

Impact de la réactivité géochimique sur les propriétés mécaniques des roches. Exemples d'une diagenèse d'enfouissement et du stockage du CO₂

Eric Kohler





A quoi servent les études de géochimie et de minéralogie ?

- Déterminer les chemins réactionnels des différents processus géochimiques qui ont lieu lors des réactions
 - expérimentation en laboratoire
 - analogue géologique
- Permettre des modélisations prédictives
- Deux exemples
 - Un réservoir gréseux Canadien (Formation de Mannville)
 - Une couverture argileuse Française (Bassin Parisien)



Objectifs de la présentation

- Présentation de propriétés mesurées en minéralogie-géochimie qui sont utiles pour les mécaniciens des roches.
- Apports de l'approche "géochimique" pour la construction de modèles (numériques) prédictifs.
- Outils pour des observations à l'échelle des phénomènes physiques et chimiques.
- ➔ Résultat : décrire l'échantillon avant et après les phénomènes qui nous intéressent
 - ➔ quantifier les minéraux et leur réactivité
 - ➔ déterminer leur localisation
 - ➔ déterminer leur faciès, texture ...



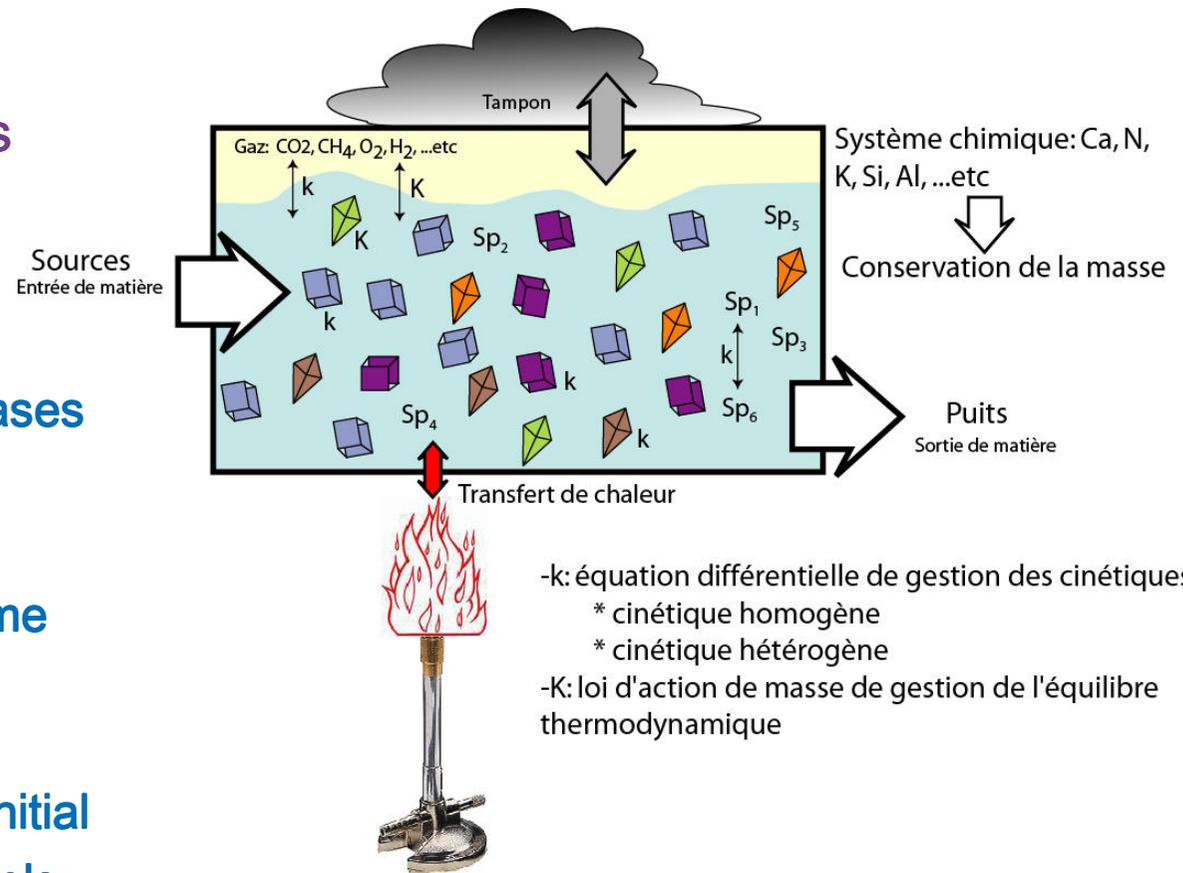
Les interactions fluides roches

■ Les différents processus géochimiques

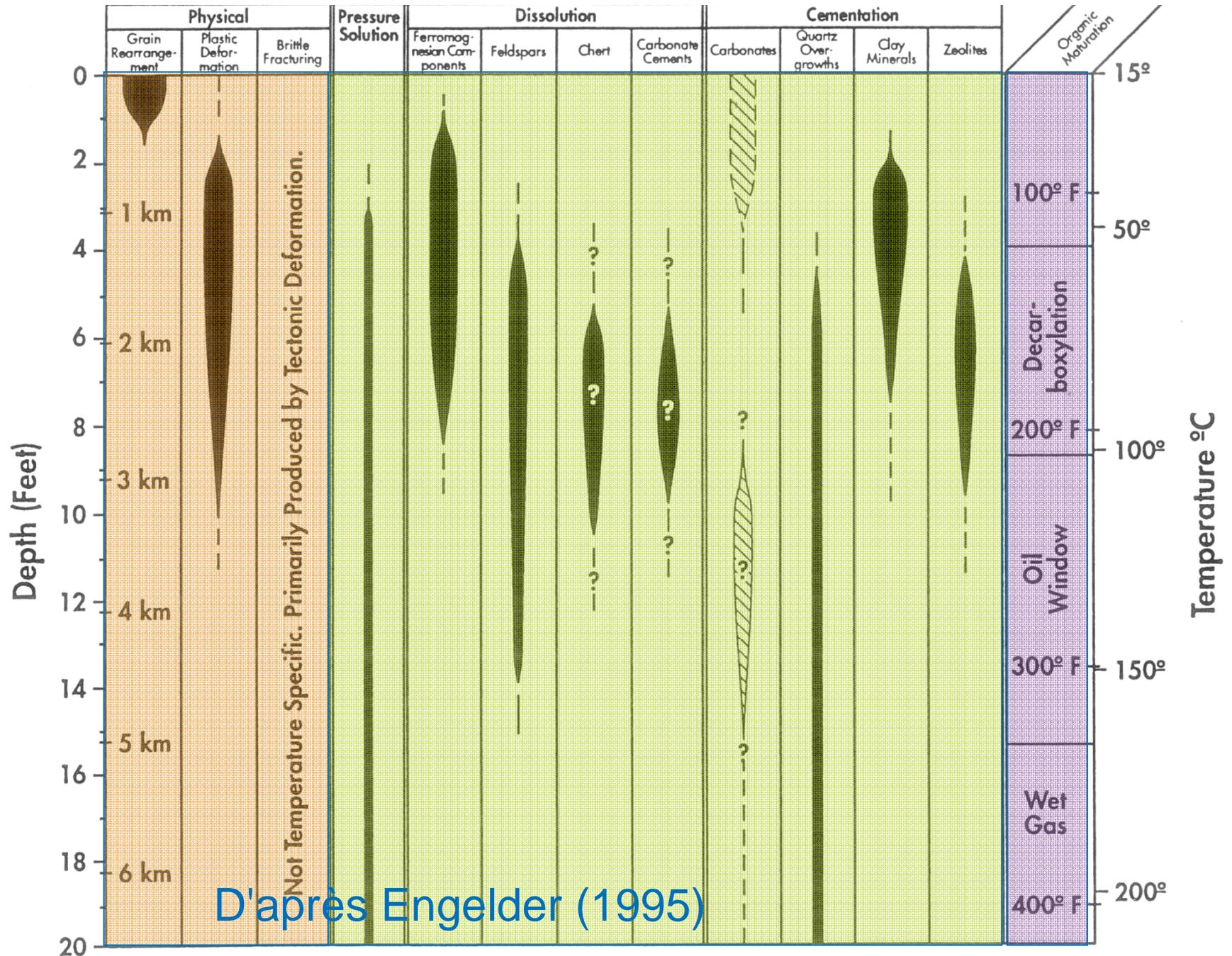
- Les dissolutions
- Les précipitations
- Les transitions des phases (HT)

■ Les différents modèles

- système ouvert /système fermé
- Notions d'équilibre
- Le système chimique initial
- Les chemins réactionnels : transfert de chaleur et de matière



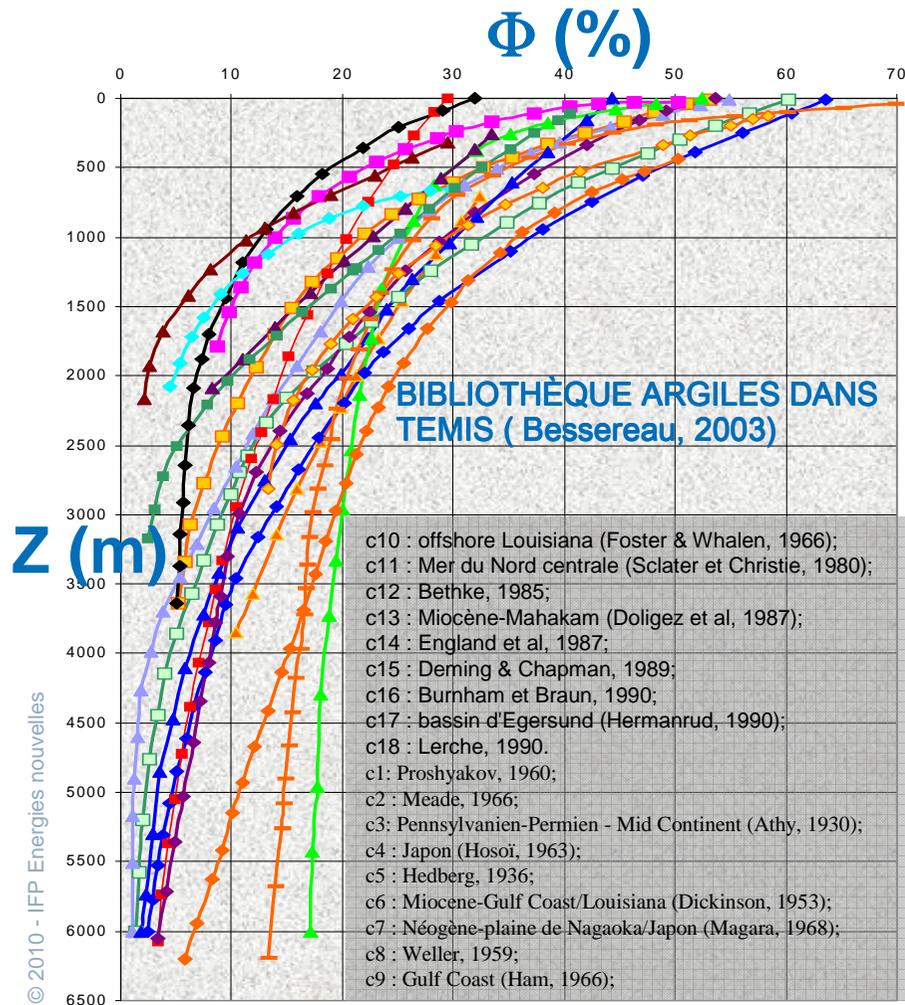
Classification des processus de transformation des roches



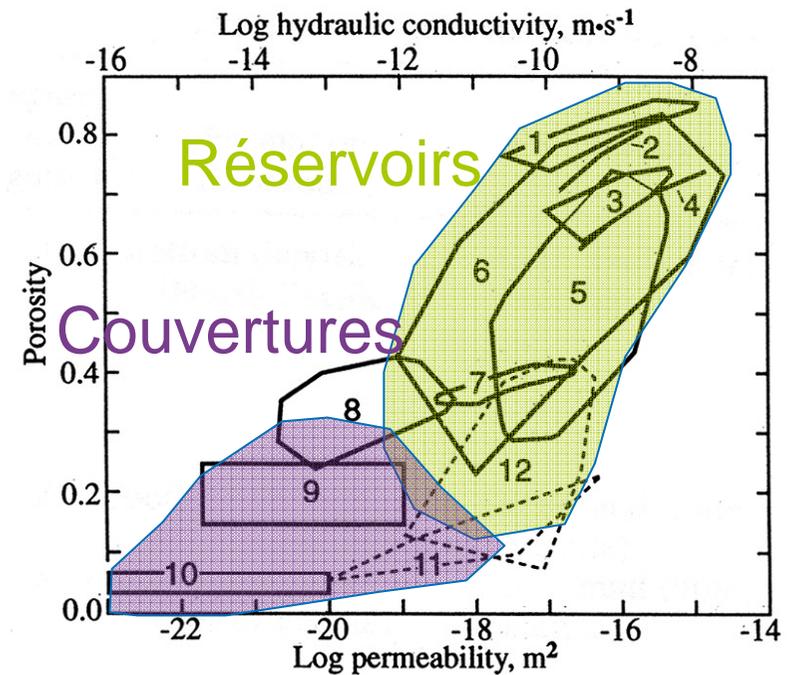
D'après Engelder (1995)



Domaine porosité-profondeur $\Phi(Z)$ couvert par les argiles de bassins : liens avec les propriétés d'écoulement



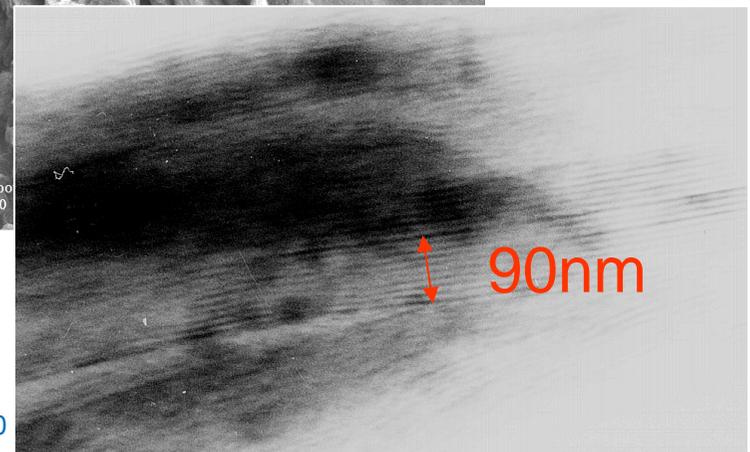
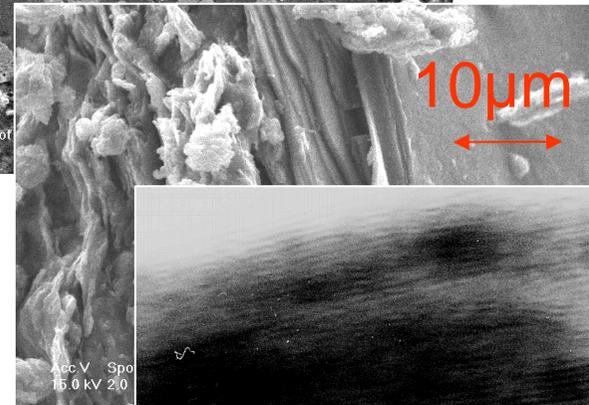
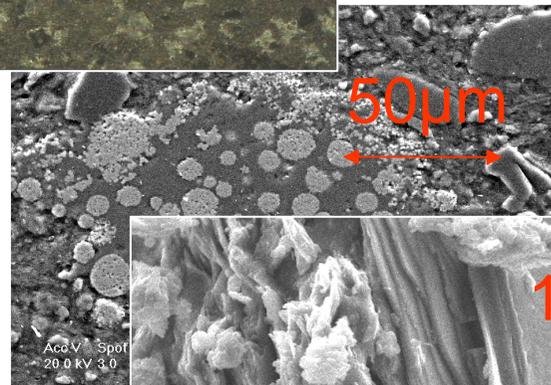
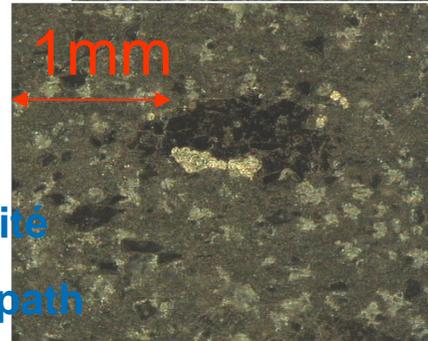
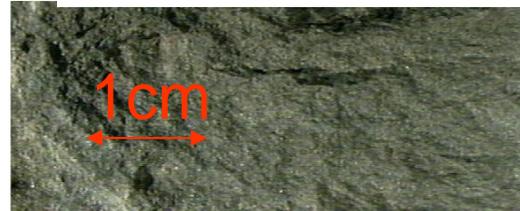
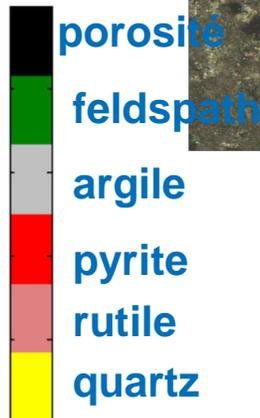
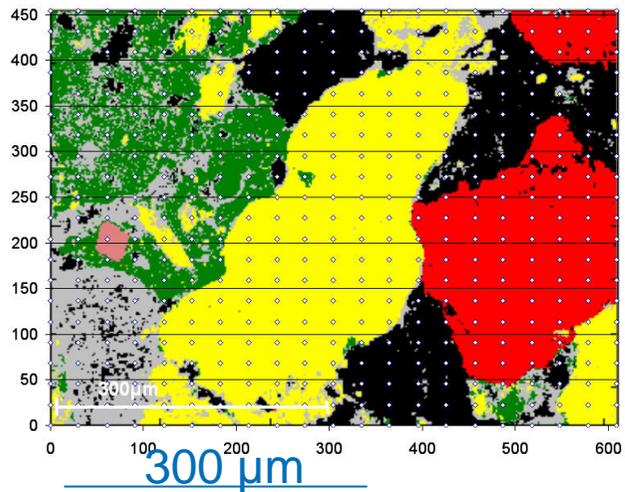
Les réservoirs et les couvertures géologiques



Neuzil (1994)

Une couverture argileuse

Un réservoir gréseux



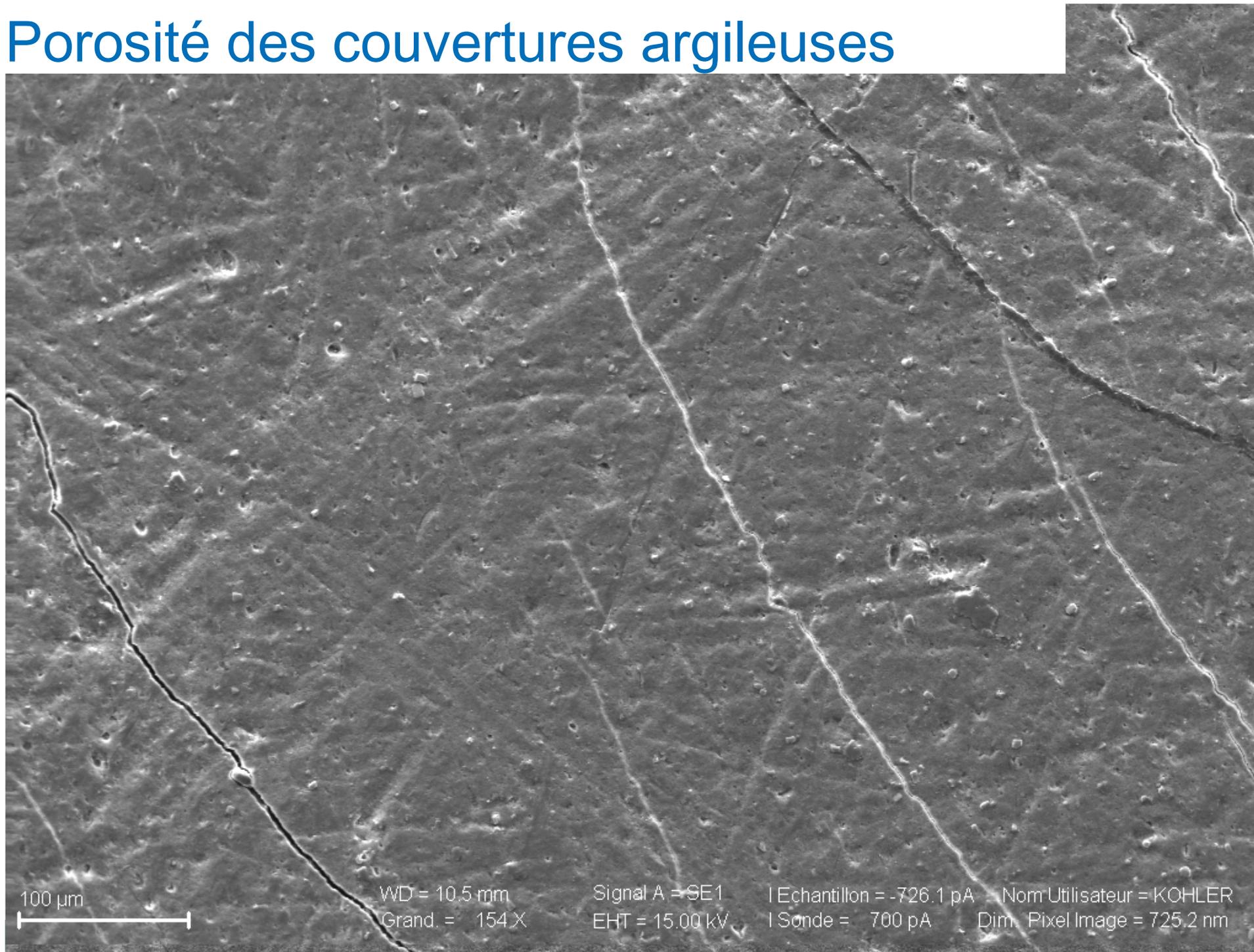
Roche sédimentaire, alumino-silicatée

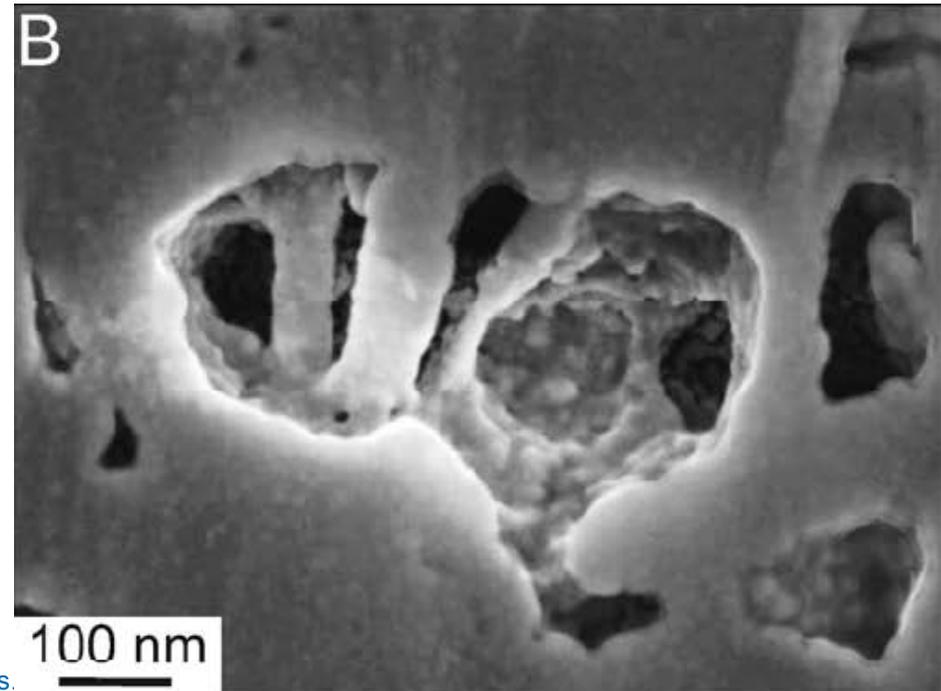
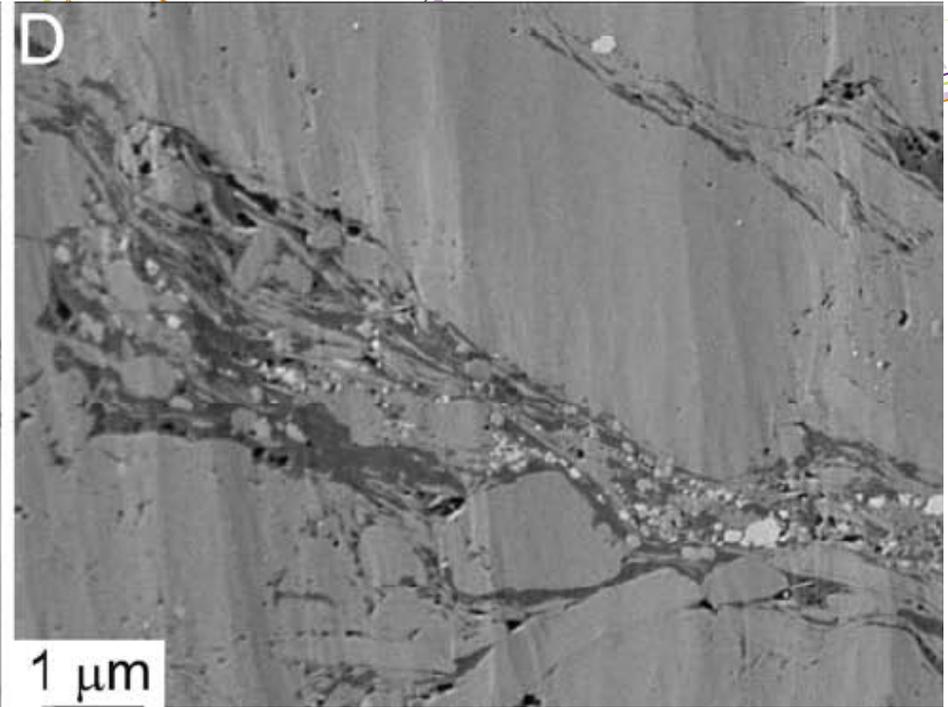
Structure feuilletée (phyllosilicates)

Propriétés spécifiques :

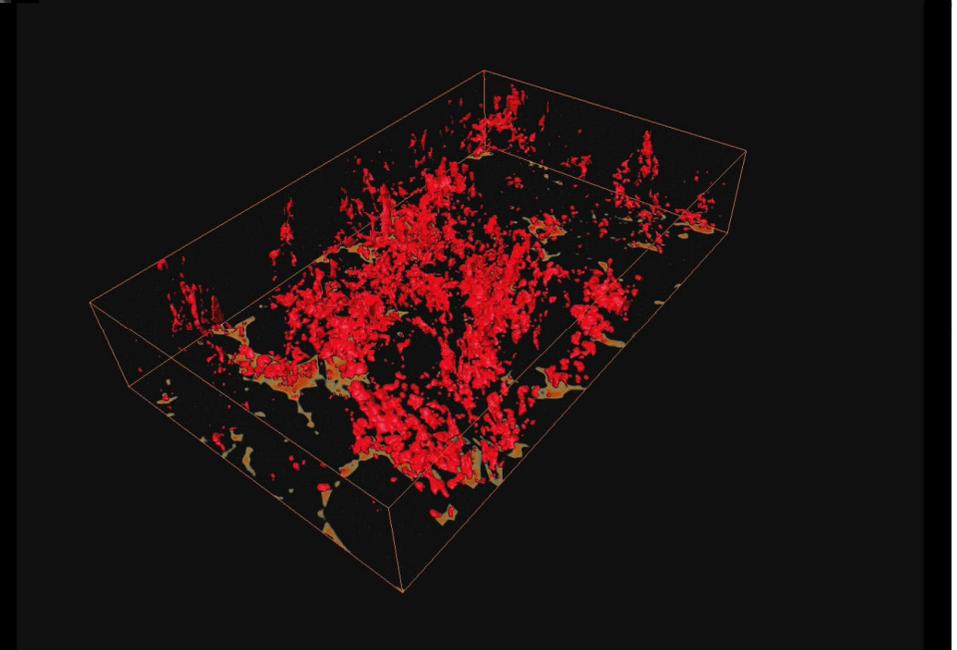
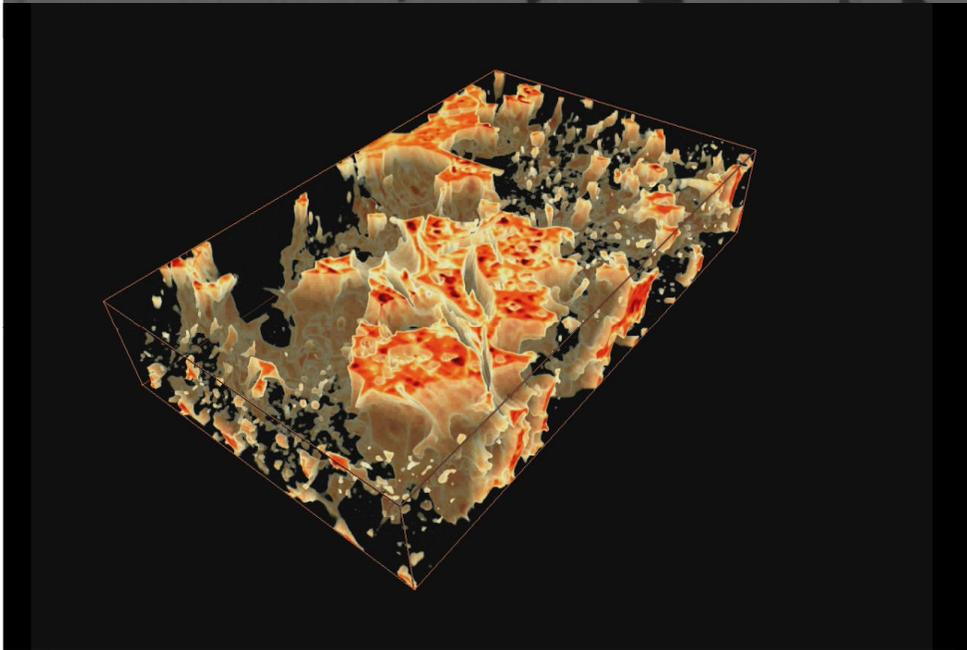
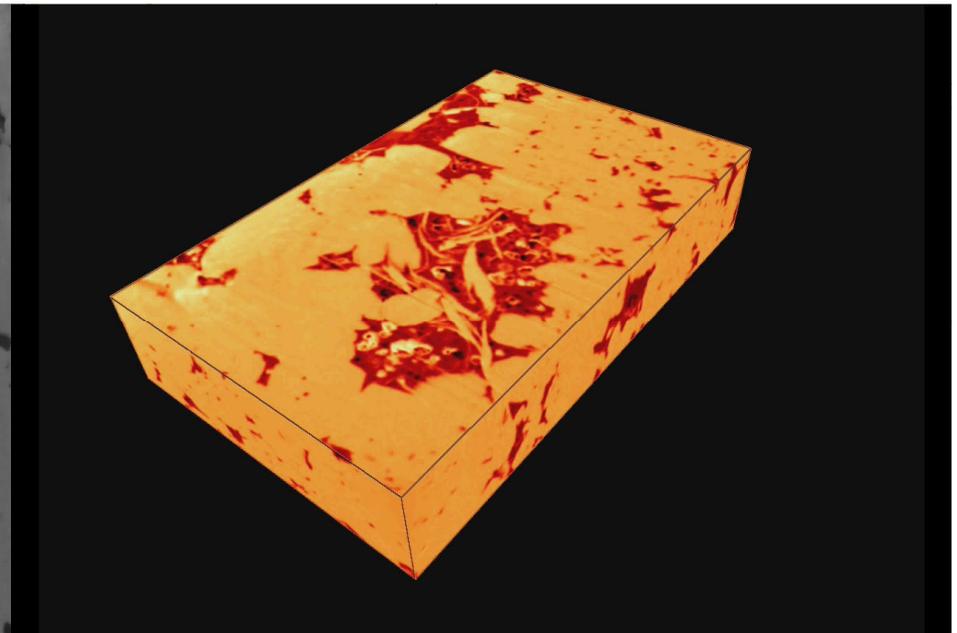
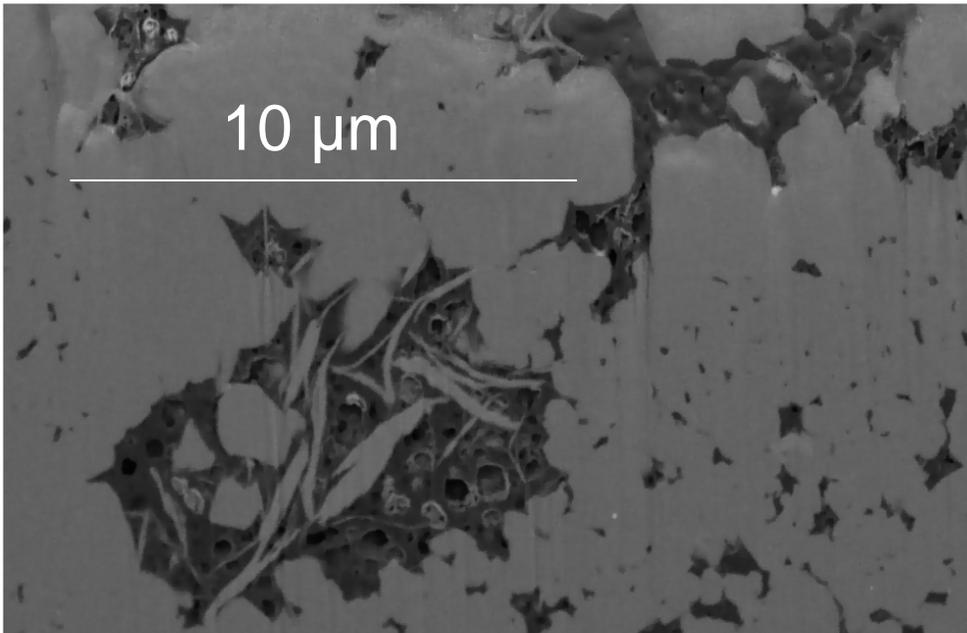
- **Plasticité** (hydratation, intercalation des feuillets)
- **Adsorption et échange des ions** (adaptation du réseau cristallin par gonflement)
- **Milieu finement divisé** (phase minérale < 2µm)
- **Porosité et perméabilité faibles**

Porosité des couvertures argileuses





Photographies MEB (électron secondaire) de la porosité nanométrique dans les Barnett shale (USA), d'après Loucks *et al.* (2009).



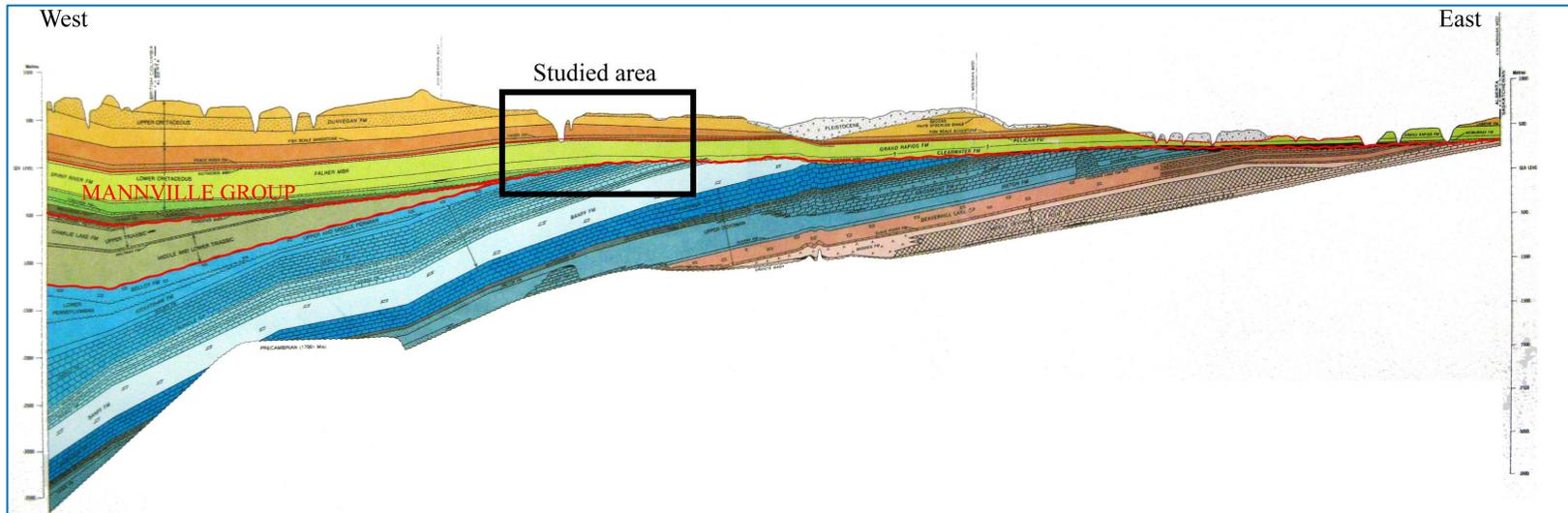
visualisation 3D FIB (électrons rétrodiffusés) de la porosité d'un échantillon argileux), reconstruction 3D à partir des coupes FIB en niveaux de gris, décomposition de la zone riche en matière organique et de la porosité, S. Youssef (Comm. Pers.)



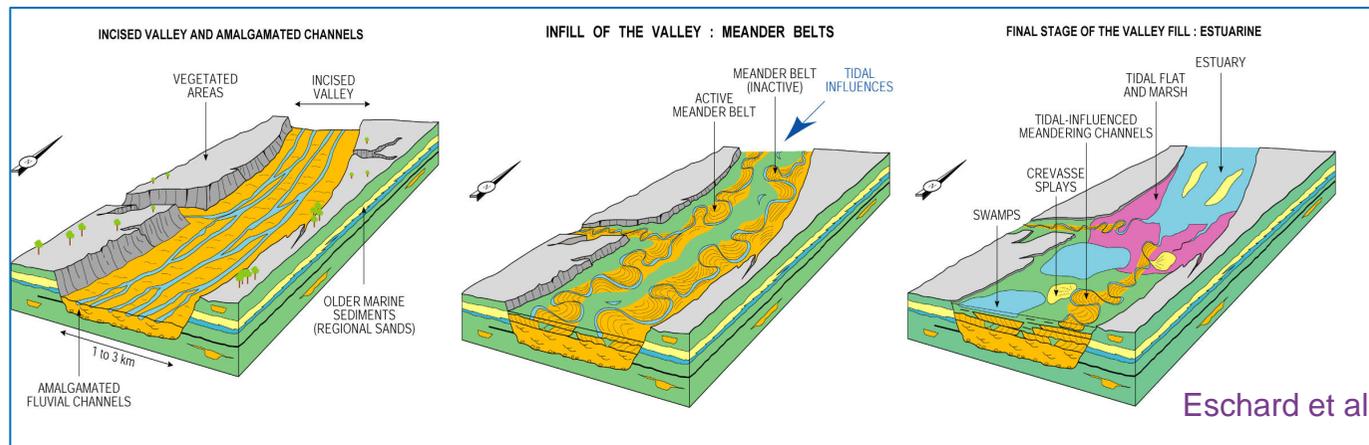
Caractérisation de la diagenèse d'enfouissement de la Formation de Mannville (Canada)

Bassin sédimentaire de l'ouest du Canada

Deschamps *et al* (2010)

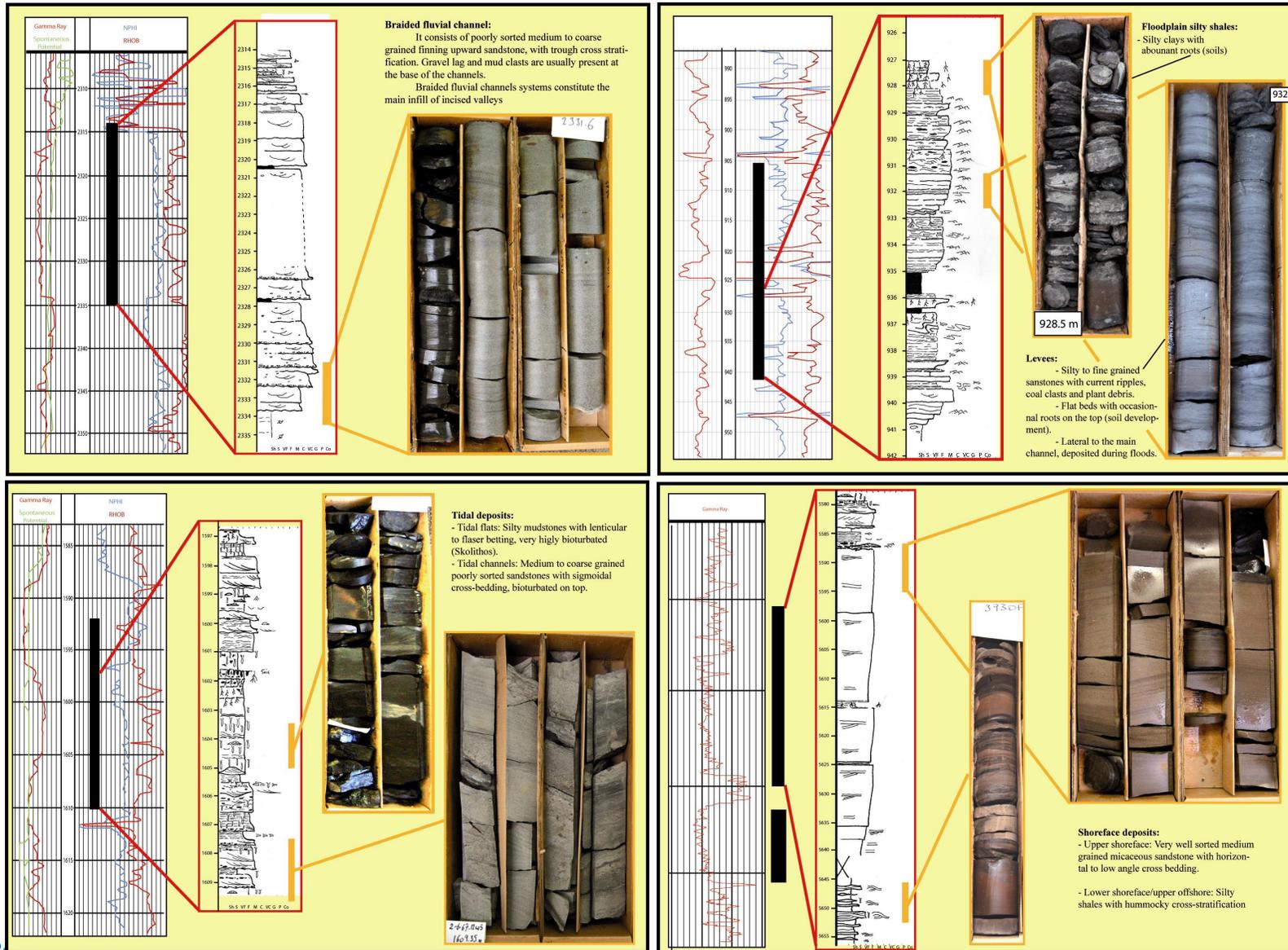


Modèle conceptuel



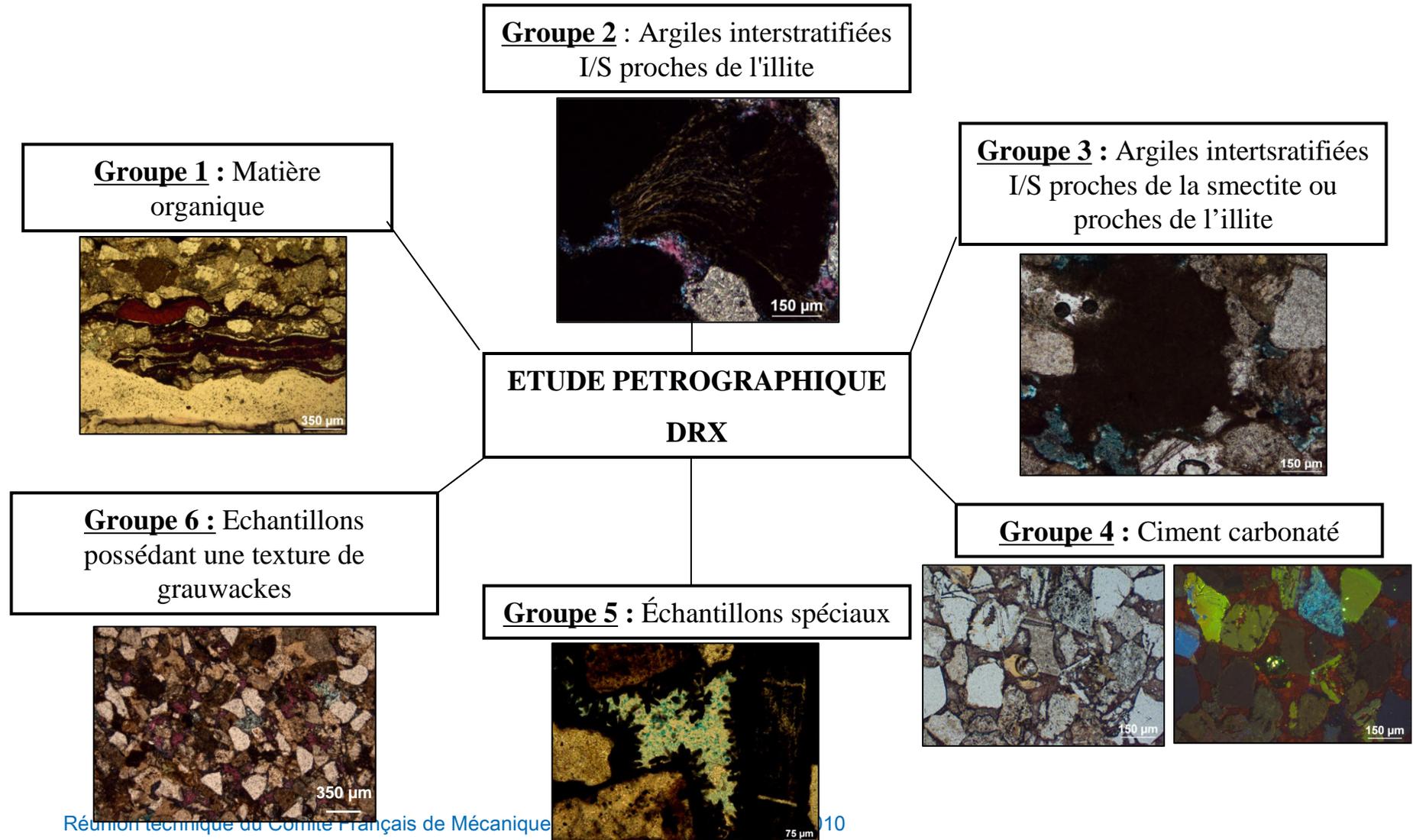
Architecture stratigraphique

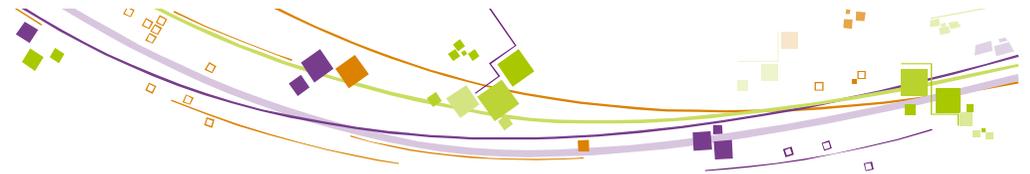
Description des faciès et des environnements de dépôt



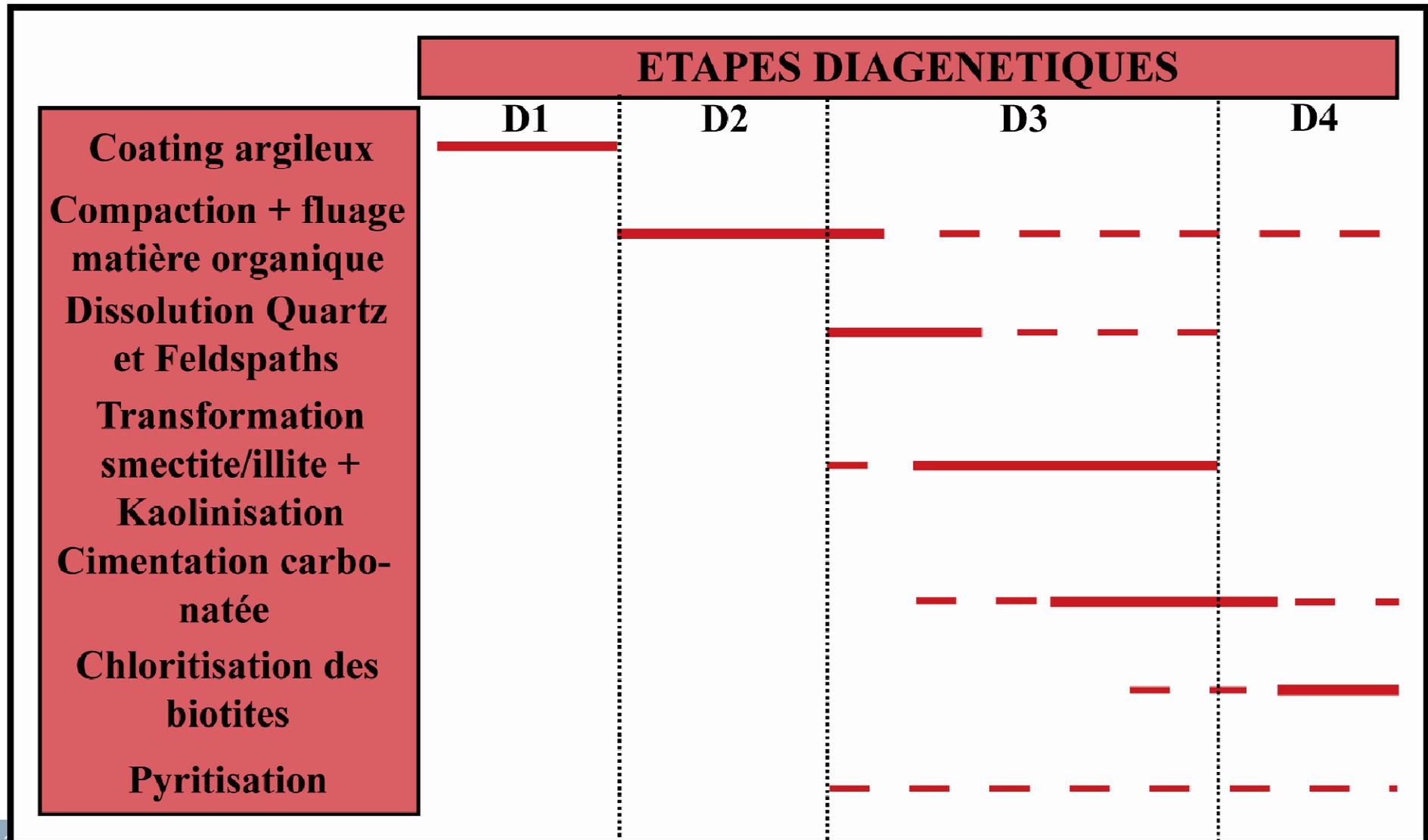


Regroupement des lames minces en 6 groupes distincts en fonction des minéraux





Interprétations

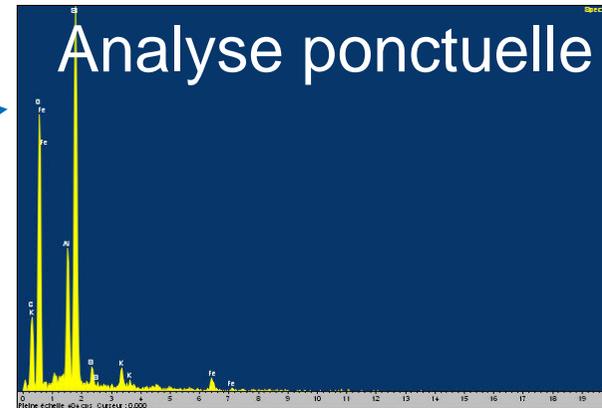
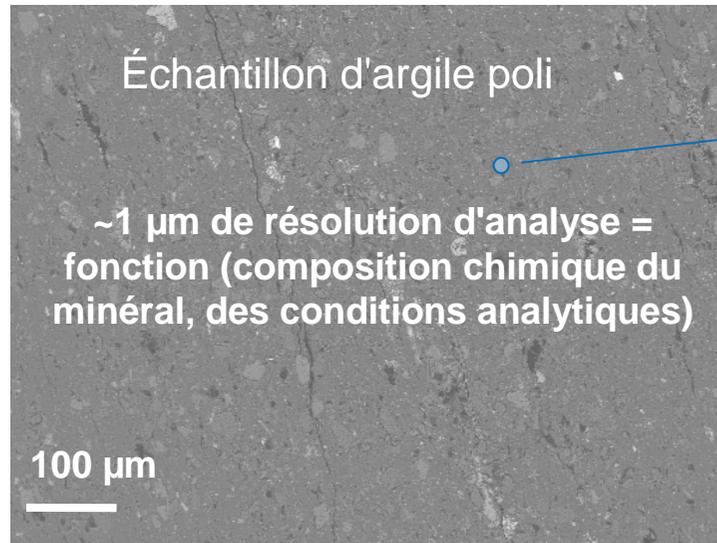


Mise au point de méthodes d'analyses quantitatives au MEB

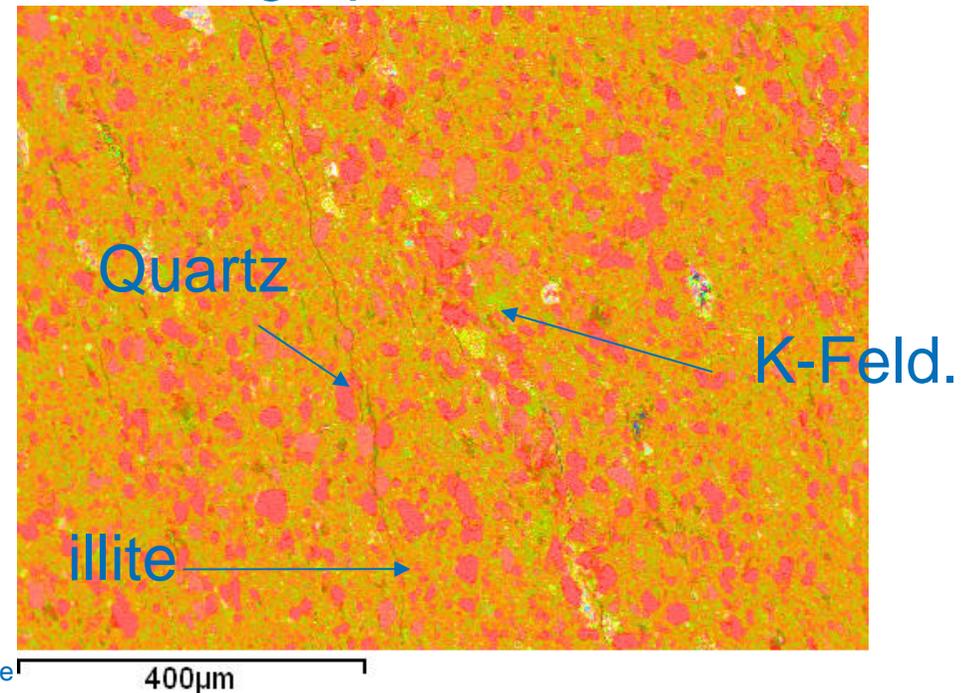
Objectifs:

- **Mise au place des procédures qui permettent d'obtenir des analyses compositionnelles quantitatives par optimisation des paramètres de mesure d'un spectromètre à dispersion d'énergie, couplé à un MEB**
- **Déterminer les conditions optimales d'analyses (mode analyses pointées et cartographies minérales)**
- **Validation de la méthode sur les grès "tights" remplissant les vallées incisées de la Formation Mannville**

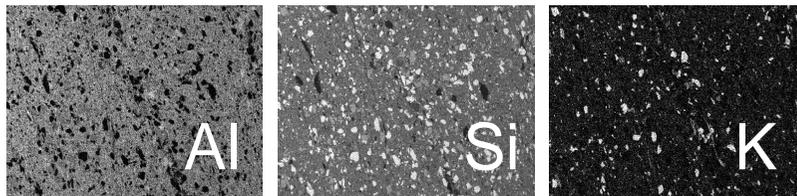
Imagerie chimique



Cartographies minérales



Cartographies élémentaires





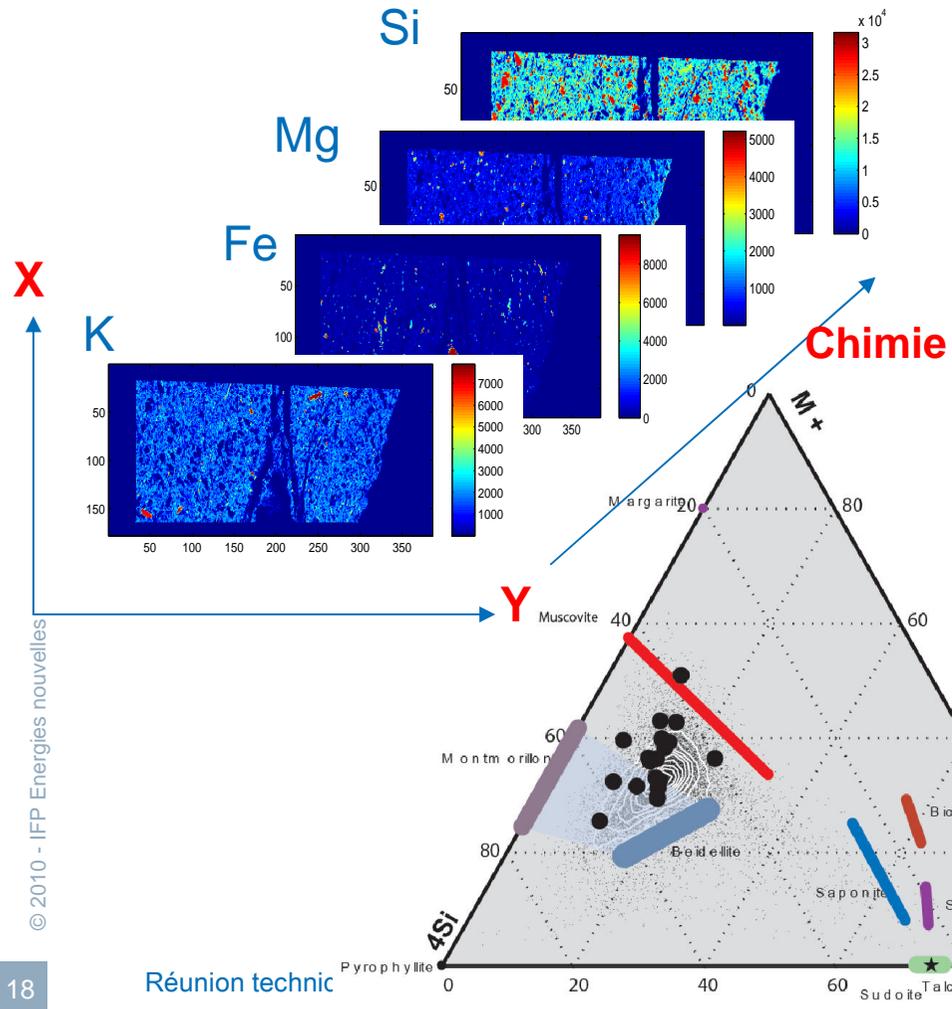
Cartographie minérale

■ Cartographie microsonde + standardisation

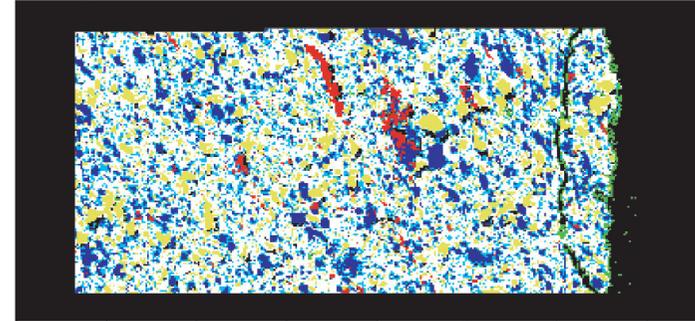


■ Cartes des minéraux obtenues par une analyse en cluster

- Le nombre de cluster est déterminé à partir de l'analyse DRX et IRTF
- La chimie des argiles correspond à celle obtenue en MET



Starting Material

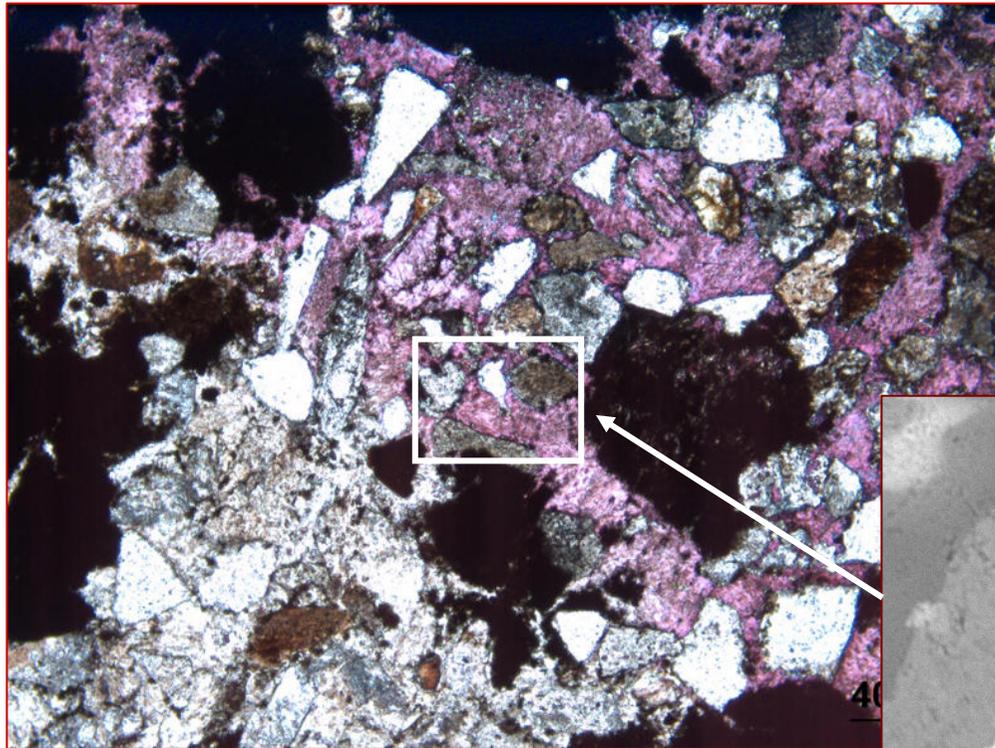


50 pt = 150 µm

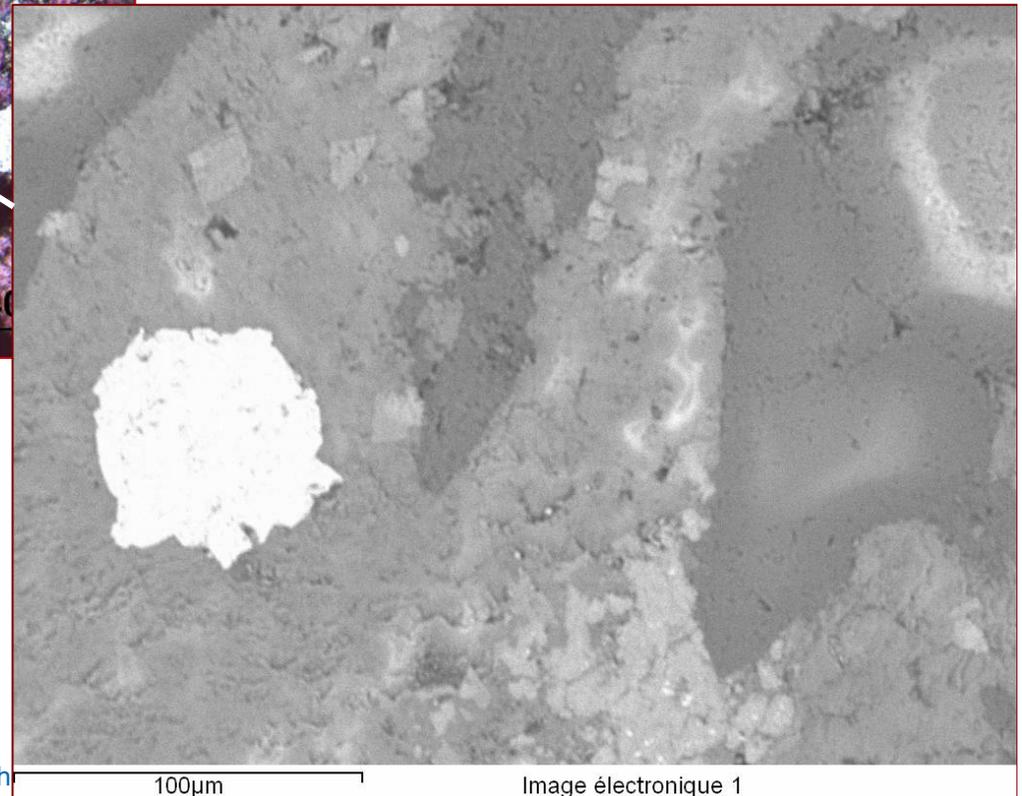


© 2010 - IFP Energies nouvelles

Exemple d'une précipitation de carbonates : cimentation

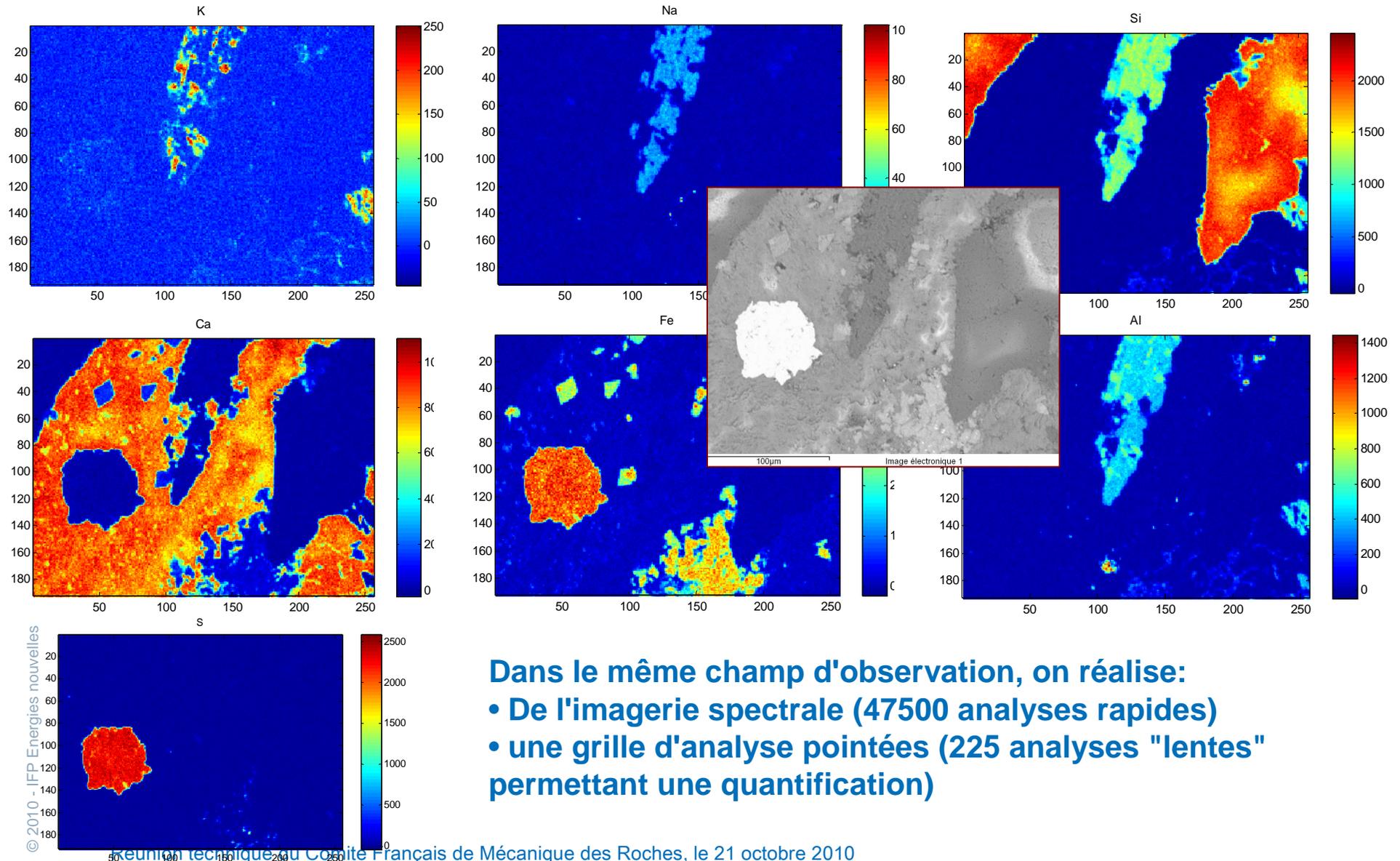


Microscopie optique



MEB

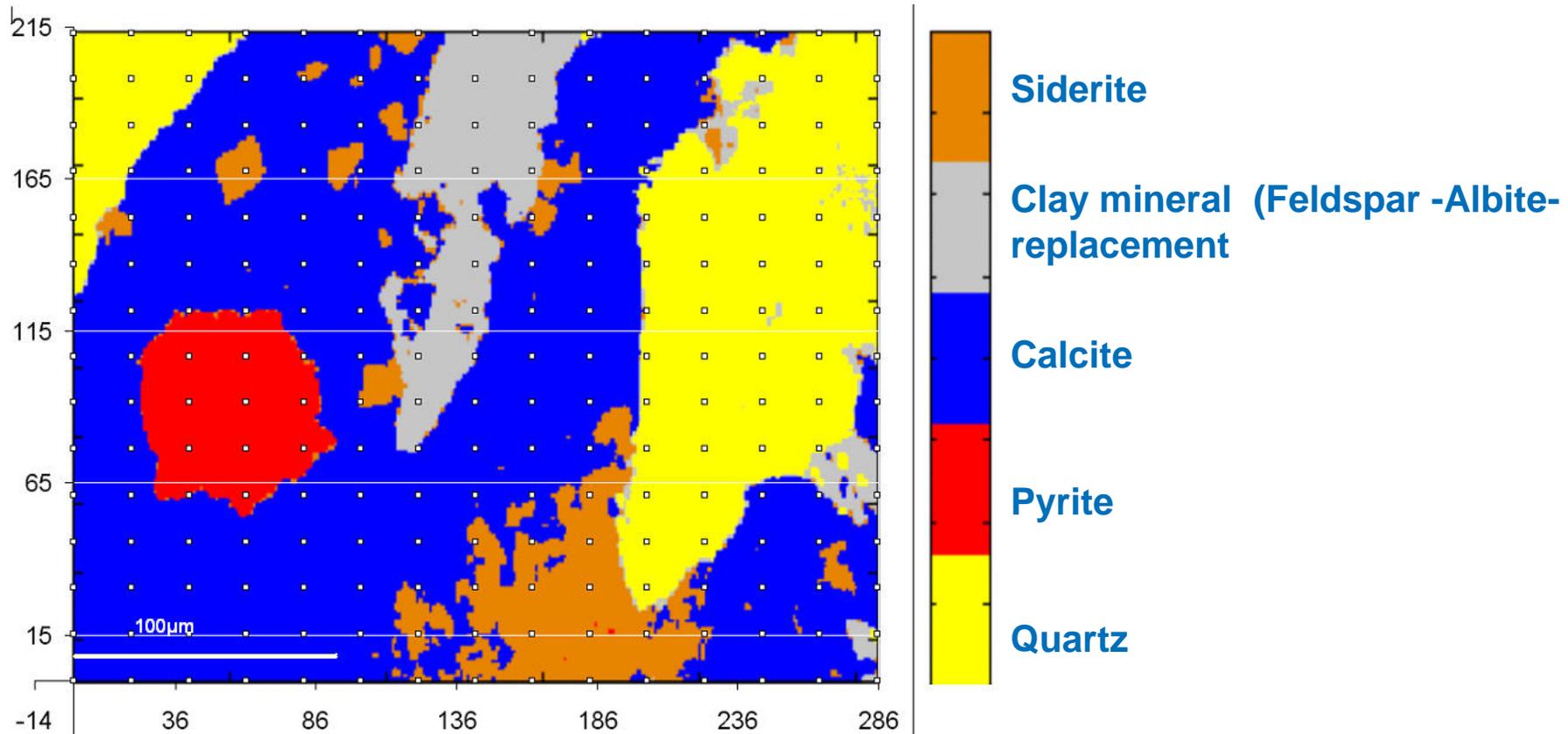
Imagerie spectrale



Dans le même champ d'observation, on réalise:

- De l'imagerie spectrale (47500 analyses rapides)
- une grille d'analyse pointées (225 analyses "lentes" permettant une quantification)

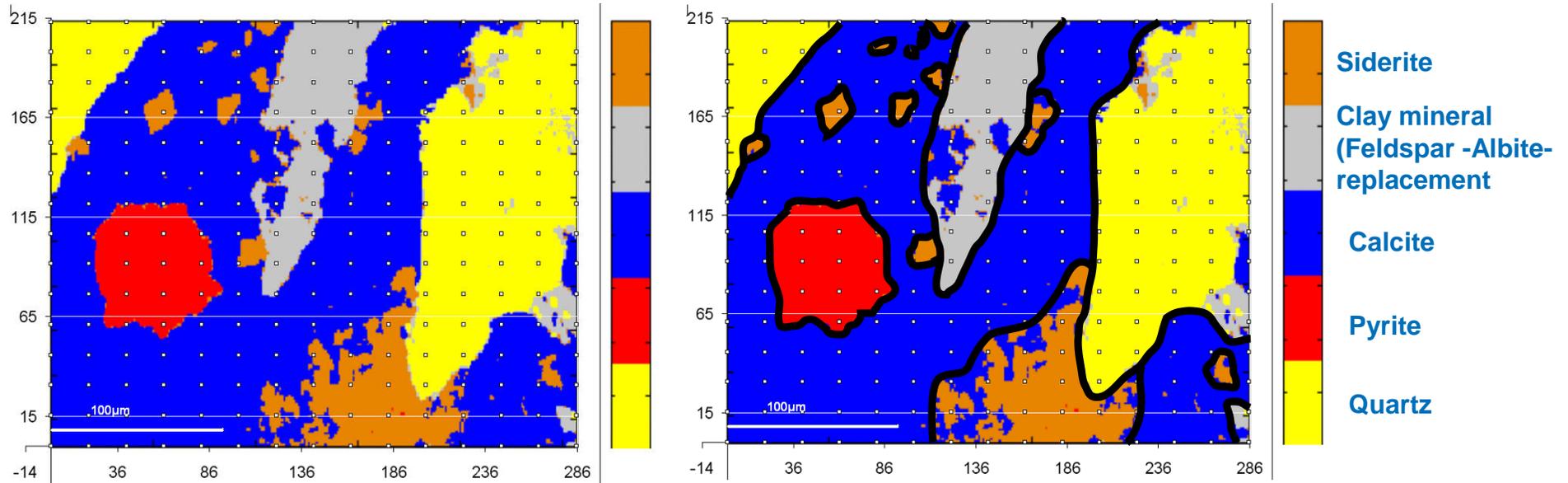
Résultat sur un échantillon cimenté par un carbonate



Resultats:

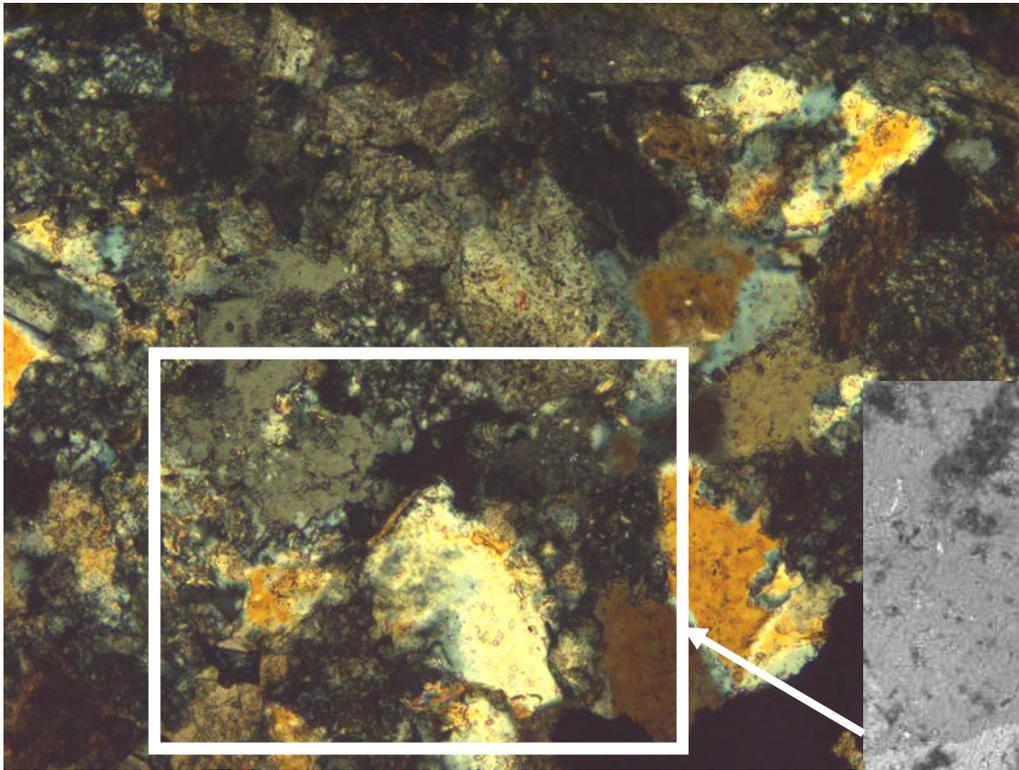
- Détermination des phases minérales (à partir imagerie spectrale via Matlab)
- Validation des résultats (à partir des analyses pointées)

Approche quantitative

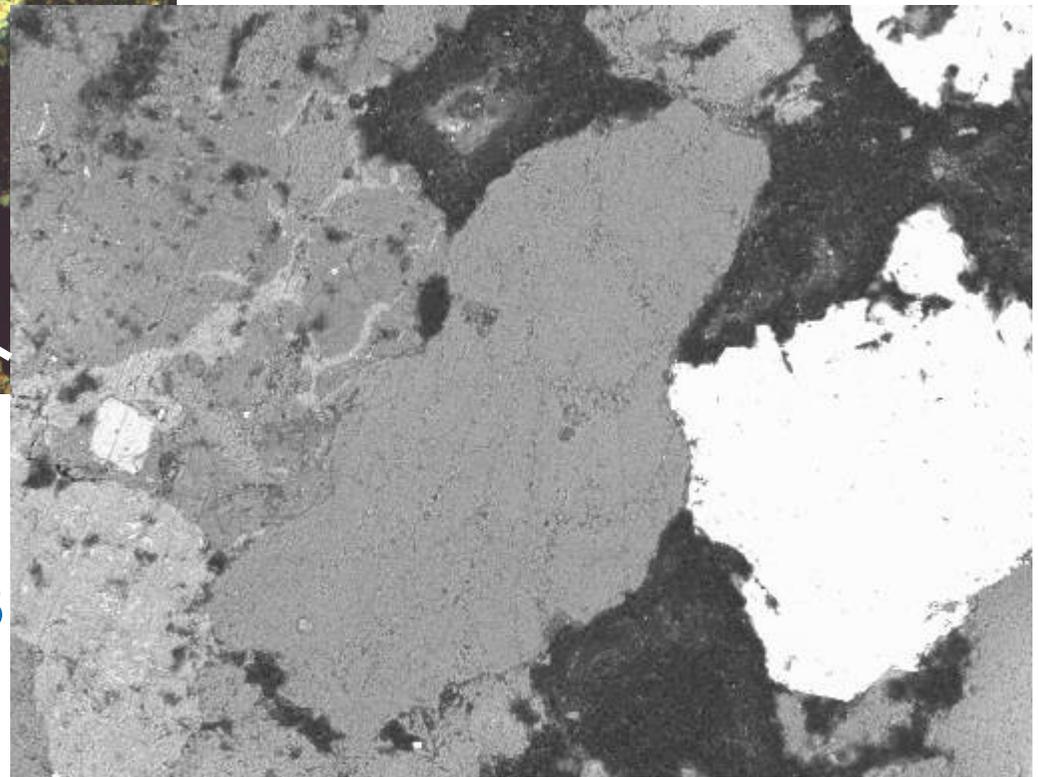


- Identification des phases diagénétiques
- Quantification des bilans de surface/volumes, sur échantillon total, et pour chaque phase minérale

Exemple d'épisodes de dissolution puis de précipitation



Microscopie optique

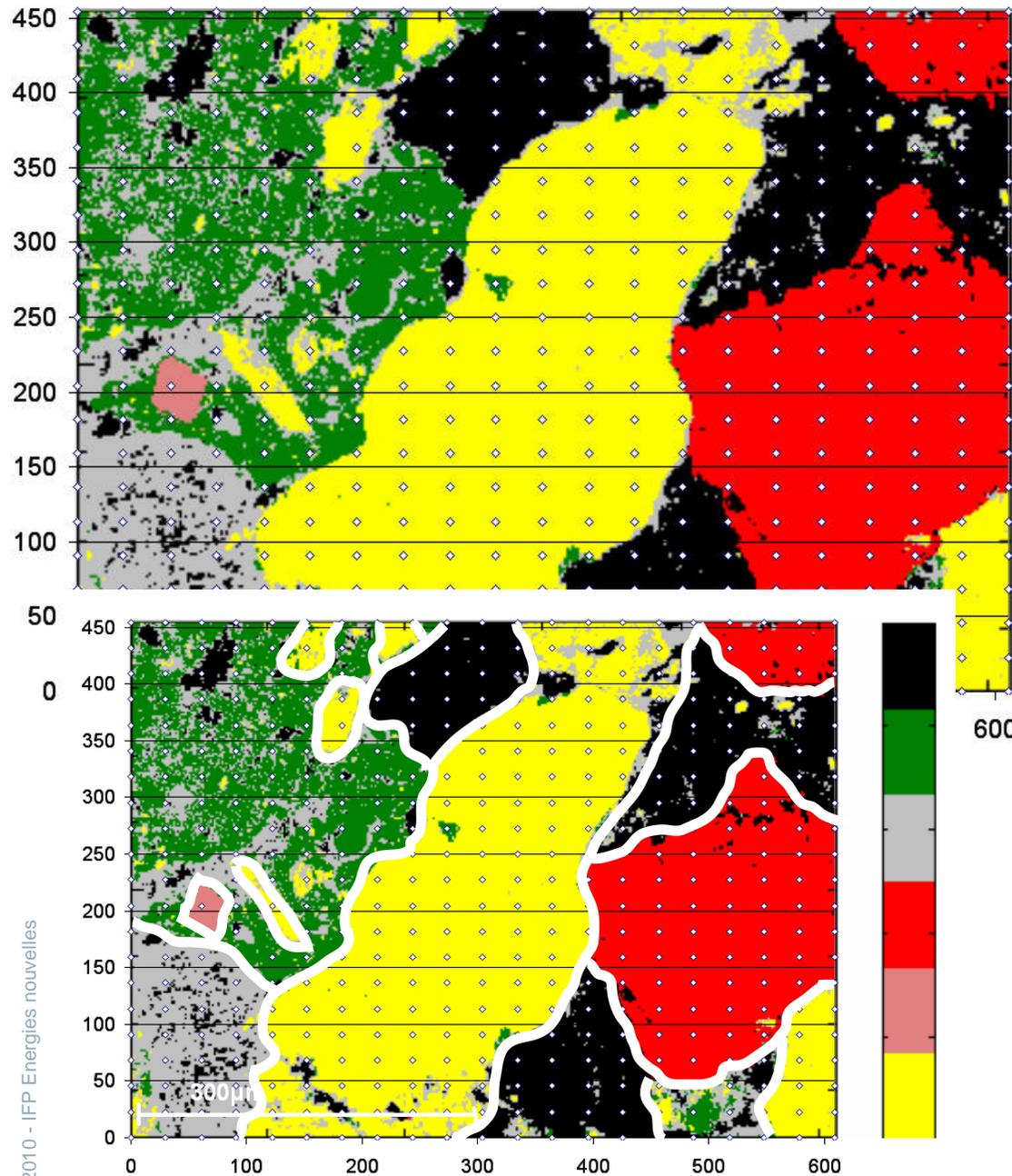


MEB

300µm

Image électronique 1

Approche quantitative



Porosité

Feldspaths

argiles

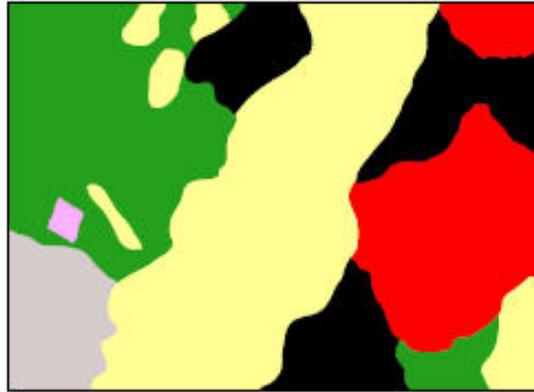
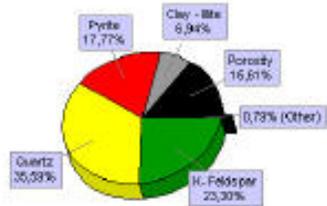
Pyrite

Rutile

Quartz

Détermination de l'histoire de la porosité

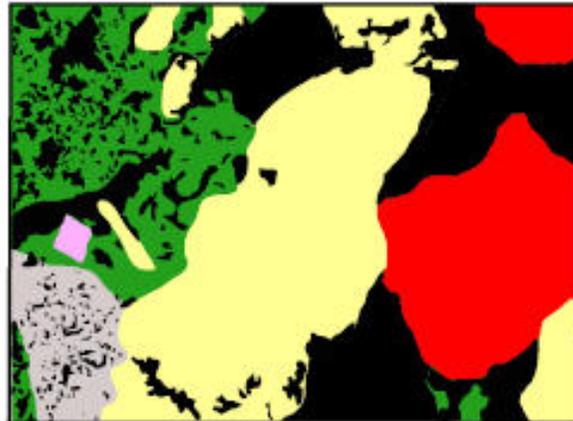
1: INITIAL TEXTURE



Après le dépôt, au maximum de l'enfouissement et de la compaction $\Phi = 16,6 \%$

2: TEXTURE AFTER PARTIAL DISSOLUTION OF QUARTZ AND FELDSPARS

13,04% porosity enhancement

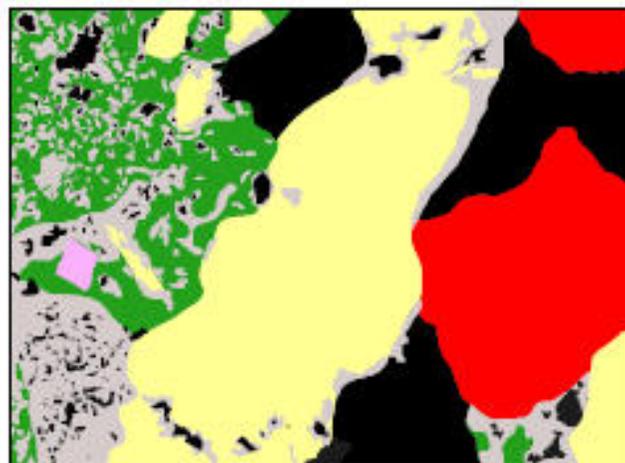


Après le premier épisode réactif : dissolution des feldspaths et du quartz

$\Phi = 28,9 \%$

3: TEXTURE AFTER ILLITISATION AND PARTIAL SECONDARY PORE SPACE INFILL

9,65% secondary porosity destruction

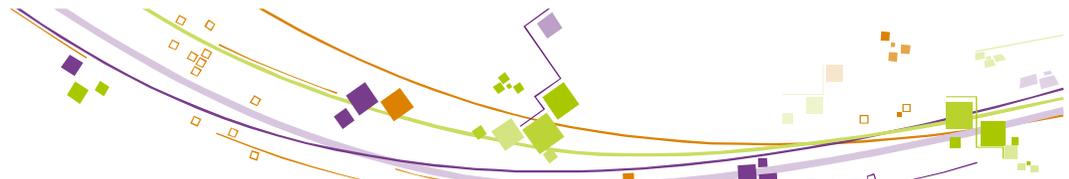


Après le second épisode réactif : précipitation d'argiles

$\Phi = 19 \%$



Caractérisation de la réactivité d'une couverture argileuse et du CO₂

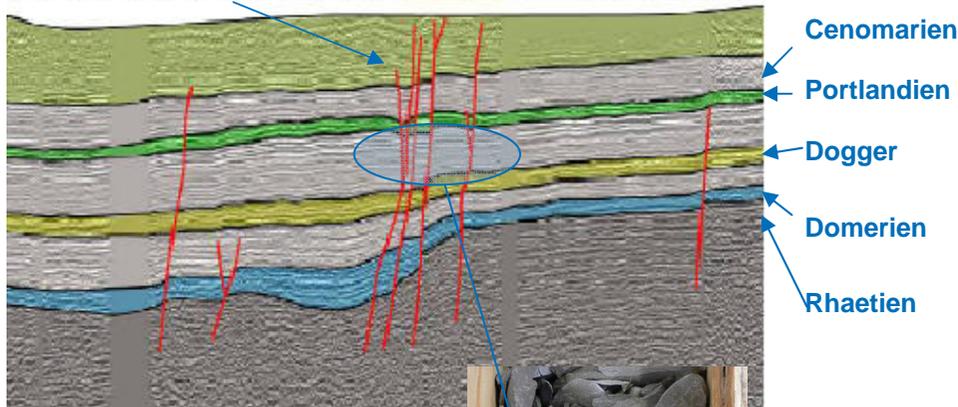


Intégrité des couvertures argileuse pour les stockages du CO₂

Kohler *et al.* (2009)

- Saint Martin de Bossenay est situé dans le sud-est du Bassin Parisien
- L'échantillonnage a été réalisé sur le puits SMB-18 dans une couverture argileuse du Callovo-Oxfordien

Faîlle régionale de St Martin de Bossenay

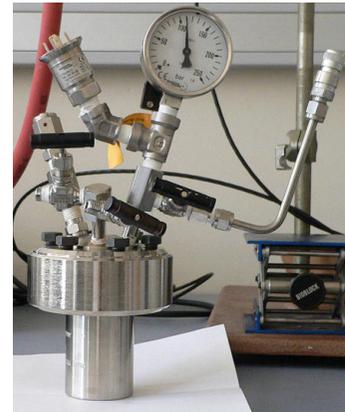


Bonijoly *et al.* 2006

Echantillon initial prélevé en carothèque (GdF)

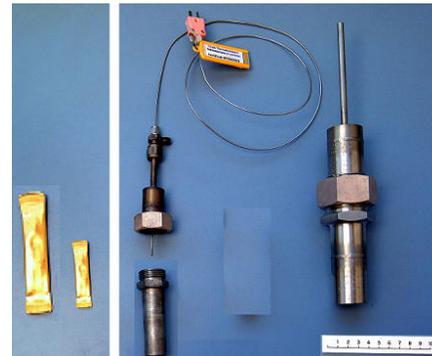


- Expériences sur des fragments de roche



Autoclave

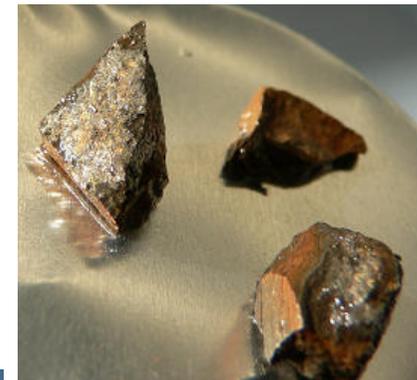
- Expériences sur poudres



- Après un mois de réaction

126.2 bars, 150 ° C

eau pure



160.9 bars, 150 ° C

CO₂ pur





Work-flow analytique

■ DRX et FTIR : Évolution minéralogique

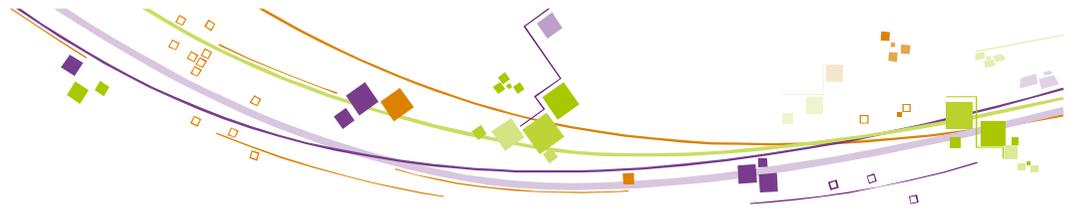
- Analyses sur poudre : Identification et proportion relative des carbonates, ZnO comme standard interne (Srodon *et al.* 2001)
- Analyses sur lame orientée : Optimisation par essai-erreur entre le signal expérimental décomposé et la modélisation (Mixed Layer Mineral modeling, Plançon and Drits, 2000)

■ Microsonde électronique : Évolution de la chimie des argiles

- Association des cartographies chimiques avec la caractérisation minéralogique pour calculer des cartes minérales en utilisant Matlab® (De Andrade *et al.* 2006)
- Observation des fronts de réaction et des textures réactionelles

■ Microscopie électronique à transmission : Évolution de la chimie et de la texture

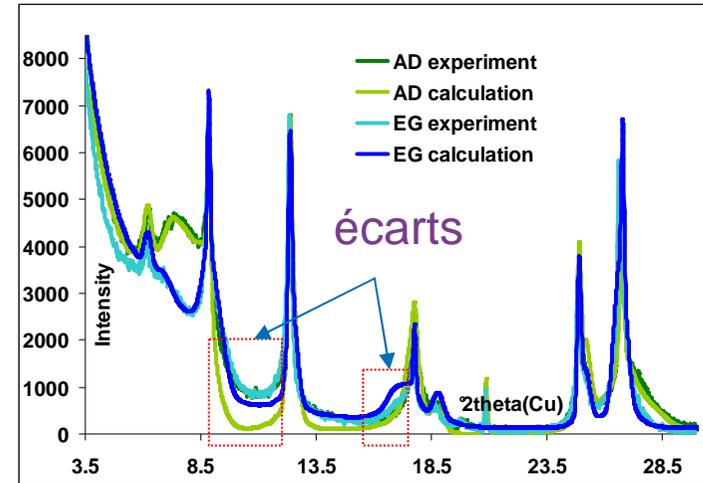
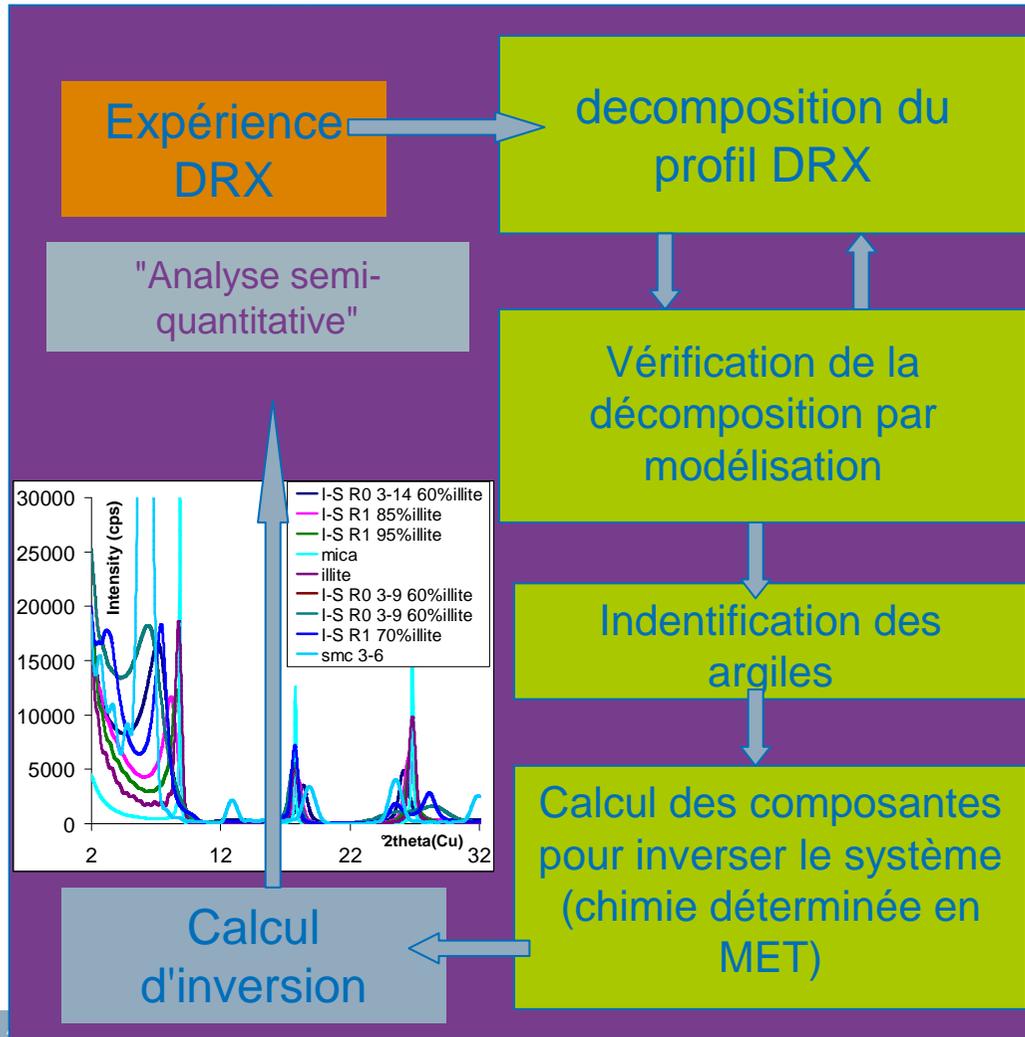
- Observation des évolutions de texture et analyses chimiques des argiles pour démontrer la qualité des observations macroscopiques en cartographie
- Formule structurale calculée et introduite dans la modélisation des DRX



Caractérisation minéralogique d'une couverture

"Approche essai-erreur"

Analyse DRX

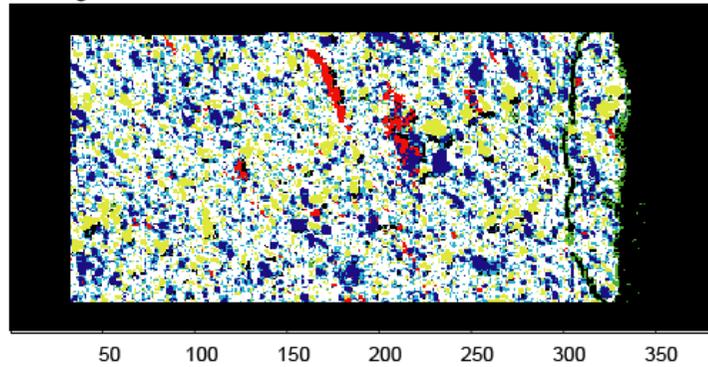


"Analyse semi-quantitative"

- Argiles (>50%), quartz, calcite, ankerite, feldspaths, gypse et pyrite
- Argiles : Interstratifiés illite-smectite (70 à 95% d'illite) approx. 75 vol. %, Fe-chlorite 10 %, kaolinite 7 % et mica 6 %

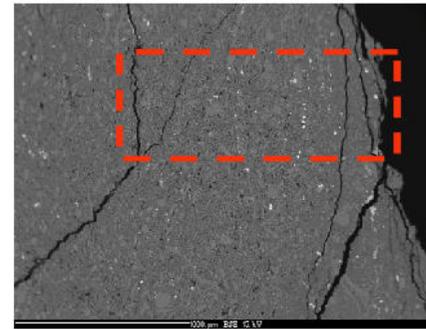


Starting Material

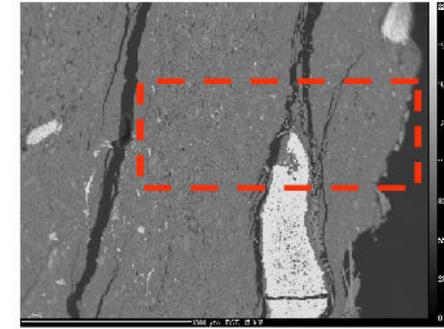


150
100
50

CO₂ Medium

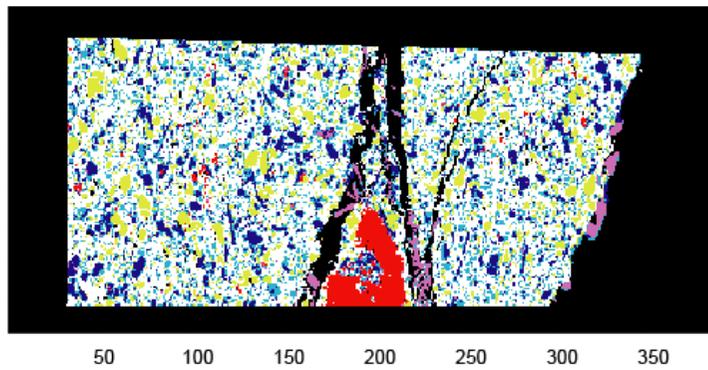


Water Medium



b)

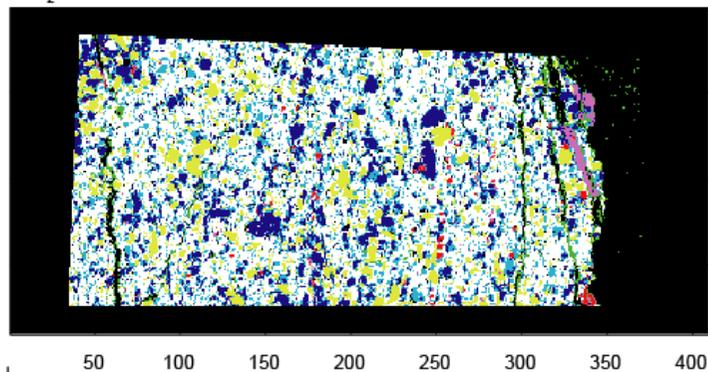
Water medium



20
40
60
80
100
120
140
160

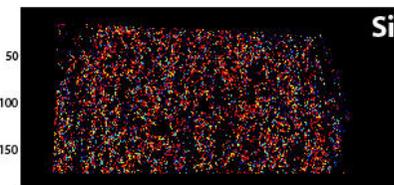
CO₂ Medium

c)

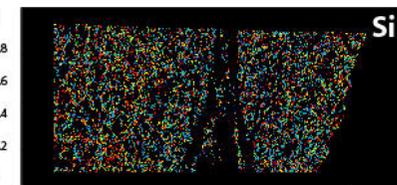


50
100
150

50 pt = 150 μm



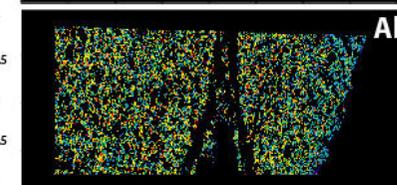
Si



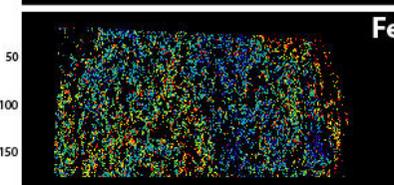
Si



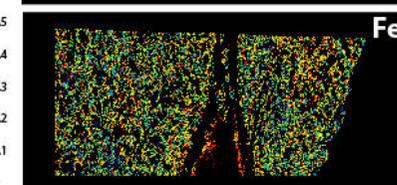
Al



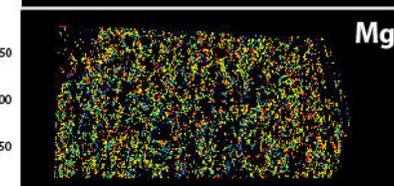
Al



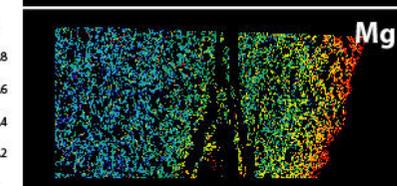
Fe



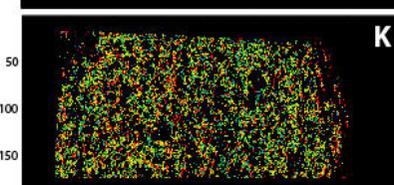
Fe



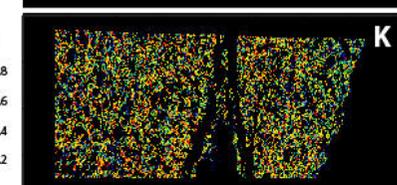
Mg



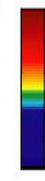
Mg

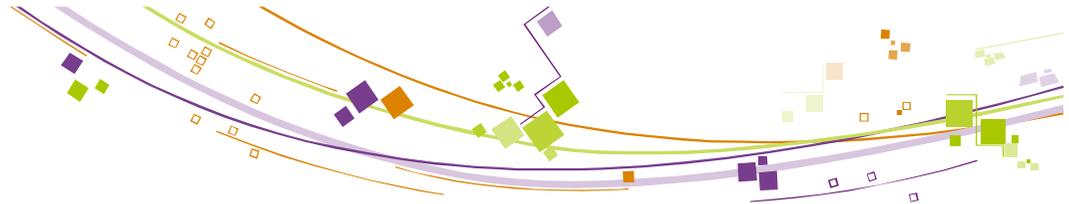


K



K





formation d'anhydrite, illitisation, augmentation des proportions d'ankerite et de dolomite

■ Equation chimique :



→ Conséquences sur les propriétés mécaniques et pétrophysiques (loi de comportement) ? (porosité, perméabilité, tortuosité, angle liquide-solide)

→ exposés de L. Cangémi et M.T. Nguyen



Conclusion

- Etudes des transformations minéralogiques
 - diagenèse d'enfouissement
 - stockage du CO₂
- Quantification et distribution des minéraux et de leur réactivité :
 - Impact sur la loi de comportement mécanique mais aussi sur les propriétés d'écoulement.
 - Permet d'avoir des "ordres de grandeur" pour des évolutions aux grandes échelles de temps.
 - Lorsque les propriétés des minéraux sont connues (cinétiques, thermodynamique), des modélisations prédictives sont possibles