

Mécanismes physiques de l'évolution de la perméabilité d'un grès sous chargements simulant la déplétion d'un gisement

F.M.R. Ferfera¹

*1 Sonatrach, Centre de recherche et développement, avenue du 1^{er} Novembre, 35000 Boumerdès - Algérie
e-mail : f.ferfera@caramail.com*

Résumé — Durant les premières années de vie d'un gisement d'hydrocarbures, l'exploitation se fait par déplétion (diminution de pression de pore), induisant une augmentation des contraintes effectives qui règnent dans le réservoir. Les mesures en place montrent que cette augmentation des contraintes semble s'effectuer suivant deux types de chemin de chargement, œdométrique ou proportionnel, en fonction de paramètres dont l'importance varie suivant les sites : caractéristiques pétrophysiques des roches, forme du gisement, conditions aux limites, etc.

Toutes ces transformations provoquent des variations des caractéristiques pétrophysiques des roches en place, en particulier des variations de perméabilité. Cette variation de la perméabilité dépend de la géométrie des pores, de la composition minéralogique de la roche et du type de chargement auquel elle est soumise.

Modéliser l'évolution de la perméabilité au cours de la production primaire est donc un problème complexe qui, dès l'abord, appelle la question suivante : faut-il relier la variation de perméabilité à une variation de contraintes ou plutôt à des déformations ? Au premier abord, une relation déformation-perméabilité semble plus logique, puisque la perméabilité est une grandeur géométrique. Cependant, l'analyse des phénomènes physiques mis en jeu (qu'ils soient mécaniques ou hydrauliques) par l'augmentation des contraintes effectives montre qu'une telle approche ne peut être appliquée systématiquement à toutes les roches. C'est ce que l'on se propose d'illustrer en s'aidant d'un travail expérimental réalisé sur du grès des Vosges de bonnes caractéristiques pétrophysiques (une porosité moyenne $\phi_{\text{moy}} = 20\%$ et une perméabilité moyenne $k_{\text{moy}} \approx 500$ mD) où des mesures simultanées de déformation et de perméabilité monophasique ont été effectuées.

Mots-clés : essais expérimentaux, perméabilité monophasique, déformation, contrainte, chemins de chargement, grès des Vosges.

Abstract — *Physical Mechanisms of Permeability Evolution of Sandstone under Load Simulating Reservoir Depletion* — During the early years of a reservoir life, production is done by depletion (decrease of pore pressure) which results in an increase of the effective stresses in the reservoir. In situ measurements show that the stress increase seems to follow two loading pathways, oedometric or proportional, depending on parameters such as the rock petrophysical characteristics, the reservoir shape, boundary conditions, etc.

All these changes induce variations of petrophysical characteristics of in situ rocks and particularly permeability variations, which depend on pore geometry, mineral composition of the rock and the loading type conditions.

The modelling of permeability evolution during the primary production is then a complex problem which can be translated into the following question: Should we link permeability variations to the change of stresses or to strains? At first, a strain-permeability relationship seems to be more logical because permeability is a geometrical value. However, the analysis of the physical phenomenon (either mechanical or hydraulic) induced by the increase of the effective stress shows that a similar approach cannot be applied systematically to all rocks. That is what we want to illustrate, by an experimental work, on Vosges sandstone of good petrophysical characteristics (average porosity $\phi_{avr} = 20\%$ and average permeability $k_{avr} \approx 500$ mD) where simultaneous measurements of strains and monophasic permeabilities were conducted.

Keywords: laboratory tests, monophasic permeability, strain, stress, stress paths, Vosges sandstone.

INTRODUCTION

La perméabilité étant une grandeur géométrique, il est logique de la relier à la géométrie de l'espace poreux. De même, il semble logique de relier les variations de perméabilité à celles de la géométrie de la roche. Paradoxalement, ce type de modèle est peu rencontré dans la littérature, car peu développé par les chercheurs.

Il existe tout au plus trois études qui relient la variation de perméabilité à une déformation mécanique :

- les travaux théoriques menés par Fauchet au LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées) sur le béton (Fauchet, 1991) : ils consistent en la modélisation de la perméabilité de fissure. Le modèle présenté paraît convenir pour les bétons soumis à des tractions comme c'est le cas pour certaines parties de barrages, mais son applicabilité reste à démontrer pour les roches profondes qui sont souvent soumises à des compressions. C'est néanmoins une voie de recherche intéressante parce qu'elle conjugue simplicité et rigueur ;
- les travaux de Morita : basés sur une modélisation complexe, dont les résultats ne peuvent être trouvés qu'après de nombreuses itérations numériques dues au nombre important de coefficients de pondération et de calage dont la signification physique reste à démontrer (Morita *et al.*, 1984) ;
- les travaux expérimentaux de Kharroubi sur une série de deux faciès différents de grès en provenance de la mer du Nord (Kharroubi, 1997) : ces essais simulent une déplétion par diminution de la pression de pore P_p à partir d'un état de contrainte initial tout en conservant une déformation radiale nulle (déformation œdométrique). Les paramètres mesurés sont la perméabilité à la saumure, les déformations et les variations du volume poreux de l'échantillon. L'auteur observe qu'une déplétion de 100 MPa provoque une nette diminution de la perméabilité. Les résultats obtenus sont ensuite exploités pour l'identification d'une loi d'évolution de la perméabilité k en fonction de la déformation, identifiée ici à la variation de la porosité ϕ .

Cependant, il apparaît que la validité d'une telle relation est limitée par les considérations suivantes :

- selon Jamouille *et al.* (1995), la perméabilité dépend du chemin de chargement, une loi $k(\phi)$ nécessite alors que ϕ soit connue en fonction du chemin de chargement ;
- d'autre part, les mesures de perméabilité lors d'un essai en déformation volumique bloquée ($\delta\varepsilon_{radiale} = \delta\varepsilon_{axiale} = 0$) montrent une diminution de 5 à 13 % pour une déplétion de 95 MPa : c'est un résultat qui contredit l'hypothèse puisque la perméabilité varie à déformation nulle.

En fait, une diminution de perméabilité suite à une diminution de pression de pore à déformation extérieure nulle ne s'explique pas aisément dans un cadre qui restitue les transformations de l'espace poreux par une variation de porosité.

Soit J le jacobien de la transformation qui fait passer de la porosité initiale ϕ_0 à la nouvelle porosité ϕ qui résulte de la baisse de pression de pore. Soit m la masse de fluide expulsée, ici négative puisqu'on perd du fluide. On a, sous l'hypothèse des petites déformations :

$$m = J\rho^{fl} \phi - \rho_0^{fl} \phi_0 = (1 + tr\varepsilon) \rho^{fl} \phi - \rho_0^{fl} \phi_0 \quad (1)$$

avec :

ρ_0^{fl} masse volumique du fluide à pression P_{p0}

ρ^{fl} masse volumique du fluide à pression P_p

$tr\varepsilon$ déformation volumique du solide.

En supposant que le volume fluide varie linéairement avec la pression, le coefficient d'incompressibilité étant K_{fl} , on obtient, sous l'hypothèse des petites déformations (Coussy, 1991) :

$$\frac{m}{\rho_0^{fl}} = \phi - \phi_0 + \phi_0 \frac{tr\varepsilon}{K_{fl}} + \phi_0 \frac{\Delta P_p}{K_{fl}} \quad (2)$$

Et, puisque la déformation de volume $tr\varepsilon$ est maintenue nulle, on a donc :

$$\phi = \phi_0 \left(1 - \frac{\Delta P_p}{K_{fl}} \right) + \frac{m}{\rho_0^{fl}} \quad (3)$$

Or, dans ce second terme, le multiplicateur de ϕ_0 augmente lorsque la pression baisse (ΔP_p négatif) tandis que, comme signalé plus haut, la variation de masse m est négative. Il est donc *a priori* impossible de déterminer si la porosité diminue ou augmente.

Ainsi, en ne considérant comme témoin de la déformation due à une déplétion isochore (c'est-à-dire à déformation extérieure constante) que la variation de porosité, il n'est pas possible de recueillir des informations intéressantes pour l'évolution de la perméabilité. Déformation et porosité ne sont donc pas les seules variables explicatives. Des considérations sur la physique et la morphologie des transformations qui interviennent sont nécessaires.

À travers ce travail, la possibilité d'appliquer une approche perméabilité-déformation sera discutée. Pour ce faire, nous nous proposons d'analyser les résultats obtenus sur une série d'essais sur du grès « Vosges Vosgien » de bonne porosité (20 %). Des mesures simultanées de déformation et de perméabilité monophasique ont été réalisées, suivant divers types de chemin de contrainte, à plusieurs niveaux de pression de pore et de confinement.

1 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les échantillons testés sont de forme cylindrique, de 40 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur. Ils sont prélevés perpendiculairement à leurs couches de stratification dans un bloc parallélépipédique. Après les opérations de surfacage, les échantillons sont équipés de jauges de déformation puis enveloppés dans une enveloppe (viton ou nitrile). Ce type de montage permet le contrôle séparé des pressions de pore et de confinement ainsi qu'une mesure simultanée de la perméabilité et des déformations.

L'échantillon ainsi préparé est posé verticalement dans une cellule triaxiale. Des pierres poreuses sont placées à ses extrémités pour assurer une meilleure distribution de la pression de pore P_p . Après saturation, l'échantillon est prêt à l'essai.

Le chargement vertical est assuré par une vis sans fin contrôlée par un automate. La pression de confinement est contrôlée par l'une des pompes du dispositif expérimental. Parallèlement, la pression de pore est appliquée par l'une des deux autres pompes restantes, jusqu'à atteindre l'état de chargement désiré. Le taux d'accroissement de ces pressions est de 0,1 MPa/min en isotrope et de 0,5 MPa/min dans les autres cas.

Après attente de la stabilité, la perméabilité est mesurée deux fois, en inversant le sens d'écoulement lors de la seconde mesure. La valeur finale considérée est la moyenne des perméabilités mesurées dans les deux sens. Cette technique permet d'éviter l'engorgement des seuils de pore par l'éventuelle formation de fines (Khilar et Fogler, 1983). Elle permet aussi de dédoubler chaque mesure dans les mêmes

conditions. La méthode de mesure adoptée est la méthode de l'état d'équilibre, analogue à celle de Darcy (1856). Connaissant la section droite S et la hauteur L de l'échantillon de roche, ainsi que la viscosité du fluide μ pour une température et une pression données, la mesure de la pression différentielle à débit imposé Q permet de calculer la perméabilité de la roche conformément à la loi de Darcy :

$$k = -\frac{\mu QL}{S\Delta P_p} \quad (4)$$

Durant les essais, l'applicabilité de la loi de Darcy (proportionnalité entre Q et ΔP_p) a été largement vérifiée. Des mesures répétées sous des conditions analogues montrent que l'erreur relative est de l'ordre de 5 %.

Le fluide utilisé pour nos mesures est une huile newtonienne faiblement conductrice (fluide saturant et de remplissage). Ce choix a été décidé afin de minimiser l'interaction physico-chimique entre liquide saturant et constituants de la roche, mais aussi afin d'éviter tout court-circuit électrique entre l'huile de remplissage de la cellule triaxiale faisant office de confinement et les fils électriques qu'elle contient. Des corrections sur la viscosité sont faites uniquement en fonction de la pression de service utilisée, car la température du laboratoire est maintenue constante.

Il est à signaler que les échantillons testés présentent une bonne homogénéité pétrophysique initiale, qui résulte d'un bon tri initial. Ceci facilite la comparaison des résultats obtenus entre les différents échantillons de roches testés. Une description plus détaillée des procédures de mesure, du dispositif expérimental et des roches utilisées se trouve dans les travaux de recherche réalisés à l'*Institut français du pétrole* dans le cadre d'une étude de l'influence du champ de contrainte sur l'évolution de la perméabilité monophasique d'un grès (Ferfera, 1997).

2 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS

L'interprétation est abordée de façon à analyser les essais en contrainte-déformation puis en déformation-perméabilité.

2.1 Approche contrainte-déformation

Les figures 1a et 1b montrent respectivement l'évolution de la déformation axiale et de la déformation radiale lorsque la roche est sollicitée par un chargement vertical à pression de confinement constante (*Uniaxial Compression*, UCC) pour plusieurs niveaux de pression de confinement P_c et de pression de pore P_p . Un calcul simple permet d'en déduire l'évolution de la déformation volumique (*fig. 1c*). Les perturbations représentées sur les différentes courbes par des petits amas de points localisés, régulièrement espacés, correspondent aux mesures des perméabilités.

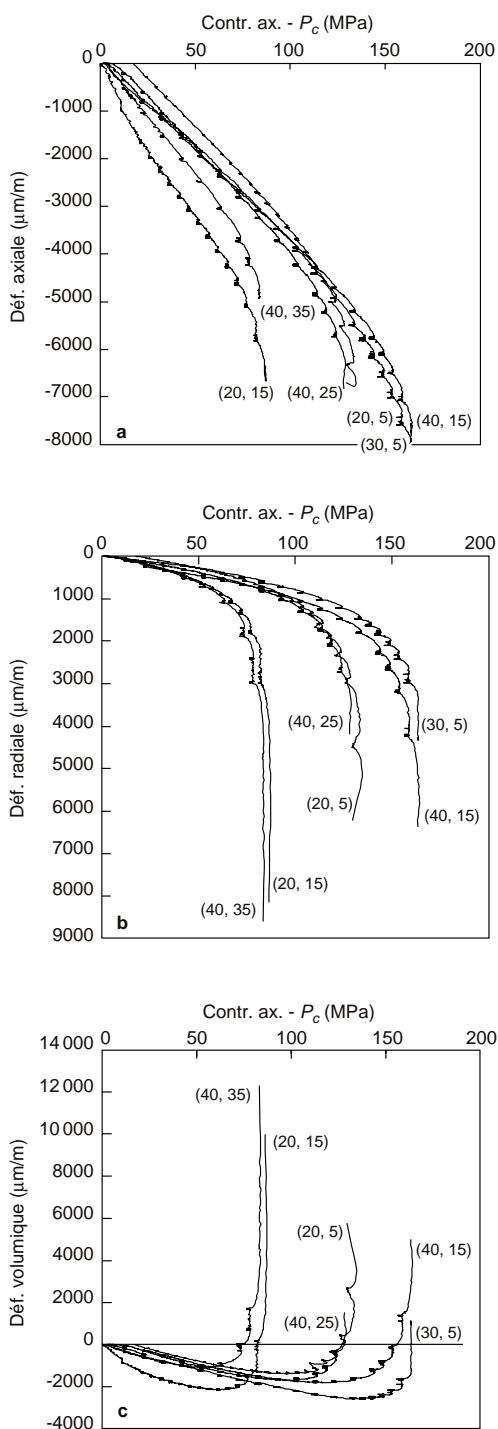


Figure 1

Courbes de déformation lors d'essais à chargement (UCC) vertical et à différents niveaux de (P_c, P_p) en MPa.

(a) Courbes de déformations axiales; (b) Courbes de déformations radiales; (c) Courbes de déformations volumiques.

Strain curves during uniaxial compression tests (UCC) at different (P_c, P_p) levels in MPa.

(a) Axial strain curves; (b) Radial strain curves; (c) Volumetric strain curves.

Une première analyse de ces courbes fait apparaître une différence notable dans le comportement du matériau suivant que les mesures de déformation sont faites parallèlement (déformation axiale, figure 1a) ou perpendiculairement (déformation radiale, figure 1b) au déviateur de contrainte. En effet, l'aspect non linéaire des déformations radiales est beaucoup plus marqué que celui des déformations axiales, pour lesquelles on observe seulement une courte phase non linéaire avant rupture.

Outre cette différence, il est intéressant d'observer le regroupement des courbes obtenues par niveau croissant de confinement effectif de Terzaghi ($P_c - P_p = \text{constante}$, figure 1c). L'accroissement de ce confinement effectif à 5, 15 puis 25 MPa se traduit par une rigidification de la roche accompagnée d'une augmentation de la contrainte de rupture.

Ces résultats permettent de déterminer le module de Young tangent E_t et le module de cisaillement tangent G_t . Les figures 2a et 2b présentent un exemple de l'évolution de ces grandeurs pour un essai à chargement vertical UCC à 20 MPa de pression de confinement P_c et 5 MPa de pression de pore P_p .

Le report des modules élastiques (module de Young, module de cisaillement) et du coefficient de Poisson ν trouvés en fonction du confinement effectif $P_c - P_p$ (fig. 3a et 3b) concrétise ces observations. Alors que le coefficient de Poisson ne paraît pas évoluer de façon monotone, on observe une nette augmentation des modules élastiques, traduisant une rigidification progressive de la roche. Ces résultats sont analogues à ceux obtenus par Wilhelmi et Somerton (1967) sur du grès de Béréa et par Pellegrino (1996) sur du grès de Rothbach.

Les diagrammes de chargement jusqu'à rupture montrent un comportement dilatant de la roche. Ce comportement est lié au matériau testé et traduit les modifications structurales qu'il subit au voisinage de la rupture. Pour notre roche, l'application d'un chargement de type chargement vertical à pression de confinement constante (UCC) entraîne une succession de comportements qui dépendent du niveau de la contrainte verticale σ_a appliquée (fig. 1c). Au début du chargement, les faibles valeurs de contrainte déviatorique ($\sigma_a - P_c$) provoquent la fermeture des microfissures situées dans le plan perpendiculaire à la direction de chargement, souvent accompagnée par de faibles déformations élastiques de la matrice rocheuse (grain + ciment). Ces variations à l'échelle du grain se traduisent macroscopiquement par une diminution non linéaire du volume total de la roche, c'est le début du phénomène de contractance.

La diminution de l'espace poreux se poursuit jusqu'au début de l'endommagement de la roche, caractérisé par une contrainte critique au-delà de laquelle il y a chute des modules élastiques (module de Young et module de cisaillement). À ce stade du comportement, la roche se fragilise, des fissures apparaissent et les déformations deviennent irréversibles.

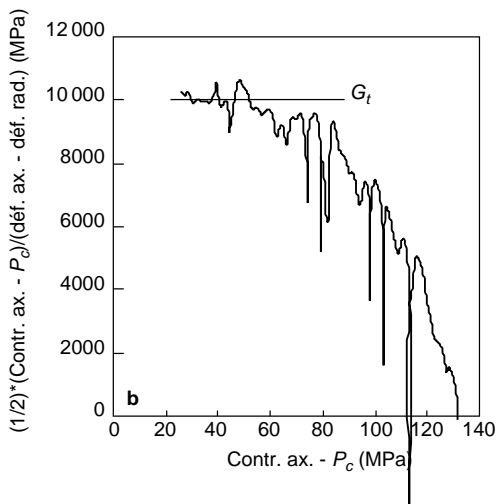
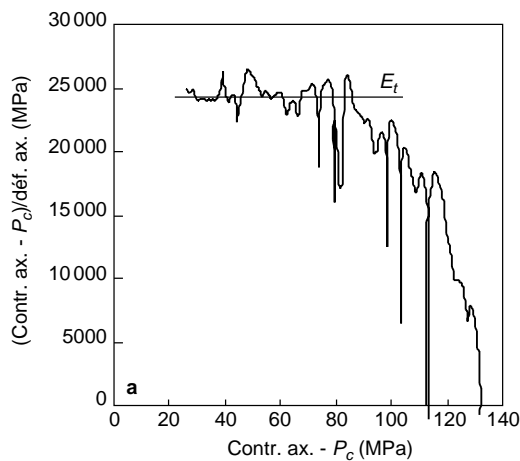


Figure 2
Détermination des modules de Young (a) et de cisaillement (b) lors d'un essai (UCC) à $P_c = 20$ MPa et $P_p = 5$ MPa.
Determination of Young (a) and shear modulus (b) under UCC test at $P_c = 20$ MPa and $P_p = 5$ MPa.

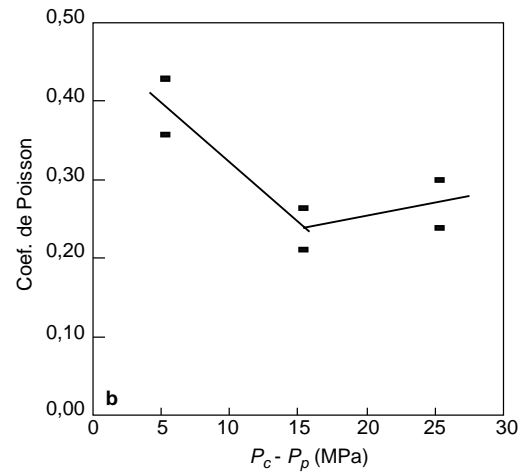
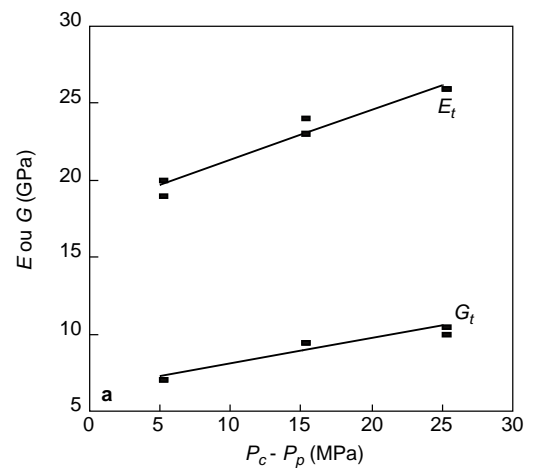


Figure 3
Modules élastiques tangents E_t , G_t (a) et coefficient de Poisson ν (b) en fonction de $P_c - P_p$.
Tangent elastic modulus E_t , G_t (a) and Poisson's ratio ν (b) vs. $P_c - P_p$.

Une augmentation supplémentaire du déviateur enclenche un développement progressif et stable de microfissuration parallèle à la contrainte majeure, créant de ce fait une importante anisotropie induite. L'endommagement engendré lors de nos essais UCC est presque exclusivement observé sur les jauges de déformation radiale, les jauges axiales donnant par contre l'illusion d'un matériau resté parfaitement sain. L'ouverture progressive des microfissures se manifeste sur la courbe (déformation volumique-déviateur) par une atténuation progressive de la contractance jusqu'au point de changement de courbure. Au-delà de ce point, le comportement de la roche devient fortement dilatant en raison d'une propagation instable de la fissuration (Bieniawski, 1967) débouchant sur une rupture conventionnelle de type fragile. Cette rupture se caractérise par une bande de cisaillement localisée

séparant deux blocs quasi rigides, glissant l'un sur l'autre, le long d'une surface plane inclinée (fig. 4).

Dans ce domaine, les travaux de Santarelli et Brown (1989) proposent une classification des types de rupture pour des essais de compression verticale (UCC) à différents niveaux de contrainte de confinement appliquée. La figure 5 présente les résultats obtenus sur le grès de Doddington, caractérisé par une résistance à la compression simple R_{comp} de 51 MPa.

Les auteurs observent que, sous de très faibles confinements (inférieurs au centième de R_{comp}), la déformation se localise le long d'une paire de plans de cisaillement conjugués associés à une très importante zone de broyage (plus de 50 % du volume du matériau est broyé). Sous un confinement moyen (compris entre le centième et le dixième de

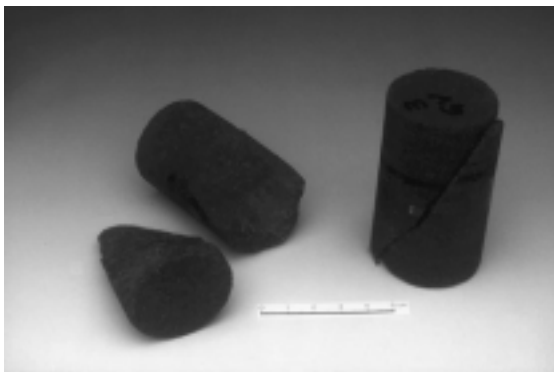


Figure 4

Exemple de comportement à la rupture du grès « Vosges Vosgien ».

Example of behavior at failure of "Vosges Vosgian" sandstone.

R_{comp}), la rupture se fait suivant une paire de plans de cisaillement conjugués. Sous un confinement élevé (compris entre le dixième de R_{comp} et R_{comp}), la déformation se concentre le long d'un plan bien marqué et d'une série de plans croisés. Sous de très forts confinements (supérieurs à R_{comp}), elle affecte une largeur de broyage de 5 à 8 mm, inclinée de 50° par rapport à la verticale.

En utilisant la mesure de résistance à la compression simple de Deflandre *et al.* (1995) sur du grès « Vosges Vosgien » non saturé, il nous est possible de vérifier la concordance de nos résultats avec la classification décrite ci-dessus. Pour une valeur de R_{comp} trouvée égale à 39 MPa et pour l'intervalle de contrainte $P_c - P_p$ de travail (5, 15 et 25 MPa), nos résultats paraissent conformes à ceux de Santarelli et Brown (1989). En effet, pour $0,1R_{\text{comp}} = 3,9 \text{ MPa} < P_c - P_p < R_{\text{comp}} = 39 \text{ MPa}$, la rupture se fait bien suivant le schéma (iii) de la figure 5. Les principaux résultats des différents essais UCC réalisés sont présentés dans le tableau 1.

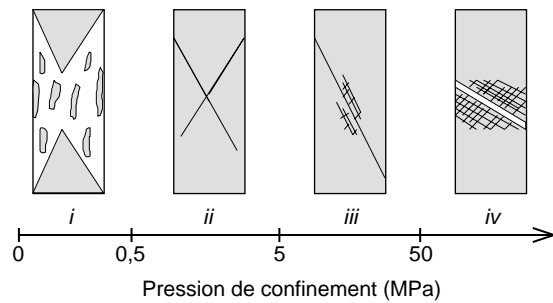


Figure 5

Schématisme des types de rupture obtenus sous différents confinements lors d'essais UCC sur du grès de Dodderington.

Graphic representation of types of failure obtained for various confining pressures under UCC tests on Dodderington sandstone.

2.2 Approche déformation-perméabilité

La représentation des mesures de perméabilité en fonction des déformations lors des essais de chargement vertical à pression de confinement constante (UCC) montre des courbes bien séparées les unes des autres (fig. 6a-6c). L'avantage de telles représentations réside dans la possibilité de mettre en valeur l'influence de la pression de pore et de la pression de confinement sur la réduction de la perméabilité.

À confinement constant égal à 40 MPa, l'augmentation de la pression de pore à 15, 25 ou 35 MPa induit une réduction de perméabilité de plus en plus faible. Réciproquement, à P_p constante égale à 5 MPa (respectivement à 15 MPa), l'augmentation de la pression de confinement P_c à 20 ou 30 MPa (respectivement à 20 ou 40 MPa) produit une réduction de perméabilité de plus en plus forte. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux et à la théorie présentés dans les travaux de Zoback et Byerlee (1975), Walls *et al.* (1982), David et Darot (1989), Berryman et Milton (1991) et Berryman (1992, 1993).

TABLEAU 1

Valeurs des paramètres poro-élastiques E_r , G_r , ν et de la contrainte de rupture σ_{rup} lors d'essais UCC sur du grès « Vosges Vosgien »

Values of poro-elastic parameters E_r , G_r , ν and failure stress σ_{rup} from UCC tests on "Vosges Vosgian" sandstone

N° de roche	P_c (MPa)	P_p (MPa)	$P_c - P_p$ (MPa)	σ_{rup} (MPa)	E_r (GPa)	G_r (GPa)	$\nu = (E_r/2G_r) - 1$
19	20	15	5	107	19	7	0,36
9	40	35	5	124	20	7	0,43
3	20	5	15	154	24	9,5	0,26
7	40	25	15	168	23	9,5	0,21
8	30	5	25	194	26	10	0,3
10	40	15	25	204	26	10,5	0,24

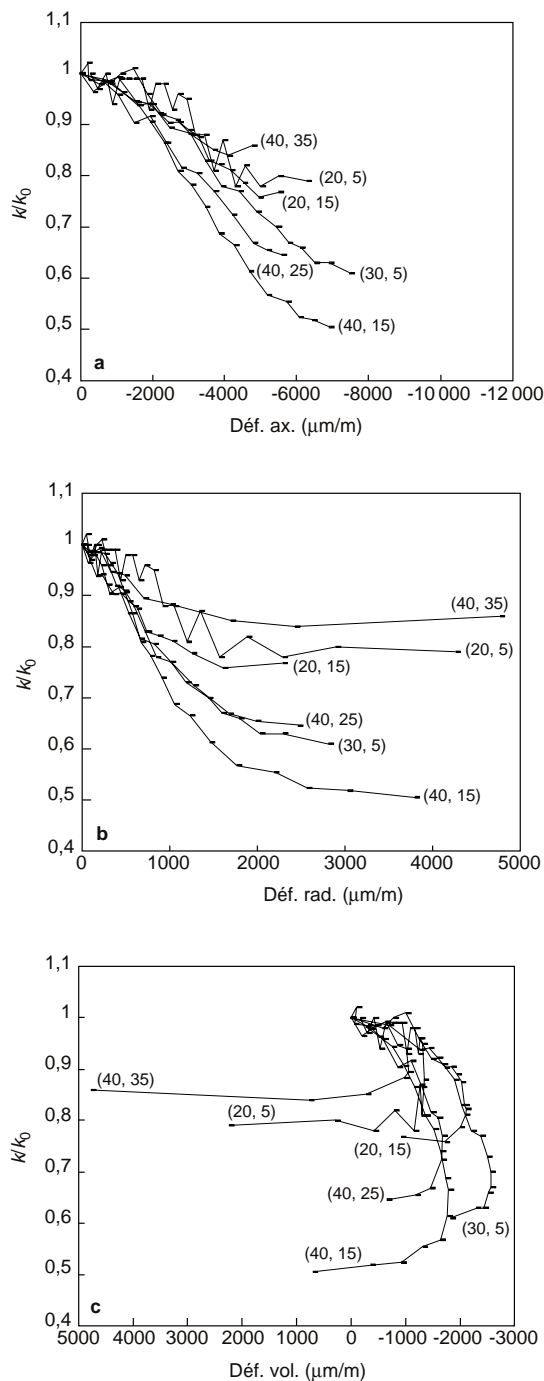


Figure 6

Courbes de perméabilité lors d'essais à chargement (UCC) vertical et à différents niveaux de (P_c , P_p) en MPa.

(a) Évolution de la perméabilité en fonction de la déformation axiale ; (b) Évolution de la perméabilité en fonction de la déformation radiale ; (c) Évolution de la perméabilité en fonction de la déformation volumique.

Permeability curves under uniaxial compression tests (UCC) at different (P_c , P_p) levels in MPa.

(a) *Permeability evolution vs. axial strain; (b) Permeability evolution vs. radial strain; (c) Permeability evolution vs. volumetric strain.*

Par ailleurs, la représentation de ces mêmes valeurs de perméabilité normalisée en fonction de la déformation volumique (fig. 6c) montre une évolution en trois étapes :

- la première phase de comportement est caractérisée par une quasi-stabilité de la perméabilité ;
- durant l'étape intermédiaire, la perméabilité et les déformations évoluent dans le même sens. Le caractère contractant (diminution de volume total) de la roche, dû essentiellement à l'écrasement des grains et à l'effondrement des pores, engendre de fortes réductions des sections d'écoulement, ce qui induit une diminution de la perméabilité ;
- à partir du début de la dilatance de la roche, la perméabilité et les déformations volumiques évoluent en sens contraire, faisant apparaître un « semblant de palier » : la perméabilité continue de décroître malgré l'augmentation importante du volume de la roche. Le phénomène d'« écrasement des pores », également présent durant cette phase, s'accompagne d'un accroissement de la densité des microfissures qui s'accroît au fur et à mesure qu'on se rapproche de la rupture. Cette augmentation des vides se traduit macroscopiquement par une augmentation du volume total de la roche. Paradoxalement, du point de vue hydraulique, la perméabilité est peu affectée par ce changement de comportement (dilatant-contractant) : elle continue à diminuer.

Afin de vérifier ce résultat, un essai complémentaire a été réalisé : essai à contrainte moyenne constante (CMS), c'est-à-dire au cours duquel la somme des trois contraintes principales de chargement reste constante. Ce chemin de chargement est réalisé en augmentant le chargement vertical tout en faisant diminuer la contrainte de confinement. Au cours d'un tel essai, le résultat déjà obtenu pour les essais à confinement constant (UCC) se voit confirmé : la réponse hydromécanique traduite par la perméabilité de la roche montre bien une diminution malgré le comportement totalement dilatant de la roche. Notons que le dédoublement de l'essai a montré une bonne répétabilité (fig. 7a et 7b).

Une explication de ce phénomène serait qu'une partie des microfissures est non-connectée, ne jouant ainsi aucun rôle dans l'évolution de la perméabilité. Cette interprétation est suggérée par un examen au microscope électronique à balayage (MEB) réalisé sur un fragment provenant d'une éprouvette de roche après rupture (fig. 8). Quant à la variation de perméabilité créée par les autres microfissures, c'est-à-dire les microfissures connectées, elle semble être négligeable devant celle engendrée par la réduction des seuils de pore. En effet, la plupart des travaux réalisés nous montrent que la réduction de la perméabilité est un phénomène communément observé dans les roches caractérisées par une porosité matricielle moyenne à bonne (> 15 %).

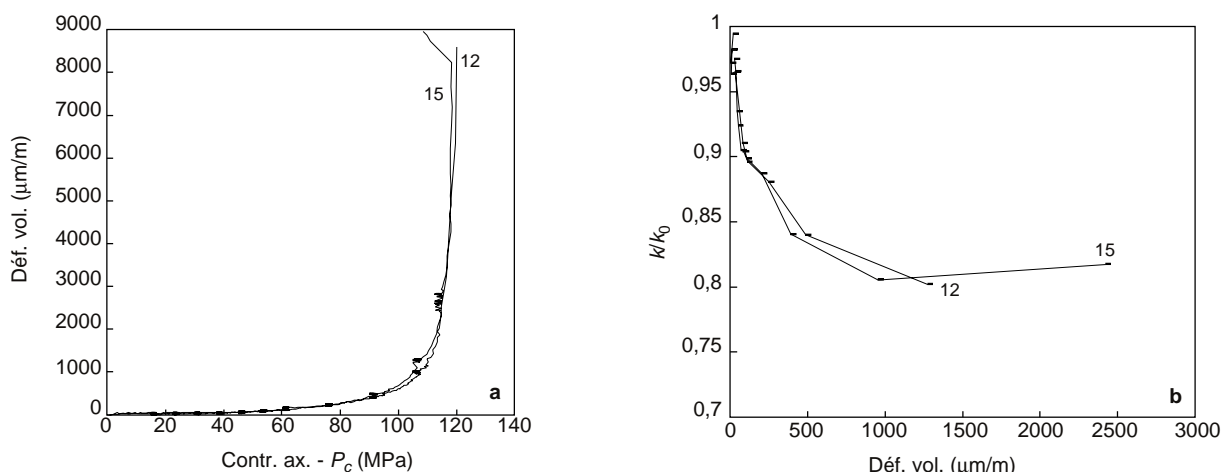


Figure 7

Essais CMS à $P_p = 5$ MPa et contrainte moyenne de 55 MPa sur deux échantillons de grès « Vosges Vosgien ».

(a) Évolution de la déformation volumique en fonction du déviateur appliqué ; (b) Évolution de la perméabilité en fonction de la déformation volumique.

CMS test at $P_p = 5$ MPa and a mean pressure of 55 MPa on two “Vosges Vosgien” sandstone cores.

(a) Volumetric strain evolution vs. the applied deviatoric stress; (b) Permeability evolution vs. volumetric strain.

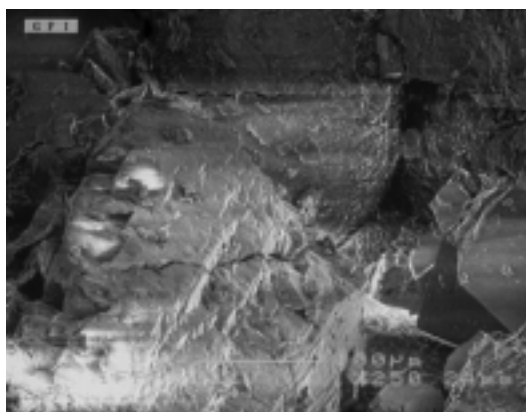


Figure 8

Vue d'un échantillon au MEB (microfissures non connectées).
Sample examined in the Scanning Electron Microscope
(unconnected microcracks).

Un travail fort intéressant effectué par Zhu et Wong (1997) sur cinq grès de porosité matricielle variable (de 15 à 35 %) vient confirmer nos résultats. À noter, parmi ces échantillons, la présence du grès de Rothbach, une roche semblable au grès des Vosges de l'étude présentée. Les travaux de Zhu et Wong (1997) consistent principalement à effectuer des mesures simultanées de porosité et de perméabilité lors d'essais de chargement vertical à plusieurs niveaux de confinement. Les auteurs observent que, dans tous les cas, la perméabilité tend à diminuer et que le comportement hydromécanique dépend du type de rupture de l'échantillon testé. La porosité et la perméabilité évoluent dans le même sens dans les essais

aboutissant à des ruptures ductiles, alors que pour les ruptures fragiles (cas des travaux présentés ici), la perméabilité diminue malgré l'augmentation de la porosité.

CONCLUSIONS

La baisse de pression dans un gisement provoque une variation des efforts s'exerçant sur la roche, dont la conséquence principale est l'augmentation du déviateur de contrainte, c'est-à-dire d'une grandeur liée à la différence entre les contraintes maximale et minimale s'exerçant sur la roche. Les expériences de laboratoire au cours desquelles on a simulé l'augmentation de déviateur suivant différents « chemins de contrainte » montrent que :

- en phase élastique, la perméabilité diminue ;
- au-delà, les déformations obtenues traduisent un endommagement mécanique anisotrope : l'anisotropie est induite par le développement progressif de microfissures parallèles à la contrainte majeure. L'ouverture de ces microfissures engendre une dilatance non négligeable, précédant une phase de rupture du type fragile ;
- la chute de la perméabilité observée en phase élastique semble peu affectée par cette transition contractance/dilatance ou élastique/plastique, ce qui rend l'écriture d'une loi de perméabilité en déformation difficile à réaliser. Dès lors, l'approche contrainte-perméabilité semble mieux convenir à l'écriture d'une telle loi. Les travaux engagés dans cette voie s'avèrent prometteurs et suggèrent des perspectives intéressantes (Ferfera *et al.*, 1997 ; Sarda *et al.*, 1998).

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'*Institut français du pétrole*, et en particulier l'équipe de Mécanique des roches au sein de laquelle il a réalisé ses travaux. Il remercie également M. le Professeur J.M. Fleureau de l'*École centrale de Paris* et M. J.P. Sarda de l'*IFP* pour les nombreux avis et critiques portés aux recherches qui ont fait l'objet de cet article.

REFERENCES

- Berryman, J.G. (1992) Effective Stress for Transport Properties of Inhomogeneous Porous Rocks. *Journal of Geophysical Research*, **97**, B12, 409-423.
- Berryman, J.G. (1993) Effective Stress Rules for Pore Fluid Transport in Rocks Containing Two Minerals. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Abstr.*, **30**, 1165-1168.
- Berryman, J.G. et Milton, G.M. (1991) Exact Results for Generalized Gassmann's Equations in Composite Porous Media with Two Constituents. *Geophysics*, **56**, 12, 1950-1960.
- Bieniawski, Z.T. (1967) Mechanism of Brittle Fracture of Rock, Part I and Part II, Theory of the Fracture Process and Experimental Studies. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, **4**, 395-423.
- Coussy, O. (1991) *Mécanique des milieux poreux*, Éditions Technip.
- Darcy, H. (1856) *Les Fontaines publiques de la ville de Dijon, Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*, Victor Dalmont éditeur.
- David, C. et Darot, M. (1989) *Permeability and Conductivity of Sandstones, Rock at Great Depth*, Maury & Fourmaintraux, Balkema, Rotterdam, 203-209.
- Deflandre, J.P., Vincke, O. et Rebut, E. (1995) Contribution of the Acoustic Emission Analysis to the Interpretation of the Uniaxial Compressive Test. *35th US Symposium on Rock Mechanics*, 4-7 juin, Lake Tahoe, USA, Daemen & Schultz, Balkema, Rotterdam, 867-872.
- Faucher, B. (1991) Analyse poroélastique des barrages en béton et leurs fondations. Rôle de la pression interstitielle. *Thèse*, École nationale supérieure des ponts et chaussées.
- Ferfera, F.M.R. (1997) Influence du champ de contrainte sur l'évolution de la perméabilité monophasique d'un grès. *Thèse*, École centrale de Paris.
- Ferfera, F.M.R., Sarda, J.P., Boutéca, M. et Vincké, O. (1997) Experimental Study of Monophasic Permeability Changes under Various Stress Paths. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, **34**, article 037, Elsevier Science Ltd.
- Jamouille, L., Cordelier, P. et Kharroubi, A. (1995) Measurement of Gas Permeability under Different Compaction Modes of Tight Reservoir Samples. *Proc. Society of Core Analysts, International Symposium*, 12-14 septembre, San Francisco, USA, SCA 9519.
- Kharroubi, A. (1997) Influence de la dépressurisation sur la perméabilité des roches réservoir, Application à un gisement HP-HT. *Thèse*, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Khilar, C. et Fogler, H.C. (1983) Water Sensitivity of Sandstones. *SPE/AIME*, février, 55-64.
- Morita, N., Gray, K., Srouji, F.A.A. et Jogi, P.N. (1984) Rock Property Changes During Reservoir Compaction. *SPE/AIME*, septembre, article 13099.
- Pellegrino, R.F. (1996) *Comportement fragile des roches, Dégradation des propriétés élastiques et anisotropie induite par les contraintes*, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, série Géotechnique.
- Santarelli, F.J. et Brown, E.T. (1989) Failure of Three Sedimentary Rocks in Triaxial and Hollow Cylinder Compression Tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Abstr.*, **26**, 401-413.
- Sarda, J.P., Ferfera, F.M.R., Vincké, O., Boutéca, M. et Longuemare, P. (1998) Experimental Study of Stress Paths Influence on Monophasic Permeability Evolution. *Proc. Society of Core Analysts, International Symposium*, 14-16 septembre, La Hague, Pays-Bas, SCA 9827.
- Walls, J.D., Nur, A.M. et Bourbié, T. (1982) Effects of Pressure and Partial Water Saturation on Gas Permeability in Tight Sands: Experimental Results. *Journal of Petroleum Technology*, avril, 930-936.
- Wilhelmi, B. et Somerton, W.H. (1967) Simultaneous Measurement of Pore and Elastic Properties of Rocks under Triaxial Conditions. *SPE Journal*, septembre, 283-294.
- Zhu, W. et Wong, T.F. (1997) The Transition from Brittle Faulting to Cataclastic Flow: Permeability Evolution. *Journal of Geophysical Research*, **102**, B2, 3027-3041.
- Zoback, M.D. et Byerlee, J.D. (1975) Permeability and Effective Stress. *AAPG Bull.*, **59**, 154-158.