

Un dispositif expérimental pour modéliser le puits de pétrole

M. Hosseini¹ et G. Viggiani²

¹ Imam Khomeini International University, Department of Mining Engineering, boulevard of Norouzian, Postal Code 34149-16818 Ghazvin - Iran

² Laboratoire 3S, Université Joseph Fourier, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9 - France

e-mail: meh-hosseini@yahoo.com - cino.viggiani@hmg.inpg.fr

Résumé — Dans l'industrie du pétrole et du gaz, on a estimé que plus de 500 millions de dollars US sont perdus tous les ans, en raison des instabilités de puits [Chen X., Tan C.P., Haberfield C.M. (2000) Numerical evaluation of the deformation behaviour of thick walled hollow cylinders of shale, *Int. J. Rock Mech. Min.* **37**, 947-961].

Les essais sur des cylindres creux à parois épaisses sont un moyen facile, économique et réaliste pour mieux comprendre les mécanismes de rupture des puits pétroliers. Cette recherche consistait à créer et développer un dispositif expérimental pour réaliser des essais sur cylindres creux à parois épaisses. Les essais sont réalisés avec écoulement radial convergent de fluide interstitiel (pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production) et sous des conditions distinctes de chargement mécanique. C'est un des avantages de ce dispositif expérimental puisque, dans la majorité des cas, cette possibilité d'écoulement radial n'existe pas dans les études rapportées dans la littérature.

Abstract — *An Experimental Apparatus to Simulate Wellbore* — In the oil and gas industry, it has been estimated that in excess of US\$ 500 millions [Chen X., Tan C.P., Haberfield C.M. (2000) Numerical evaluation of the deformation behaviour of thick walled hollow cylinders of shale, *Int. J. Rock Mech. Min.* **37**, 947-961] are lost each year because of wellbore instability.

Laboratory tests on thick-walled hollow cylinders of rock are a relatively easy, economical and realistic mean to better understand the mechanisms associated to wellbore failure. This research consisted in the development of an experimental device to carry out tests on thick-walled hollow cylinders under distinct condition: tests with convergent radial flow of pore fluid (to simulate the wellbore during its phase of production). The latter is one of the key advantages of this experimental device since this possibility of radial flow does not exist in the majority of studies reported in the literature.

INTRODUCTION

Les essais sur des cylindres creux à parois épaisses sont un moyen facile, économique et réaliste pour mieux comprendre les mécanismes de rupture pendant le creusement des puits pétroliers et pendant la production de pétrole.

Quatre types de dispositifs ont été utilisés pour réaliser des essais sur cylindres creux :

- dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition de déformation plane [3],
- dispositif expérimental pour réaliser des essais avec application de trois contraintes différentes [5],
- dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition non drainée [2],
- dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition drainée [6].

La recherche présentée dans cet article se caractérise par deux points particuliers importants :

- Type de matériau :

De nombreuses études expérimentales ont été effectuées sur cylindres creux mais la majorité des recherches précédentes ont été réalisées sur des échantillons cylindriques creux de roches présentant une porosité basse ou moyenne.

Notre étude est réalisée sur un matériau artificiel très poreux. Son comportement est similaire à celui de certains grès très poreux qui constituent des réservoirs pétroliers.

- Dispositif expérimental :

Les études expérimentales ont été effectuées généralement dans des conditions sèches et avec un fluide interstitiel en condition non drainée sauf celui de la référence [6] qui permet un écoulement radial mais avec dispositif ne permettant pas la mesure du volume du fluide interstitiel sortant de l'échantillon (le calcul de la perméabilité radiale n'est pas possible).

Le but de cette étude est de trouver des réponses aux questions suivantes :

- Quelle est la forme de la rupture ?
- Quel est le mécanisme de formation de la rupture ?
- Est-ce que l'écoulement radial du fluide interstitiel influence l'instabilité du trou ?
- Est-ce que la forme et le mécanisme de formation de la rupture changent avec l'écoulement radial du fluide interstitiel ?
- Comment varie la perméabilité en fonction des variations de la contrainte effective ?

1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

On peut étudier la déformation et la rupture en parois de forages avec écoulement radial grâce à ce dispositif expérimental. De plus, on peut mesurer les variations de perméabilité

en fonction des variations de la contrainte effective. La perméabilité est une caractéristique très importante parce qu'elle contrôle le flux de fluide dans les roches. Elle joue un grand rôle dans la production de pétrole.

Ce chapitre décrit les caractéristiques des composantes du dispositif expérimental, les composantes et la méthode d'obtention des grandeurs mesurées. Ce dispositif est performant et permet de réaliser des essais sur des cylindres creux à paroi épaisse.

Le dispositif expérimental se compose de [4] :

- cellule triaxiale,
- capteur de pression,
- générateur de pression,
- acquisition de données,
- pompe,
- balance.

La partie principale de ce dispositif est une cellule triaxiale donc on explique seulement cette partie.

Grâce à un tube acier, le fluide interstitiel entre dans la plaque. Il y a 12 rainures (*fig. 1*) pour répartir le fluide dans la plaque. Cette pièce (pièce n°1) est vissée dans l'autre pièce (pièce n° 2) de la plaque. La différence de diamètre entre les deux pièces est de 0,6 mm et de ce fait le fluide peut circuler dans une zone d'une épaisseur de 0,3 mm autour de la plaque. L'échantillon est enveloppé dans une gaine constituée d'un matériau drainant et disposée à l'intérieur de la membrane externe. Le fluide pénètre dans la gaine drainante, puis s'écoule dans l'échantillon, radialement vers l'intérieur (*fig. 2*). À la sortie dans le trou central, qui est à la pression atmosphérique, le fluide s'écoule le long de la paroi interne. Il est collecté en pied d'échantillon à la sortie du trou central, et il est recueilli dans un récipient posé sur une balance. Une Balance DP 60 (fabricant : *Ohaus*) a été utilisée pour mesurer la masse de fluide sortant de l'échantillon. Elle communique avec le PC via une liaison RS232. Le calcul du volume de fluide est très facile ($V = m / \rho$, ρ : masse volumique du fluide).

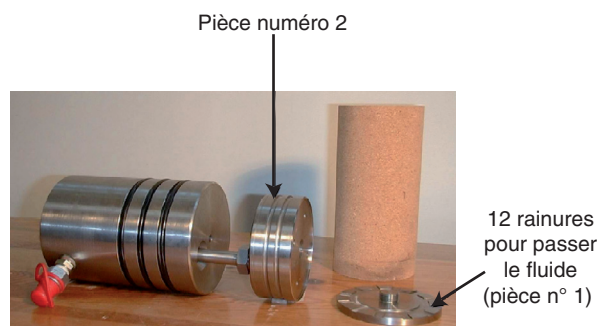


Figure 1

Nouvelles pièces usinées et échantillon cylindrique creux [4].
New parts and hollow cylinder sample.

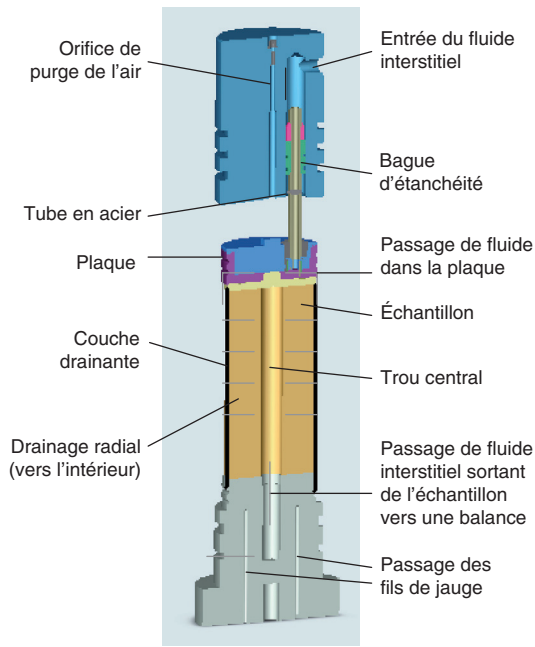


Figure 2
Schéma des parties du montage internes à la cellule.
Schematic drawing triaxial Cell after assemblage.

Des échantillons sont saturés à l'huile hydraulique Azolla ZS 32. Dans ce cas, l'interaction chimique entre le fluide et la roche diminue en comparaison du cas de l'eau. Pour tenir compte du fait que la viscosité du fluide varie avec la température, nous avons mesuré les variations de viscosité du fluide interstitiel en fonction de la température. Les paramètres mesurés et contrôlés pendant l'essai sont présentés dans le tableau 1.

TABLEAU 1
Paramètres mesurés et contrôlés pendant l'essai
Parameters measured and controlled during the test

Grandeur	Mesurée	Contrôlée	Remarques
Déformation axiale	x		Jauge de déformation
Déformation orthoradiale	x		Jauge de déformation
Pression externe	x		Capteur de pression
		x	Générateur de pression
Pression interstitielle externe	x		Capteur de pression
		x	Générateur de pression
Masse de fluide sortant de l'échantillon	x		Balance

2 PROGRAMME D'ESSAIS

Ces essais ont été réalisés pour trouver des réponses aux questions qui ont été présentées dans l'introduction. À l'aide de ce dispositif, on peut réaliser deux types d'essai.

2.1 Essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante

Les essais comprennent trois étapes : une première étape pendant laquelle la pression externe (pression de confinement ou contrainte totale) est augmentée jusqu'à une valeur P_1 , une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe est augmentée à la valeur P_f , une troisième étape pendant laquelle la pression externe est augmentée jusqu'à la rupture pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production tandis que le différentiel de pression interstitielle (différence entre la pression interstitielle externe et la pression interstitielle dans le trou) est constant (fig. 3). La pression interstitielle dans le trou est nulle.

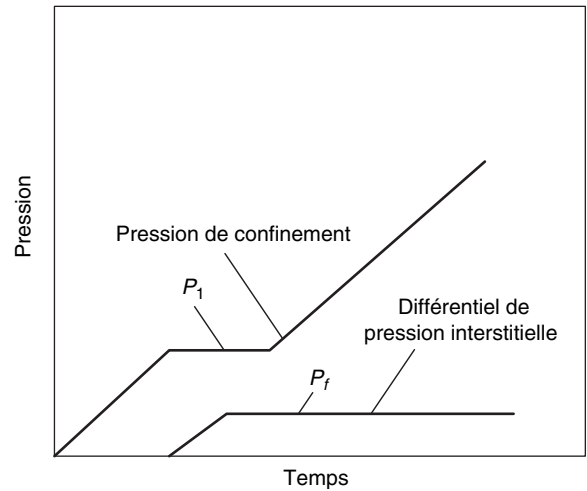


Figure 3
Les étapes d'un essai.
The stages of test.

2.2 Essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante

Les essais comprennent trois étapes : une première étape pendant laquelle la pression externe (pression de confinement) est augmentée jusqu'à une valeur P_1 , une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe est augmentée à la valeur P_f , une troisième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe est augmentée par palier

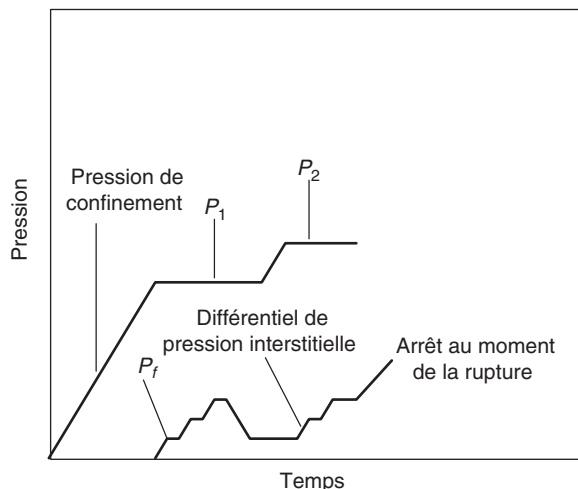


Figure 4

Les étapes d'un essai.
The stages of test.

jusqu'à la rupture pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production tandis que le différentiel de pression interstitielle (différence entre la pression interstitielle externe et la pression interstitielle dans le trou) augmente pendant la production de pétrole (fig. 4). La pression interstitielle dans le trou est nulle. Si l'échantillon n'est pas fracturé, d'abord, on diminue la pression interstitielle externe jusqu'à P_f , ensuite la pression de confinement est augmentée jusqu'à P_2 et enfin la pression interstitielle externe est augmentée jusqu'à la rupture.

3 MATÉRIAU ÉTUDIÉ

Nous avons choisi de travailler sur un matériau artificiel. Ce matériau est appelé CPIR 09. C'est un matériau très poreux à base d'argile. La recherche sur ce matériau artificiel est intéressante parce qu'il existe très peu de travaux sur des matériaux très poreux et, d'autre part, son comportement est similaire à certains grès naturels très poreux qui constituent les réservoirs pétroliers [4]. Les résultats de ces essais sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

TABLEAU 2

Caractéristiques physiques / Physical properties

n (%)	ρ_{sec} (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)
46,48	0,899	1,367

TABLEAU 3

Caractéristiques mécaniques / Mechanical properties

σ_c (MPa)	ν	E (GPa)
18,6	0,18	8

4 RÉSULTATS D'ESSAIS

4.1 Résultats d'essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante

La pression externe (P_e), la pression interstitielle externe (P_f), la déformation orthoradiale en paroi interne (Dti) et le volume sortant de l'échantillon sont mesurés. La pression interstitielle externe est imposée à 3 MPa et la température de l'huile est de 25°C pendant l'essai. L'échantillon s'est fracturé à la pression de 13,70 MPa. Le mode de rupture est le même que dans l'essai sans fluide interstitiel. Les caractéristiques de l'échantillon et les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau 4 et sur la figure 5.

TABLEAU 4

Les caractéristiques de l'échantillon
Characteristic of specimen

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	99,15
Diamètre interne (mm)	25,53
Parallélisme < $1,25 \times 10^{-3}$	$8,11 \times 10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

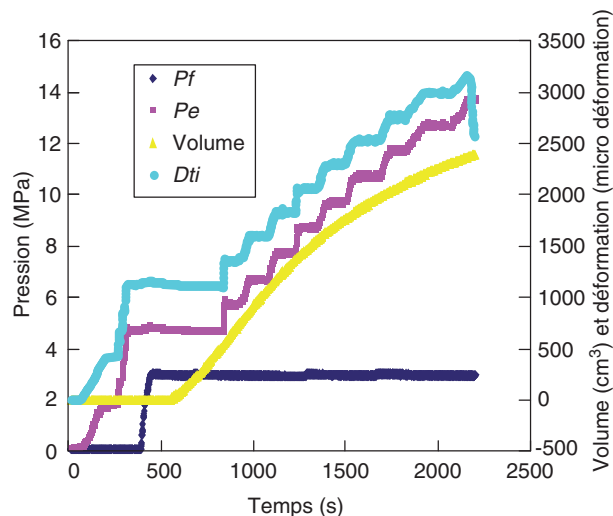


Figure 5

Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps.
Curves of pressure, strain and volume according to time.

4.2 Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante

Nous avons augmenté la pression externe jusqu'à 9,7 MPa puis la pression interstitielle externe jusqu'à 1,5 MPa. Après la saturation de l'échantillon, nous avons encore augmenté la pression interstitielle externe jusqu'à la rupture. L'échantillon se fracture pour une pression interstitielle externe de 6 MPa. La température de l'huile est de 24,5°C pendant l'essai. Le mode de rupture est identique à celui de l'essai sans fluide interstitiel. Les caractéristiques de l'échantillon et les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau 5 et sur la figure 6.

TABLEAU 5
Les caractéristiques de l'échantillon
Characteristic of specimen

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	98,98
Diamètre interne (mm)	25,63
Parallélisme $1,25 \times 10^{-3}$	$8,31 \times 10^{-4}$
Longueur de partie perméable* (cm)	12,5

* On a placé deux rubans de membrane en bas (entre l'échantillon et la base de la cellule) et en haut (entre l'échantillon et la plaque) pour assurer l'étanchéité du système. La longueur de la partie perméable est la hauteur de l'échantillon moins la longueur des rubans de membrane.

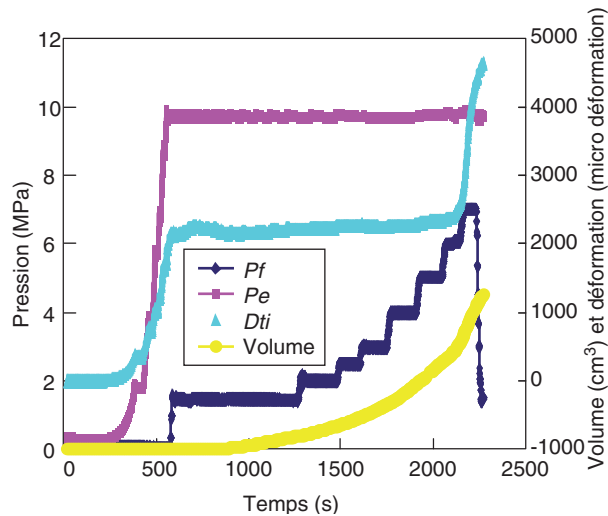


Figure 6

Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps.

Curves of pressure, strain and volume according to time.

5 DISCUSSION

Dans les essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante, les valeurs de la perméabilité ont été calculées avec la formule 1 [6].

$$K = \frac{Q \mu \ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi l P_f} \quad (1)$$

où :

μ viscosité dynamique de fluide (MPa.s)

K perméabilité (m²)

Q débit sortant de l'échantillon (m³/s)

P_f pression de fluide (MPa)

r_e rayon externe

r_i rayon interne

l longueur de partie perméable

Les valeurs de la perméabilité diminuent avec l'augmentation de la pression externe. On n'observe pas de changement de régime sur la courbe quand on s'approche de la rupture (fig. 7).

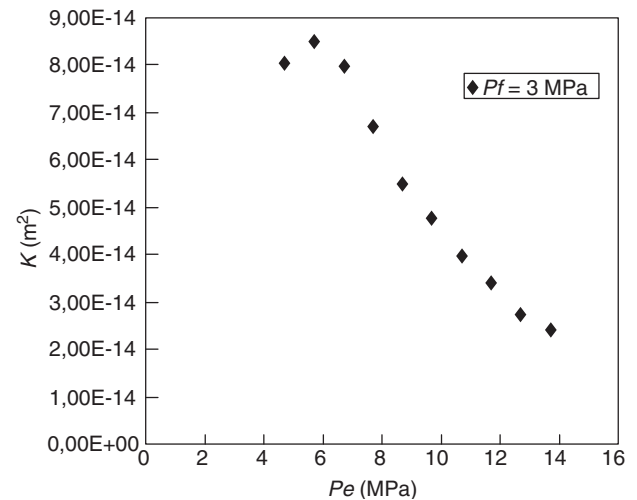


Figure 7

Variations de la perméabilité en fonction de la pression externe.

Variations of permeability according to external pressure.

Nous avons observé une paire de plans de rupture radiaux (fig. 8). Nous avons observé des lames minces sous une loupe binoculaire (laboratoire LGIT) qui est équipée d'une caméra numérique DP 10 Olympus.

Ces bandes sont orthogonales à la direction de la contrainte principale la plus compressive (contrainte orthoradiale), elles correspondent à des bandes de compaction.

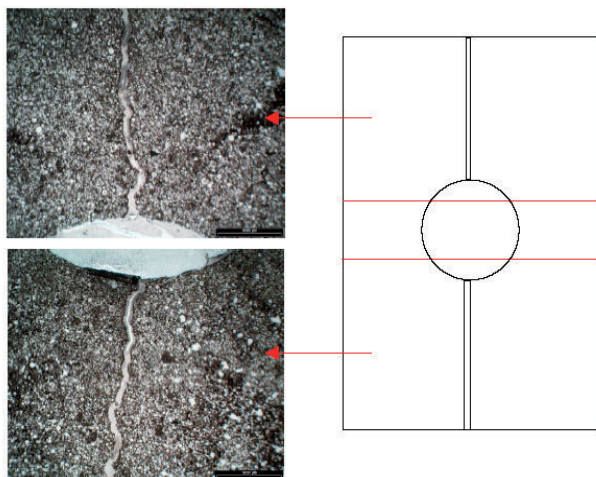


Figure 8

Mode de rupture (perpendiculaire à l'axe du trou).

Mode of rupture (perpendicular to the axis of the hole).

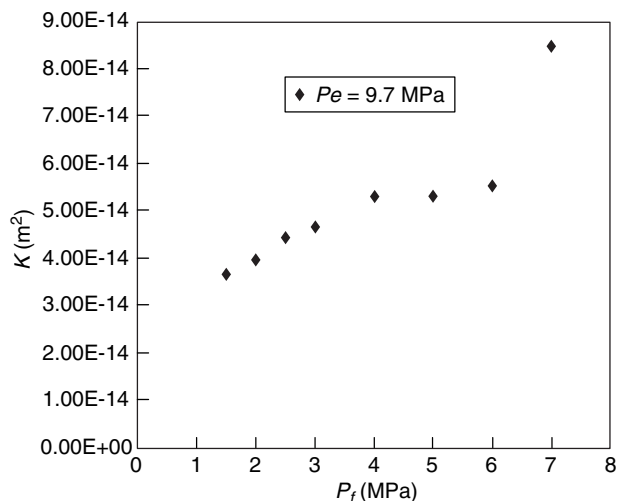


Figure 9

Variations de perméabilité en fonction de la pression interstitielle externe (essai).

Variations of permeability according to external pore pressure.

Par ailleurs, les résultats d'essai montrent que la présence de bandes de localisation n'a pas d'effet sur la perméabilité globale de l'échantillon. Si le mécanisme de rupture avait été dilatant, la valeur de la perméabilité globale aurait vraisemblablement augmenté. On peut conclure que la bande de localisation est compactante.

Dans les essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante, les valeurs de la perméabilité ont été calculées avec la formule 1.

Les valeurs de la perméabilité augmentent avec l'augmentation de la pression interstitielle externe (fig. 9).

L'écoulement radial convergent de fluide interstitiel n'a pas d'effet sur la forme de la rupture mais cet écoulement enlève de la matière broyée donc des bandes de rupture sont érodées.

On a mesuré par moyenne mobile l'efficacité d'écoulement (flow efficiency [7]) (Q/P_f) interstitiel (fig. 10). D'abord, l'efficacité d'écoulement interstitiel est nulle (parce que Q est nul) ensuite elle augmente rapidement et puis elle est à peu près constante.

CONCLUSIONS

La première partie de la présente recherche consistait à créer et développer un dispositif expérimental pour réaliser des essais sur cylindres creux à parois épaisses sous deux conditions distinctes :

- Essais sous une pression de confinement croissante et une pression interstitielle externe constante.

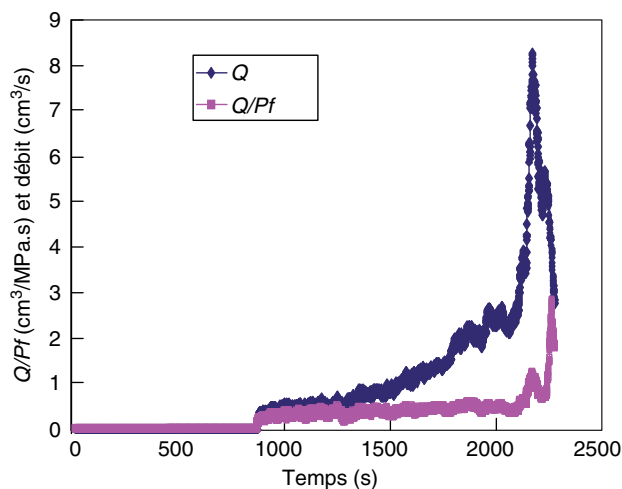


Figure 10

Courbes de débit et d'efficacité d'écoulement (Q/P_f) en fonction du temps (mhccdn9).

Curves of flow rate and effectiveness of flow (Q/P_f) according to time (mhccdn9).

- Essais sous une pression de confinement constante et une pression interstitielle externe croissante.

La seconde partie de cette recherche était la partie expérimentale qui a été réalisée sur le matériau appelé CPIR 09.

Les conclusions de ce travail de recherche :

- Le mode de rupture est une paire de plans de rupture radiaux diamétralement opposés, parallèles à l'axe du trou

et perpendiculaires à la paroi interne. Ces bandes sont orthogonales à la direction de la contrainte principale la plus compressive (contrainte orthoradiale).

- Les mesures montrent que les valeurs de la perméabilité diminuent avec l'augmentation de pression externe.
- L'écoulement radial convergent de fluide interstitiel n'a pas d'effet sur la forme de la rupture mais cet écoulement enlève de la matière broyée donc les bandes de rupture sont érodées.
- Les valeurs de la perméabilité augmentent avec l'augmentation de pression interstitielle externe.

REMERCIEMENTS

Je ne saurais comment remercier Messieurs Gioacchino Viggiani et Jacques Desrues pour leurs conseils, les discussions que l'on a eues et leur dévouement. Leur disponibilité et leurs encouragements ont été essentiels pour la réalisation de ce travail.

RÉFÉRENCES

- 1 Chen X., Tan C.P., Haberfield C.M. (2000) Numerical evaluation of the deformation behaviour of thick walled hollow cylinders of shale, *Int. J. Rock Mech. Min.* **37**, 947-961.
- 2 Chen X., Tan C.P., Wu B., Haberfield C.M. (1998) Modelling of the undrained behaviour of wellbores, *The geotechnics of hard soils-soft rocks*, Balkema, Rotterdam.
- 3 Ewy R.T., Cook N.G.W. (1990) Deformation and fracture around cylindrical opening in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Geomech. Abstr.* **27**, 387-417.
- 4 Hosseini M. (2005) Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'une roche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation, *PhD Thesis*, Univ. Grenoble 1.
- 5 Haimson B., Lee H. (2004) Borehole breakout and compaction bands in two high porosity sandstones, *Int. J. Rock Mech. Min.* **41**, 287-301.
- 6 Papamichos E., Vardoulakis I., Tronvoll J., Skjaerstein A. (2001) Volumetric sand production model and experiment, *Int. J. Numer. Anal. Met.* **25**, 789-808.
- 7 Tronvoll J., Fjaer E. (1994) Experimental study of sand production from perforation cavities, *Int. J. Rock Mech. Min. Geomech. Abstr.* **31**, 393-410.

Manuscrit final reçu en mars 2008

Publié en ligne en septembre 2008

Copyright © 2008 Institut français du pétrole

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than IFP must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, to republish, to post on servers, or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee: Request permission from Documentation, Institut français du pétrole, fax. +33 1 47 52 70 78, or revueogst@ifp.fr.