

Caractérisation expérimentale de l'évolution des propriétés géomécaniques des roches sous l'effet de l'injection de CO₂

Elisabeth Bemmer
Jean-Marc Lombard
Minh Tuan Nguyen



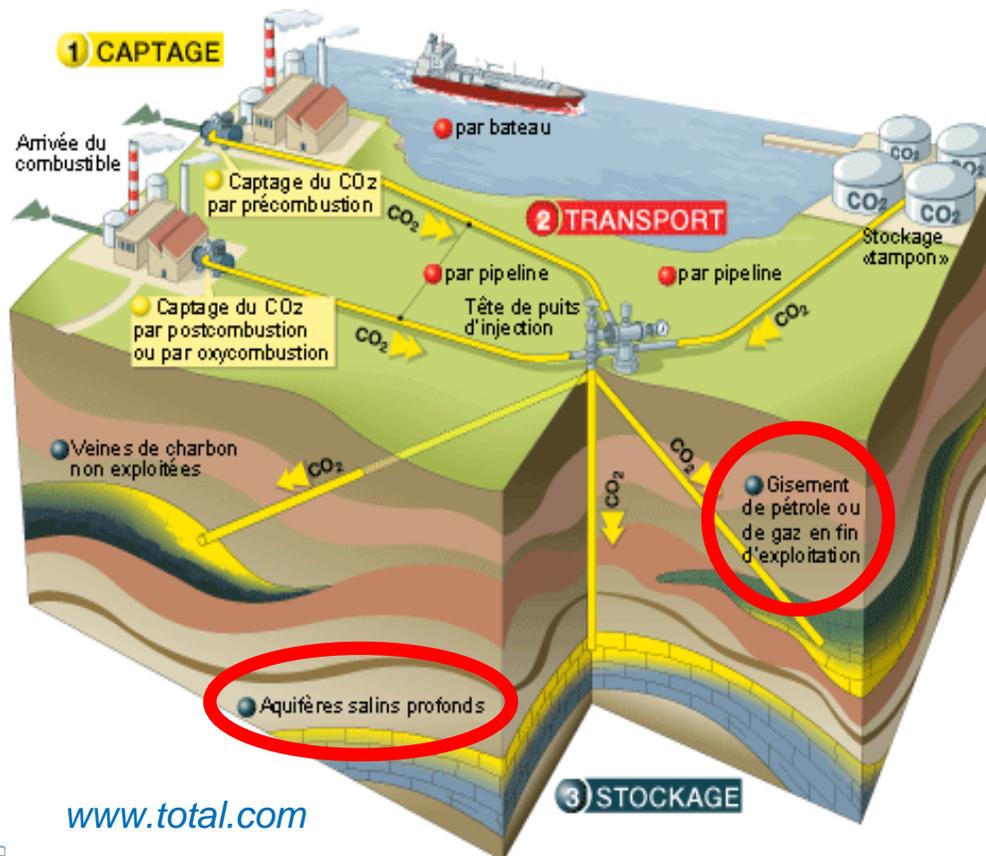


Plan de la présentation

- Contexte
- Roches étudiées
- Méthode d'altération homogène
- Caractérisation géomécanique
- Évolution de la porosité
- Évolution de la perméabilité
- Évolution de la résistance à la rupture
- Évolution des modules élastiques
- Conclusion et perspectives

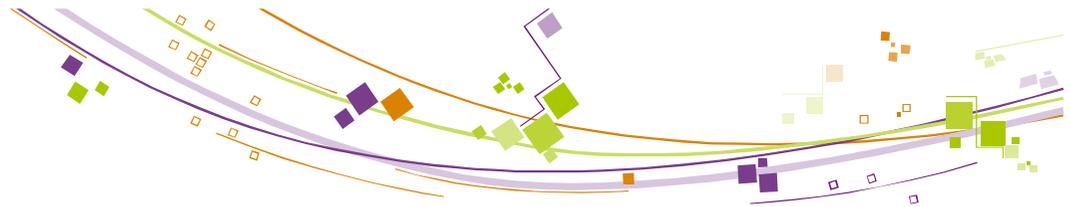
Contexte de l'étude

Stockage géologique du CO₂



www.total.com

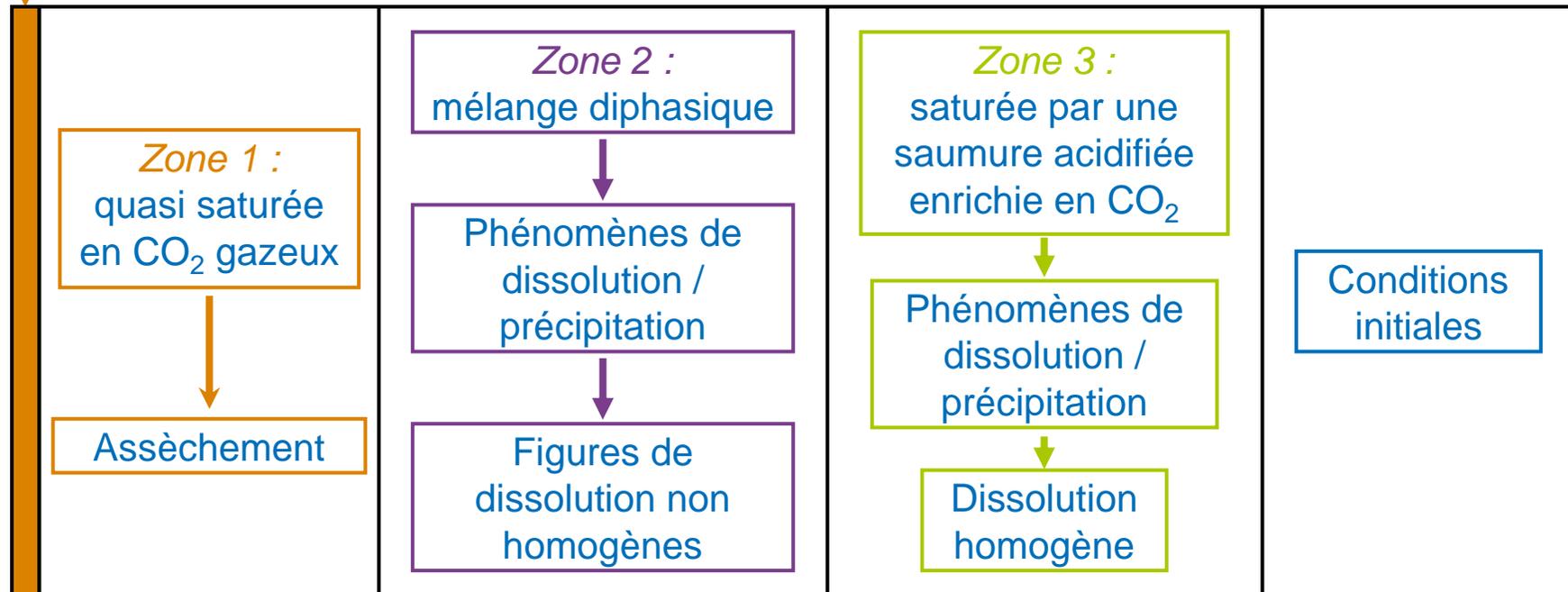
- Injection de CO₂ supercritique
- Dissolution progressive du CO₂ dans la saumure
- Réactions géochimiques avec la roche réservoir
- Effet sur les propriétés pétrophysiques et géomécaniques?

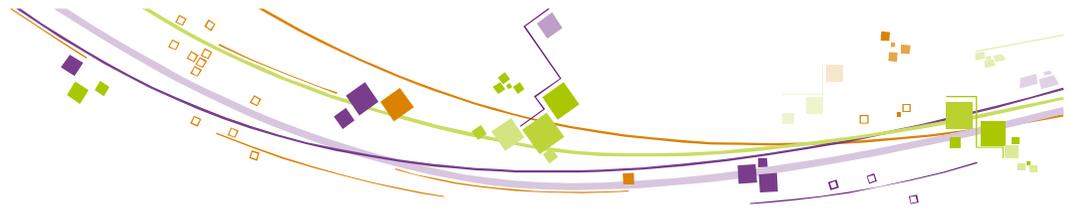


Contexte de l'étude

Phénomènes attendus

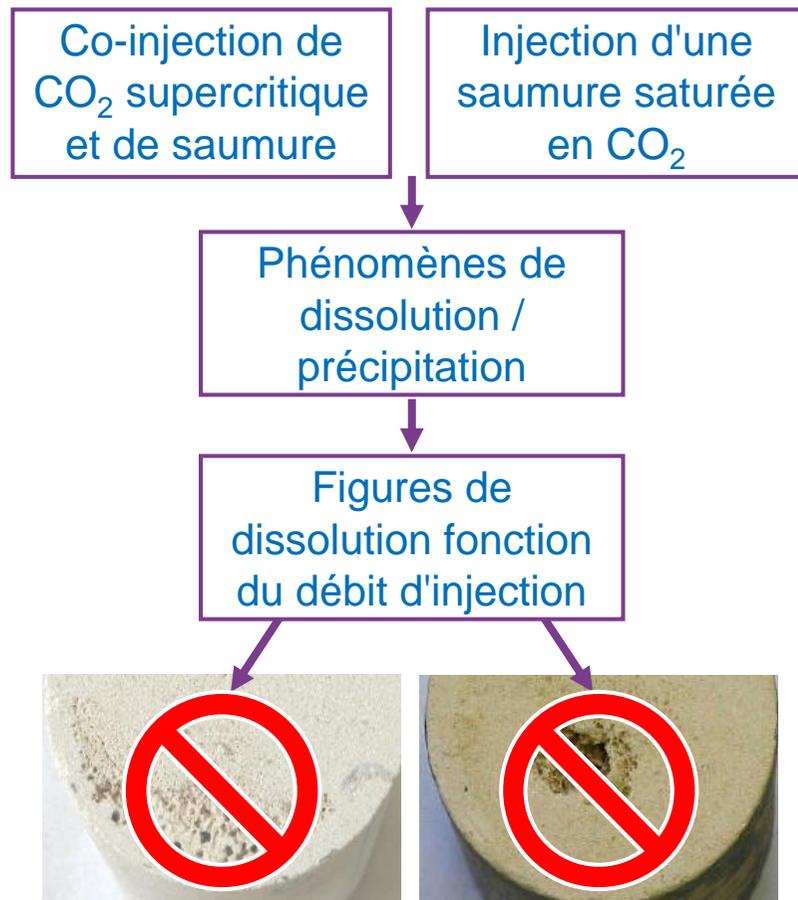
↓ Injection de CO₂ supercritique





Contexte de l'étude

Évolution des propriétés hydromécanique sous l'effet d'une altération chimique



- Caractérisation géomécanique : échantillons intacts et altérés assimilables à un VER
- Développement d'une méthode d'altération homogène
- Étude expérimentale concernant le comportement attendu à long terme loin du puits

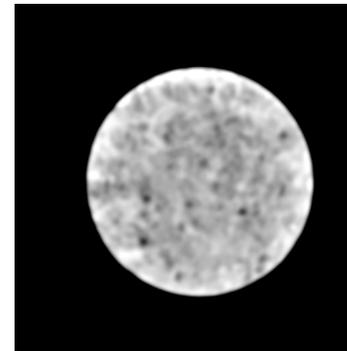


Roches étudiées

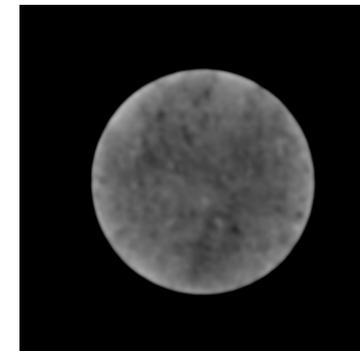
Propriétés pétrophysiques

- Calcaire du Comblanchien
 - site de Charmottes (profondeur : 1820 m)
 - porosité : $14,7\% \pm 0,8\%$
 - perméabilité intrinsèque : 2-20 mD
- Calcaire de Lavoux jaune
 - Lavoux C1 : porosité de $17,3\% \pm 0,9\%$
 - Lavoux C2 : porosité de $20,5\% \pm 0,9\%$
 - perméabilité intrinsèque : 150-250 mD
- Calcaire d'Euville
 - porosité : $17,3\% \pm 1,1\%$
 - perméabilité intrinsèque : 90-150 mD

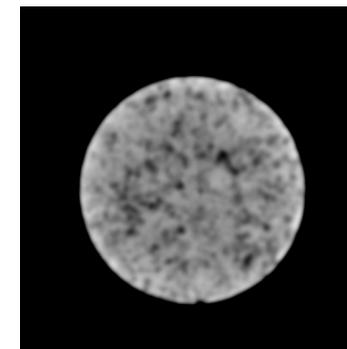
Combl. 4-1 dV



Lavoux C2 3



Euville B1



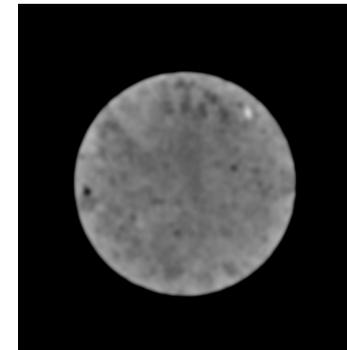


Roches étudiées

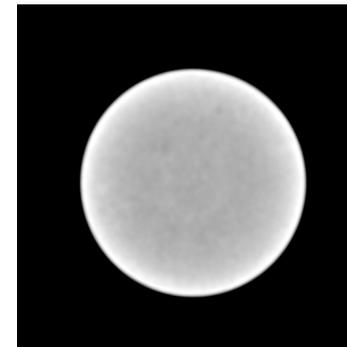
Propriétés pétrophysiques

- Calcaire de Saint-Maximin (RFF)
 - porosité : 35,6%±1,9%
 - perméabilité intrinsèque : ~50 mD
- Zone de transition
 - site de Charmottes (profondeur comprise entre 2004 et 2011 m)
 - porosité comprise entre 2,2% et 5,3%
 - perméabilité intrinsèque : 0,1-17,6 μD
- Calcaire de Tavel
 - porosité : ~10%
 - perméabilité intrinsèque : 0,8-2,5 μD

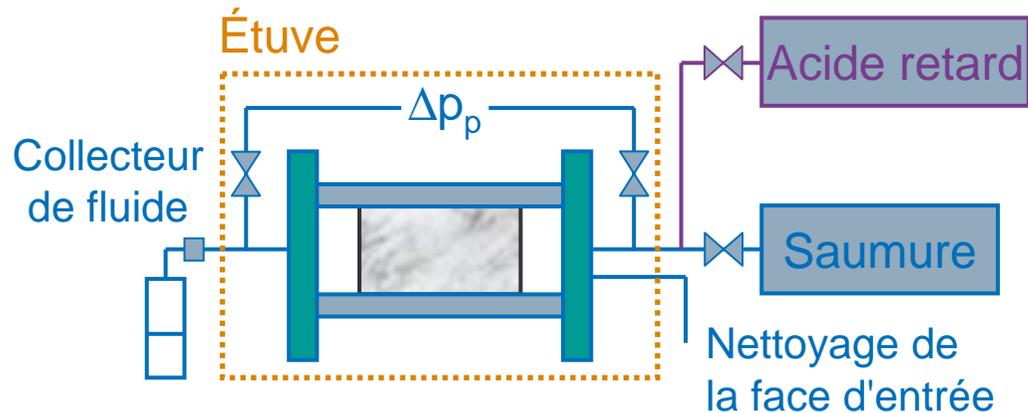
RFF1_B



Transition 109-1-1 dV



Méthode d'altération homogène



- Traitement à l'Acide Retard :
 - injection d'acide "frais" dans l'échantillon
 - activation par chauffage (60°C)
 - balayage à la saumure
- Réalisation de **plusieurs TAR** en fonction du niveau d'altération chimique recherché



Caractérisation géomécanique

Étape 1

Caractérisation géomécanique à l'état intact en condition saturée

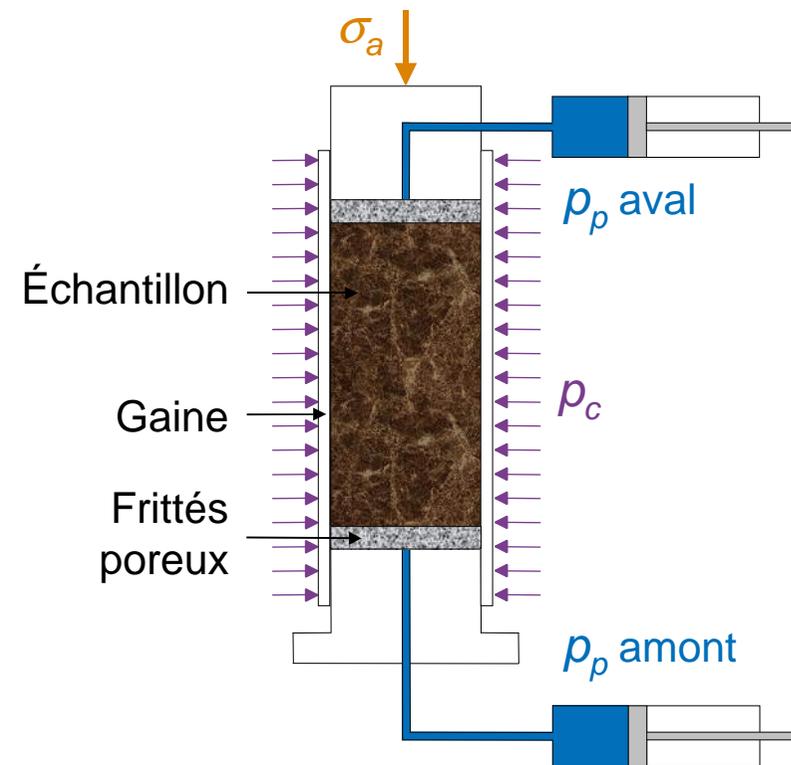
Étape 2

Altération géochimique



Caractérisation géomécanique à l'état altéré en condition saturée

Essai triaxial standard

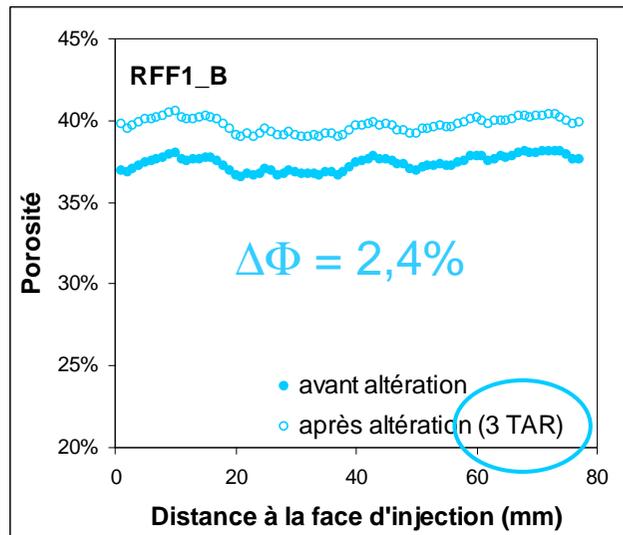


$$p' = \frac{\sigma_a + 2p_c}{3} - p_p$$

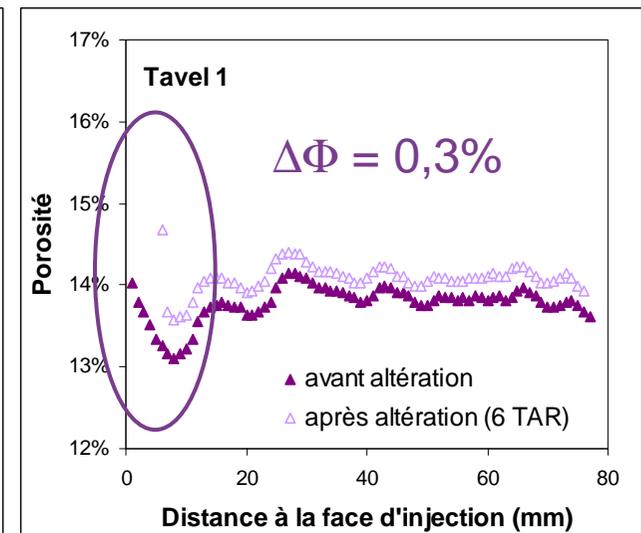
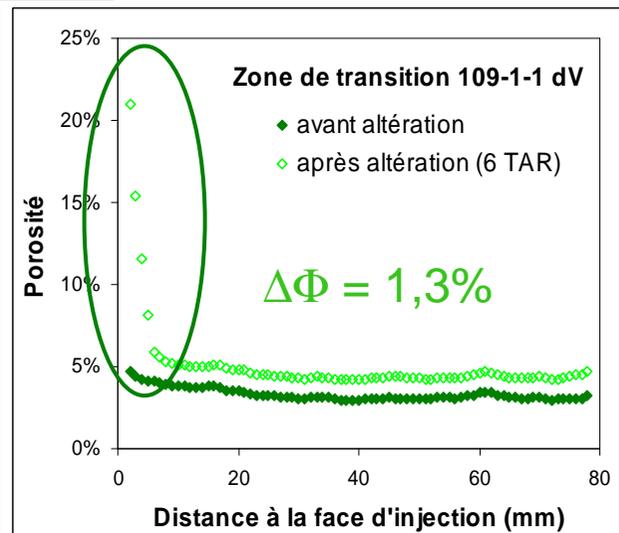
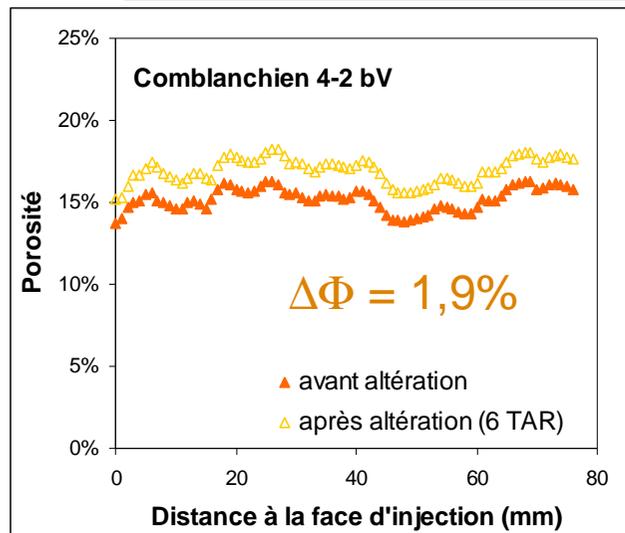
$$q = \sigma_a - p_c$$



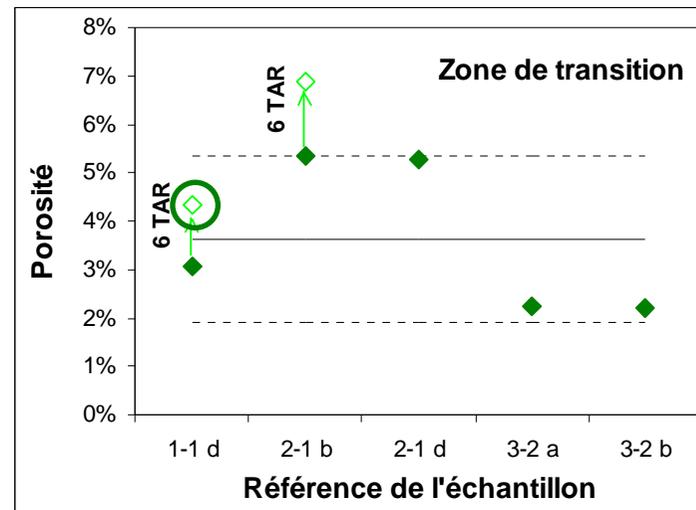
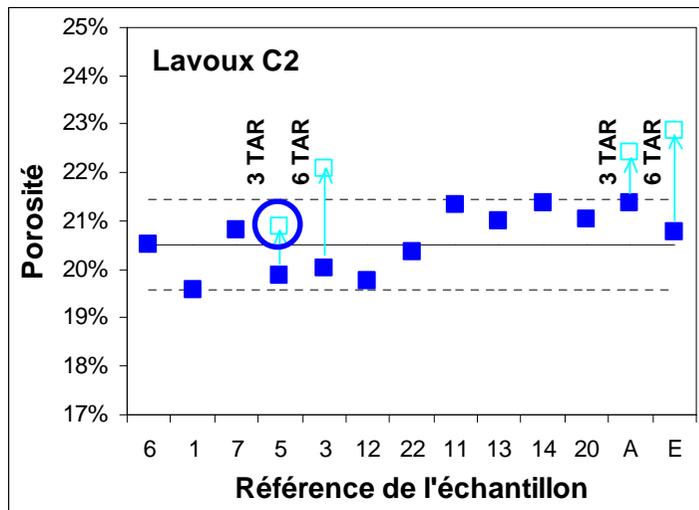
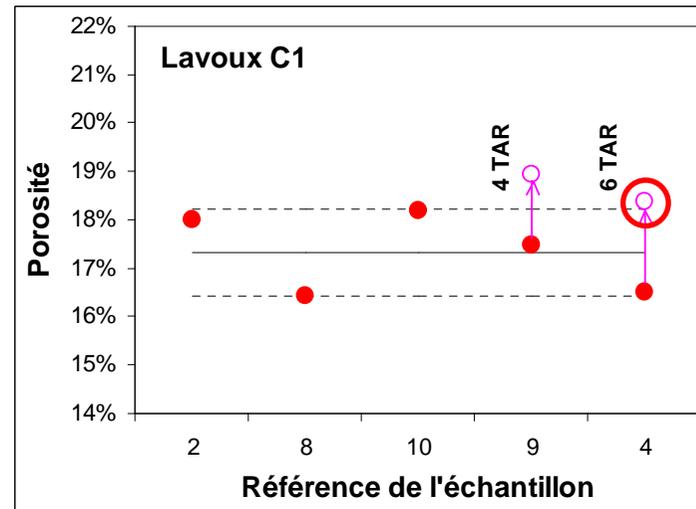
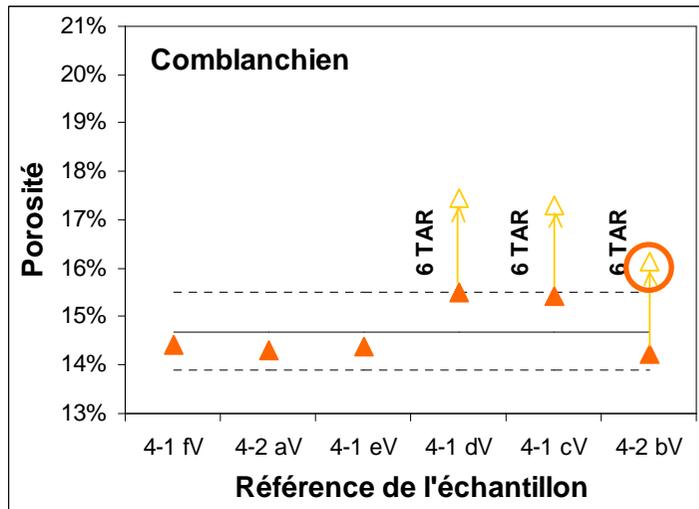
Évolution de la porosité



- Niveau d'altération fonction de la porosité initiale
- Problématique des échantillons de très faible perméabilité :
 - temps d'injection longs
 - suppression de la phase de balayage à la saumure \Rightarrow effets de bord



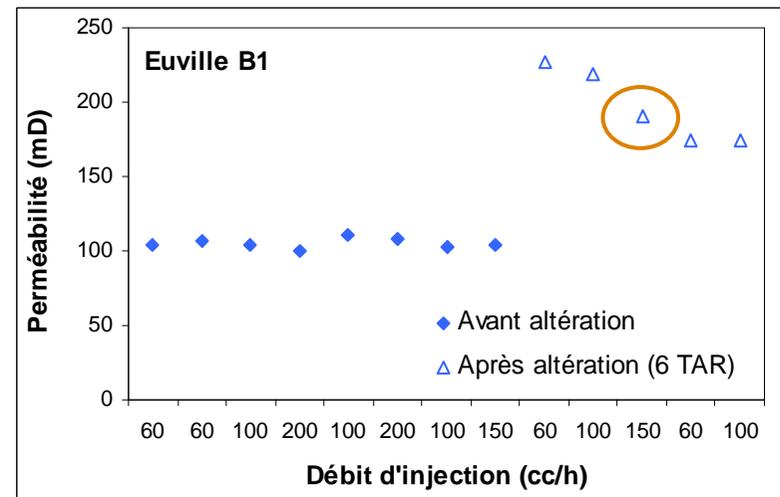
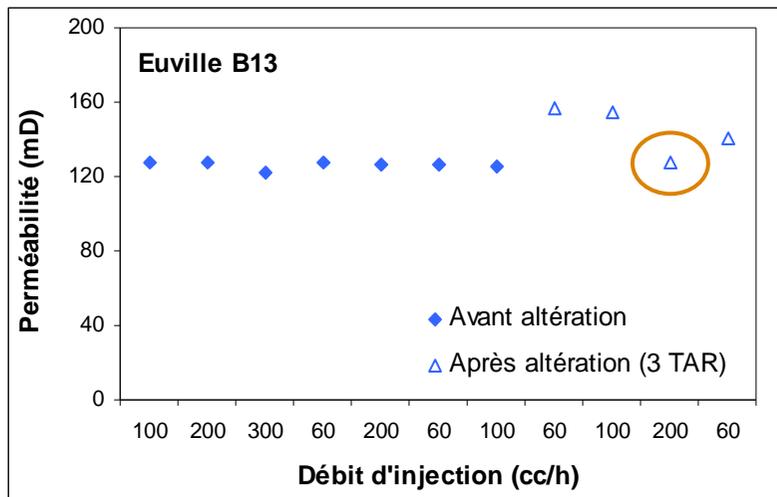
Évolution de la porosité





Évolution de la perméabilité

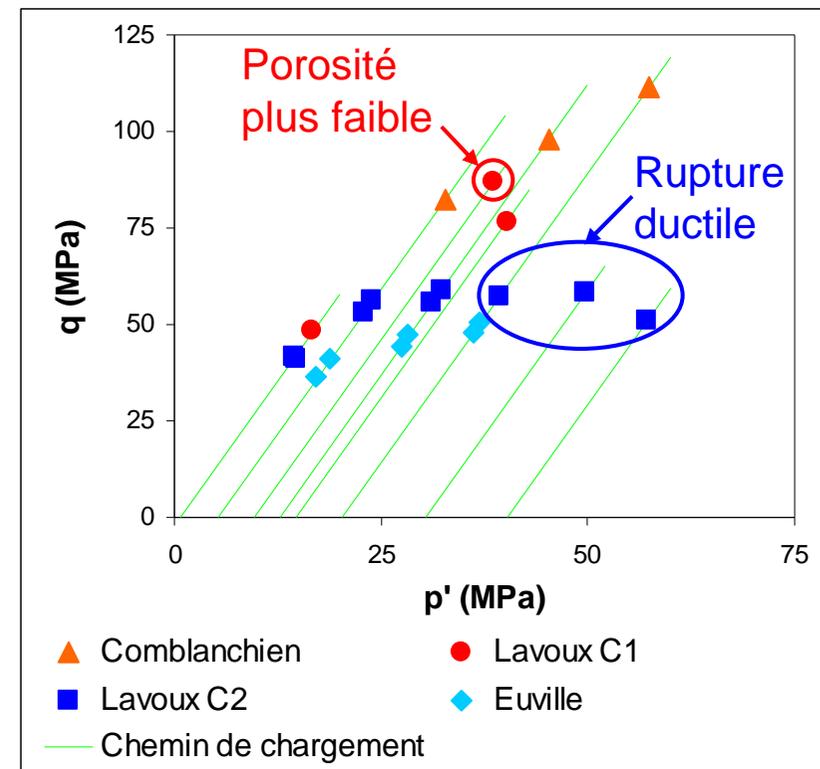
- Mesure au sein du dispositif d'altération
- Pas de tendance claire après trois cycles d'altération
- Augmentation de la perméabilité après six cycles d'altération
- Identification d'un possible déplacement de fines



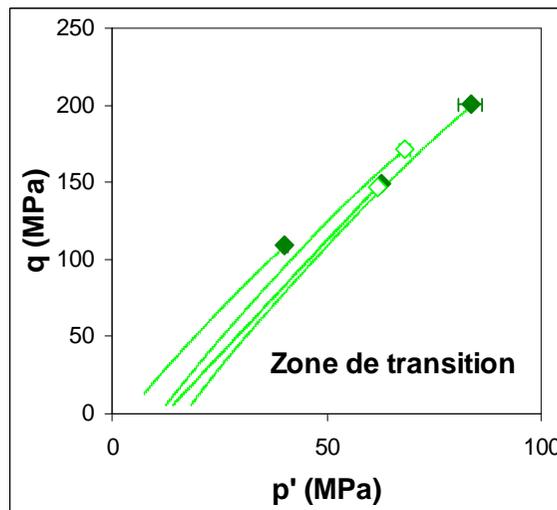
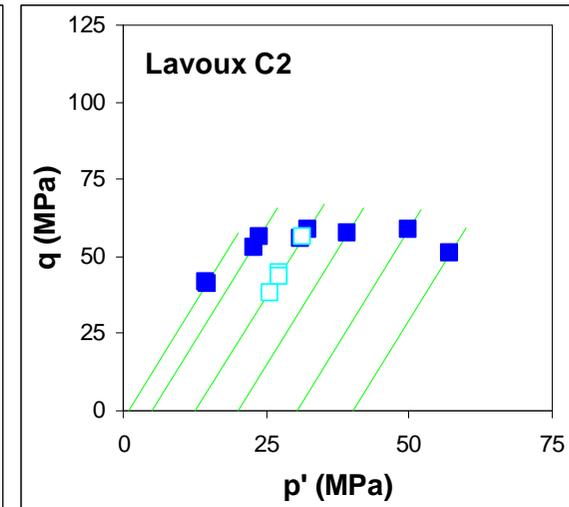
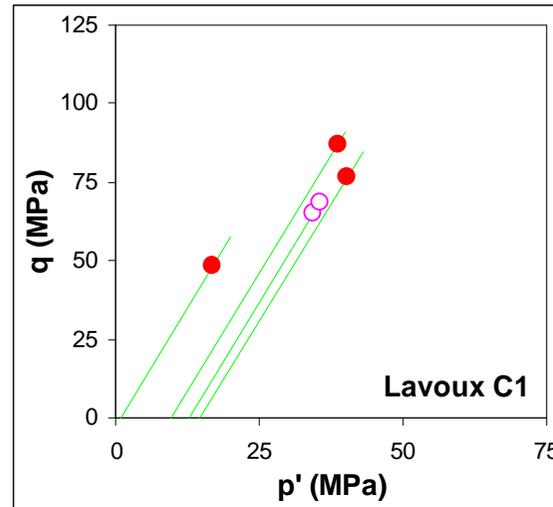
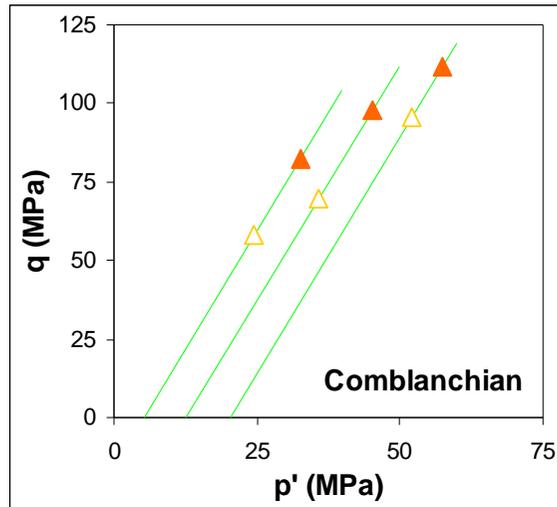
Évolution de la résistance à la rupture

- Problématique des échantillons de très faible perméabilité :
 - temps de resaturation très longs
 - pression de pore non uniforme
 - ⇒ condition de drainage mixte
 - ⇒ incertitude supplémentaire
- Comportement à l'état intact :
 - rupture fragile pour les faibles confinements
 - cohérence globale du niveau de résistance par rapport à la porosité des formations étudiées
 - résistance du calcaire d'Euville inférieure aux tendances

Résistance à la rupture à l'état intact

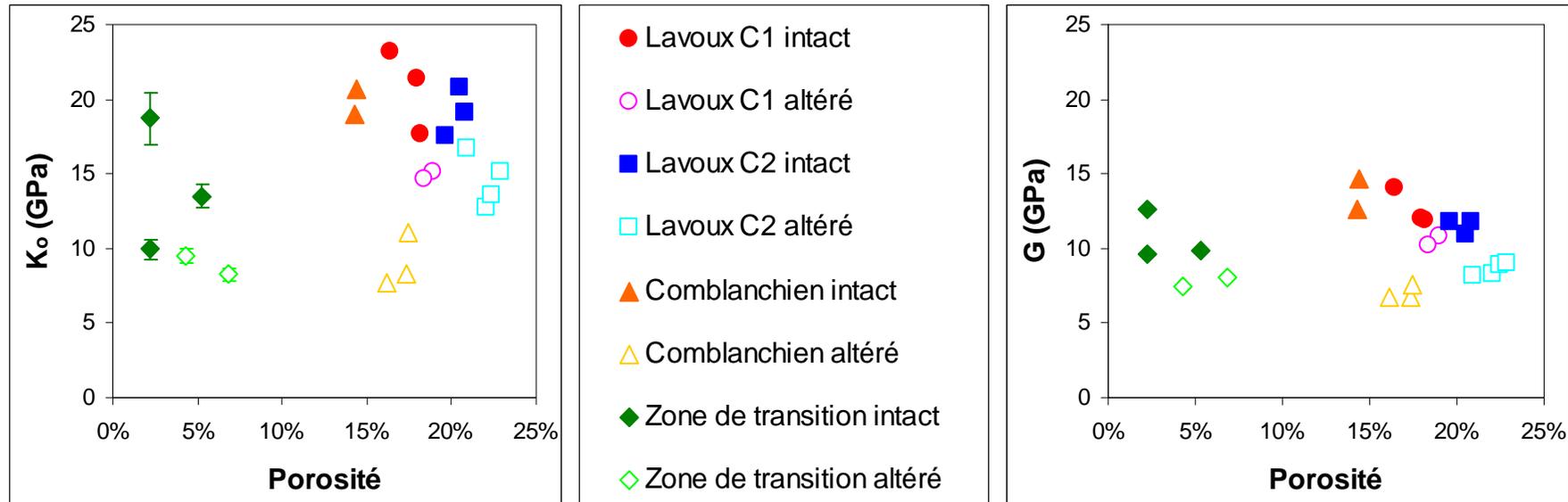


Évolution de la résistance à la rupture



- Diminution de la résistance à la rupture pour les formations réservoir : calcaire du **Comblanchien** et calcaire de **Lavoux**
- Pas d'effets notables sur la **zone de transition**
- Effet du nombre de cycles non quantifiable

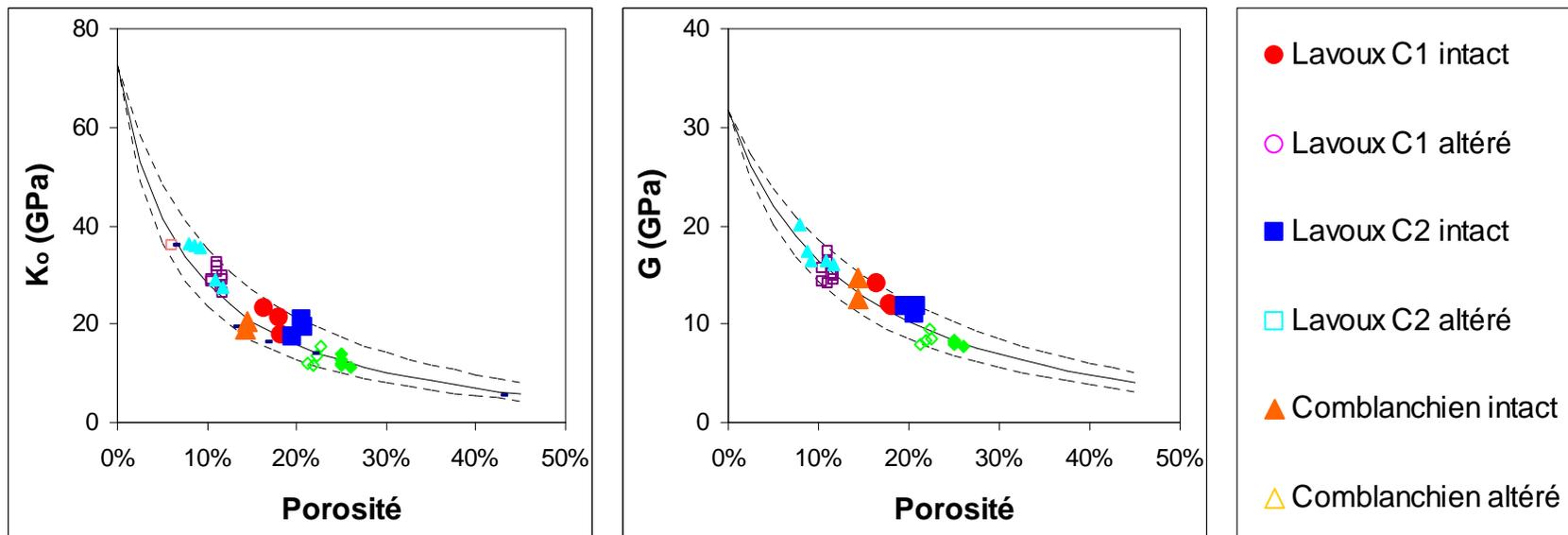
Évolution des modules élastiques drainés



- Diminution de la raideur pour les formations réservoirs : calcaire du Comblanchien et calcaire de Lavoux
- Diminution de la raideur plus marquée pour le calcaire du Comblanchien
- Légère diminution de la raideur de la zone de transition ?

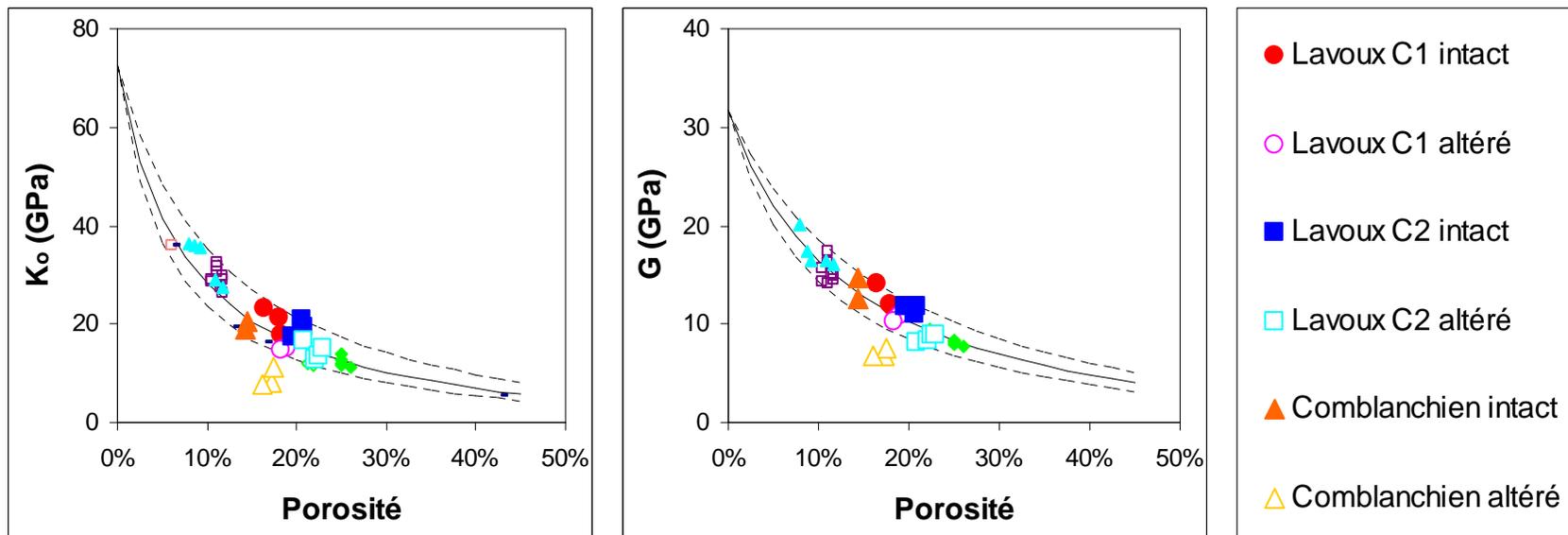
Évolution des modules élastiques drainés

- Comparaison avec les tendances naturelles
 - Lois $K_o(\Phi)$ et $G(\Phi)$ pour les carbonates



Évolution des modules élastiques drainés

- Comparaison avec les tendances naturelles
 - Lois $K_o(\Phi)$ et $G(\Phi)$ pour les carbonates



- Affaiblissement sous altération chimique sortant des tendances naturelles associées à une simple augmentation de porosité pour le calcaire du **Comblanchien**...



Conclusion et perspectives

- Observation de tendances nettes d'affaiblissement mécanique sous l'effet d'une altération chimique pour les roches réservoir
- Poursuite de la démarche actuelle sur différentes formations :
 - extension du jeu de données sur l'évolution des propriétés géomécaniques des roches sous l'effet d'une altération chimique
 - mesures complémentaires : RMN, mesures pétroacoustiques
- Caractérisation de l'évolution de la microstructure sous l'effet d'une altération chimique :
 - dégradation de mini-échantillons observables sous micro-scanner
 - lames minces, MEB
 - objectif : lien avec l'évolution des propriétés macroscopiques
- Comparaison des effets de l'acide retard et d'une saumure acidifiée par du CO_2