

Couplages multi-échelle entre déformation et microstructure dans les roches argileuses ou organiques

Apports des collaborations entre mécaniciens et géologues

A-L. Fauchille

Manchester x-ray facility, School of materials, The University of Manchester, UK.

Research Complex at Harwell, UK.

Ecole Centrale de Nantes, GeM, UMR 6183 CNRS, France.

IC2MP, Université de Poitiers, ENSIP UMR CNRS 7285



Plan

- Contexte et enjeux
- Caractérisation des matériaux
- Déformations et microstructure : dernières avancées
 - Essais en laboratoire et sur grands instruments
 - Les interfaces de la microstructure
- Conclusion et Perspectives

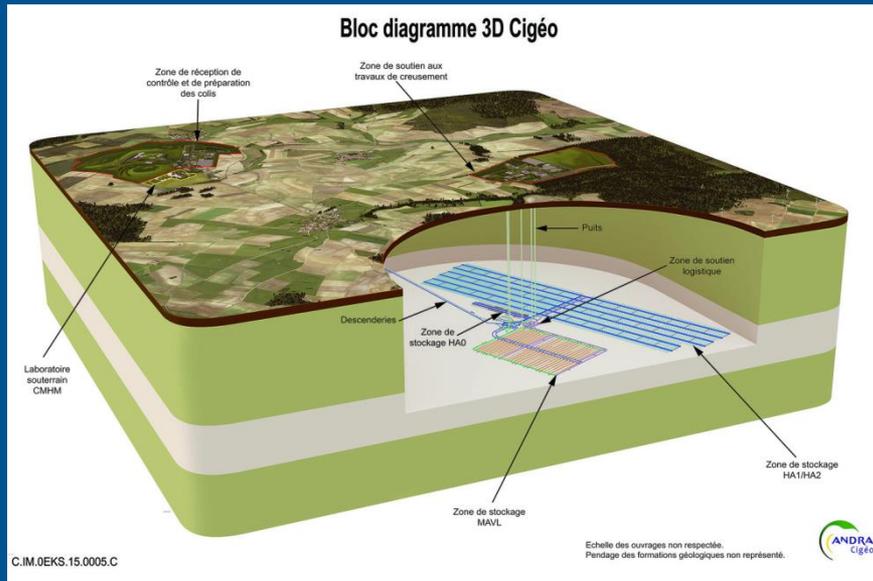
Plan

- Contexte et enjeux
- Caractérisation des matériaux
- Déformations et microstructure : dernières avancées
 - Essais en laboratoire et sur grands instruments
 - Les interfaces de la microstructure
- Conclusion et Perspectives

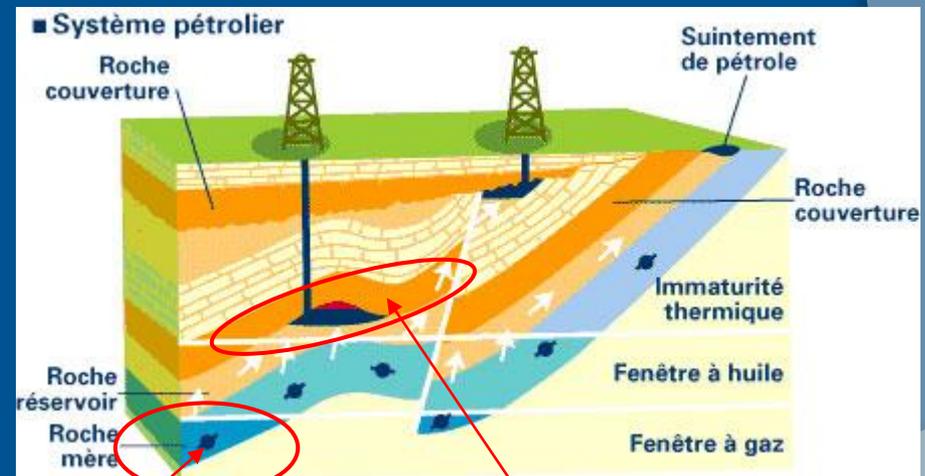
Contexte

Contexte énergétique

Stockage de déchets radioactifs



Hydrocarbures



Roche mère

Roche couverture

Des matériaux géologiques

- Roche argileuse
- Argilite
- Schiste
- Roche carbonée
- Shale
- Mudstone...

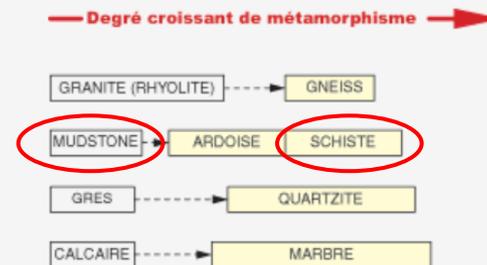


Ces roches sont bien différentes selon les communautés

- roches magmatiques :
 - granits
 - basaltes
- roches sédimentaires :
 - grès et roches siliceuses
 - roches carbonatées :
 - calcaires gréseux
 - calcaires marbriers
 - calcaires non marbriers
 - ardoises, shales et schistes
- roches métamorphiques :
 - ardoises, shales et schistes
 - gneiss
 - marbres.



Fig. 3 Roches métamorphiques les plus courantes selon leur degré de métamorphisme.



Charbons

solide

Schiste
bitumineux

Schiste bitumineux : roche ni schisteuse, ni bitumineuse mais laminée et suffisamment enrichies en MO (15-50% de C_{org}) pour produire des huiles mais n'ayant pas été assez enfouies pour produire des hydrocarbures.

Pétroles

visqueux, liquide, gaz



Des matériaux géologiques

- Roches argileuses, **argilites** → Définition d'abord granulométrique

Taille mm	Classe granulométrique	Particule		Sédiment		Roche sédimentaire	
256	RUDITE	Blocs		Amas de blocs		Conglomérats	
10		Galets, Cailloux		Cailloutis			
4		Graviers		Grave			
2		Granules				Microconglomérats	
1	ARENITE	Grains de sable	<i>Très grossier</i>		Sable	Grès	
0,5			<i>Grossier</i>				
0,250			<i>Moyen</i>				
0,125			<i>Fin</i>				
0,0625			<i>Très fin</i>				
0,031	LUTITE	Poussières	Boue	<i>Grossier</i>		Siltite	
0,0156				<i>Moyen</i>	Limons = mélange silt moyen /fin + argile		<i>Fin</i>
0,0039				Particules ultra-fines		Argile	

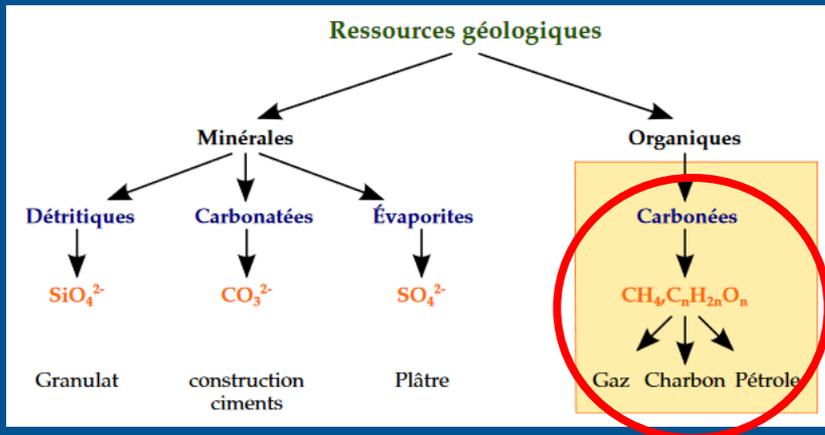


Classification des roches sédimentaires détritiques terrigènes

Des matériaux géologiques

- **Roches carbonées**

Roches sédimentaires résultant de l'accumulation et de la décomposition de matière organique issue d'êtres vivants.



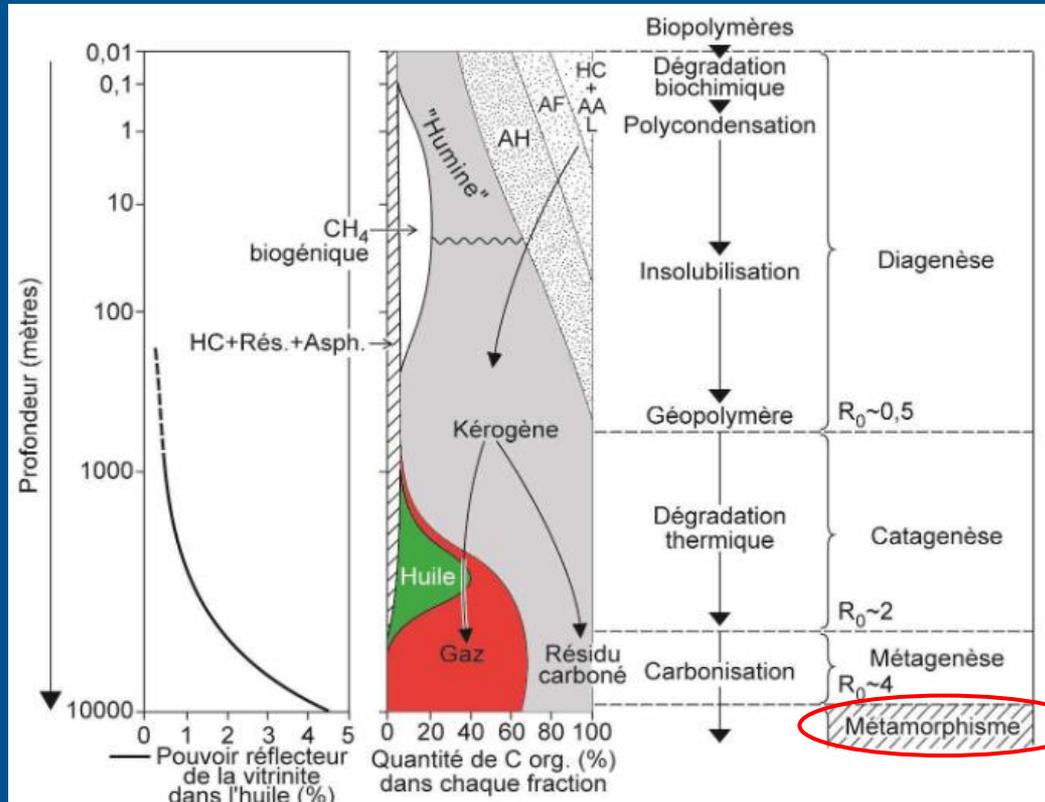
Les roches carbonées ne sont pas forcément à dominante argileuse

Woodford and Bowland shales (Quartz)

Les roches carbonées peuvent contenir des argiles en quantité significative (conditions de dépôt calmes favorables)

→ cas des roches-mères des gisements non conventionnels

Des matériaux géologiques



Roches organiques pouvant contenir des argiles

Schistes

Objets d'étude :

- (1) Roches sédimentaires argileuses de type argilite
- (2) Roches sédimentaires carbonées contenant des argiles qui n'ont pas subi de métamorphisme

Aujourd'hui

Un couplage pour l'ingénieur

- **Matériaux naturels multi échelle :**

Les déformations à l'échelle macroscopique dépendent des **échelles inférieures**

- **Matériaux à « microstructure »**

Le comportement mécanique dépend de **l'arrangement des particules**

Un couplage pour l'ingénieur

Structure multi échelle et hétérogène

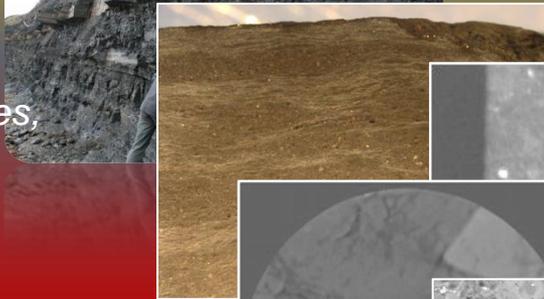
- m

macro

Couches sédimentaires, failles, concrétions



In situ



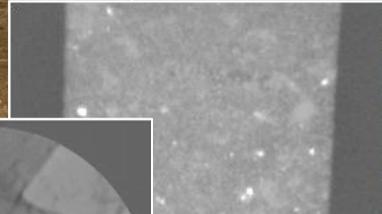
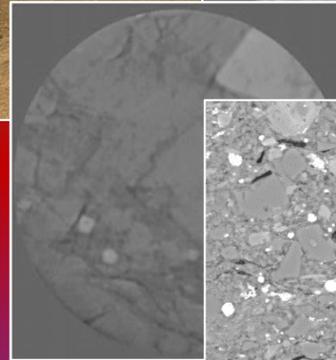
Microscopie optique

- cm

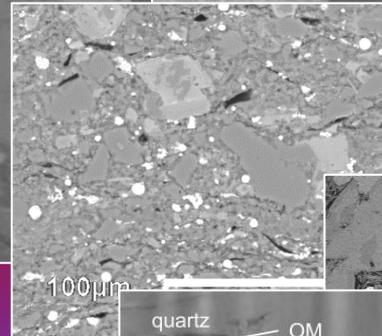
meso

- mm

Inclusions rigides (carbonates, quartz, pyrites...), fractures



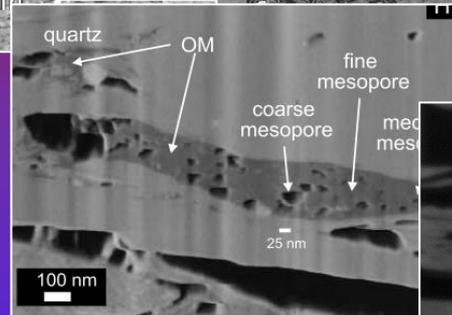
Tomographie RX



- μm

micro

MO, argiles, pores

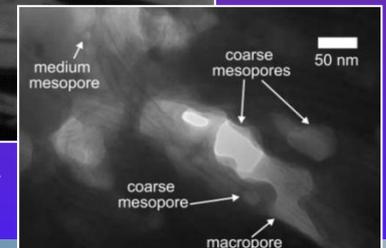
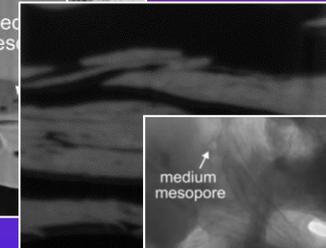
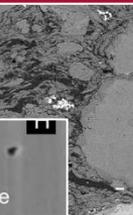


Chalmers et al., 2012

Curtis et al., 2010,2011;

Chalmers et al., 2012

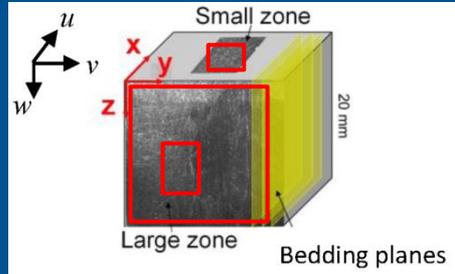
Microscopie électronique HR
Nano RX



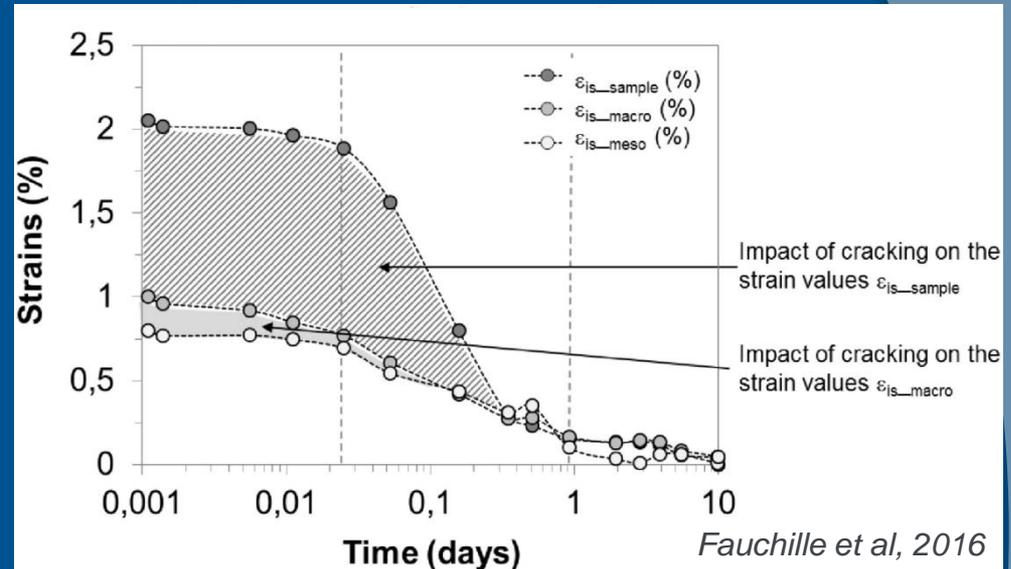
- nm

Un couplage pour l'ingénieur

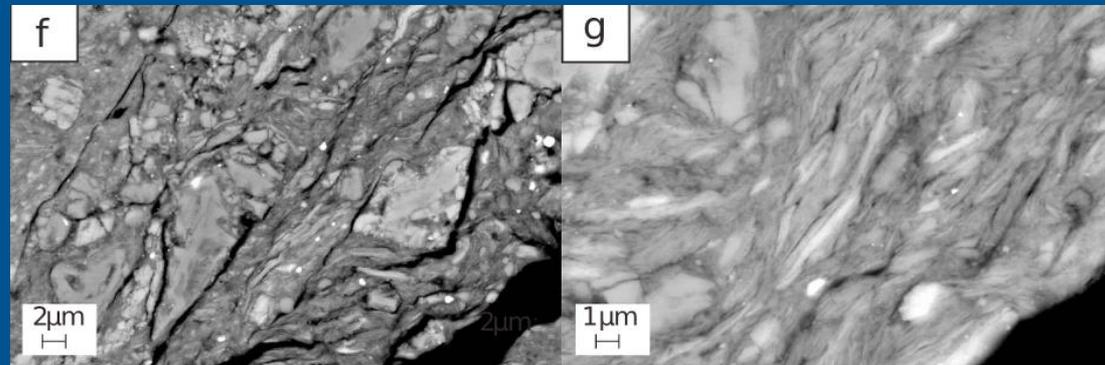
- Déformations multi échelles



→ Déformation moyenne différente selon l'échelle étudiée



- Réarrangement des particules lors de chargements triaxiaux



Bonnelye et al, 2017

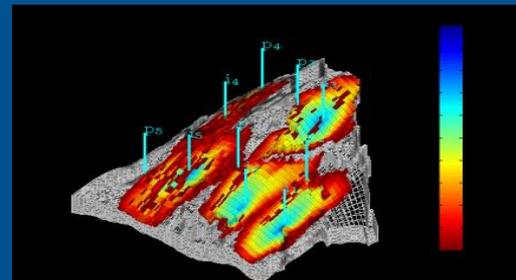
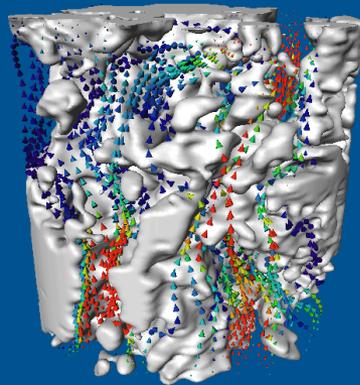
Les enjeux pour l'ingénieur

- **Localisation et intensité des déformations** et des réseaux de fractures
Identification des **facteurs microstructuraux**



Perméabilité à l'échelle de l'ingénieur

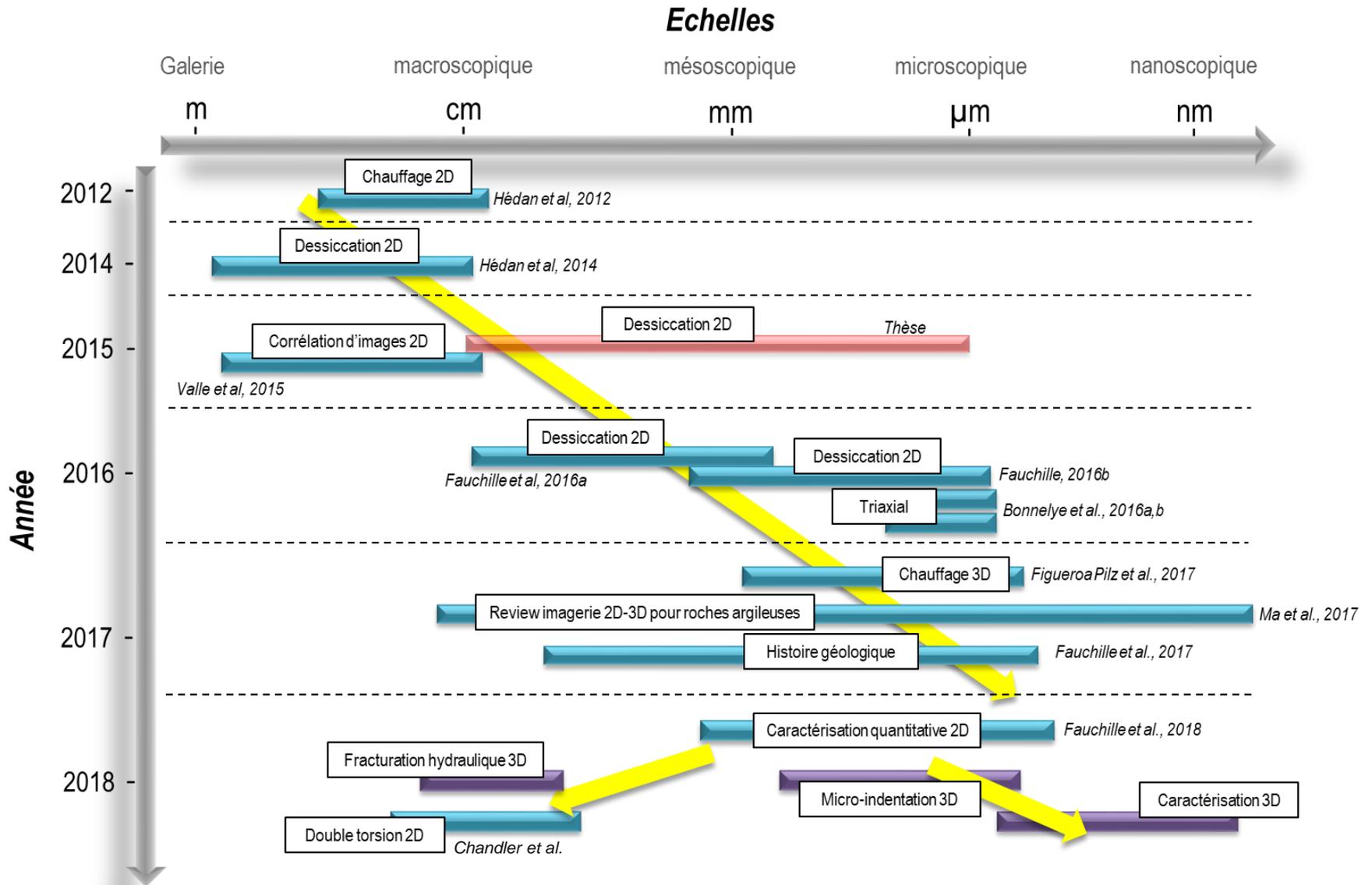
Schéma hydrodynamique des trajectoires des fluides et des particules fines dans le milieu



**Tenseur de perméabilité
De l'échelle du milieu poreux au bassin**

→ Dernières avancées pour mieux comprendre les relations entre déformations et microstructure dans les roches argileuses et carbonées

6 ans de collaborations entre (géo)mécaniciens et géologues



Plan

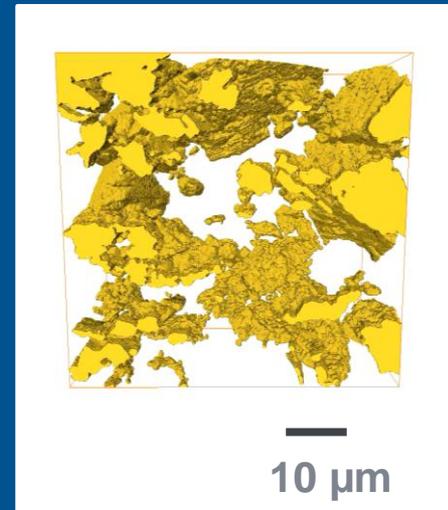
- Contexte et enjeux
- Caractérisation des matériaux
- Déformations et microstructure : dernières avancées
 - Essais en laboratoire et sur grands instruments
 - Les interfaces de la microstructure
- Conclusion et Perspectives

Caractérisation de la microstructure

- **Caractérisation des échantillons**
- **Méthodes d'imagerie**

Micro et nano tomographie RX

Microscopie électronique



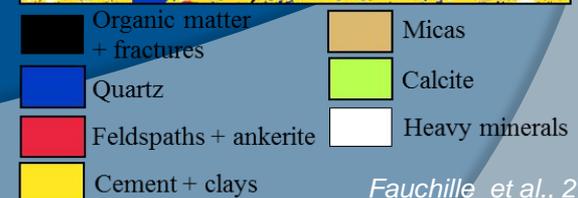
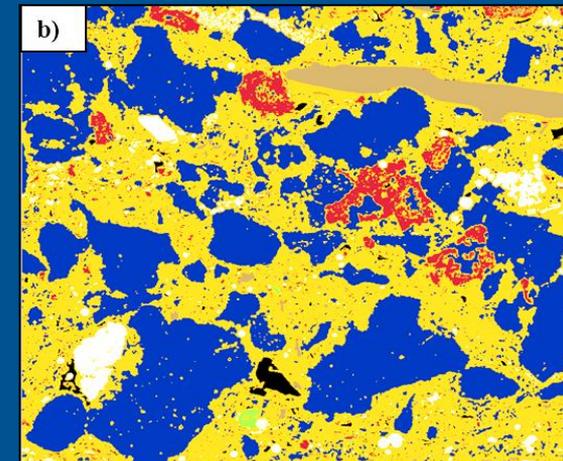
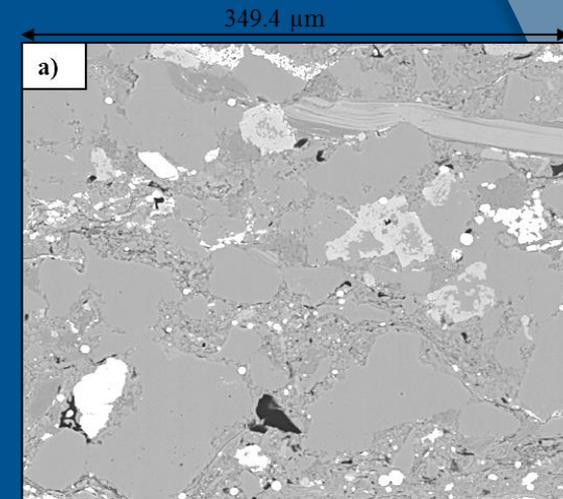
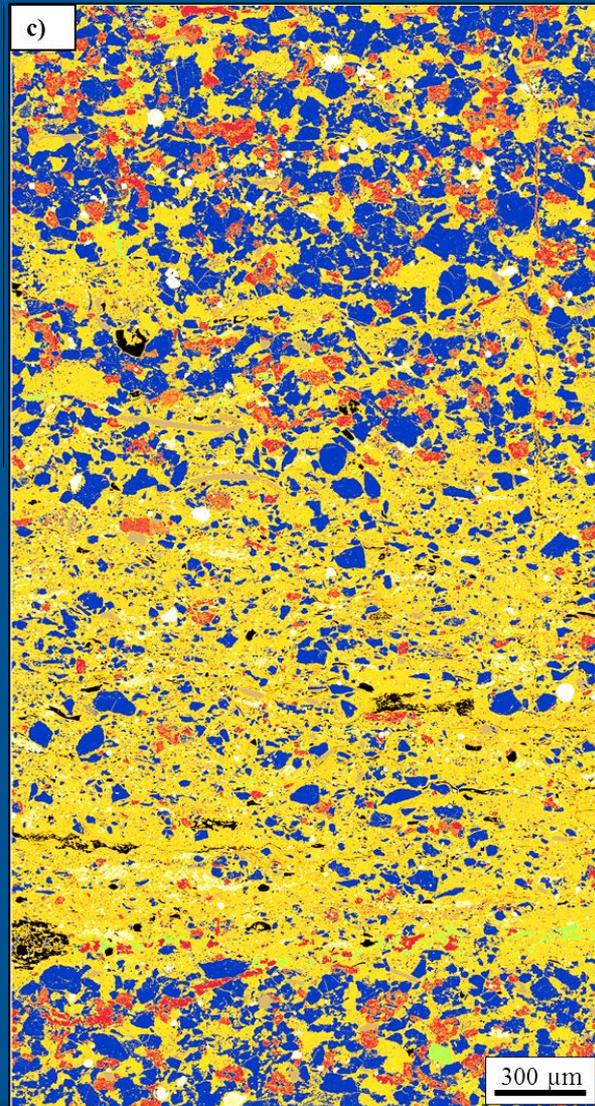
Ma et al., 2016

Caractérisation de la microstructure

- Bowland Shale
- Mosaique d'images MEB grand champ
- Segmentation des phases

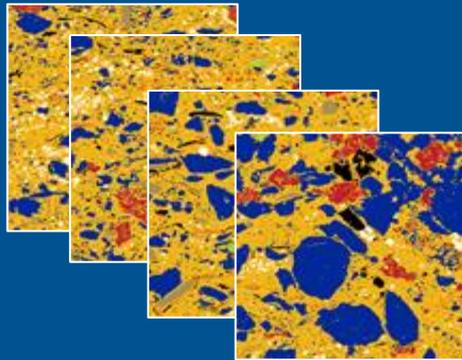
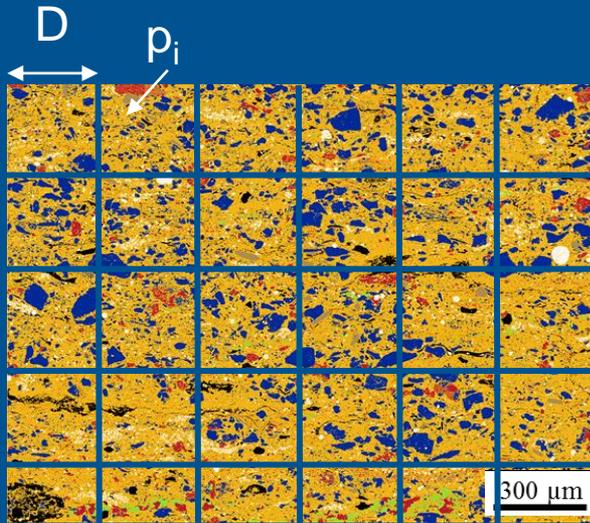
3 lamines sédimentaires

Fauchille et al., 2018



Fauchille et al., 2018

Caractérisation de la microstructure



N domaines D

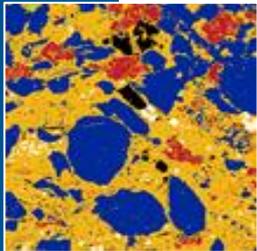
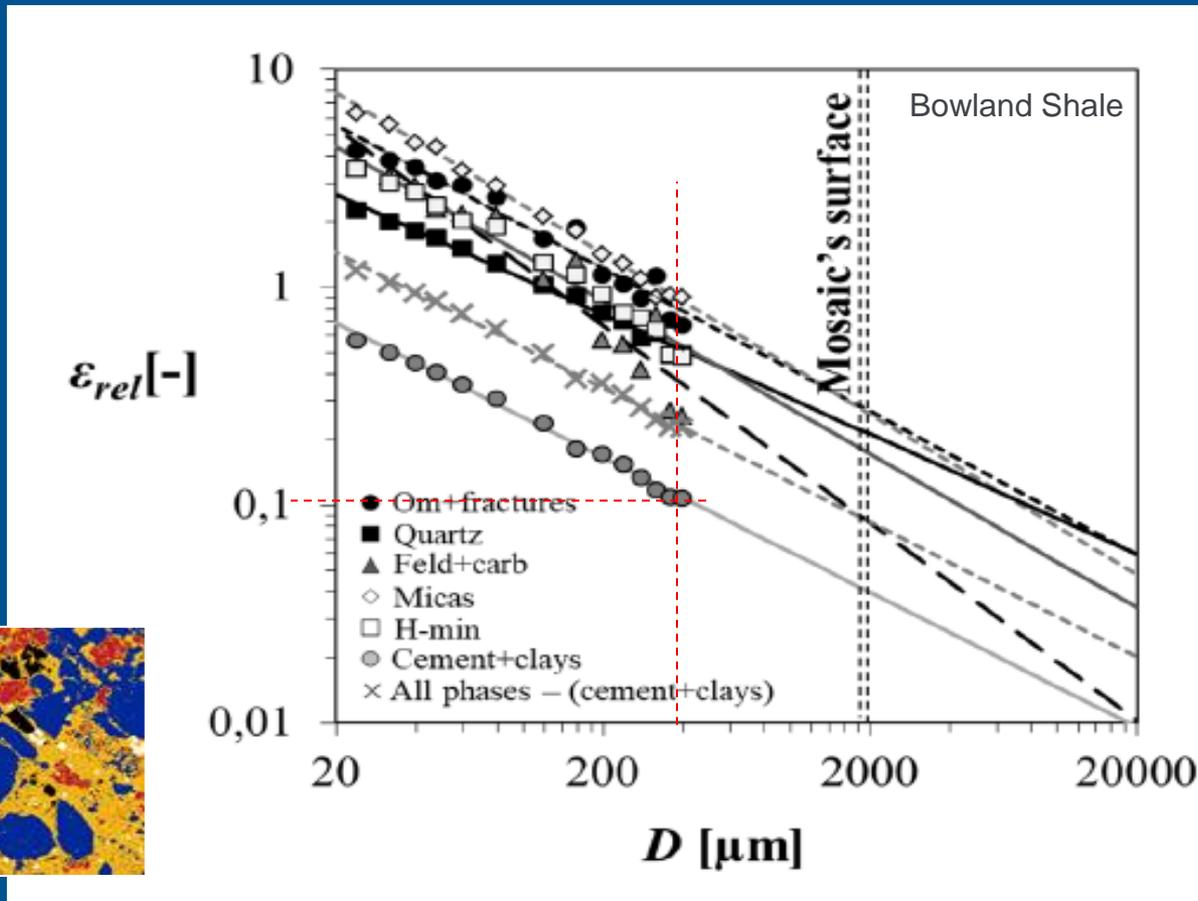
- Discrétisation en domaines D (*Kanit et al., 2003*)
- Chaque D est caractérisé par un paramètre P
- Pour une taille de D définie, l'écart type σ de P est calculé.

$$\varepsilon_{rel}(D) = \frac{2\sigma_P(D)}{\bar{P}\sqrt{N}}$$



Pour différentes tailles de D, il y a différentes valeurs de σ .

Caractérisation de la microstructure

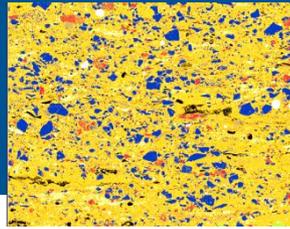


Pour une surface finie, on peut définir valeur de l'erreur de p .

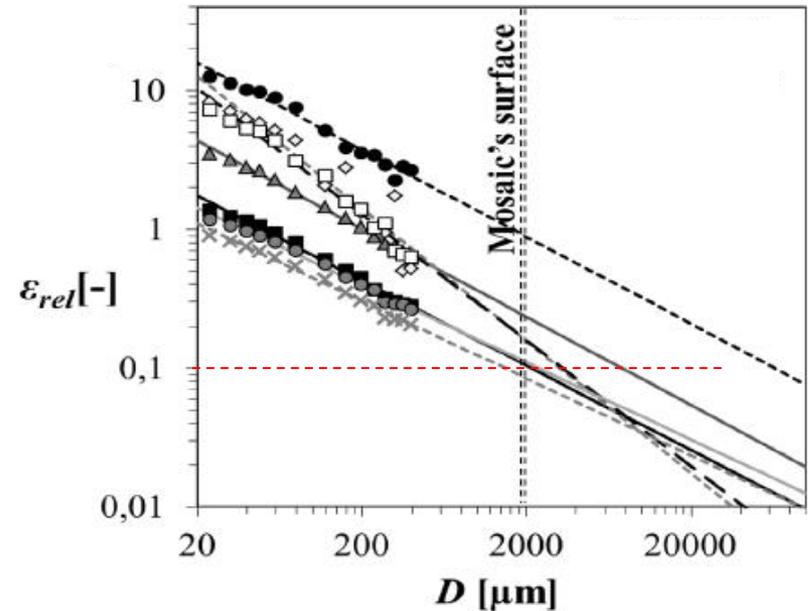
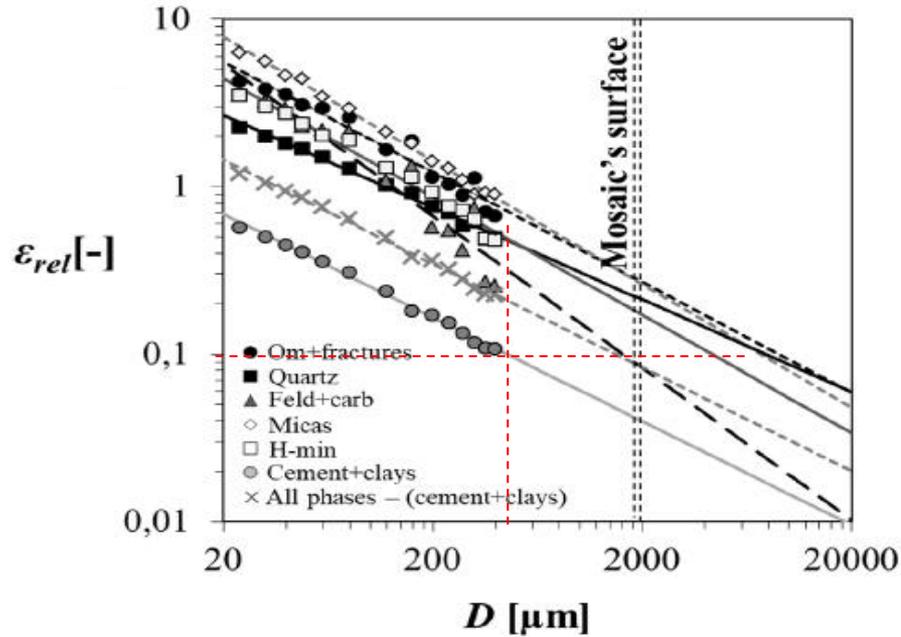
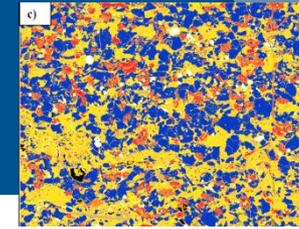
Pour $p \pm \sigma$, on peut définir une valeur de REA

Exemple : zone de travail de $300\mu m$ alors p peut varier de $\pm \sigma$ pour ε_{rel} de 0,1

Lamine riche en argiles et MO



Lamine riche en Qz et pauvre en MO



Liant (dont argiles) : REA pour $p \pm 0,1$
320 x 320 μm

REA pour $p \pm 0,1$
2 x 2 mm

→ Orientation du choix de la taille des échantillons

Plan

- Contexte et enjeux
- Caractérisation des matériaux
- Déformations et microstructure : dernières avancées
 - Essais en laboratoire et sur grands instruments
 - Les interfaces de la microstructure
- Conclusion et Perspectives

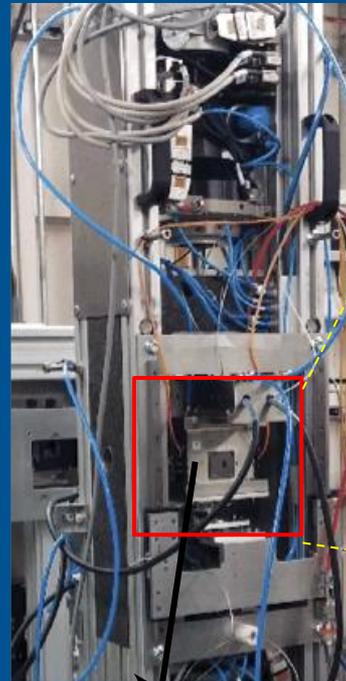
Déformations et microstructure :

dernières avancées

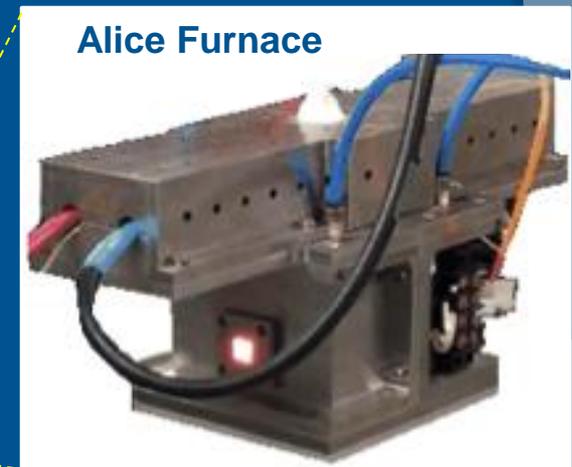
- Essais thermiques
- Essais hydriques

Essais – thermiques (1/2)

- Chauffage 20-400°C
- Argilite de Kimmeridge (UK)
- Mieux comprendre l'initiation et la propagation de fissures pendant la maturation
- Tomographie RX



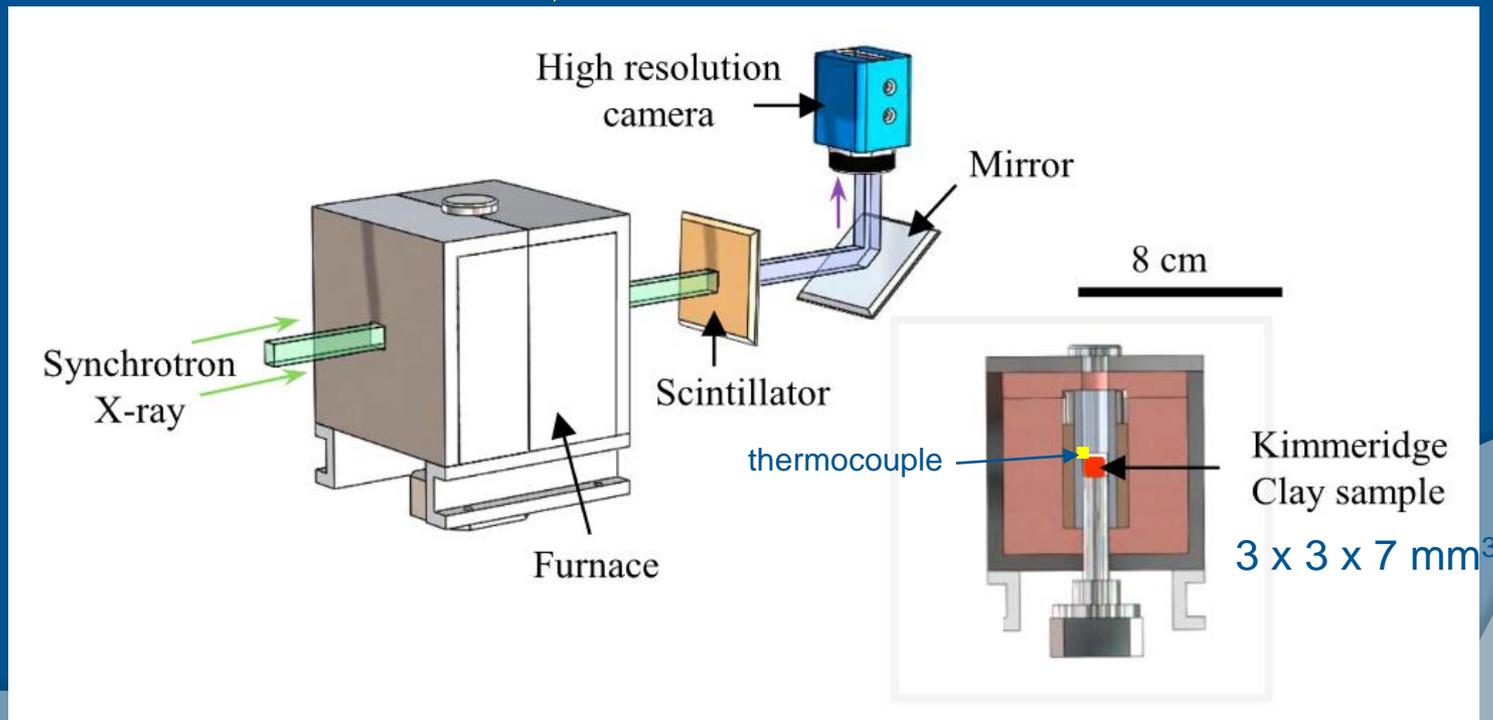
P2R



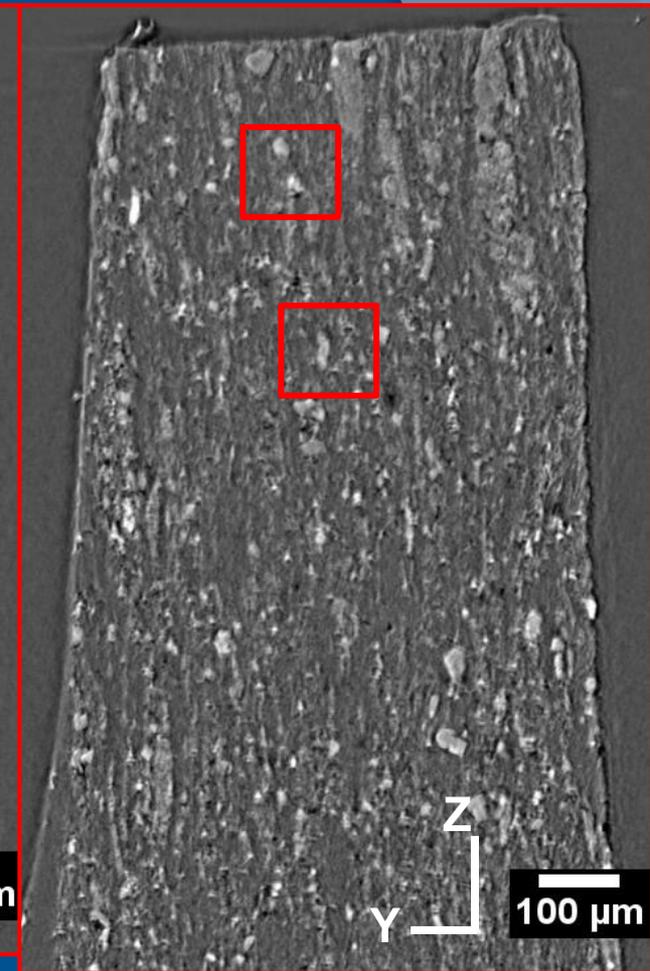
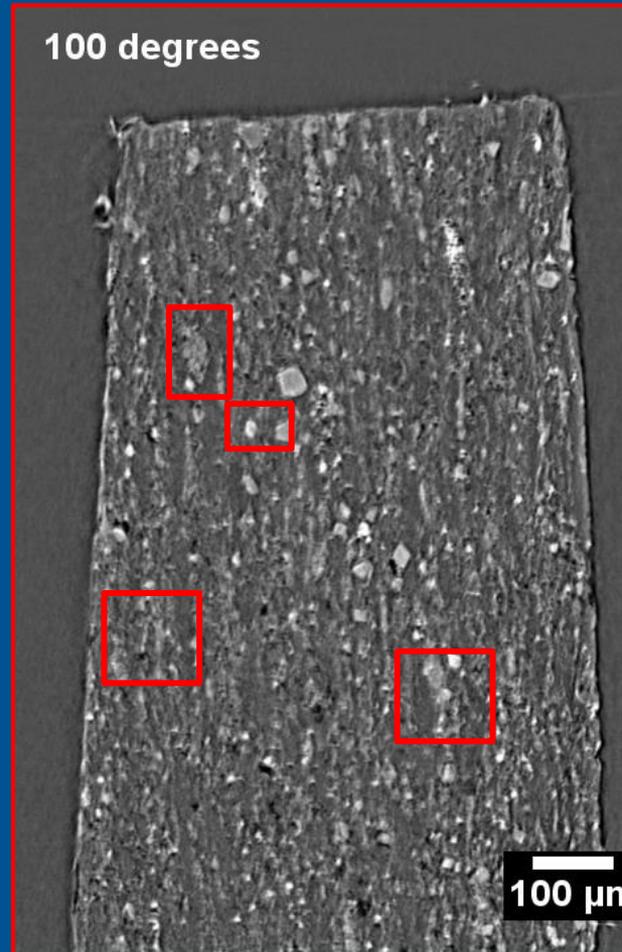
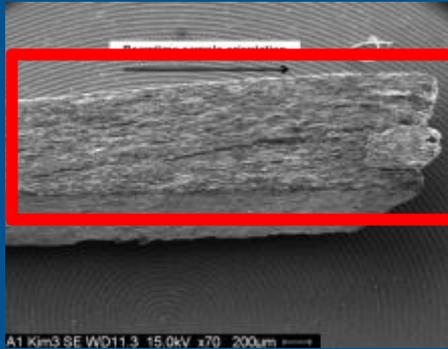
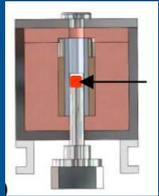
Essais – thermiques (1/2)

- Chauffage 20-400°C
- Argilite de Kimmeridge (UK)
- Mieux comprendre l'initiation et la propagation de fissures pendant la maturation
- Tomographie RX

20°C → 400°C at 2°C/min

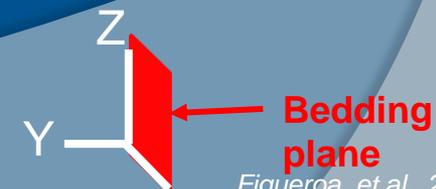


Essais – thermiques (1/2)

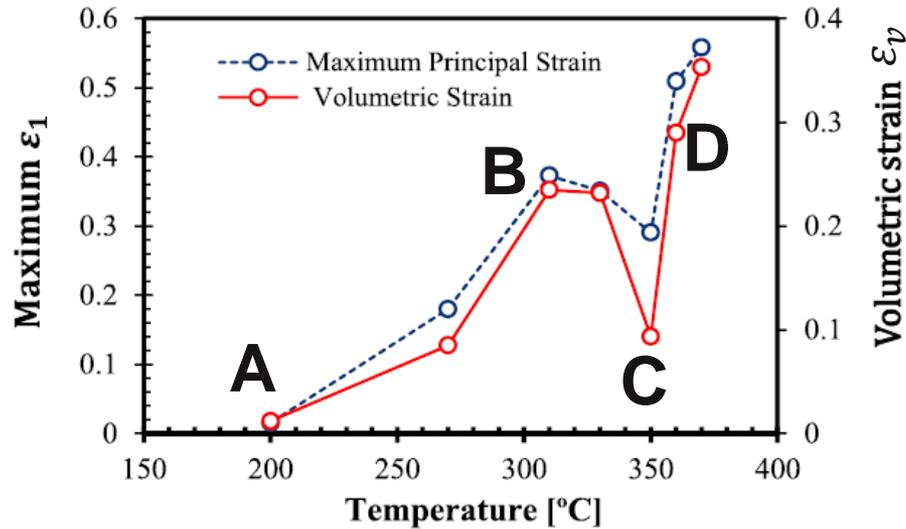


At atmospheric pressure :

- Cracks visible from 370°C
- Major growth between 370°C and 380°C



Essais – thermiques (1/2)



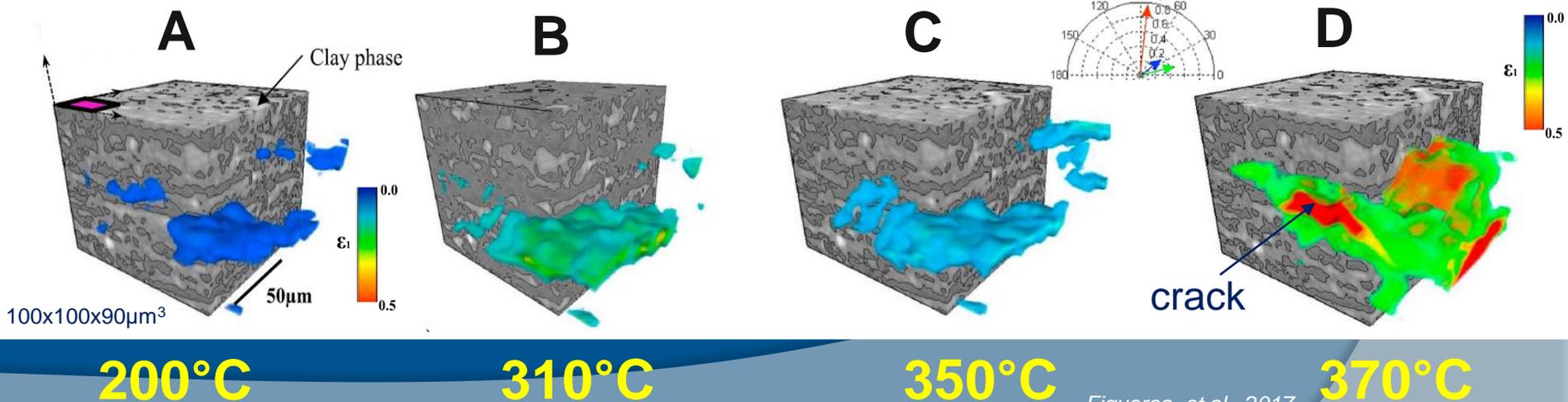
$$\varepsilon_v = \det(F) = (1 + e_1) (1 + e_2) (1 + e_3)$$

(Bazant, 1996)

200 ► 330 °C: Thermal expansion, gas pressure builds

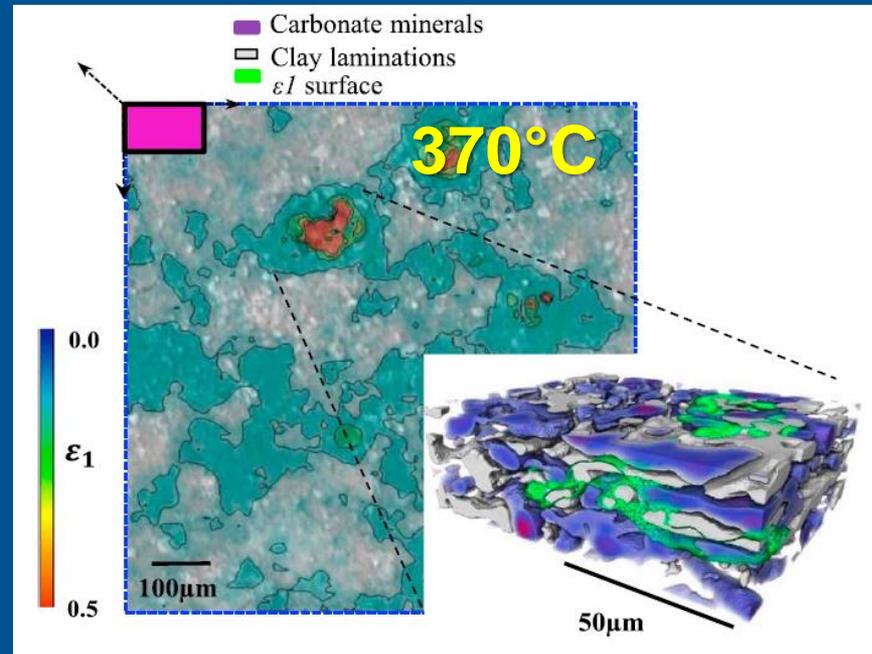
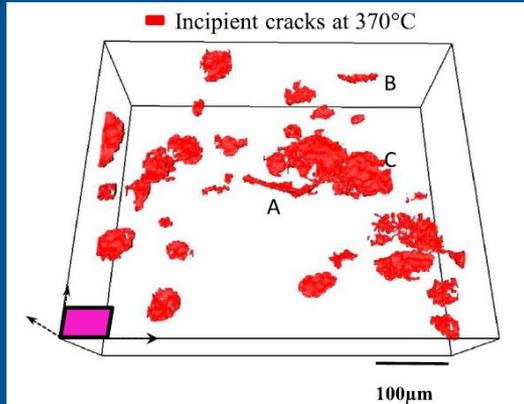
350°C : Reduction in total strain, initial release of gas to the exterior of the sample

370°C : Partial release of gas pressure
Cracks open, driving by opening mode, due to om transformation in volatile hydrocarbons

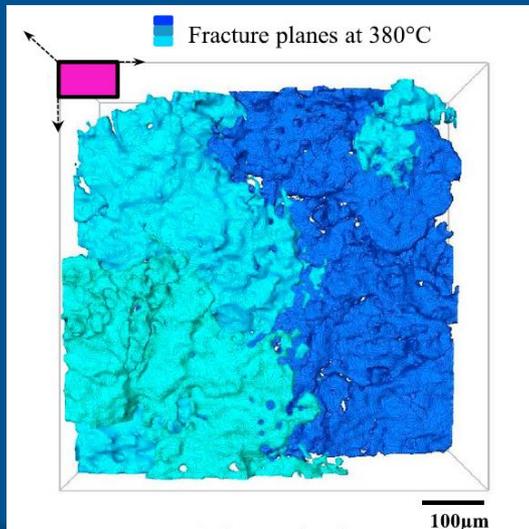


Essais – thermiques (1/2)

370°C Image segmentation



380°C

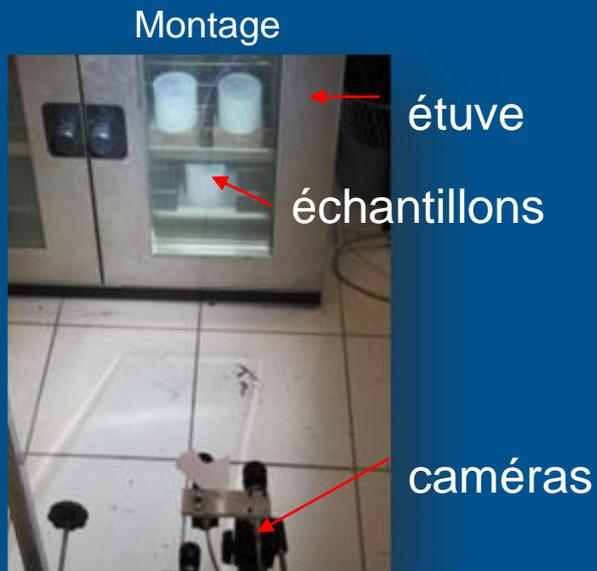


At 370°C ► cracks nucleate preferentially in the laminated organic matter mixed with clays, max thickness = 5 µm

At 380°C ► coalescence of small cracks parallel to bedding

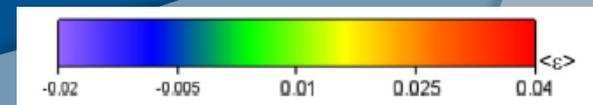
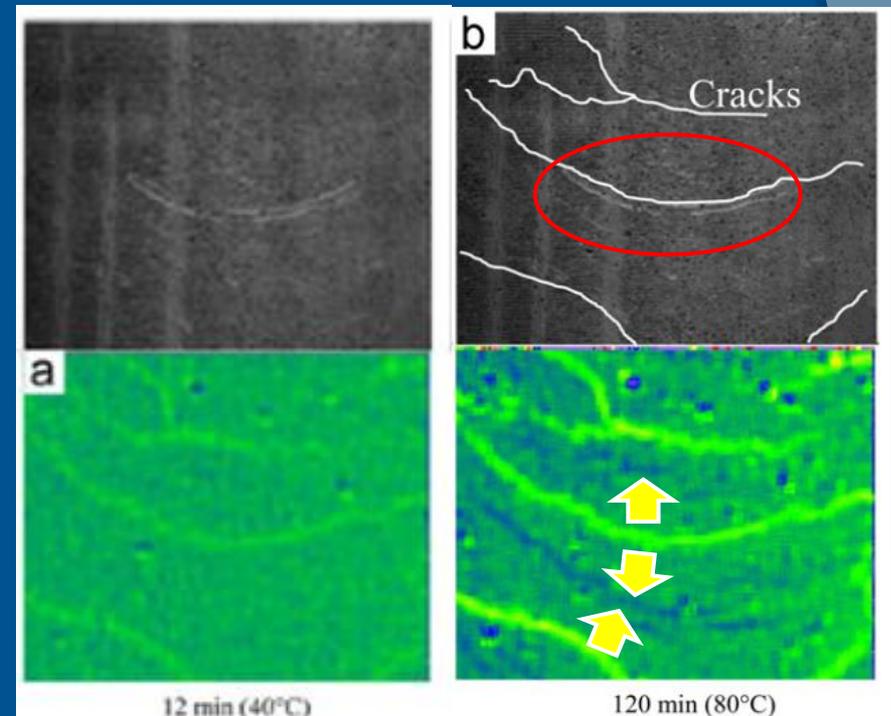
Essais – thermiques (2/2)

- Argilite de Tournemire
- Chauffage 20-200°C
- Suivi des déformations par corrélation d'images numériques



- Ouverture de fissures à l'interface entre « matrice » et la concrétion carbonatée

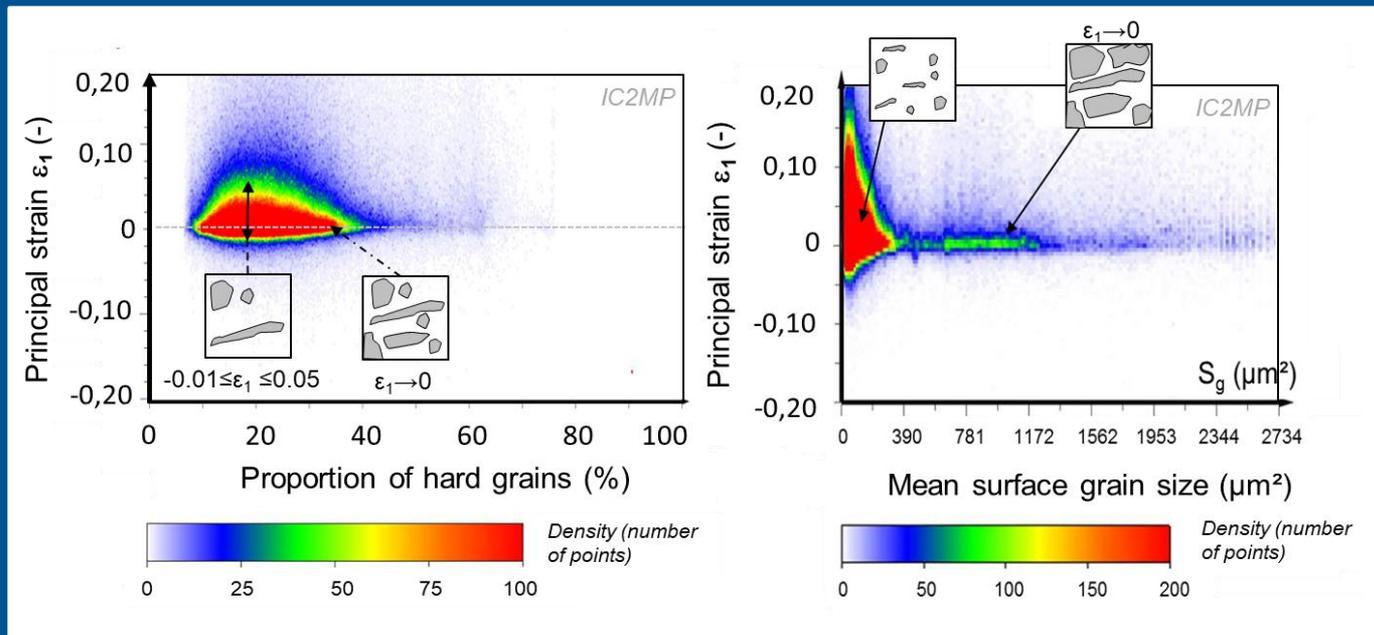
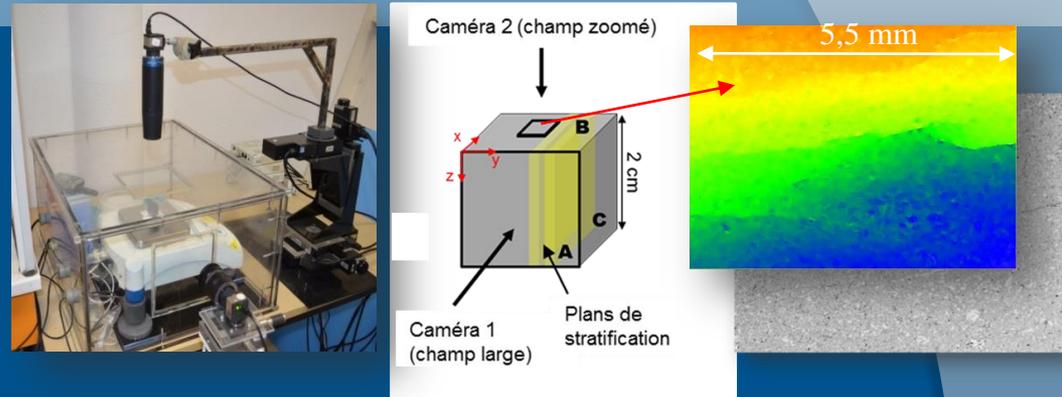
→ **Importance de l'interface minéralogique**



Hédan et al., 2012

Essais - hydriques

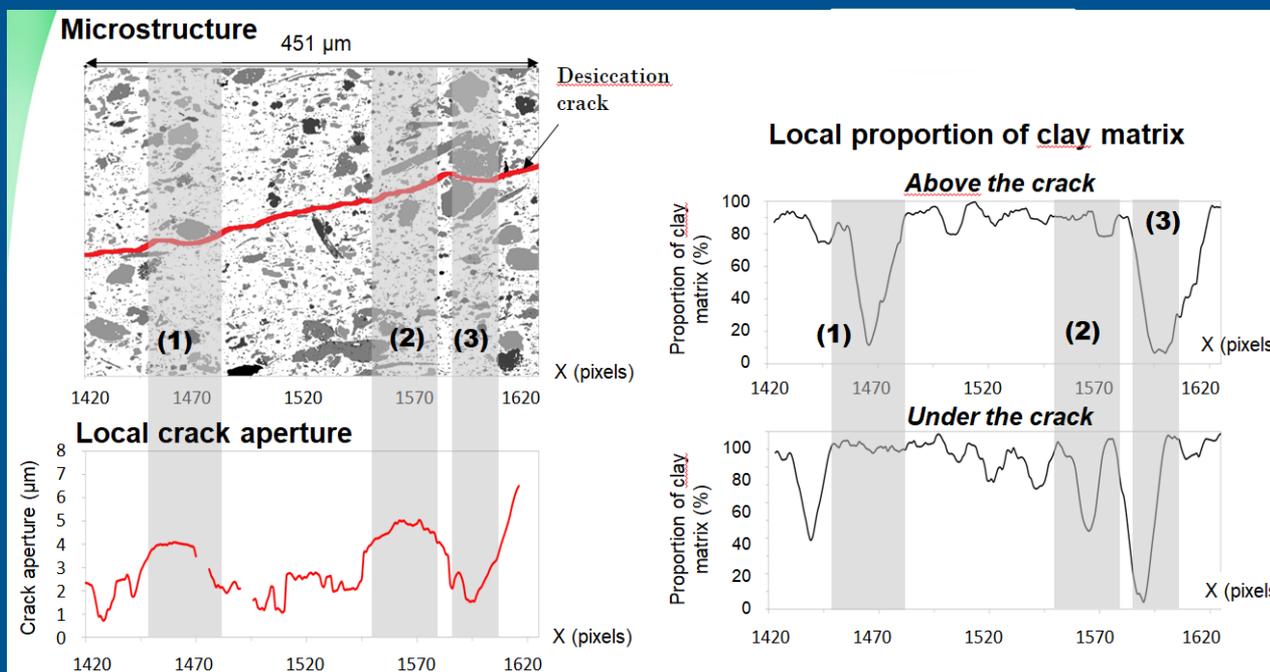
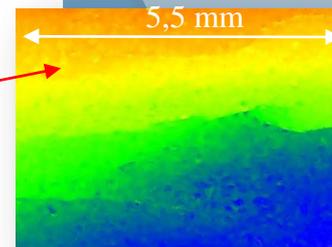
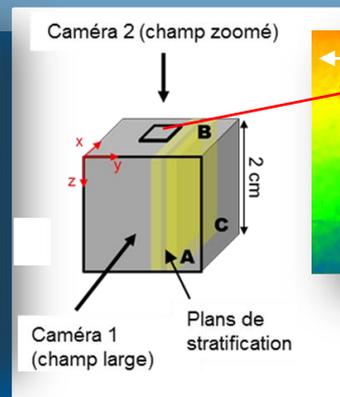
- Dessiccation à HR contrôlée
- Argilite de Tournemire
- Collage déformation / microstructure MEB segmentée sur grand champ



Pas de couplage direct déformation proportion ou taille des grains

Essais - hydriques

- Dessiccation à HR contrôlée
- Argilite de Tournemire
- Collage déformation / microstructure MEB segmentée sur grand champ



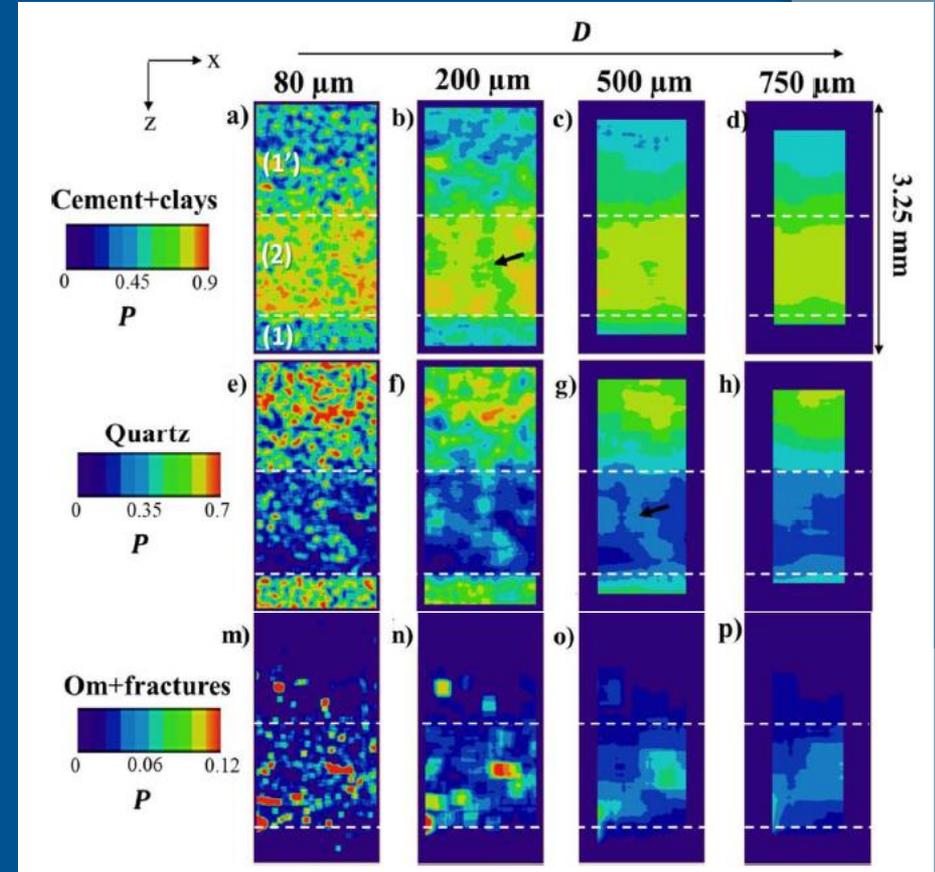
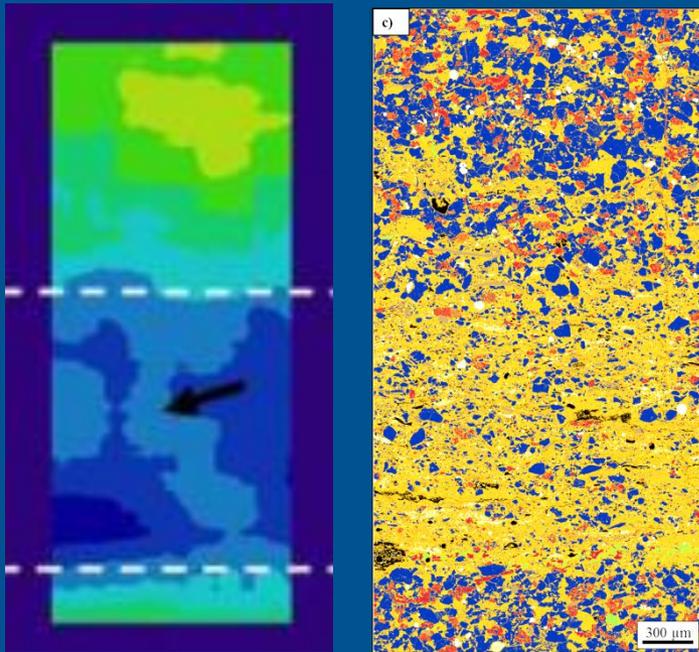
Fauchille et al 2016b

Ouverture pour des interfaces marquées de proportion de matrice/inclusions

Détection des interfaces

Notion d'interfaces très récurrente
Interfaces grain matrice, grain/grain...

Y a-t-il d'autres interfaces plus
« diffuses » ?



→ Détection d'interfaces multi-échelles

Plan

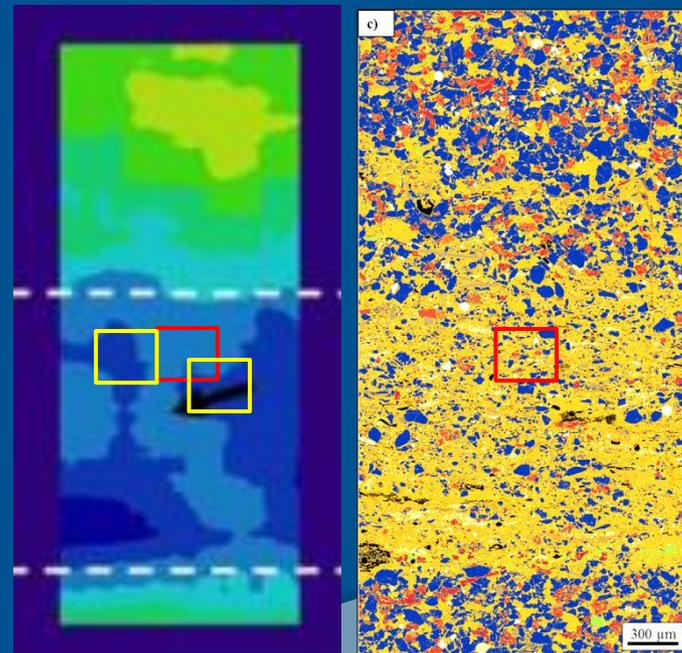
- Contexte et enjeux
- Caractérisation des matériaux
- Déformations et microstructure : dernières avancées
 - Essais en laboratoire et sur grands instruments
 - Les interfaces de la microstructure
- Conclusion et Perspectives

Conclusion

- 6 années de collaborations entre (géo)mécaniciens et géologues :
échantillonnage, préparation, rigs, analyse
- Essais thermo hydro mécaniques variés
→ **interfaces**

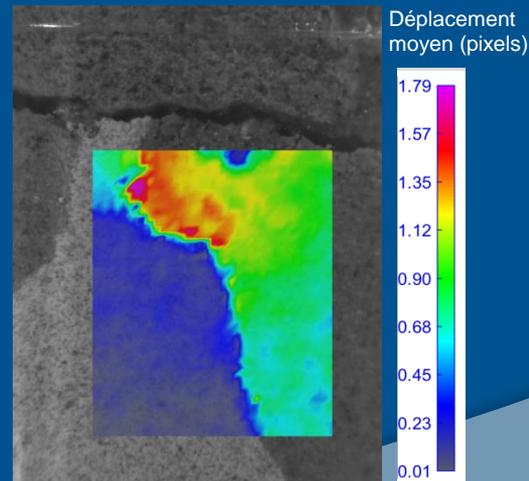
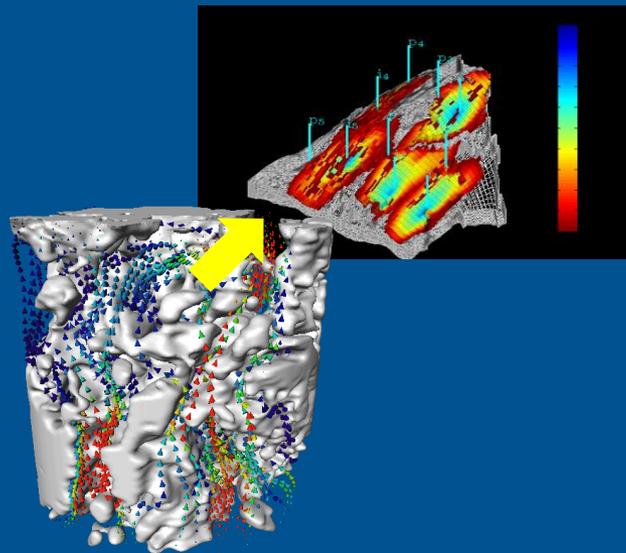
→ Vers un couplage non local ?

→ Vers des interfaces non locales ?



Perspectives

- Essais mécaniques **in-situ** MEB et MEBE
- Localisation des **écoulements** pendant le chargement



Merci

anne-laure.fauchille@ec-nantes.fr

Références

- Bonnelye, A., Schubnel, A., David, C., Henry, P., Guglielmi, Y., Gout, C., Fauchille, A.L. and Dick, P., 2017. Elastic wave velocity evolution of shales deformed under uppermost crustal conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1), pp.130-141.
- Bonnelye, A., Schubnel, A., David, C., Henry, P., Guglielmi, Y., Gout, C., Fauchille, A.L. and Dick, P., 2017. Strength anisotropy of shales deformed under uppermost crustal conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1), pp.110-129.
- Fauchille, A.L., 2015. *Determinismes microstructuraux et mineralogiques de la fissuration hydrique dans les argillites de Tournemire: apports couples de la pétrographie quantitative et de la corrélation d'images numériques* (Doctoral dissertation, PhD thesis, University of Poitiers, France).
- Fauchille, A.L., Hedan, S., Valle, V., Pret, D., Cabrera, J. and Cosenza, P., 2016. Multi-scale study on the deformation and fracture evolution of clay rock sample subjected to desiccation. *Applied Clay Science*, 132, pp.251-260.
- Fauchille, A.L., Hedan, S., Valle, V., Pret, D., Cabrera, J. and Cosenza, P., 2016.b Relationships between cracking, strains and proportions of clay matrix and rigid inclusions in Tournemire clay rock. *Proceedings of the 2nd Petrus-OPERA PhD and*, p.42.
- Fauchille, A.L., van den Eijnden, A.P., Ma, L., Chandler, M., Taylor, K.G., Madi, K., Lee, P.D. and Rutter, E., 2018. Variability in spatial distribution of mineral phases in the Lower Bowland Shale, UK, from the mm-to μ m-scale: Quantitative characterization and modelling. *Marine and Petroleum Geology*, 92, pp.109-127.
- Figueroa Pilz, F., Dowey, P.J., Fauchille, A.L., Courtois, L., Bay, B., Ma, L., Taylor, K.G., Mecklenburgh, J. and Lee, P.D., 2017. Synchrotron tomographic quantification of strain and fracture during simulated thermal maturation of an organic-rich shale, UK Kimmeridge Clay. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(4), pp.2553-2564.
- Hedan, S., Cosenza, P., Valle, V., Dudoignon, P., Fauchille, A.L. and Cabrera, J., 2012. Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, pp.64-75.
- Hedan, S., Fauchille, A.L., Valle, V., Cabrera, J. and Cosenza, P., 2014. One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68, pp.22-35.
- Ma, L., Fauchille, A.L., Dowey, P.J., Pilz, F.F., Courtois, L., Taylor, K.G. and Lee, P.D., 2017. Correlative multi-scale imaging of shales: a review and future perspectives. *Geological Society, London, Special Publications*, 454, pp.SP454-11.
- Ma, L., Taylor, K.G., Lee, P.D., Dobson, K.J., Dowey, P.J. and Courtois, L., 2016. Novel 3D centimetre-to nano-scale quantification of an organic-rich mudstone: The Carboniferous Bowland Shale, Northern England. *Marine and Petroleum Geology*, 72, pp.193-205.
- Valle, V., Hedan, S., Cosenza, P., Fauchille, A.L. and Berdjane, M., 2015. Digital image correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks. *Experimental Mechanics*, 55(2), pp.379-391.