

# Comportement mécanique du carbonate d'Estailades en condition drainée: influence du chemin de chargement

JEREMIE DAUTRIAT<sup>a,b</sup>, NICOLAS GLAND<sup>a</sup>, ALEXANDRE DIMANOV<sup>b</sup>, JEAN RAPHANEL<sup>b</sup>

a. Institut Français du Pétrole, 1&4 av. Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison

b. Laboratoire de Mécanique des Solides, UMR 7649, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau

## Résumé :

*On réalise sur des échantillons cylindriques de carbonates des essais drainés en appliquant divers chemins de chargement, caractérisés par  $K$ , le rapport des contraintes radiale et axiale. Le mode d'endommagement et son influence sur la perméabilité dépendent essentiellement de  $K$ , mais dans des régimes intermédiaires, les hétérogénéités de microstructure poreuse jouent aussi un rôle majeur. Nous proposons une normalisation des données expérimentales qui permet de définir sans autre ajustement l'enveloppe de rupture dans le plan des contraintes.*

## Abstract :

*We performed hydromechanical tests on cylindrical carbonate samples at different loading paths, defined by the ration of radial to axial stresses. Damage modes and their effects on permeability depend essentially on  $K$ , but especially in the intermediate regimes the heterogeneity of the porous microstructure has also strong effects. We propose an original approach of data normalization in order to define the yield envelope without other adjusting parameters.*

**Mots clefs :** Carbonate, hétérogénéité, chemin de chargement, endommagement, enveloppe de rupture

## 1.Introduction

Les évolutions de perméabilité des roches réservoir dépendent de la contrainte effective, mais aussi du chemin de chargement  $K$ , défini comme le rapport des contraintes horizontales et verticales. Nous avons réalisé une campagne d'essais hydromécaniques sur le carbonate d'Estailades, en utilisant une cellule triaxiale [1] qui permet de faire varier  $K$  de 0 à 1, et ce, afin de mesurer les évolutions de perméabilités et de compressibilités, au cours de chargements continus. Ici, nous abordons surtout les effets du chemin de chargement sur le mode d'endommagement. Mais, nous proposons aussi de rendre compte des effets d'hétérogénéités de porosité observables à différentes échelles. En considérant les mécanismes mis en jeu et un modèle de milieu effectif, nous proposons une méthode de normalisation qui permet de définir une enveloppe de rupture pour ce matériau en tenant compte de ces hétérogénéités.

## 2.Matériau et techniques expérimentales

Le carbonate d'Estailades est constitué à 99 % de calcite de taille de grains de 1 à 10  $\mu\text{m}$ . Mais, ils présentent des hétérogénéités structurales à différentes échelles. La figure 1 montre que les grains

de calcite forment deux types d'agrégats ( $< 500 \mu\text{m}$ ), les uns denses, les autres microporeux. Une porosité plus large est présente entre ces agrégats. Ces structures caractérisent la micro-hétérogénéité. Comme illustré sur la Figure 2, la distribution spatiale des différents agrégats peut entraîner des variations locales de densité, et donc une méso hétérogénéité. Par ailleurs, la variation de porosité d'un échantillon à l'autre (entre 24 et 31 %) traduit une macro hétérogénéité. Des jeux de trois échantillons de 8 cm de haut et de 4 cm de diamètre ont été soumis en continu à chacun des chemins de chargement suivants :  $K = 0$  ;  $K = 0,125$  ;  $K = 0,25$  ;  $K = 0,375$  ;  $K = 0,5$  ;  $K = 0,75$  et  $K = 1$ . La cellule opère pour des contraintes de confinement (par huile) et axiale (par piston) de 69 MPa maximum. Afin d'assurer l'étanchéité des jaquettes en élastomère une pression de confinement initiale de 3 MPa est nécessaire. Les échantillons sont saturés en saumure (30g/L NaCl) et la pression de pore est maintenue à 1 MPa par un régulateur de pression. Pour tout  $K$  nous avons fixé le taux de chargement axial à 0,1 MPa/min. Ainsi, les taux de déformation volumique varient entre  $2,5 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$  et  $1,7 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$  pour  $K = 0$  et 1, respectivement.

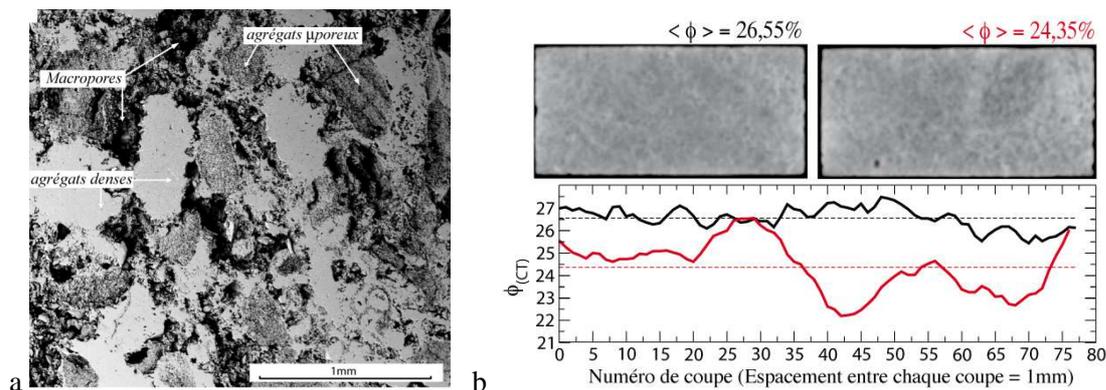


Fig.1. (a) Microstructure observée en MEB (électrons secondaires). (b) Scanners RX et profils de porosité correspondants sur la longueur de deux échantillons.

### 3. Résultats

#### 3.1. Chemin de chargement et mécanismes d'endommagement

La réponse mécanique des échantillons est évidemment fonction du chemin de chargement, mais pour un même chemin de chargement, celle-ci est également intimement liée au degré d'hétérogénéité entre les différents échantillons testés. Ces aspects sont décrits ci-dessous.

**Régime fragile.** Pour  $K = 0$  et 0,125 l'endommagement est localisé et entraîne à partir d'une pression seuil  $C^*$  la rupture fragile, soit par deux fractures conjuguées, soit par une fracture oblique unique, dont l'inclinaison par rapport à la direction de la contrainte axiale dépend de  $K$ , mais aussi des hétérogénéités de structure.

**Régime compactant localisé.** Pour  $K = 0,25$  à 0,375 le régime est transitionnel, ou semi - fragile. Le régime élastique voit très peu de compaction jusqu'au seuil de pression critique  $C^*$ , où l'apparition d'une bande de cisaillement localisée induit une compaction axiale macroscopique. L'accroissement de pression stabilise cette compaction, jusqu'au second seuil de pression critique  $C^{**}$ , qui marque le régime dilatant cataclastique. Comme observé aussi par [2] et [3], ce régime ne présente pas de localisation, mais résulte en éprouvettes en barillet. Sous chargement on observe une importante réduction de porosité, dont l'évolution correspond à celle de la déformation volumique. Mais à la décharge, on observe aussi l'ouverture d'une porosité nouvelle, liée à la fissuration diffuse. Ce régime n'est pas observé pour  $K = 0,5$ , à cause des limitations en pression de

notre dispositif. Enfin, les profils de densité aux RX montrent que les plus fortes diminutions de porosité apparaissent aussi dans les zones initialement les plus poreuses.

**Régime compactant diffus.** Pour  $K = 0,75$  à  $1$ , au-delà de  $C^*$ , le régime est purement compactant avec l'effondrement du réseau de méso-porosité [4], initialement présente entre différents agrégats (Fig. 2).

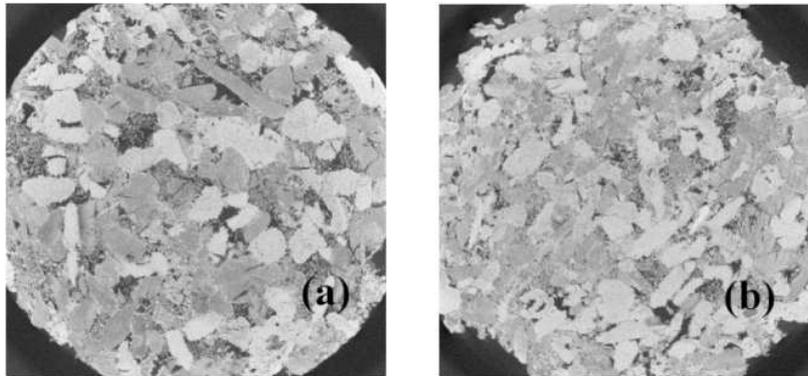


Figure 2. Cartes de densité obtenues en microtomographie RX sur mini-carottes de 5 mm de diamètre échantillonnées dans le matériau sain (a) et après chargement à  $K = 1$  (b). On note la réduction de porosité.

### 3.2. Modélisation de la rupture

Pour chaque essai on définit d'après les courbes de la déformation axiale  $\epsilon_a$  en fonction de la contrainte effective moyenne  $P'$  les pressions  $P_{in}$  et  $C^*$ , qui correspondent respectivement aux seuils du régime inélastique et de la rupture. D'après leurs données expérimentales, Yale et al. [5] et Wong et al. [6] ont proposé que l'enveloppe de rupture des roches réservoir pourrait être modélisée par une ellipse dans l'espace  $(P', q)$ , avec  $q$  contrainte déviatorique:

$$\frac{(C^* - \omega)^2}{A^2} + \frac{q^{*2}}{B^2} = 1, \quad (1)$$

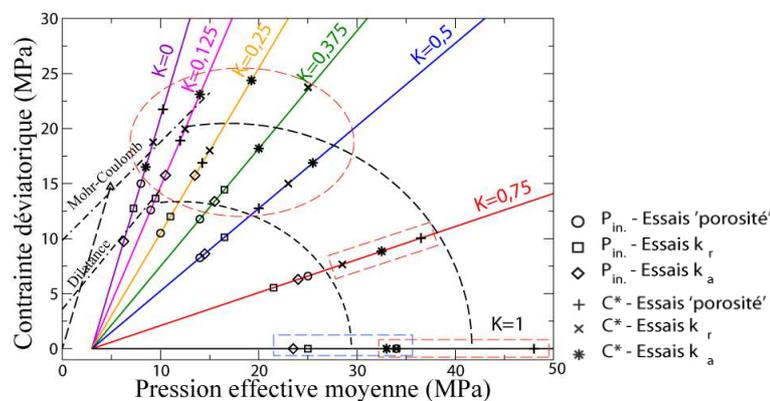


Figure 3. : Enveloppes elliptiques d'inélasticité et de rupture déterminées à partir des expériences conduites en chargement continu.  $P_{in}$  et  $C^*$  sont représentées par des symboles 'vides' et 'pleins', respectivement. Le point de rupture en essai uniaxial classique est aussi représenté pour contraindre la droite de Mohr-Coulomb.

avec A et B, étant les demi-axes de l'ellipse centrée sur  $(\omega, 0)$ . Nos données, présentées dans la Figure 3, permettent de caractériser les enveloppes elliptiques aussi bien à l'initiation de la réponse inélastique que à la rupture. Néanmoins, on constate que pour un même chemin de chargement, et en particulier pour  $K = 1$ , il y a une très forte dispersion des valeurs de  $C^*$ , ce qui résulte en un écart de 11,5 MPa entre les valeurs extrêmes de pression à la rupture  $P^*$ . En général,  $C^*$  et  $q^*$  dans (1) sont normalisées par  $P^*$ , ce qui devient ici impossible. Or, nous constatons aussi que les plus fortes variations de pression critique apparaissent pour les échantillons qui présentent les plus fortes variations de porosité. La dispersion des données est donc liée à la forte hétérogénéité de structure poreuse du matériau. Pour réduire son incidence nous avons appliqué un modèle de milieu effectif, détaillé dans [7], qui combine les théories du contact de Hertz et de la rupture, et un modèle de milieu granulaire effectif [8]. Ce modèle permet notamment de relier la pression critique d'effondrement de porosité  $P^*$  à sa valeur par :  $P^* \propto \varphi^{-3/2}$ . De ce fait, nous effectuons une normalisation de  $C^*$  par les porosités normalisées de chaque échantillon :

$$C^* \rightarrow \frac{C^*}{\left(\frac{\varphi}{\langle \varphi \rangle}\right)^{-3/2}} \quad (2)$$

Les Figures 4a et 4b montrent respectivement les pressions critiques mesurées (brutes) et celles recalculées selon (2), dans un diagramme Pression effective moyenne en fonction de K. Il apparaît que

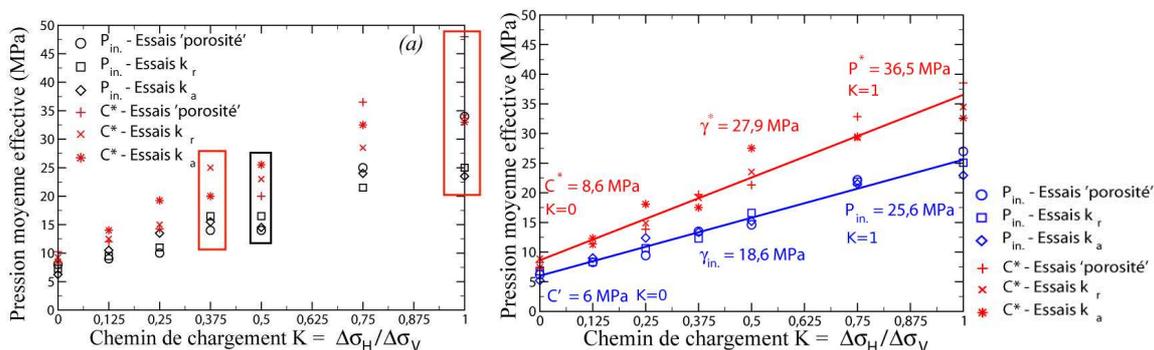


Figure 4. (a) Dispersion des valeurs des pressions seuils  $P_{in}$  et  $C^*$  en fonction du chemin de chargement. Les domaines en rouge soulignent les essais réalisés sur des échantillons à forte dispersion de porosité initiale, et la dispersion des pressions seuils qui leur correspond. A  $K=0,5$  (domaine noir), les échantillons présentent une forte porosité, mais moins dispersée. (b) Même diagramme après normalisation des pressions critiques  $C^*$  et  $P_{in}$ , selon l'expression (2). La dispersion des données est fortement réduite et fait apparaître clairement une dépendance linéaire entre les pressions critiques et K.

la procédure de normalisation réduit fortement la dispersion des données et fait apparaître clairement une dépendance linéaire entre les pressions critiques et K. La pente de la droite est la différence entre la valeur de  $P^*$  dans le cas hydrostatique  $K=1$  et celles de  $C^*$  pour le cas uniaxial  $K = 0$ . Ainsi, la valeur de  $C^*$  pour un K quelconque se déduit de ces valeurs par :

$$C^* = (P^* - C_{K=0}^*)K + C_{K=0}^* \quad (3)$$

La transposition de (3) dans l'espace des contraintes établit un nouveau modèle de rupture qui ne dépend que de K. Pour un K donné, les contraintes verticale  $\sigma_V$  et horizontale  $\sigma_H$  vérifient:

$$\sigma_H = K(\sigma_V - P_0) + P_0, \quad (4)$$

avec  $P_0$ , la pression hydrostatique initiale. Quelque soit le régime d'endommagement, la contrainte déviatorique  $q^*$  s'exprime donc en fonction de la pression moyenne critique  $C^*$  comme:

$$q^* = \frac{3(1-K)}{(1+2K)}(C^* - P_0) \quad (5)$$

En combinant (3) et (5), on obtient une nouvelle expression de l'enveloppe de rupture, illustrée en Figure 5 :

$$q^* = 3(C^* - P_0) \frac{(P^* - C^*)}{(P^* - 3C_{K=0}^* + 2C^*)} \quad (6)$$

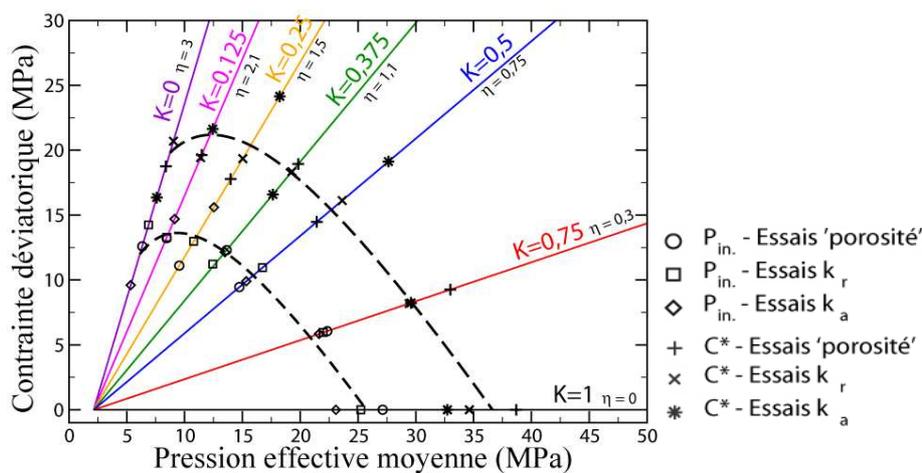


Figure 5. Représentation des enveloppes d'inélasticité et de rupture définies par l'expression (6) pour l'ensemble des données obtenues en chargement continu et normalisées par la porosité. Les symboles 'vides' correspondent aux valeurs de pression d'inélasticité  $P_{in}$ , les symboles 'pleins' correspondent aux valeurs de pression critique  $C^*$ .

La Figure 5 montre un très bon ajustement des enveloppes d'inélasticité et de rupture définies par (6) avec les données expérimentales normalisées selon (2). Au-delà de 20 MPa de pression effective, la nouvelle représentation met en évidence la composante hydrostatique du tenseur de contraintes sur les mécanismes d'endommagement. En effet, entre 20 MPa et  $P^*$  l'enveloppe montre une tendance linéaire pour laquelle  $q^* \sim C^*$ , ce qui est cohérent avec les observations de comportement compactant à la rupture pour  $K > 0,5$ . Aux plus faibles pressions, la contribution de la composante déviatorique est plus importante, en cohérence avec les mécanismes de cisaillement compactant et de rupture fragile. Outre la meilleure représentativité visuelle en termes de composantes du tenseur des contraintes et de mécanismes de déformation, et contrairement à l'approche elliptique classique, cette nouvelle approche d'enveloppe ne nécessite aucun paramètre d'ajustement. Seuls deux types d'essais, l'un à pression de confinement constante ( $K = 0$ ),

l'autre en conditions hydrostatiques, sont nécessaires pour décrire l'ensemble de l'enveloppe de rupture. Néanmoins, selon l'hétérogénéité du matériau, plusieurs essais pour ces chemins de chargement doivent être réalisés.

## 4. Conclusions

Nous avons observé les différents modes d'endommagement et les effets des hétérogénéités de microstructure lors de tests hydromécaniques de carbonates soumis à différents chemins de chargement,  $K$ . Ce dernier est le paramètre principal qui définit le régime de déformation et l'évolution des perméabilités. Mais, dans les régimes intermédiaires, différents échantillons soumis au même  $K$  peuvent montrer des différences notables, du fait de leurs hétérogénéités de structure poreuse. Cette variabilité entraîne une forte dispersion des données en termes de pressions critiques et rend problématique l'ajustement d'une enveloppe de rupture dans l'espace des contraintes. En nous basant sur un modèle de milieu effectif, nous proposons une normalisation des pressions critiques par les porosités normalisées des différents échantillons, ce qui permet de dériver une expression d'enveloppe de rupture sans autre paramètre d'ajustement. Cette enveloppe correspond bien mieux aux données que l'enveloppe elliptique classique, et son élaboration ne nécessite que deux types d'essais, l'un à pression de confinement constante ( $K = 0$ ), l'autre en conditions hydrostatiques.

## Références

- [1] Dautriat J. et al., Axial and radial permeability evolutions of compressed sandstones, end effects and shear band induced permeability anisotropy, *Pure and Applied Geophysics* (in press).
- [2] Schubnel, A. et al., Damage and recovery of calcite rocks deformed in the cataclastic regime. In D. Bruhn and L. Burlini Eds. V. 245, 303-221, 2005.
- [3] Baud, P. et al., Failure mode and weakening effect of water on sandstone. *J. Geophys. Res.*, 105, 16371-16389, 2000.
- [4] Dautriat J. et al., Stress-Dependent Directional Permeabilities of Two Analog Reservoir Rocks: A Prospective Study on Contribution of  $\mu$ -Tomography and Pore Network Models, *SPE Res. Eval. & Eng.*, 12(2), 297-310, 2009.
- [5] Yale, DP and Crawford BR. Plasticity and permeability in carbonates. *SPE/ISRM*, 47582,485-494, 1998.
- [6] Wong, TF. et al., The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation. *J. Geophys. Res.*, 102, 3009-3026, 1997.
- [7] Zhang, J. et al., Micromechanisms of pressure induced grain crushing in porous rocks. *J. Geophys. Res.*, 95, 341-352, 1990.
- [8] Brandt, H. A study of the speed sound in porous granular media. *ASME, J. Applied Mechanics*, 22, 479-486, 1965.