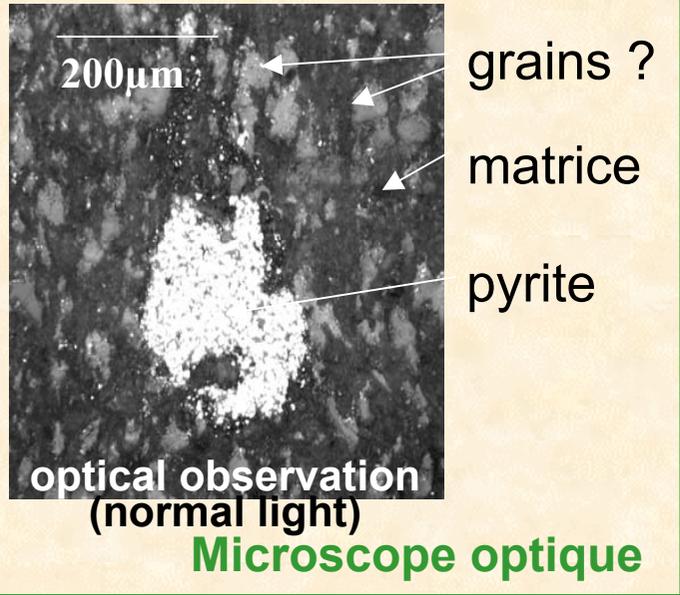
15mm



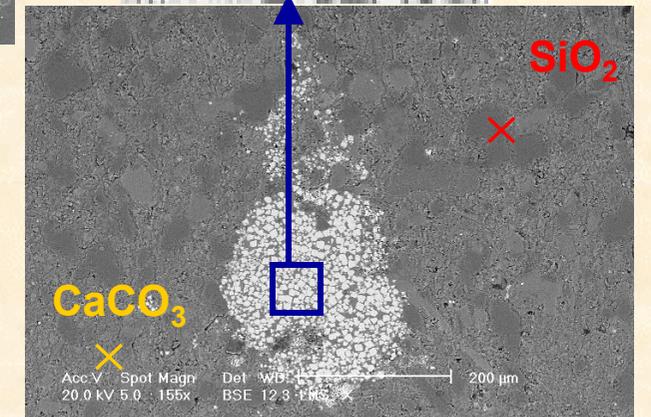
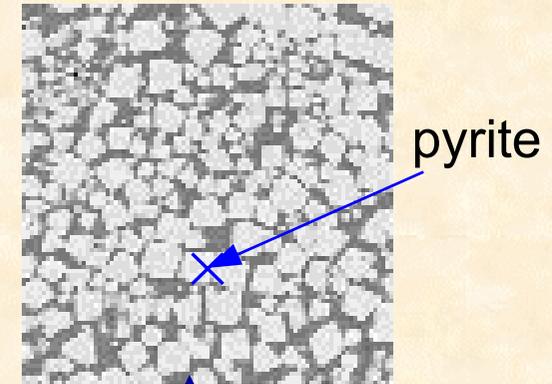
du cm au massif

échelle macro : composite + hétérogénéités locales (fissures, failles ...)

Organisation microstructurale du cm au micron (surface polie à sec)

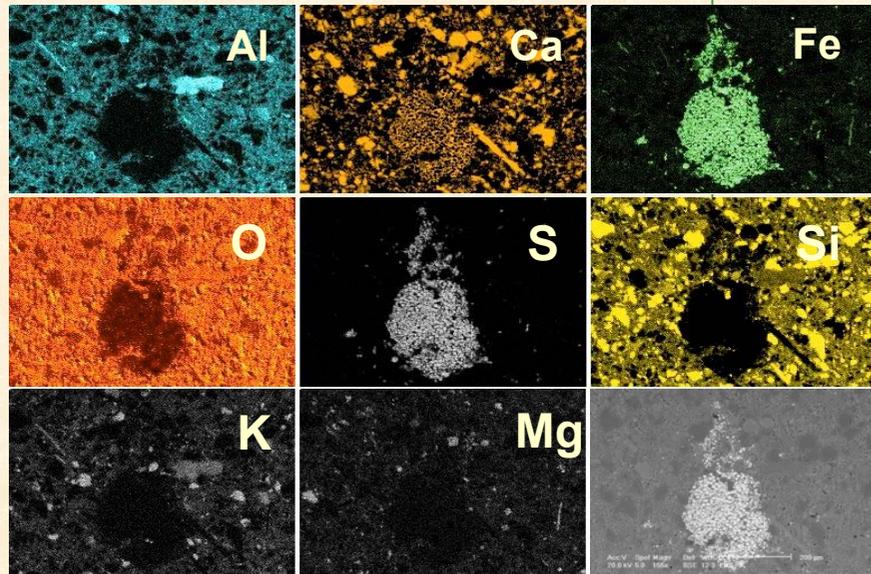


Secondary Electrons (SE)



Back Scattered Electrons (BSE)

Microscope Electronique à Balayage (MEB)

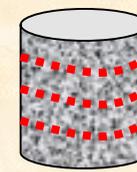


Cartographie chimique (EDS)

Argilite = microstructure composite
de grains de minéraux dans une
matrice argileuse

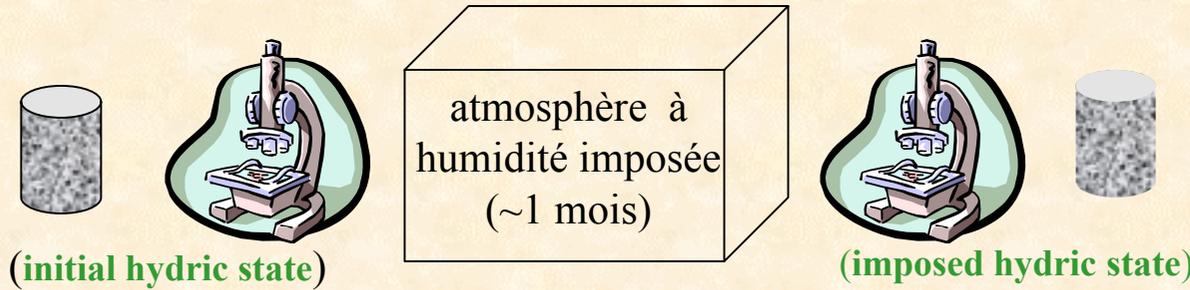
(taille typique des grains : 10-50μm)

Méthodologie générale : suivre les déformations/endommagements sans perturber



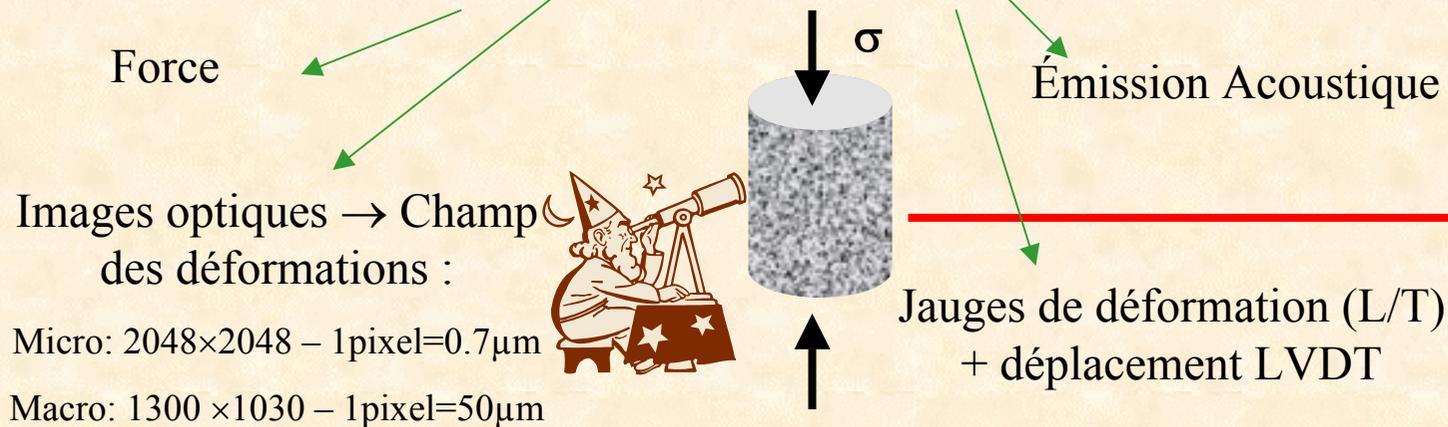
$\theta = 90^\circ$
état hydrique de réception

Imposition du degré de saturation avec suivi de l'évolution de paramètres physiques



- données en continu: ΔM , $\Delta \varepsilon_L$, $\Delta \varepsilon_T$
- données ante/post : ΔV_L ,
+ images optiques : évolution microstructure + champ des ε

Caractérisation mécanique à saturation imposée avec acquisition de données en continu



Caractérisation post-mortem

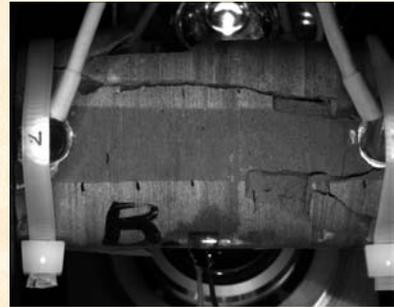
teneur en eau
porosimétrie
calcimétrie

- Type de roche (argilite) et contexte général de l'étude
- **Techniques : principe, montages et limitations :**
 - **Digital Image Correlation**
 - **Émission acoustique**
- Exemples : suivi des déformations et endommagement
 - succion pure
 - compression uniaxiale à différents degrés de saturation
- Conclusions et perspectives

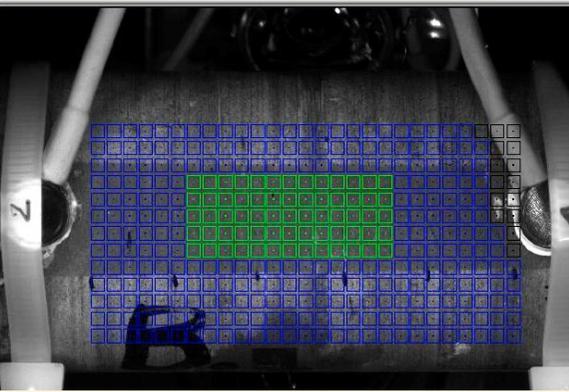
i. Extensométrie optique : champ de déformation à partir Digital Image Correlation

1- Acquisition d'images digitales au cours de la sollicitation

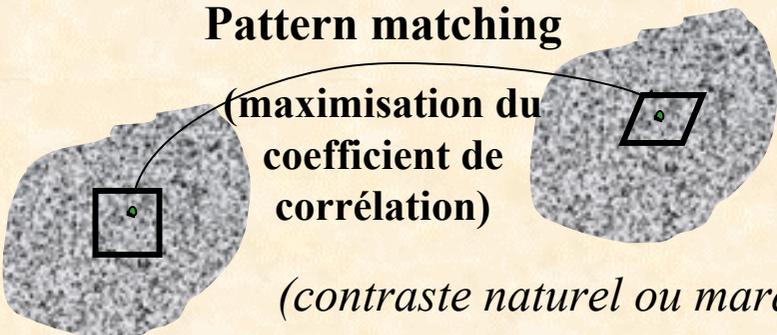
(~1image/s)



temps t_0 : image référence temps t : image déformée



2 -Digital Image Correlation

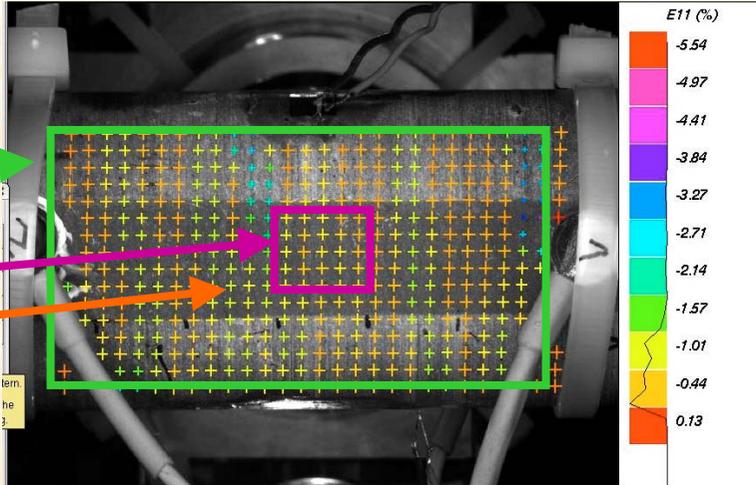


→ champ des déplacements

3 – Calcul des déformations

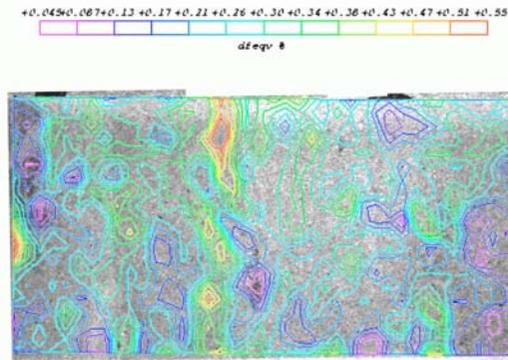
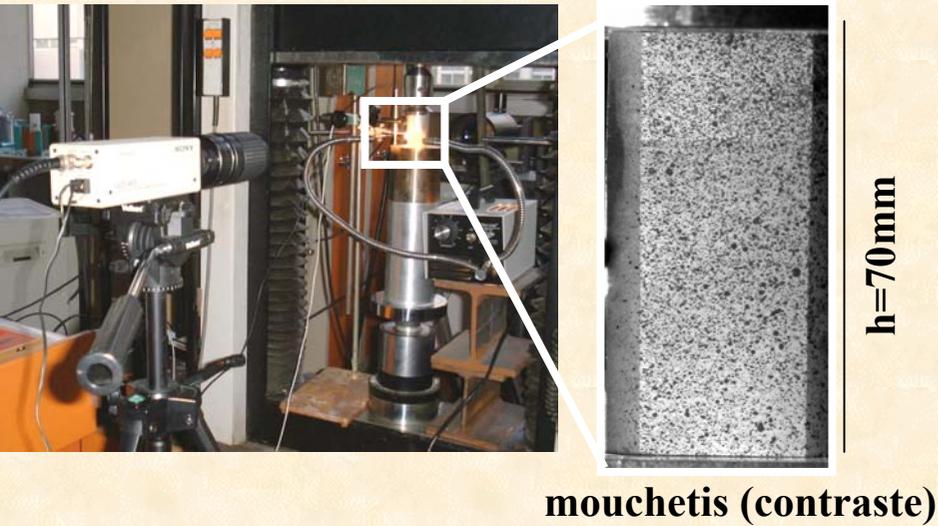
$\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{12}, \epsilon_{is}, \epsilon_{qq} \dots$
 à différentes échelles :

- global
- zone sélectionnée
- local

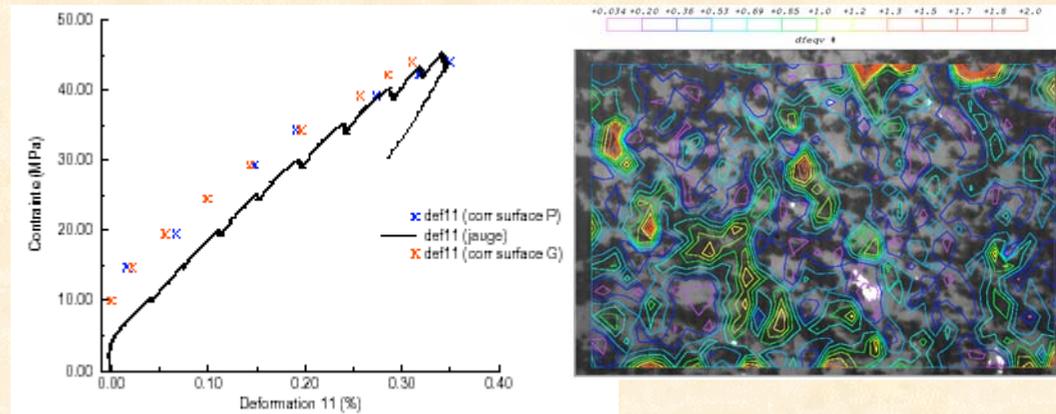
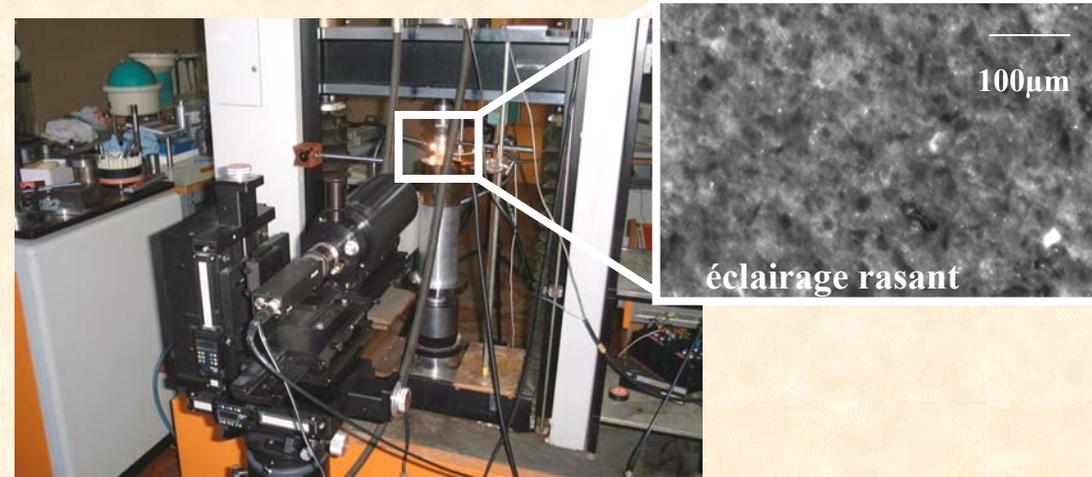


Montages préliminaires (2000) : deux échelles d'investigation - compression uniaxiale

échelle de l'éprouvette

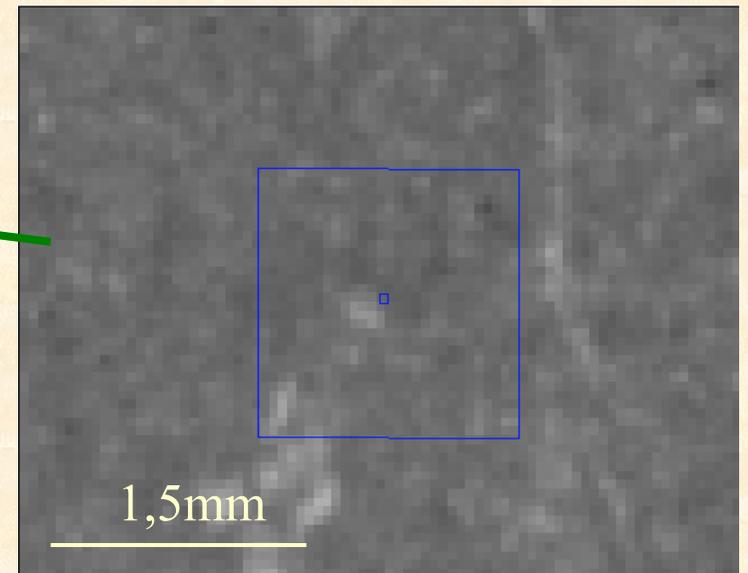
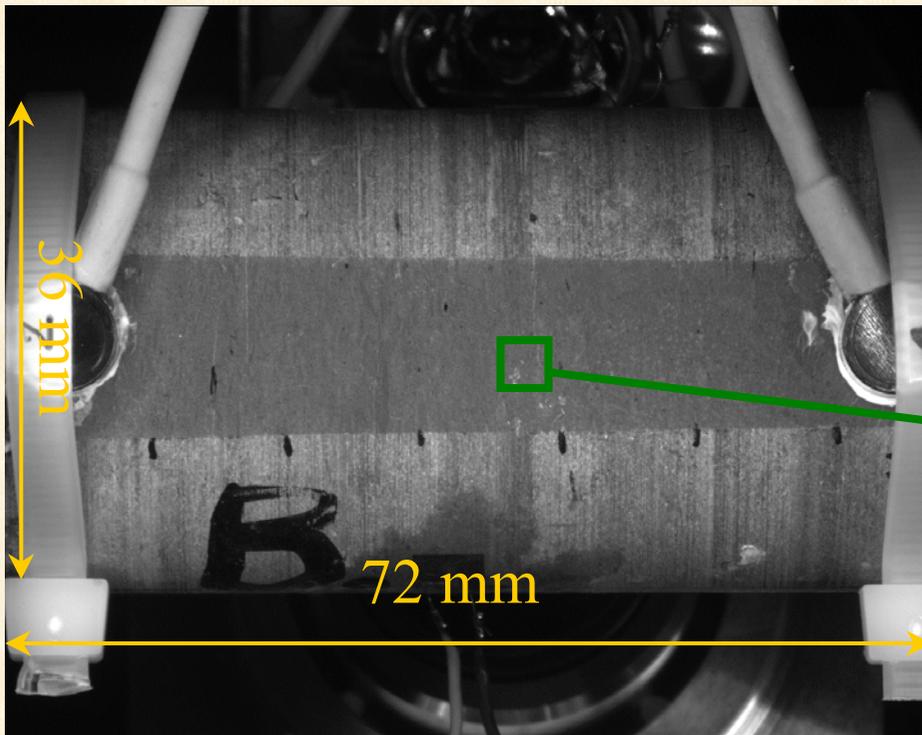
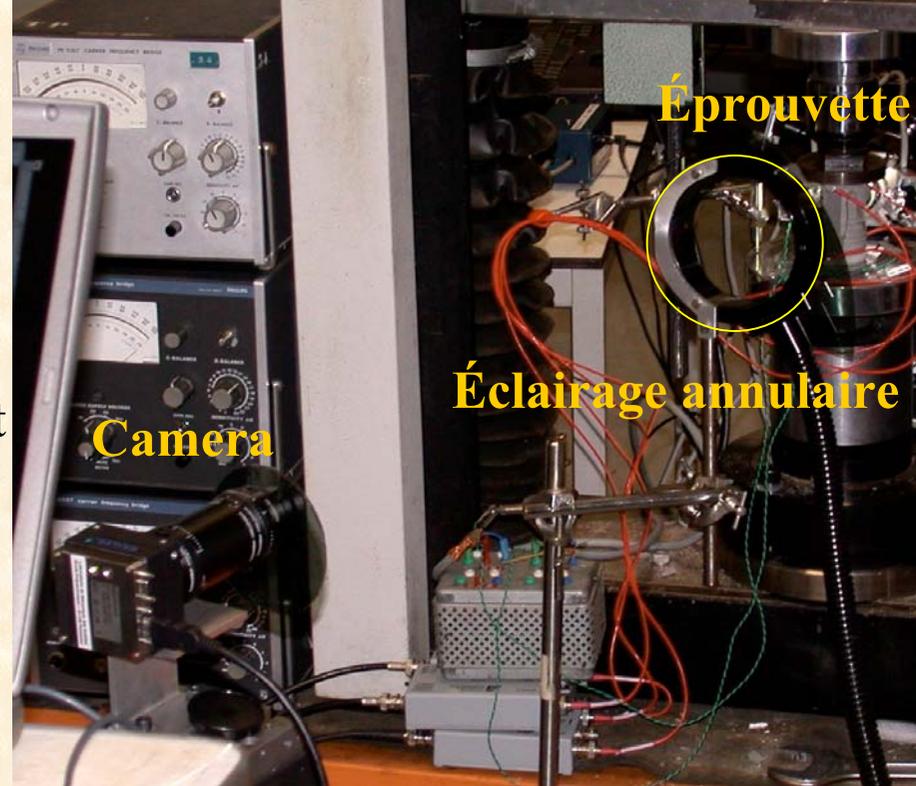


échelle de la microstructure



aux deux échelles, fortes hétérogénéités des déformations (surtout en fin d'essai) localisées dans phase argileuse mais relaxation importante pour la prise d'images ; en local, faible résolution (1pixel~5µm) ; contraste naturel et éclairage insuffisants pour les optiques utilisées.

Macroscale: à l'échelle de l'éprouvette
objectif standard et éclairage annulaire
1300x1030pixels, 8bits digital camera
1pixel = 50 μ m
taille du domaine de calcul des déf. 2mm
contraste naturel (microstructure polie à sec) suffisant



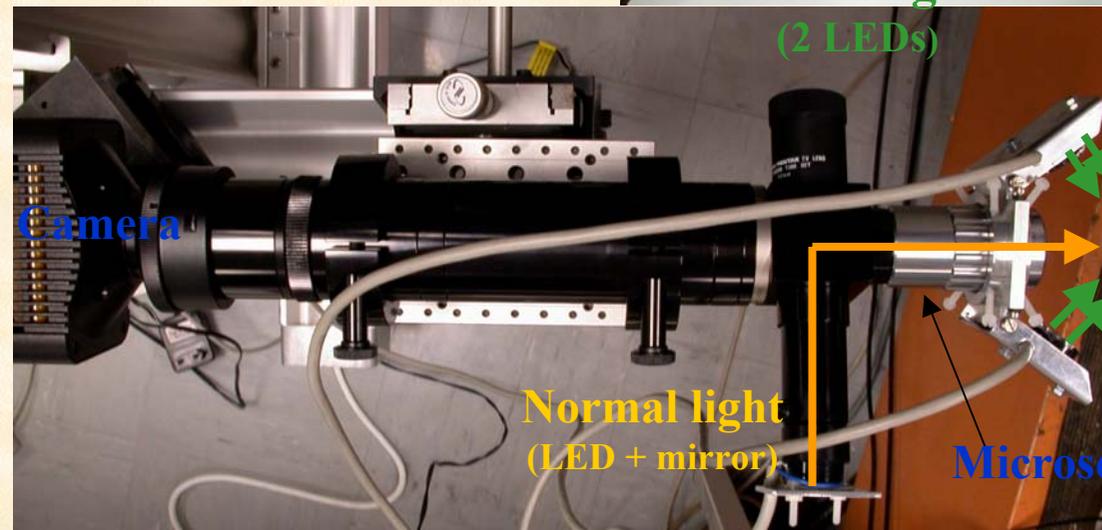
Microscale : à l'échelle des grains

montages spécifiques :

- 2048x2048pixels, 12bits digital camera
- Objectif microscope spécifique
(grossissement x10, 1pixel = 0,7 μ m)
- Méplat (polissage à sec, très petite profondeur de champ)
- Éclairages spécifiques (LE
normal : **microstru**
latéral : **contrast fo**
- platine 3D pour positionne

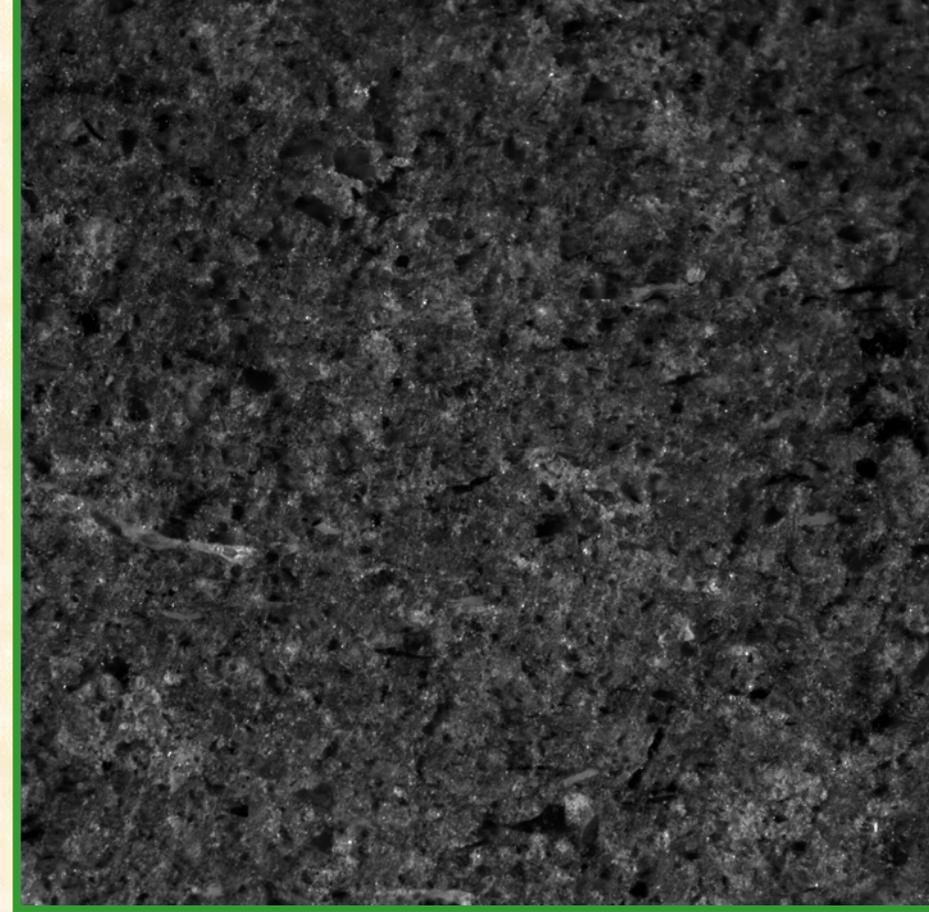


lateral light
(2 LEDs)



Normal light
(LED + mirror)

Microscope lens



1,5 mm

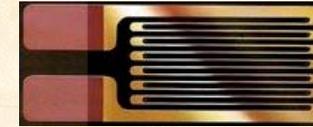
Sample



- 1pixel = 0,74 μ m
- taille du domaine de calcul des déf. 40 μ m

Comparaisons des différentes techniques de mesure des déformations au cours d'un essai simple :

Mesures classiques des déformations



strain gauges

LVDT



10 μ m

100 μ m

1mm

10 mm

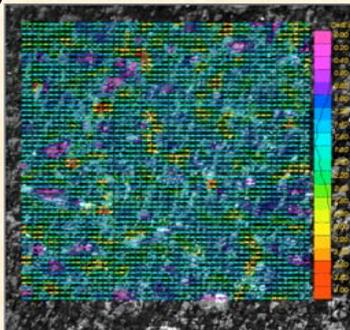
10cm

(mineral inclusions)

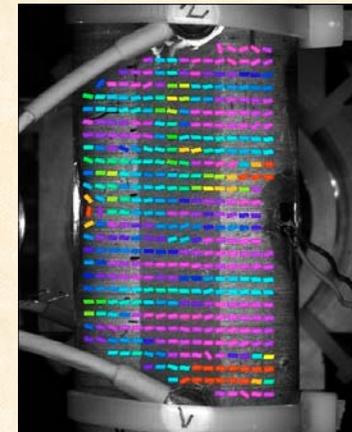
Micro DIC

Macro DIC

(SEM DIC ?)



Méthodes optiques de mesures des déformations



ii - Émission acoustique :

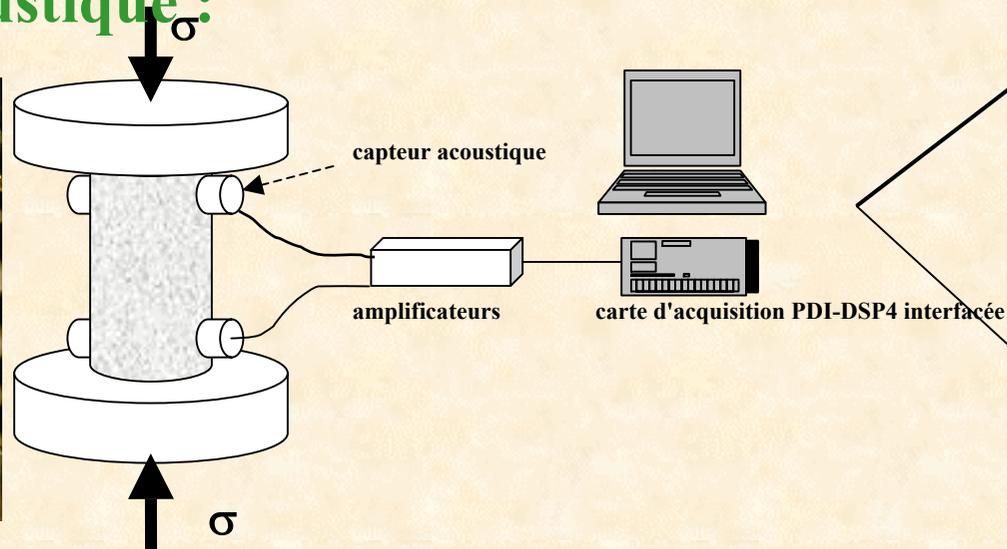
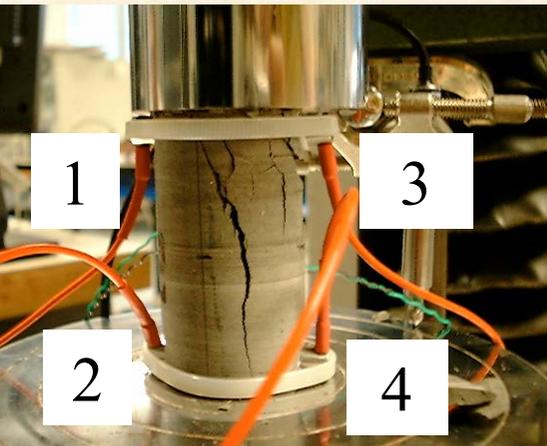
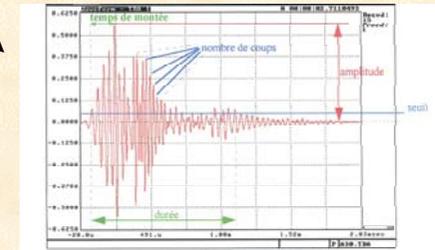


tableau de données horodatées

GRP	x=	y=	HH:MM:SS.n	PARA1
1	45.52	0.02152	15.737237	0.1297
1	53.04	0.02415	474.461609	13.6677
1	39.88	0.01954	530.991965	14.0568
1	39.26	0.01932	531.025661	14.0309
1	44.27	0.02108	543.149524	1.5183

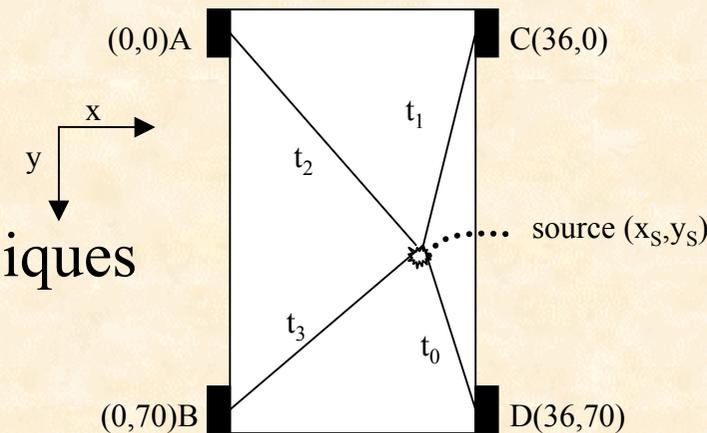
forme d'ondes



- localisation de la source EA par algorithme de reconstruction des chemins
(élimination des sources externes éprouvette : plateaux, machine, ...)

mais $V_p(\theta, S, \sigma \dots)$

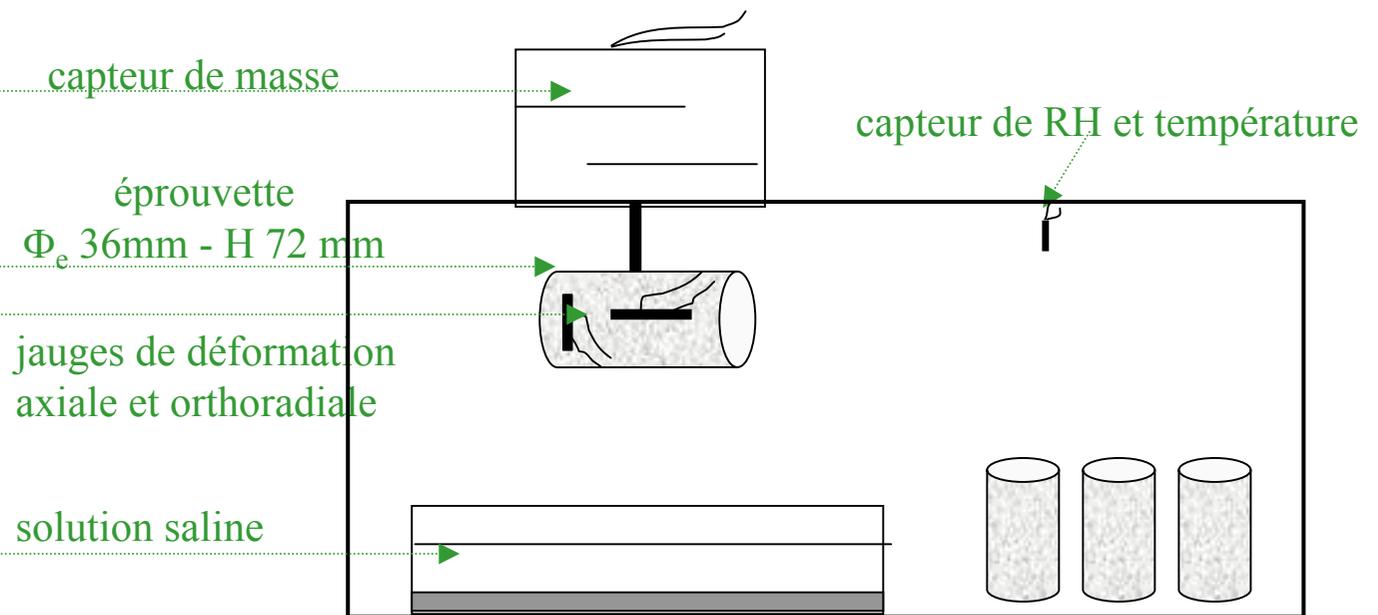
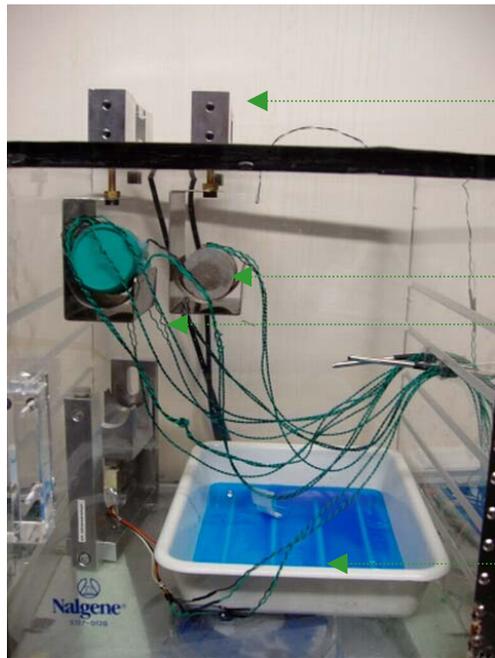
- critère d'identification des EA \leftrightarrow mécanismes physiques
(énergie, amplitude, durée, ...)



- Type de roche (argilite) et contexte général de l'étude
- Techniques et montages :
 - Digital Image Correlation
 - Émission acoustique
- **Exemples : suivi des déformations et endommagement**
 - **succion pure**
 - compression uniaxiale à différents degrés de saturation
- Conclusions et perspectives

i. suivi des déformations et endommagement au cours d'une succion pure

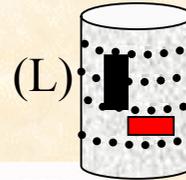
- méthodes des solutions salines (98, 76, 50, 36% RH) dans enceinte thermostatée (limitation de l'influence hydrique et des fluctuations hydrique)
- mesures en continu des évolutions de masse et des déformations (jauges)



"cures hydriques" instrumentées

➤ stabilisation de la masse et déformation = équilibre hydrique ~ 3 à 6 semaines

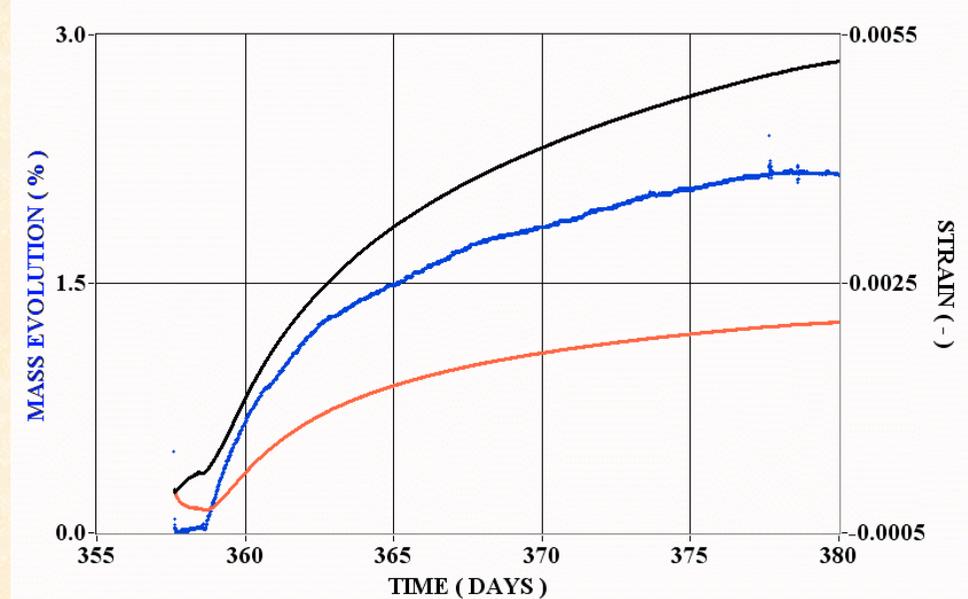
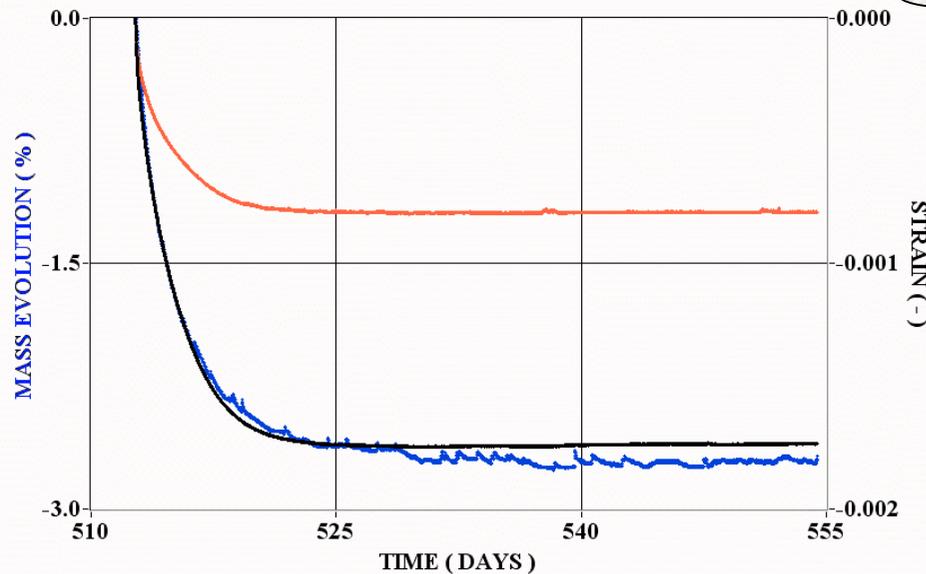
50%RH – succion=97MPa



(L)

98%RH – succion=2,8MPa

(T)



perte d'eau et retrait géométrique

masse : - 2,5%

jauges $\left\{ \begin{array}{l} \perp_{\text{litage}} : -0,18\% \\ \text{ortho} : -0,08\% \end{array} \right.$

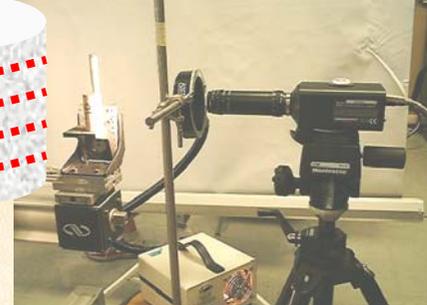
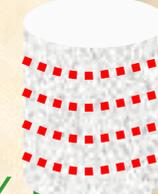
gain d'eau et expansion géométrique

masse : + 2,2%

jauges $\left\{ \begin{array}{l} \perp_{\text{litage}} : +0,5\% \\ \text{ortho} : +0,2\% \end{array} \right.$

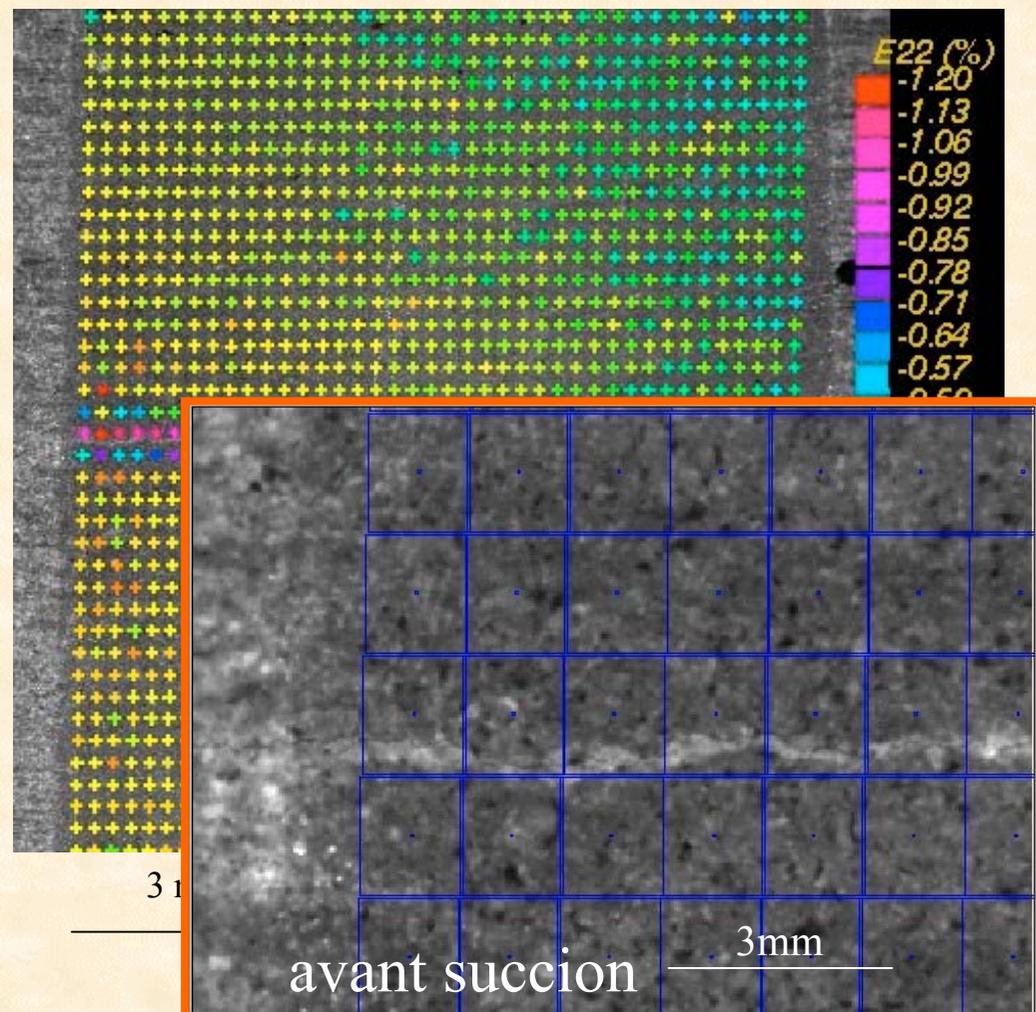
Évolution de la microstructure et DIC :

A) Observations macroscopiques : déformation de retrait/gonflement avec apparition de fissures pour 98%RH



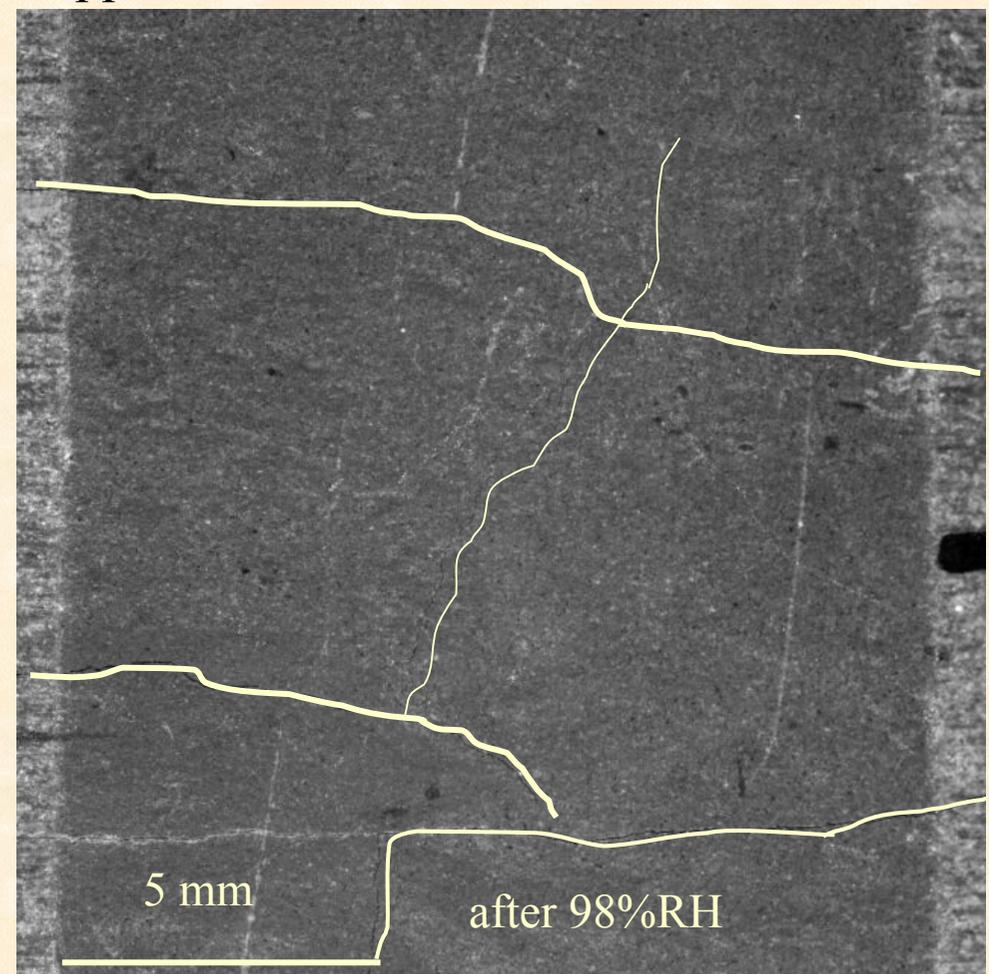
état sec (50%RH):

retrait avec fermeture de qq fissures existantes



état humide (98%RH):

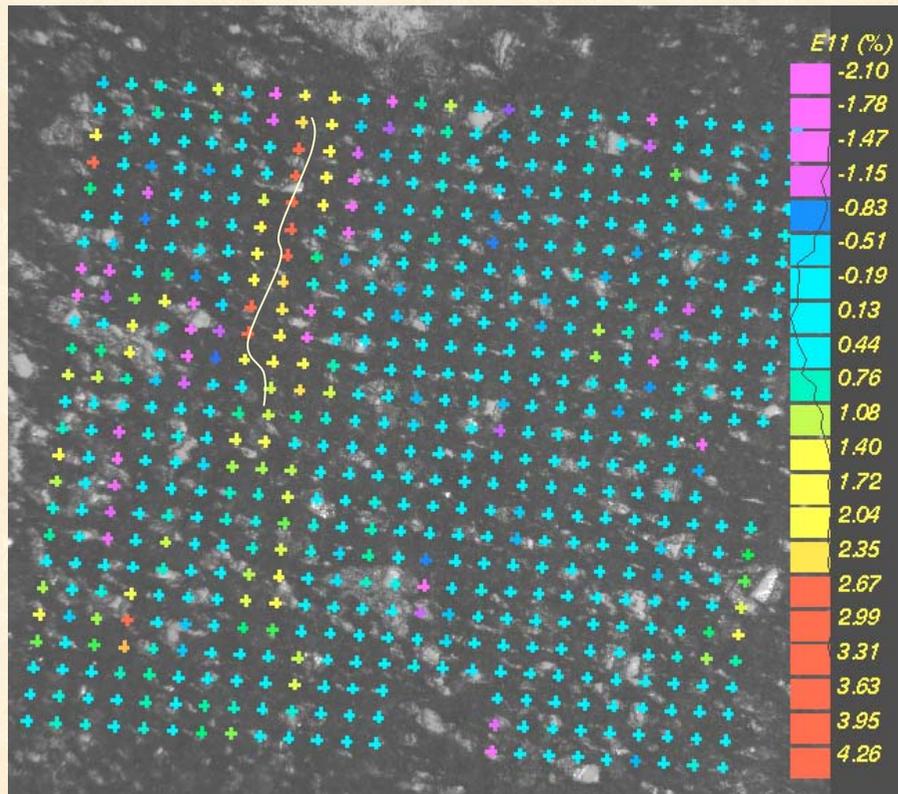
apparition de nombreuses fissures



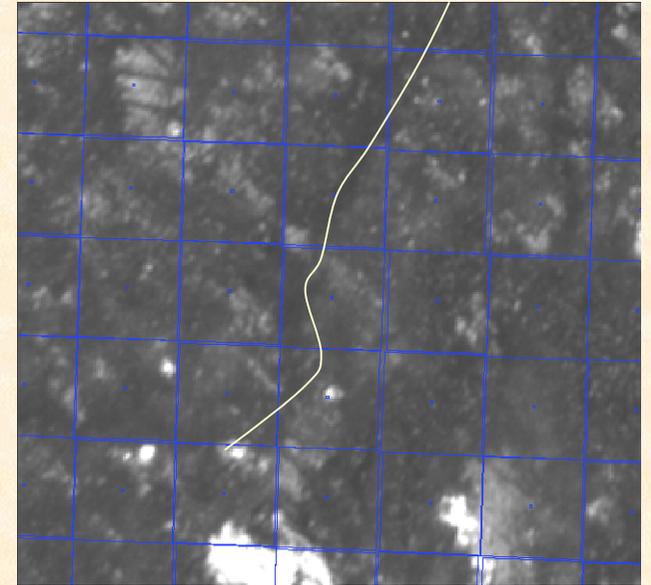
B) Observations microscopiques : (résultats préliminaires)

50%RH:

déformations locales très petites
apparition de très peu de micro-cracks
(près des hétérogénéités macro)



98%RH :



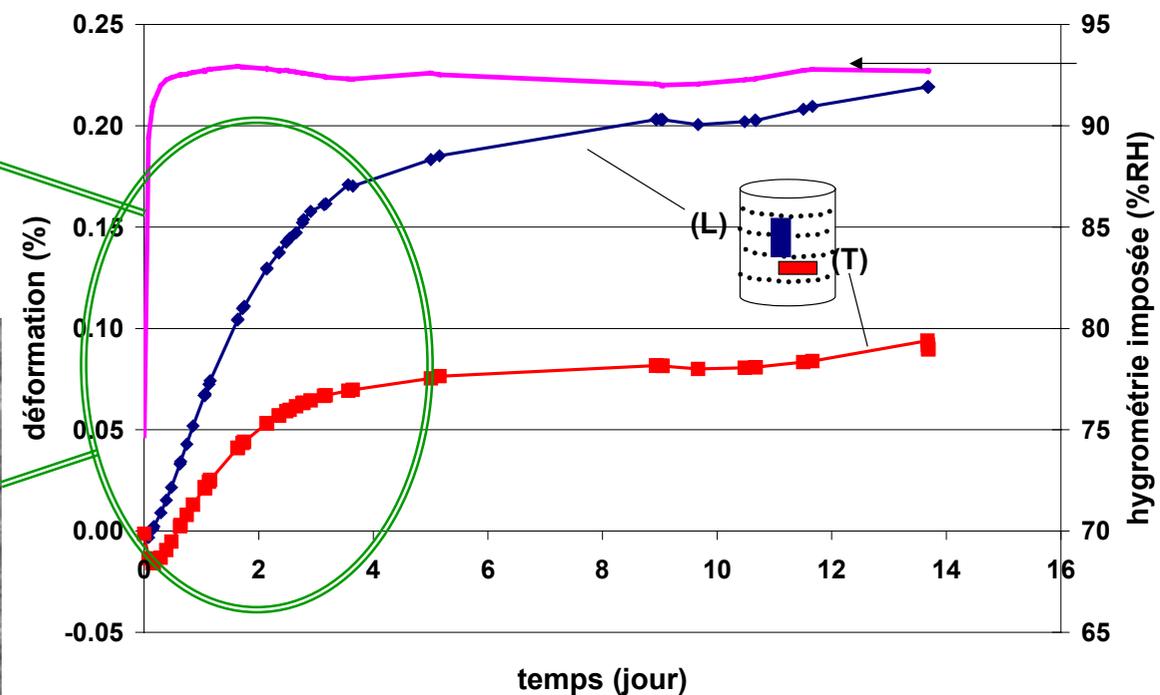
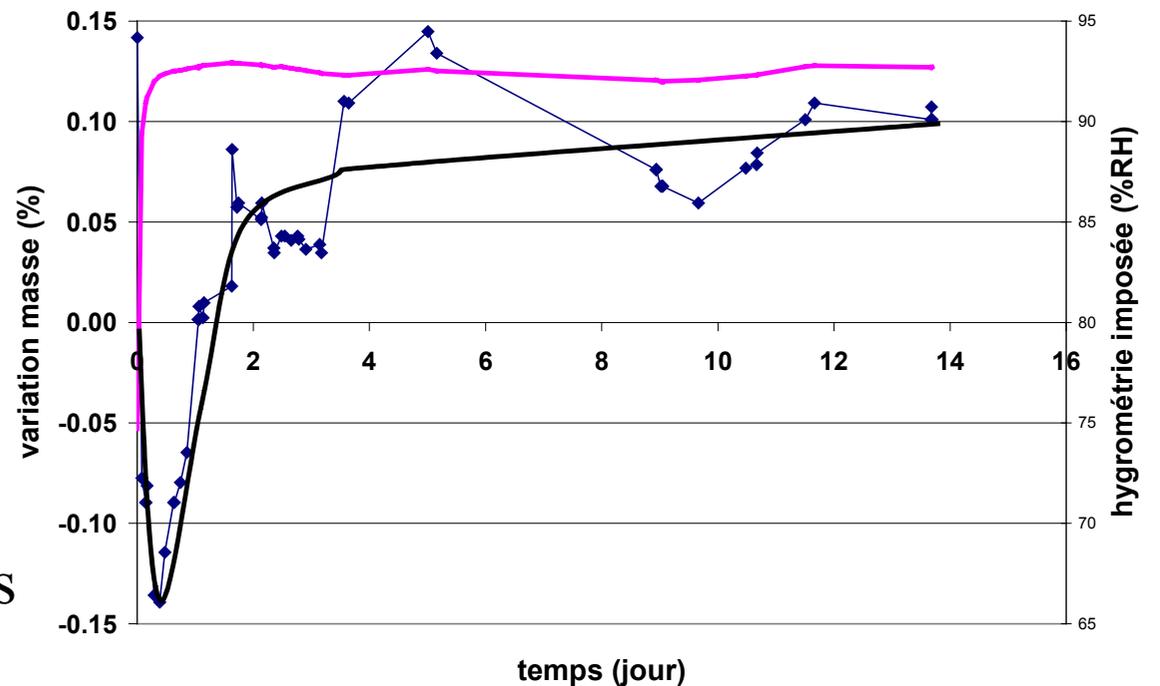
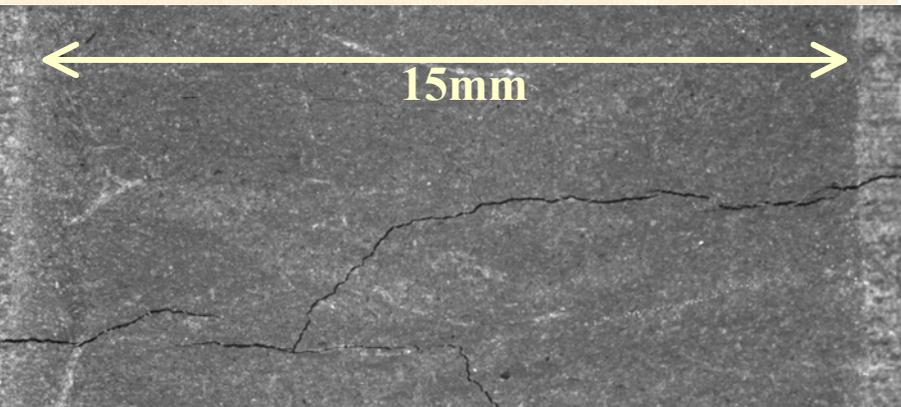
déformation trop faible,
qq nouvelles micro-cracks détectées
mais évolution grande du contraste

- les images ne sont idéales pour le DIC
- enregistrement continu d'images ?

Émission acoustique au cours d'une suction humide (98%RH)

EA associées aux microfissurations observées (humide) lorsque le gradient hydrique (peau/cœur) est important

← 15mm →



- Type de roche (argilite) et contexte général de l'étude
- Techniques : principe, montages et limitations :
 - Digital Image Correlation
 - Émission acoustique
- **Exemples : suivi des déformations et endommagement**
 - succion pure
 - **compression uniaxiale à différents degrés de saturation**
- Conclusions et perspectives

Compression uniaxiale avec extensométrie DIC et EA

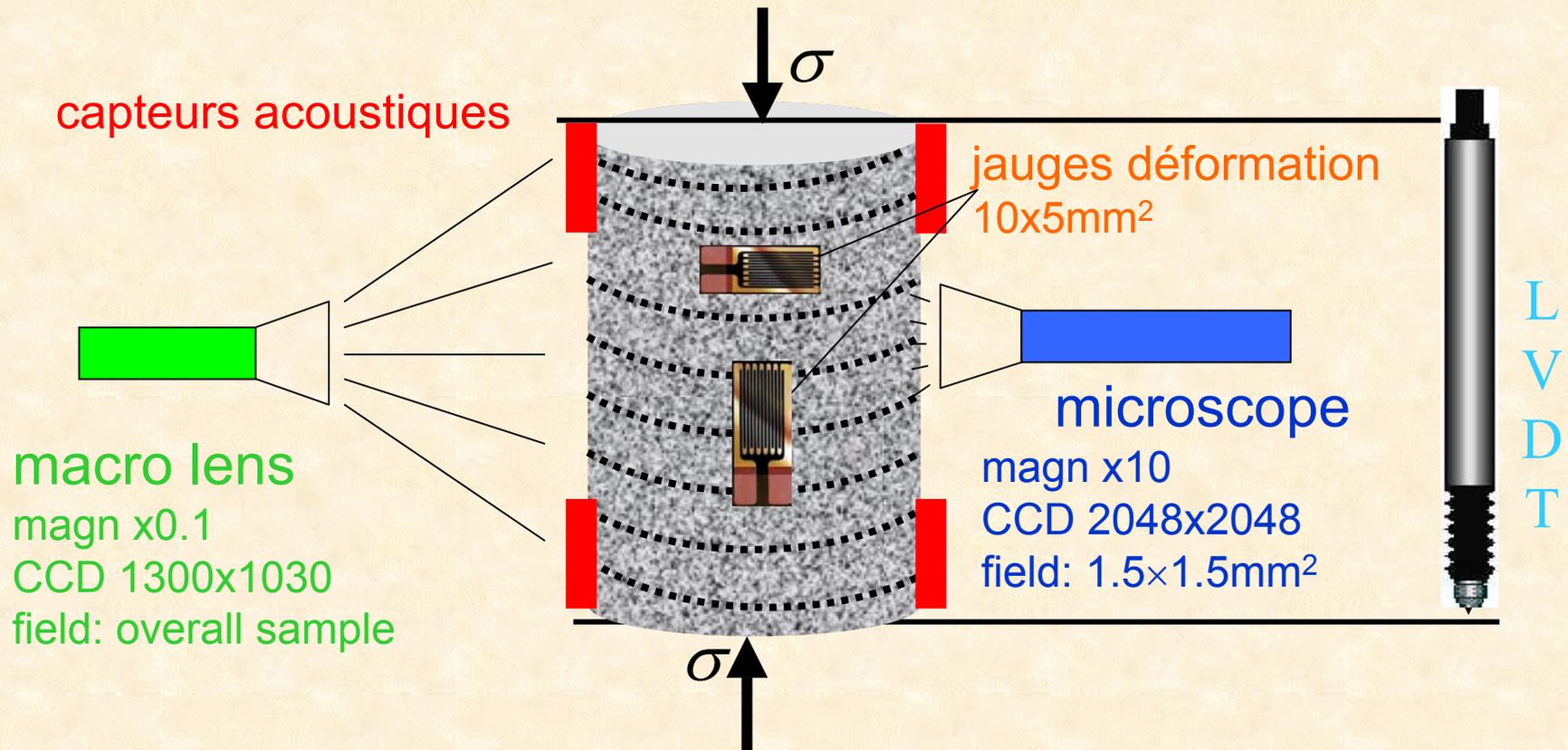
Mesures conventionnelles : force, jauges résistives de déformation, déplacement LVDT

Champs des déformations : macro DIC et local DIC

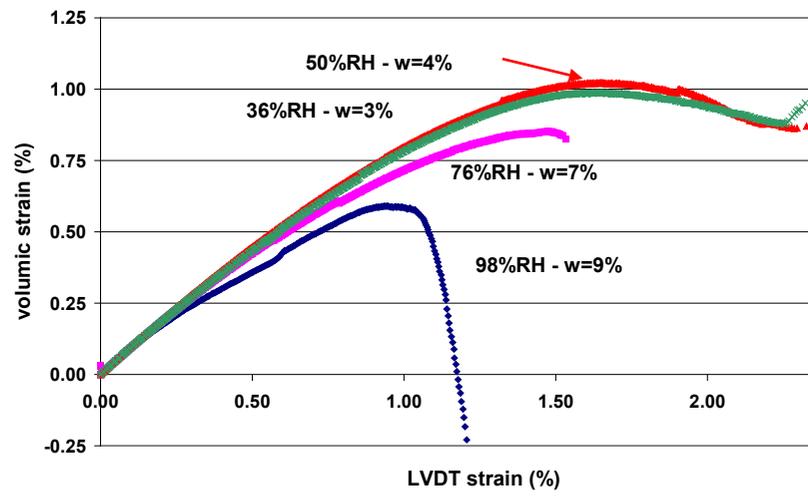
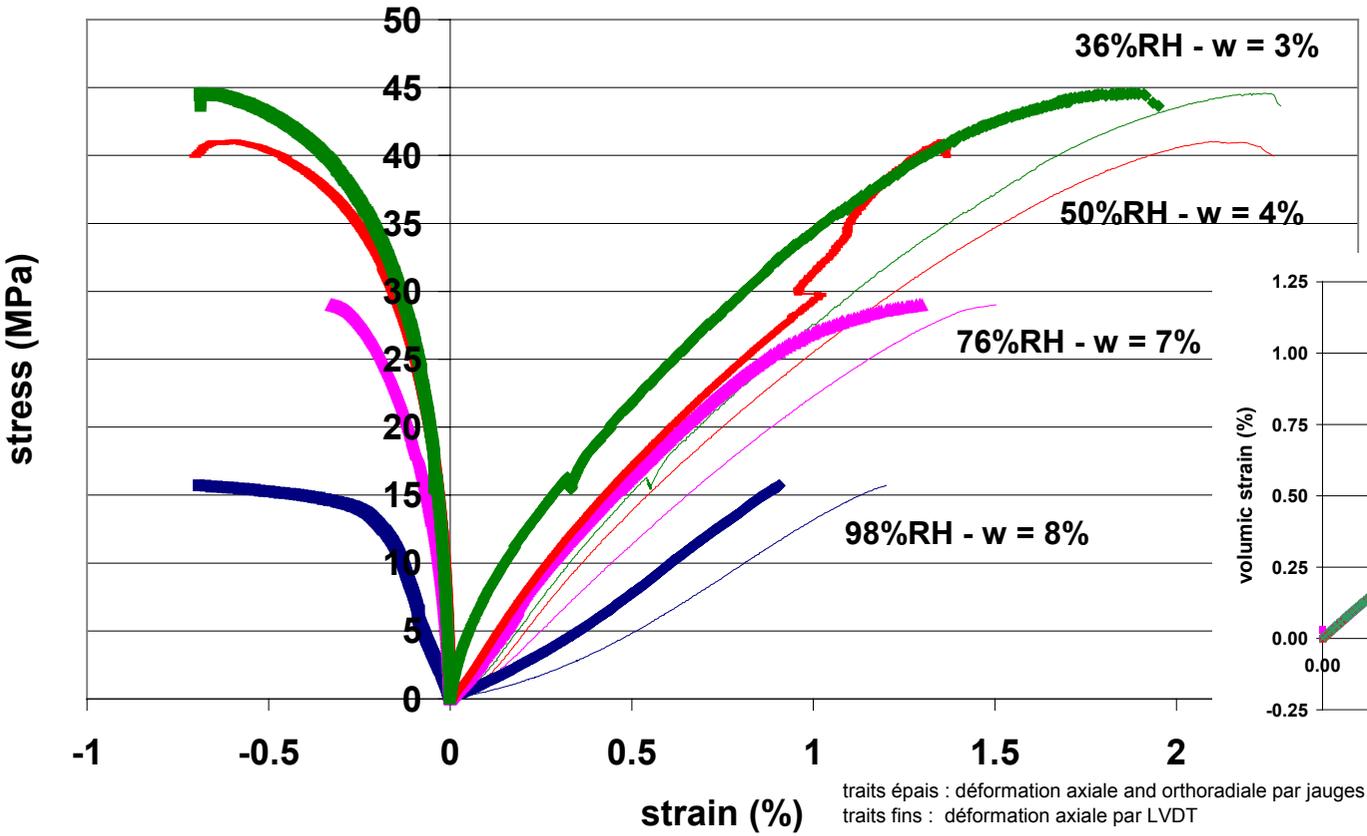
Endommagement : émission acoustique

$\phi 36\text{mm}$ - H 72mm

2 méplats polis pour les observations optiques



Compressions uniaxiales : réponse macroscopique (jauges-LVDT)

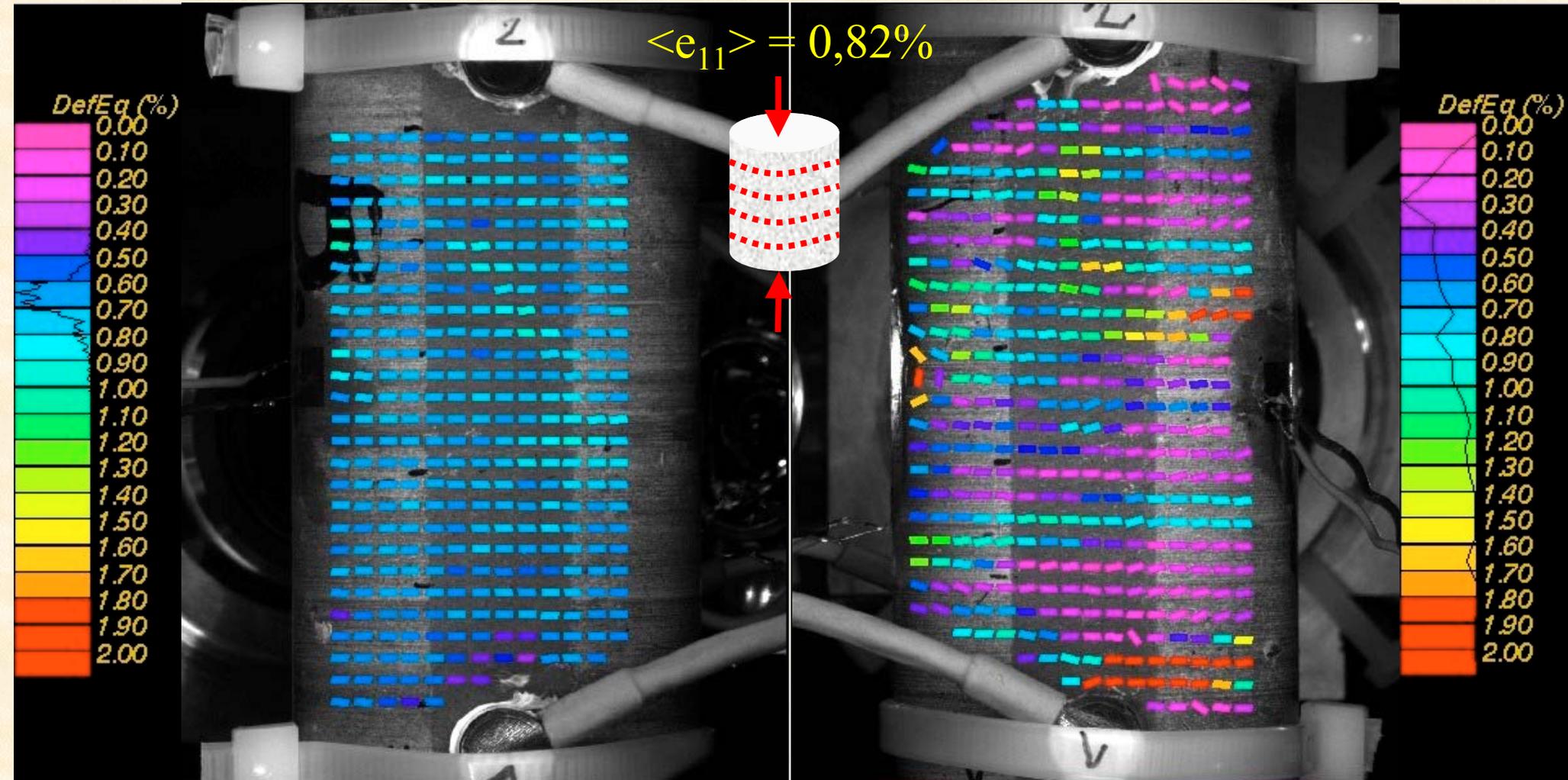


- E et R_c augmentent avec la succion
- comportement différent pour humide (dilatance importante)

Localisation de la déformation macroscopique (1/3) :

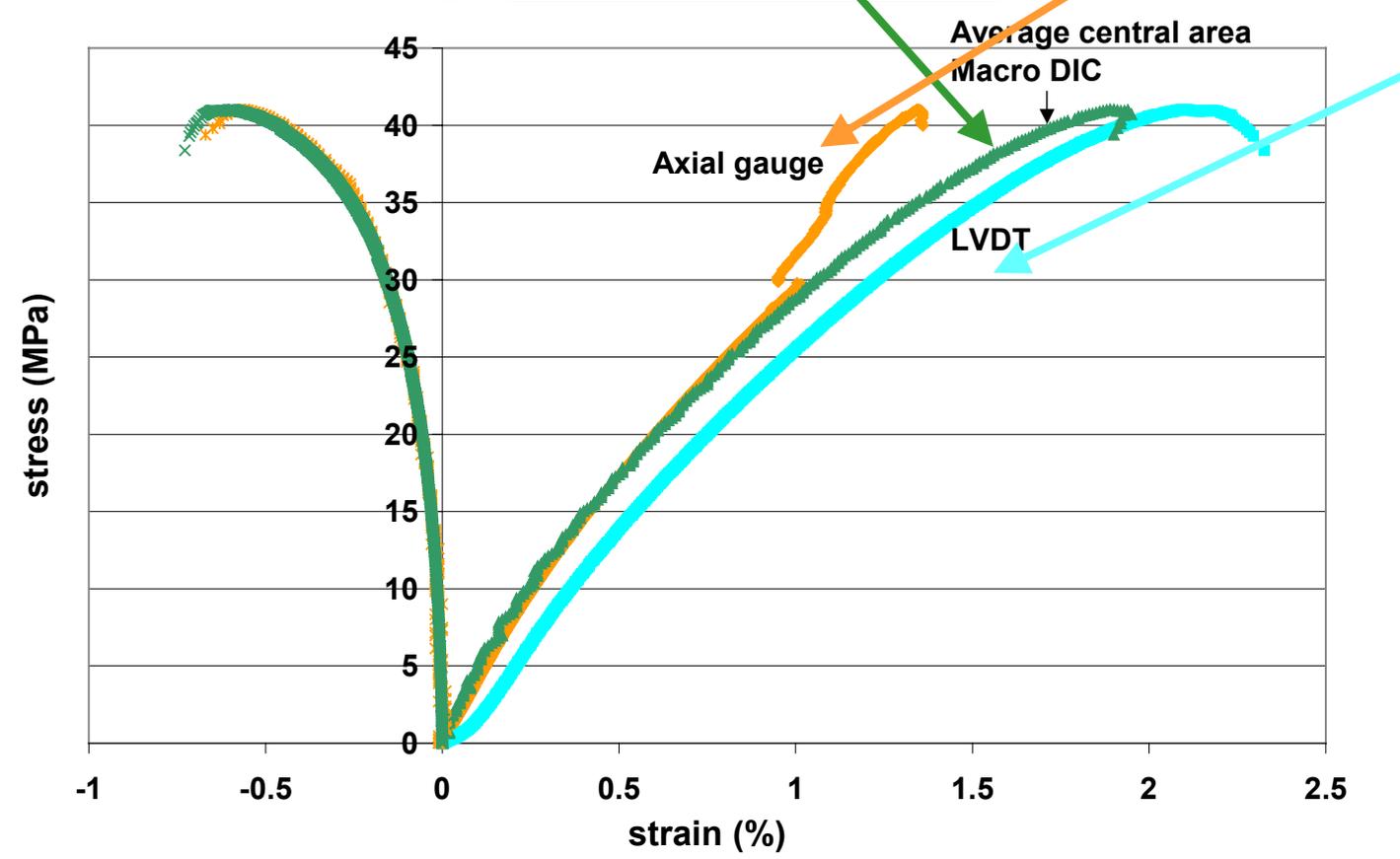
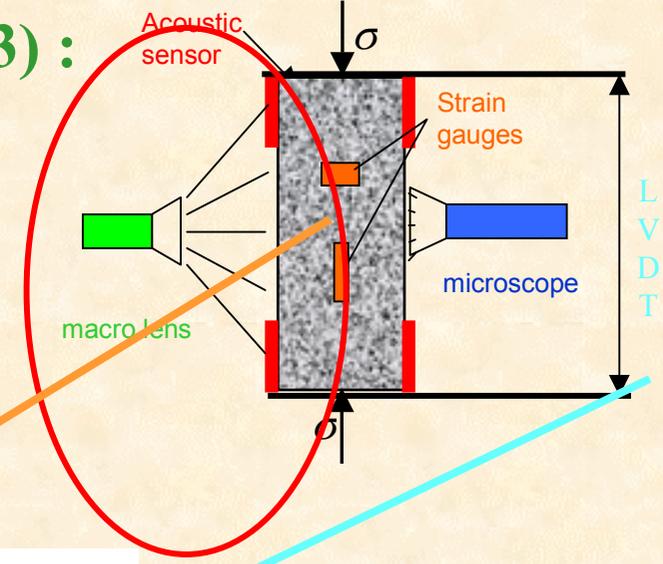
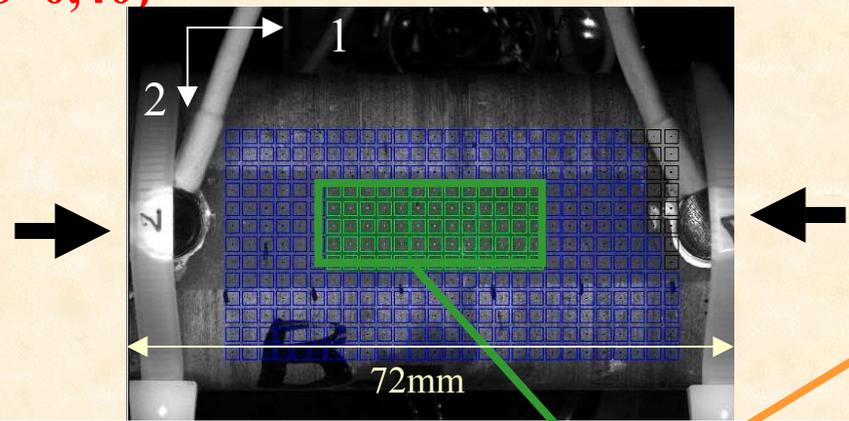
Sec (50%RH-S~0,40)

Humide (98%RH-S~0,95)



Localisation de la déformation macroscopique (2/3) :

Sec (50%RH-S~0,40)

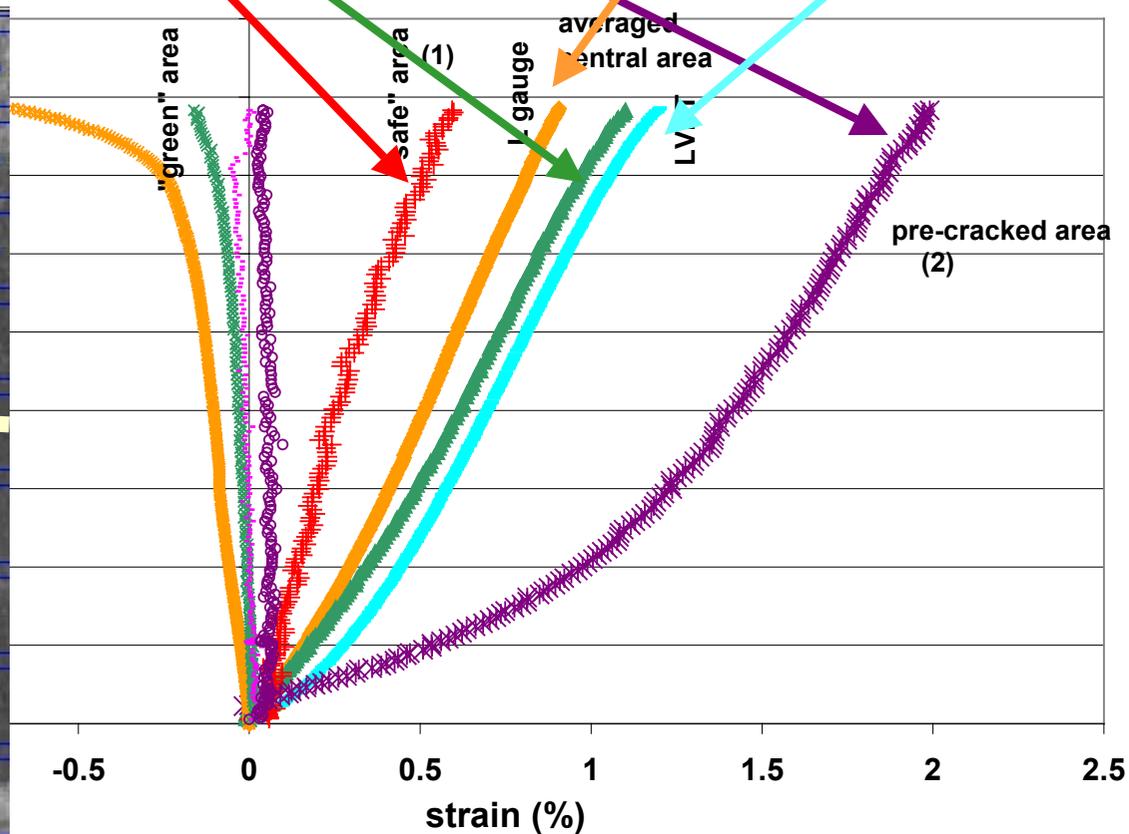
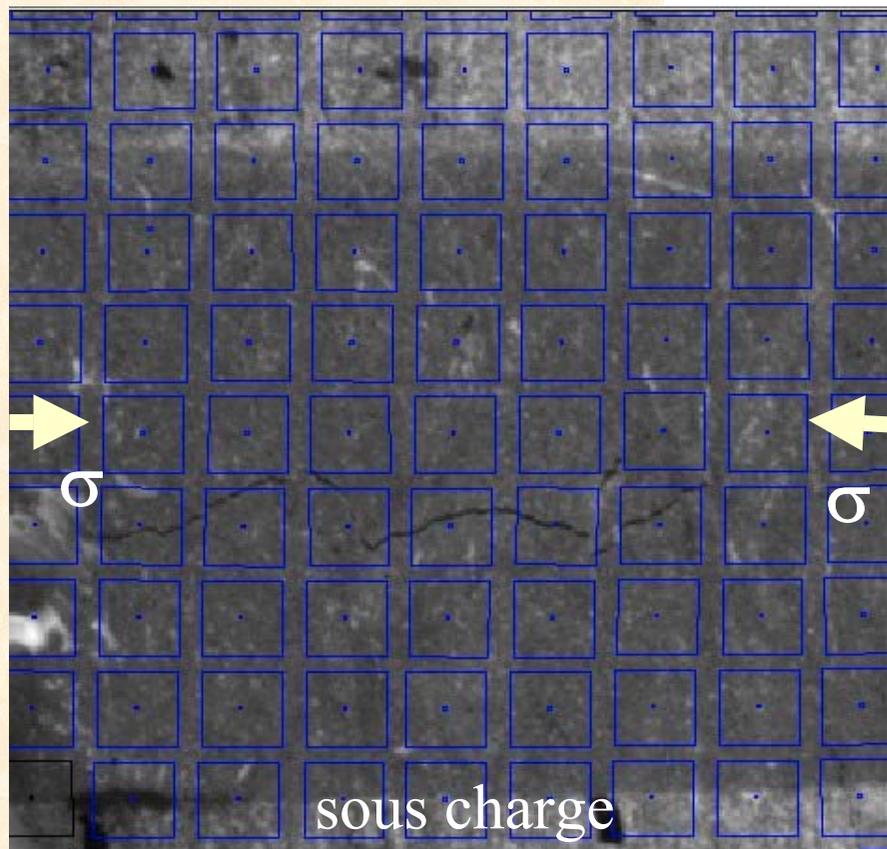
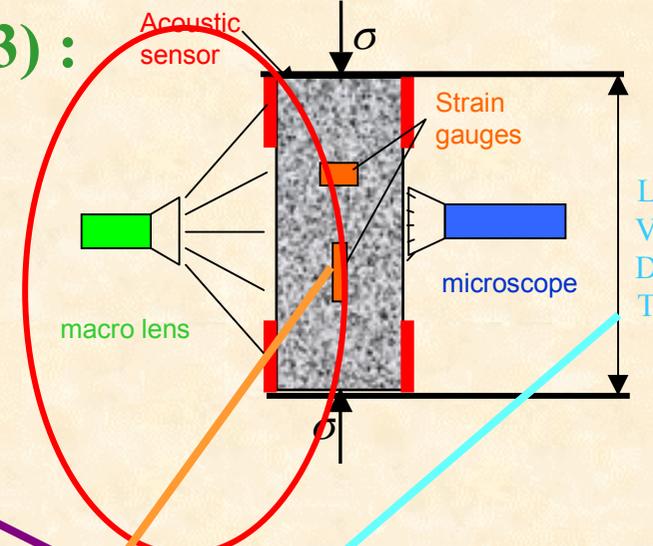
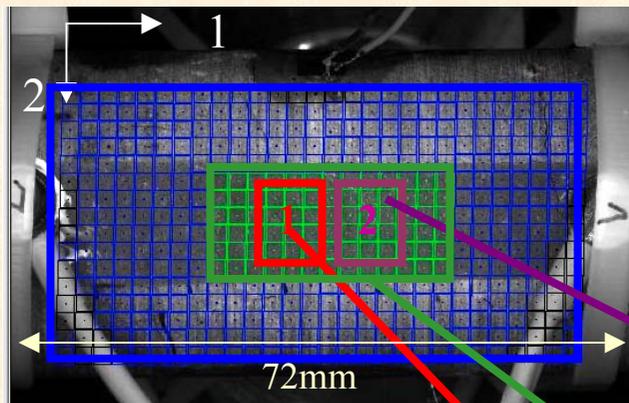


- réponse homogène
- superposition
jauge/MacroDIC mais
jauge défectueuse

Localisation de la déformation macroscopique (3/3) :

Humide (98%RH-S~0,95)

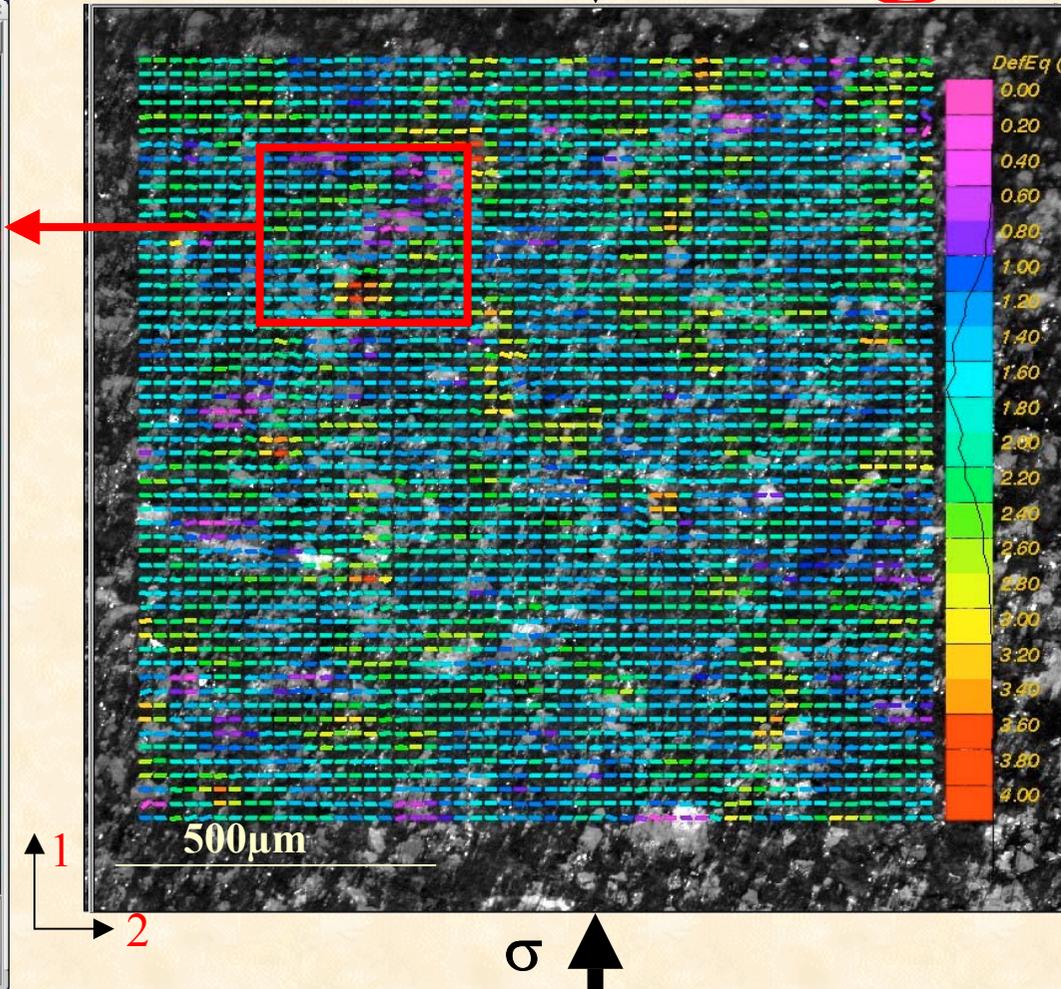
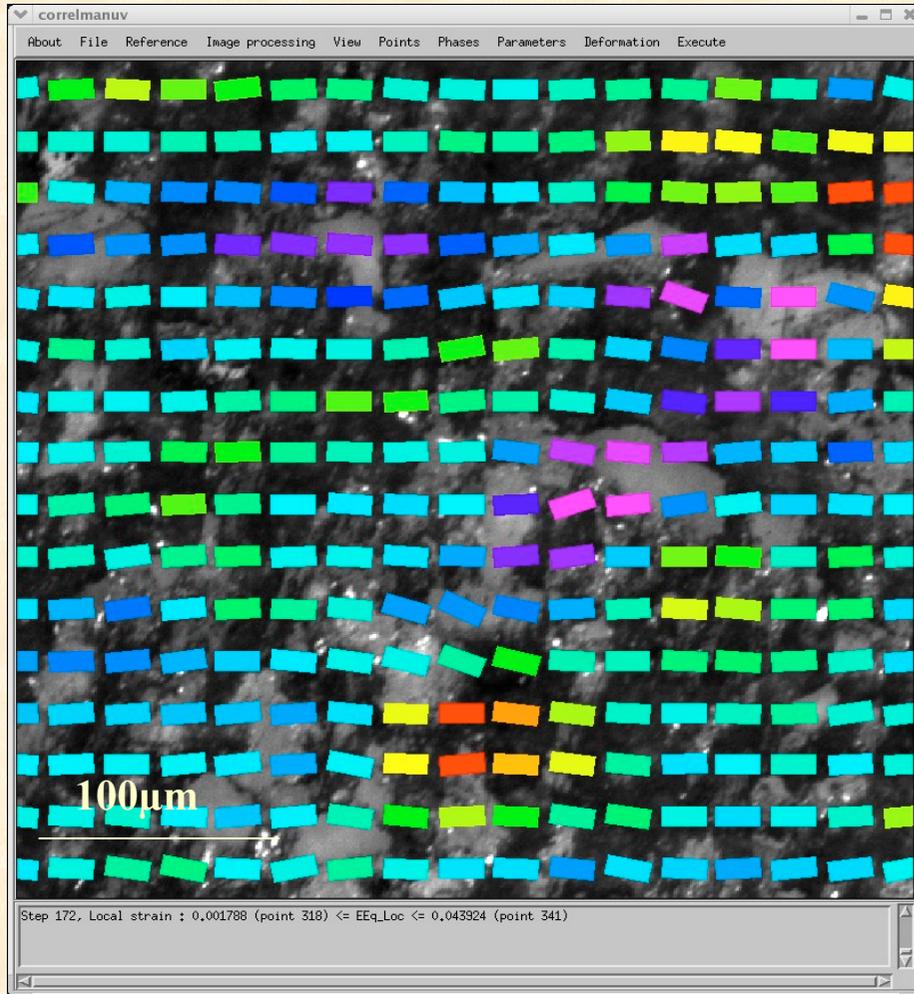
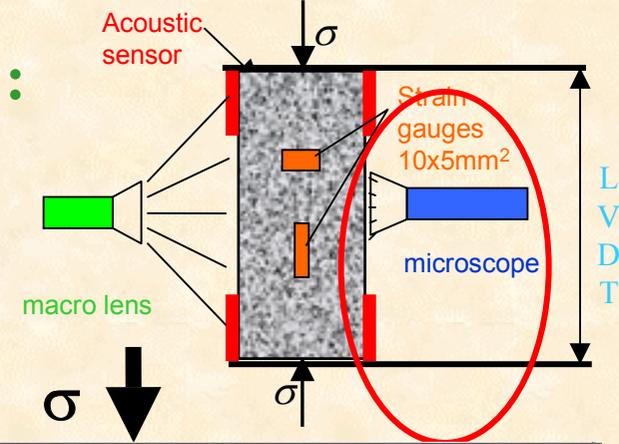
μ -fissures pré-existantes et création de macro-cracks



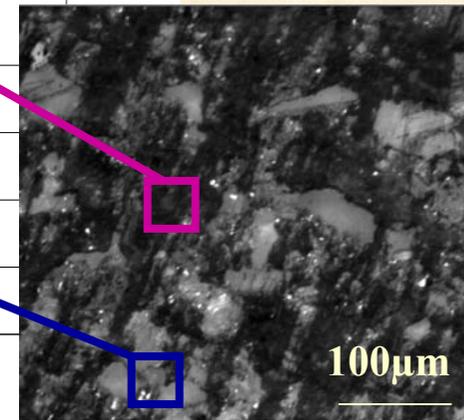
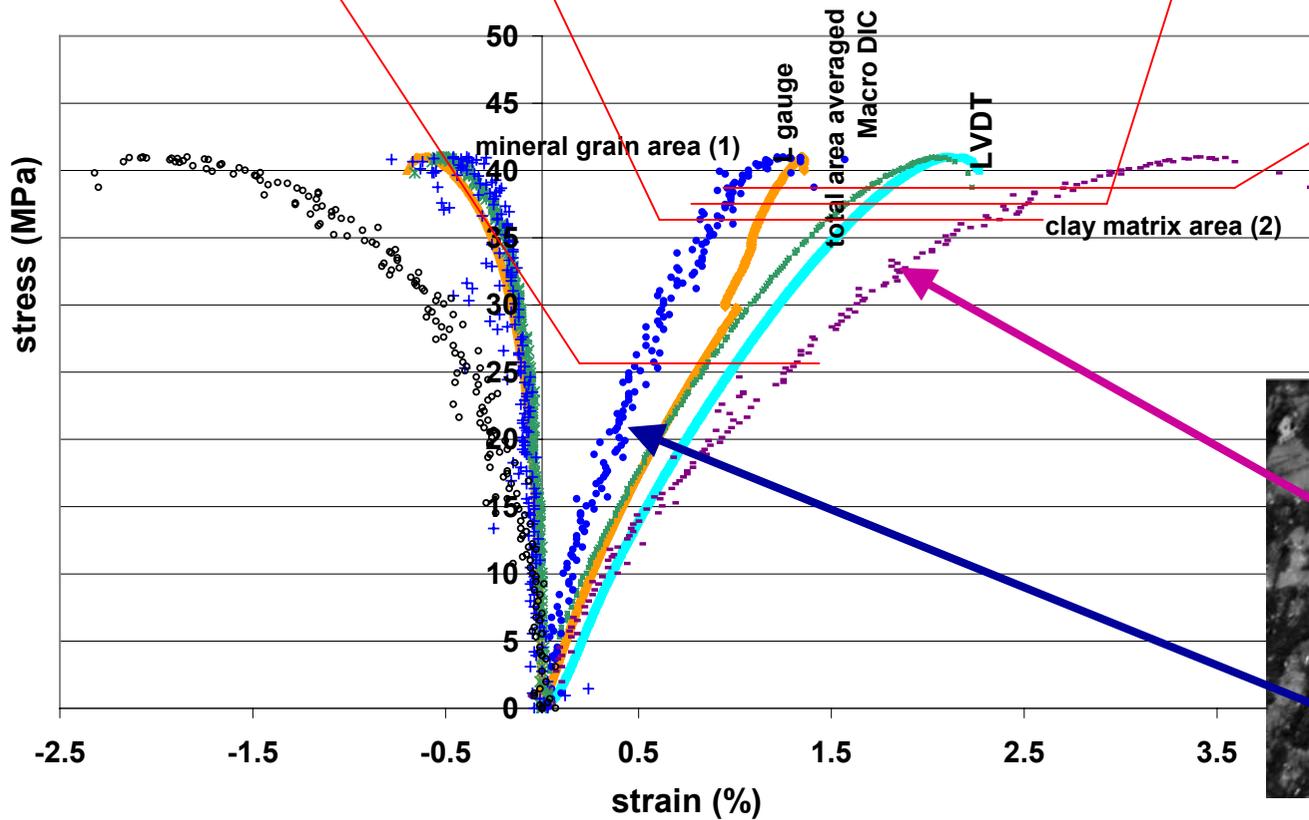
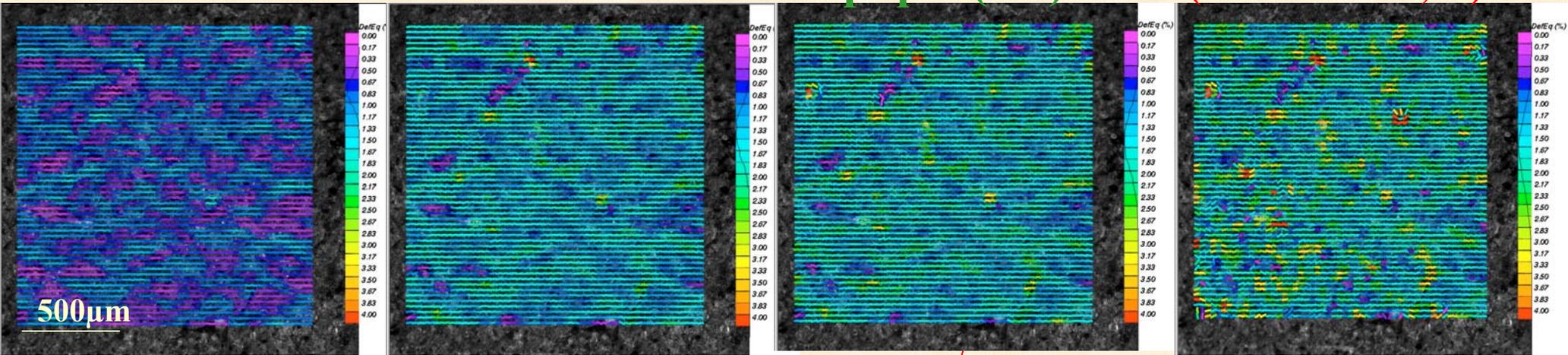
Localisation de la déformation microscopique (1/3) :

Sec (50%RH-S~0,40)

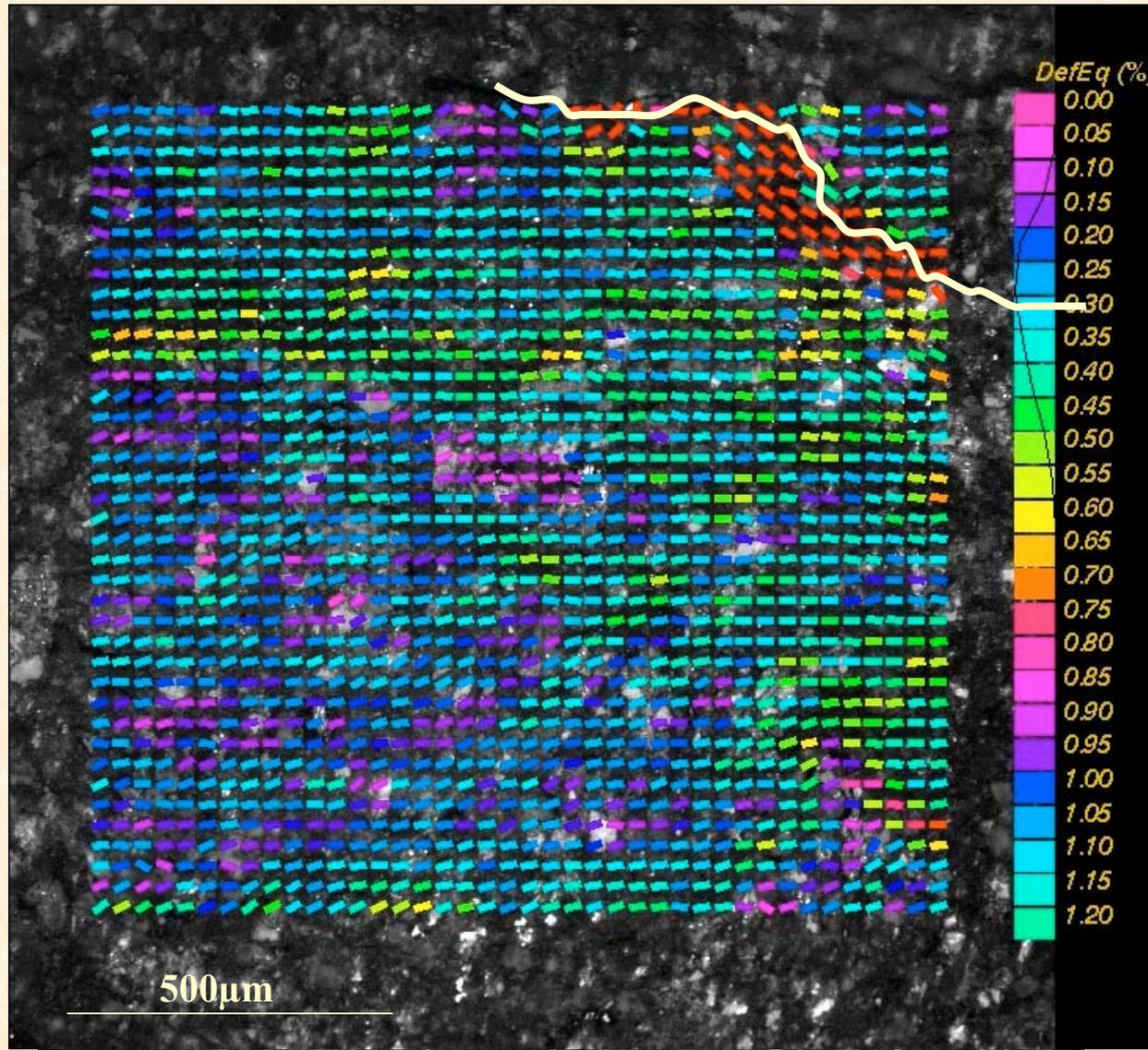
- champ hétérogène à l'échelle de la structure composite : matrice déformable et grains minéraux rigides
- absences de macro-hétérogénéité et de microcracks



Localisation de la déformation microscopique (2/3) : Sec (50%RH-S~0,40)



Localisation de la déformation microscopique (3/3) :

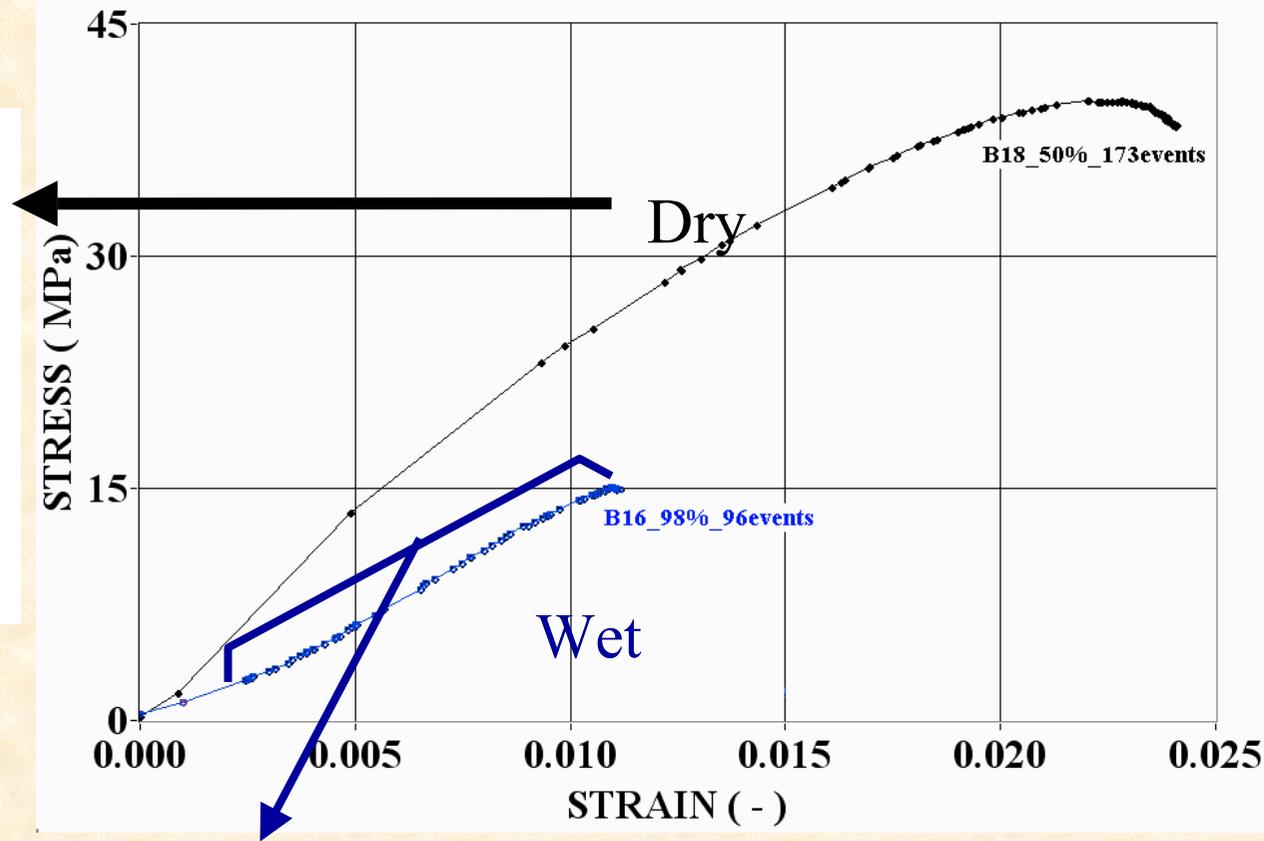
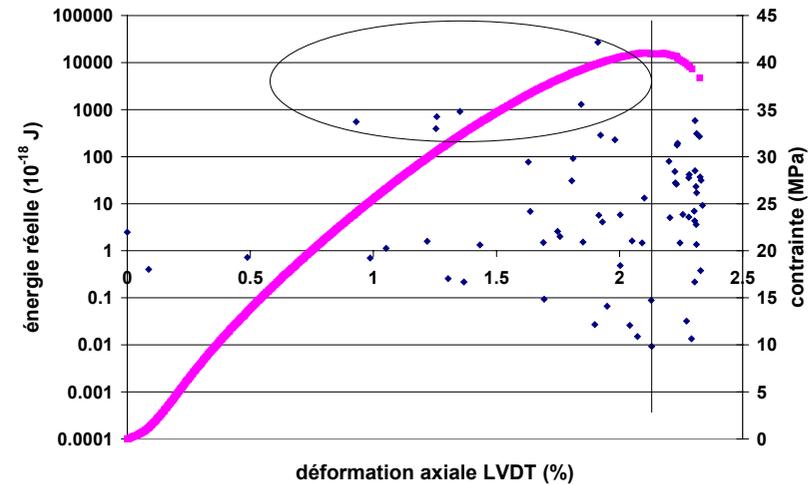


Humide (98%RH-S~0,95)

Faible niveau des déformations :

- hétérogénéité liée à la microstructure
- apparition de peu de microfissures

Émission acoustique :



activité acoustique due à de la friction (micro-fissures existantes) ?

- Humide : événements tout le long du chargement (friction ?)
- Sec : pas d'activité EA $< 60\%$ de R_c ,
quelques évènements de forte énergie à 60 - 80% R_c ,
plus d'activité avec moins d'énergie au delà de 80% R_c
- autres critères : extraire paramètres caractéristiques des salves EA

- Type de roche (argilite) et contexte général de l'étude
- Techniques et montages :
 - Digital Image Correlation
 - Émission acoustique
- Exemples : suivi des déformations et endommagement
 - succion pure
 - compression uniaxiale à différents degrés de saturation
- **Conclusions et perspectives**

Conclusions (1/2)

Comportement mécanique en fonction de la saturation :

- ✓ Succion humide : gonflement global avec création de μ -fissures
Succion sèche : retrait sans endommagement visible

- ✓ Effet important du degré de saturation sur les propriétés mécaniques :
 - ✓ module et résistance augmentés avec la désaturation

 - ✓ sec : comportement macro homogène ; à l'échelle fine, hétérogénéités liées à la structure composite
endommagement "ruinant" entre 60-80% R_c .

 - ✓ humide : très hétérogène aux échelles Macro et Micro, comportement global "gouverné" par fermeture des fissures.

Conclusions (2/2)

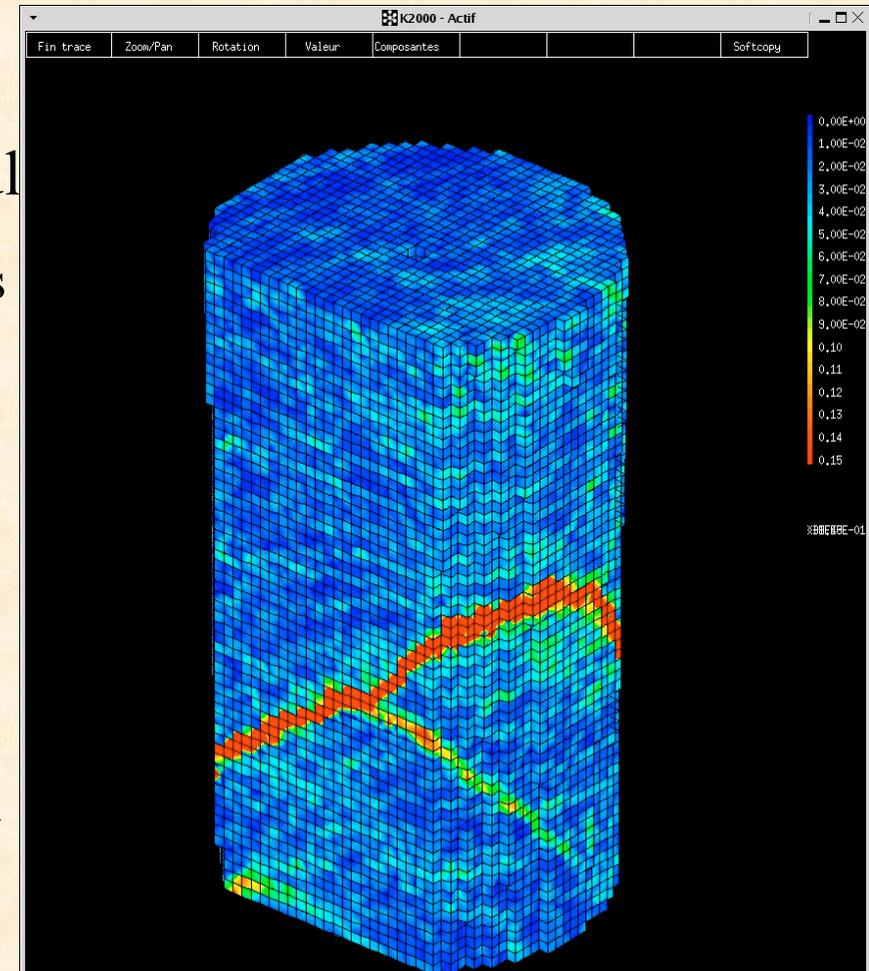
Techniques :

- ✓ Extensométrie optique Macro/Micro DIC : nouvel éclairage du comportement mécanique, observations locales (jusqu'au μm) sur un champ global centimétrique.
- ✓ Émission acoustique fournit des données mais amélioration du dispositif (algorithme de reconstruction des chemins avec vitesse réelle).
- ✓ Première étape de développement de modèles multi-échelles (matrice+autres minéraux+fissures ...).

Extensions :

- ✓ Anisotropie + Suivi optique en continu au cours de succion
- ✓ Combinaison hydrique et chargements mécaniques
- ✓ Identification et contributions relatives des différents mécanismes de déformation.
- ✓ Développement et validation de modèles mul
(loi de comportement homogénéisée, calcul des champs
- ✓ Investigations 3D sur des essais triaxiaux
(volumic DIC on X-Ray CT images?)

→
compression triaxiale à rupture
N.Lenoir, J.Desrues, M.Bornert (Collaboration 3S-LMS)





+ 4  pendant l'essai (600 secondes) et ... 1 journée de montage (alignement ...) stockage (images seules 1essai=2Go) et plusieurs jours de dépouillement des images !!!