

Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'uneroche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation

Mehdi Hosseini

▶ **To cite this version:**

Mehdi Hosseini. Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'uneroche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005. Français. NNT : . tel-00084656

HAL Id: tel-00084656

https://theses.hal.science/tel-00084656

Submitted on 9 Jul 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée par

Mehdi Hosseini

Pour l'obtention du titre de DOCTEUR de

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER — GRENOBLE I

(Arrêtés ministériels du 5 Juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Mécanique

Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'une roche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation

Date de soutenance : 23 mars 2005

Composition du jury

Président	R. CHAMBON	Professeur U.J.F., Grenoble
Rapporteurs	C. SCAVIA	Professeur Politecnico di Torino
	T. CHOTARD	Professeur E.N.S.C.I., Limoges
Examinateurs	J. DESRUES	Directeur de recherche C.N.R.S. Grenoble
	G. VIGGIANI	Professeur U.J.F., Grenoble
	P. BESUELLE	Chargé de recherche C.N.R.S., Grenoble

Thèse préparée au sein du laboratoire Sols, Solides, Structures de Grenoble
Laboratoire mixe : U.J..F. — I.N.P.G. — C.N.R.S. : U.M.R. 5521

Remerciement

Je ne saurais comment remercier mes deux directeurs de thèse Messieurs Jacques Desrues et Gioacchino Viggiani ainsi que Pierre Bésuelle, pour leur 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.

Je voudrais remercier :

Monsieur le Professeur René Chambon, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Messieurs Les Professeurs Claudio Scavia et Thierry Chotard qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Monsieur Pierre Bésuelle, qui a accepté d'être l'examinateur de ce travail.

Je tiens à remercier les techniciens, sans qui, ce travail aurait été difficile à réaliser :

Monsieur Christophe Rousseau qui a contribué à la asservissement de la machine et la réalisation des essais.

Monsieur Pascal Charrier qui a contribué à la réalisation des essais.

Je remercie Monsieur Ives Orengo (laboratoire LIRIGM) qui a contribué à la réalisation des essais.

Je remercie également tous le personnel du laboratoire et mes camarades (notamment Mademoiselle Cécile Coll et Monsieur Nicolas Lenoir) qui m'ont apporté leur aide et leur amitié.

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, Tan et Haberfield, 2000, [7]). Afin de limiter les problèmes d'instabilités relatifs à des excavations souterraines la prévision de l'évolution des contraintes et des déformations à proximité de l'ouverture est essentielle.
Les essais sur des cylindres creux à parois épaisses sont un moyen facile, économique et réaliste pour mieux comprendre les mécanismes de rupture de puits pétroliers. 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 :

1) Essais sans fluide interstitiel (pour modéliser l'ouverture souterraine pendant et après le creusement).
2) Essais avec écoulement radial convergent de fluide interstitiel (pour modéliser le puit de pétrole pendant sa phase de production).
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 .

La seconde partie de cette recherche est une campagne d'essais expérimentaux réalisée sur le matériau artificiel appelé CPIR09. Son comportement est similaire à certain grès très poreux qui constituent des réservoirs pétroliers.
Le mode de rupture observé dans les essais est une paire de plans de rupture radiaux diamétralement opposés, parallèles à l'axe du trou et perpendiculaires à la paroi interne) qui correspond à un mécanisme compactant. Les mesures montrent que les valeurs de la perméabilité globale diminuent avec l'augmentation de pression externe. L'écoulement radial convergent de fluide interstitiel n'a pas effet sur la forme de la rupture mais cet écoulement enlève des particules de matière fracturée, ce qui crée une érosion à l'intérieure des bandes de localisation. L'écoulement radial convergent de fluide interstitiel (en raison du différentiel de pression interstitielle) peut légèrement diminuer la résistance des échantillons.

Mots clefs :

rupture, ouverture souterraine, instabilité, comportement hydromécanique

Abstract

In the oil and gas industry, it has been estimated that in excess of US$ 500 millions [7] is lost each year because of wellbore instability. To prevent problems due to wellbore instability, accurate prediction of stress and deformation around the wellbore are essential. Laboratory tests on thick-walled hollow cylinders of rock are a relatively easy, economical and realistic means to better understand the mechanisms associated to wellbore failure.
The first part of this research consisted in the development of an experimental device to carry out tests on thick-walled hollow cylinders under two distinct conditions:

1) Tests without pore fluid (to simulate the underground opening during and after the drilling).
2) 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.

The second part of this research discusses the experiments carried out on the rock-like ceramic material called CPIR09. The behaviour of this material is similar to very porous sandstones which form certain oil reservoirs. The mode of rupture observed in the tests was a pair of radial rupture planes that are diametrically opposed (parallel with the axis of the hole and perpendicular to the internal wall) which corresponds to a compacting failure mechanism. The results obtained show that the global permeability decreases with increasing external pressure. The convergent radial flow of pore fluid does not affect the form of the rupture but acts to remove fractured materials to erode localization bands. The convergent radial flow of pore fluid (due to the imposed pore pressure) may slightly decrease the strength of the samples.

Key words:

rupture, underground opening, instability, hydromechanical behaviour

Table des matières

Chapitre 1- Introduction 10

1.1. Objectifs de recherche 10
1.2. Contenu du mémoire de thèse 11

Chapitre 2- Synthèse d'essais effectués sur des échantillons cylindriques creux 12

2.1. Introduction 12
2.2. Solution poroélastique du cylindre creux lorsqu'il y a l'écoulement radial de fluide 12
2.3. Essai sans fluide interstitiel 16
2.3.1. Essais sur deux grès et une dolomite 16
2.3.1.1. Introduction 16
2.3.1.2. Dimensions des échantillons testés 17
2.3.1.3. Procédures d'essai 17
2.3.1.4. Résultats 17
2.3.1.5. Modes de rupture 17
2.3.2. Essais sur un grès et un calcaire 19
2.3.2.1. Introduction 19
2.3.2.2. Dimensions des échantillons testés 19
2.3.2.3. Procédures d'essai 19
2.3.2.4. Résultats 20
2.3.2.5. Modes de rupture 21
2.3.3. Essais sur une diatomite 22
2.3.3.1. Introduction 22
2.3.3.2. Procédures d'essai 24
2.3.3.3. Résultats 24
2.3.3.4. Modes de rupture 25
2.3.4. Essai sur un granite 26
2.3.4.1. Introduction 26
2.3.4.2. Dimensions des échantillons testés 26
2.3.4.3. Procédures d'essai 26
2.3.4.4. Résultats et mode de rupture 27
2.4. Essais avec fluide interstitiel 29
2.4.1. Essai sur des roches argileuses 29
2.4.1.1. Introduction 29
2.4.1.2. Dimensions des échantillons testés 30
2.4.1.3. Procédures d'essai 30
2.4.1.4. Résultats 30
2.4.1.5. Modes de rupture 31
2.4.2. Essais sur une argilite artificielle 32

2.4.2.1. Introduction 32
2.4.2.2. Dimensions des échantillons testés 32
2.4.2.3. Procédures d'essai 32
2.4.2.4. Résultats et mode de rupture 33
2.4.3. Essai sur un grès 35
2.4.3.1. Introduction 35
2.4.3.2. Dimensions des échantillons testés 35
2.4.3.3. Procédures d'essai 35
2.4.3.4. Résultats 36
2.4.3.5. Modes de rupture 36
2.4.4. Essai sur un grès 38
2.4.4.1. Introduction 38
2.4.4.2. Dimensions des échantillons testés 39
2.4.4.3. Procédures d'essai 39
2.4.4.4. Résultats et mode de rupture 40
2.5. Interprétation des mécanismes de rupture 43
2.5.1. Mécanisme dilatant 43
2.5.2. Mécanisme compactant 45
2.5.3. Mécanisme par cisaillement 45
2.6. Dispositifs expérimentaux 48
2.6.1. Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition de déformation plane 48
2.6.2. Dispositif expérimental pour réaliser des essais avec application de trois contraintes différentes ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$) 49
2.6.3. Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition non drainée 49
2.6.4. Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition drainée 50
2.7. Conclusion 51

Chapitre3- Caractéristiques du matériau étudié 53

3.1. Introduction 53
3.2. Motivation du choix du matériau 53
3.3. Caractéristiques techniques 53
3.4. Préparation des échantillons 53
3.5. Réalisation des essais classiques 54
3.5.1. Porosité 54
3.5.2. Essais uniaxiaux 57
3.5.3. Essais triaxiaux 59
3.5.4. Essai de perméabilité 62
3.6. Conclusion 65

Chapitre 4- Développement et mise au point de l'installation de dispositif expérimental 66

4.1. Introduction 66

4.2. Installation du dispositif (essai sans fluide interstitiel) 66
4.2.1. Cellule triaxiale 66
4.2.2. Pompe à main 68
4.2.3. Capteur de pression 68
4.2.4. Membranes 69
4.2.5. Presse 69
4.2.6. Générateur de pression 69
4.2.7. Jauge de déformation 70
4.2.8. Colles 70
4.2.9. Acquisition de données 71
4.2.9.1. Conditionnement et acquisition 71
4.2.9.2. Programme d'acquisition 72
4.3. Installation du dispositif (essai avec fluide interstitiel) 72
4.3.1. Cellule triaxiale 72
4.3.2. Pompe 74
4.3.3. Capteur de pression 74
4.3.4. Membrane 74
4.3.5. Presse 75
4.3.6. Générateur de pression 75
4.3.7. Balance 75
4.3.8. Jauge et colles 75
4.3.9. Acquisition de données 75
4.3.10. Matériau drainant 75
4.3.11. Fluide interstitiel 75
4.4. Obtention des grandeurs mesurées (essai sans fluide interstitiel) 76
4.4.1. Etalonnage des capteurs de pression 76
4.4.2. Etalonnage des voies du module de jauge 76
4.5. Obtention des grandeurs mesurées (essai avec fluide interstitiel) 77
4.5.1. Etalonnage des capteurs de pression 78
4.5.2. Etalonnage des voies du module de jauge 78
4.5.3. Volume de fluide sortant de l'échantillon 78
4.6. Conclusion 79

Chapitre 5- Programme et résultats d'essai 80

5.1. Programme d'essai 80
5.1.1. Types d'essais (essais sans fluide interstitiel) 80
5.1.1.1. Essais sous une pression externe croissante (sans pression interne) 80
5.1.1.2. Essais sous une pression externe constante et une pression interne décroissante 80
5.1.2. Types d'essais (essais avec fluide interstitiel) 81
5.1.2.1. Essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante 81
5.1.2.2. Essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante 81
5.2. Résultats d'essais (essais sans fluide interstitiel) 82
5.2.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante 84
5.2.2. Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interne décroissante 86

5.3. Résultats d'essais (essais avec fluide interstitiel) 87
5.3.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante 87
5.3.2. Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante 90
5.4. Commentaire sur les résultats 92
5.4.1. Effet d'écoulement radial convergent de fluide interstitielle sur l'instabilité du trou 92
5.4.2. Variation de perméabilité en fonction de la contrainte effective 96
5.4.3. Mécanisme de formation de la rupture 97

Chapitre 6- Conclusions et perspectives 98

6.1. Conclusions 98
6.2. perspectives 99

Références 102

Annexe I- Courbes d'étalonnage des capteurs de pression 104

Annexe II- Courbes d'étalonnage des voies du module de jauge 107

Annexe III- Résultats d'essais (essais sans fluide interstitiel) 110

III.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante 110
III.2. Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interne Décroissante 111

Annexe IV- Résultats d'essais (essais avec fluide interstitiel) 115

IV.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante 115
IV.2. Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante 118

Annexe V- Solution du cylindre creux en élasticité (sans fluide interstitiel) 124

Annexe VI- Protocoles expérimentaux 126

VI.1. Préparation d'essai (essai sans fluide interstitiel) 126
VI.2. Préparation d'essai (essai avec fluide interstitiel) 128
VI.3. Mode d'emploi du générateur de pression Wykeham 131

VI.4. Câblage de module AI-110 et SG –140 133
VI.4.1. Module AI-110 133
VI.4.2. Module SG-140 (module de jauge) 133

VI.5. Variations de viscosité du fluide interstitiel en fonction de la température 133

Annexe VII- Plans des pièces mécaniques 134

Chapitre 1
Introduction

1.1. Objectifs de recherche

Pendant et après la construction d'ouvertures souterraines comme les tunnels, les galeries ou les puits pétroliers, des concentrations de contrainte apparaissent près de ces ouvertures et des problèmes d'instabilité peuvent se produire à proximité de l'ouverture. Par exemple 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, Tan et Haberfield, 2000, [7]). Afin de limiter les problèmes d'instabilités relatifs à des excavations souterraines la prévision de l'évolution des contraintes et des déformations à proximité de l'ouverture est essentielle.
Par ailleurs, la perméabilité est une caractéristique très importante parce qu'elle contrôle l'écoulement de fluide dans les roches. Par exemple, une diminution de perméabilité induit une baisse de la production d'un réservoir d'hydrocarbure ce qui peut mettre en danger l'économie de production du puit.
En conséquence, il est important de mesurer l'évolution de la perméabilité en fonction des variations de la contrainte effective.
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.
De nombreuses études expérimentales ont été effectuées sur cylindres creux mais la majorité des recherches précédentes ont été réalisées sur des échantillons cylindriques creux avec une porosité faible ou moyenne et dans des conditions sèches. Quelques études expérimentales ont aussi été effectuées avec un fluide interstitiel.
Cette étude est réalisée sur un matériau artificiel très poreux (Voir Chapitre 3). Son comportement est similaire à certains grès très poreux qui constituent des réservoirs pétroliers.
La partie principale de la présente recherche consiste à créer et développer un dispositif expérimental pour réaliser des essais sur cylindres creux à paroi épaisse sous deux conditions distinctes :

1) Essais sans fluide interstitiel (pour modéliser l'ouverture souterraine pendant et après le creusement) :

a) Essais sous une pression de confinement croissante.
b) Essais sous une pression de confinement constante et une pression interne décroissante.

2) Essais avec écoulement radial convergent de fluide interstitiel (pour modéliser le puit de pétrole pendant sa phase de production).
a) Essais sous une pression de confinement croissante et une pression interstitielle externe constante.
b) Essais sous une pression de confinement constante et une pression interstitielle externe croissante.

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

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

1.2. Contenu du mémoire de thèse

Ce travail de recherche s'articule autour de 6 parties principales :

La chapitre 2 est un résumé d'une étude bibliographique concernant certains essais effectués sur cylindres creux de 1987 jusqu'à 2004.

Dans le chapitre 3, les étapes de la préparation des échantillons et les essais classiques réalisés sont présentés. Le but est l'obtention des caractéristiques (comme : la porosité, le module de Young et le coefficient de Poisson) et la caractérisation du comportement du matériau étudié.

Le chapitre 4 décrit les caractéristiques des composantes du dispositif expérimental, les composantes et le programme d'acquisition, la méthode d'obtention des grandeurs mesurées et les protocoles de préparation d'essais dans les deux cas, sans et avec fluide interstitiel.

Le chapitre 5 présente les types d'essais réalisés et les résultats obtenus dans les deux conditions énumérées au paragraphe 1.1 et expose une analyse des résultats dans les deux cas, sans et avec fluide interstitiel.

Le chapitre 6 expose les conclusions générales sur le comportement du matériau étudié et propose des perspectives concernant le développement de dispositif expérimental.

Chapitre 2

Synthèse d'essais effectués sur

des échantillons cylindriques creux

2.1. Introduction

Notre sujet de recherche est l'analyse de l'instabilité des puits pétroliers, elle se résume en trois types [36]:
1) Fracturation hydraulique liée à la pression du fluide de creusement.
2) Elargissement du puit (par écaillage) liée à la rupture fragile des roches.
3) Réduction de section liée au comportement plastique et la grande déformation dans des roches autour de puit.
Notre recherche est centrée sur la rupture par écaillage (deuxième type) car le comportement du matériau est élastique-fragile. Cette recherche est aussi utilisable dans l'instabilité de tunnel et de mine.
Ce chapitre comprend deux parties :
a) Partie théorique (solution poroélastique du cylindre creux)
b) Partie expérimentale
L'étude de la bibliographie montre que les essais effectués sur cylindres creux peuvent être classés dans deux groupes (essai sans fluide interstitiel et avec fluide interstitiel). Nous les avons sélectionné avec deux points importants : 1) dispositif expérimental 2) type de rupture du matériau.

2.2. Solution poroélastique du cylindre creux lorsqu'il y a l'écoulement radial de fluide

Nous considérons un cylindre creux de rayon interne r_i et de rayon externe r_e.
Les contraintes et les déplacements sont traités en coordonnées cylindriques (r,θ,z) avec les hypothèses suivantes :

Matériau supposé continu, homogène, isotrope et élastique.

Dans le cas du cylindre creux axisymétrique, les équations d'équilibre conduisent à l'équation différentielle [34] :

$$\frac{d\sigma_r}{dr}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0 \qquad (2\text{-}1)$$

$$\sigma_r=\sigma_r'+\alpha P \qquad (2\text{-}2)$$

$$\sigma_\theta=\sigma_\theta'+\alpha P \qquad (2\text{-}3)$$

Où :

σ'_θ : contrainte orthoradiale effective

σ'_r : contrainte radiale effective

P : pression interstitielle

σ_r : contrainte radiale totale

σ_θ : contrainte orthoradiale totale

α : coefficient de Biot

Les relations (2-2) et (2-3) sont remplacées dans la relation (2-1) :

$$\frac{d\sigma'_r}{dr}+\frac{\sigma'_r-\sigma'_\theta}{r}+\frac{dP}{dr}=0 \qquad (2\text{-}4)$$

$\frac{dP}{dr}$ est la force d'infiltration (due à l'écoulement du fluide). Les procédures de calcul de la force d'infiltration sont expliquées ci-dessous :

Le débit qui traverse le cylindre coaxial de rayon r et d'épaisseur dr est [41] (loi de Darcy):

$$q=\frac{2\pi l k r dP}{\mu dr} \qquad (2\text{-}5)$$

Où :

μ : viscosité dynamique de fluide

k : perméabilité

l : hauteur d'échantillon

Si on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas d'accumulation de fluide dans l'échantillon, le débit q est constant par rapport à r et égale au débit Q qui sort de l'échantillon.

Donc :

$$Q=\frac{2\pi l k P_f}{\mu \ln\frac{r_e}{r_i}} \qquad (2\text{-}6)$$

P_f : pression interstitielle externe (r=re)

Par ailleurs :

$$\frac{dP}{dr}=\frac{P_f}{r\ln\frac{r_e}{r_i}} \qquad (2\text{-}7)$$

Si on considère une relation constitutive de type élastique linéaire isotrope pour le matériau homogène [9] :

$$\sigma'_\theta=\lambda e+2G\varepsilon_\theta \qquad (2\text{-}8)$$

$$\sigma'_r=\lambda e+2G\varepsilon_r \qquad (2\text{-}9)$$

$$\sigma'_z=\lambda e+2G\varepsilon_z \qquad (2\text{-}10)$$

$$e=\varepsilon_r+\varepsilon_\theta+\varepsilon_z \quad (2\text{-}11)$$

Où :

$\lambda=\frac{2\nu G}{(1-2\nu)}$ λ et G sont les coefficients de Lamé avec ν le coefficient de Poisson

ε_r : déformation radiale

ε_θ : déformation orthoradiale et ε_Z déformation axiale

σ'_z : contrainte axiale effective

e : déformation volumique

$$\varepsilon_r=\frac{du}{dr} \quad (2\text{-}12)$$

$$\varepsilon_\theta=\frac{u}{r} \quad (u \text{ est le déplacement radial}) \quad (2\text{-}13)$$

Les relations (2-8), (2-9), (2-12) et (2-13) sont remplacées dans la relation (2-4) :

$$(\lambda+2G)\frac{d}{dr}(\frac{du}{dr}+\frac{u}{r}+\varepsilon_z)=\frac{-\alpha P_f}{r\ln\frac{r_e}{r_i}} \quad (2\text{-}14)$$

La solution de cette équation différentielle peut se mettre sous la forme [41] :

$$u=Ar+\frac{B}{r}+\frac{C}{2}r\ln r-\frac{C}{4}r \quad (2\text{-}15)$$

$$C=\frac{-\alpha P_f}{(\lambda+2G)\ln\frac{r_e}{r_i}} \quad (2\text{-}16)$$

pour déterminer A et B ,on utilise les conditions aux limites :

$$\sigma'_r(r_e)=P_e-\alpha P_f \quad (2\text{-}17)$$

$$\sigma'_r(r_i)=0 \quad (2\text{-}18)$$

$$\sigma'_r=(\lambda+G)(2A+C\ln r)+\lambda\varepsilon_z-\frac{2GB}{r^2}+\frac{GC}{2} \quad (2\text{-}19)$$

Où :

P_e : pression externe

r_e : rayon externe

r_i : rayon interne

Enfin :

$$A=\frac{(P_e-\alpha P_f)r_e^2-C(\lambda+G)(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)-\lambda\varepsilon_z(r_e^2-r_i^2)-\frac{GC}{2}(r_e^2-r_i^2)}{2(\lambda+G)(r_e^2-r_i^2)} \quad (2\text{-}20)$$

$$B=\frac{(P_e-\alpha P_f)r_e^2r_i^2-Cr_i^2(\lambda+G)(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)+Cr_i^2(\lambda+G)(r_e^2-r_i^2)\ln r_i}{2G(r_e^2-r_i^2)} \quad (2\text{-}21)$$

Les relations (2-20) et (2-21) sont remplacées dans la relations (2-19) :

$$\sigma_r'=\frac{(P_e-\alpha P_f)r_e^2-C(\lambda+G)(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)}{(r_e^2-r_i^2)}+C(\lambda+G)\ln r-$$
$$\frac{(P_e-\alpha P_f)r_e^2r_i^2-C(\lambda+G)r_i^2(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)+C(\lambda+G)r_i^2(r_e^2-r_i^2)\ln r_i}{r^2(r_e^2-r_i^2)} \quad (2\text{-}22)$$

Pour obtenir σ_θ' nous avons :

$$\sigma_\theta'=(\lambda+G)(2A+C\ln r)+\lambda\varepsilon_z+\frac{2GB}{r^2}-\frac{GC}{2} \quad (2\text{-}23)$$

Les relations (2-20) et (2-21) sont remplacées dans la relation (2-23) :

$$\sigma_\theta'=\frac{(P_e-\alpha P_f)r_e^2-C(\lambda+G)(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)}{(r_e^2-r_i^2)}+C(\lambda+G)\ln r+$$
$$\frac{(P_e-\alpha P_f)r_i^2r_e^2-C(\lambda+G)r_i^2(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)+C(\lambda+G)r_i^2(r_e^2-r_i^2)\ln r_i}{r^2(r_e^2-r_i^2)}-GC \quad (2\text{-}24)$$

En condition $r=r_i$ nous avons :

$$\sigma_r'=0 \quad (2\text{-}25)$$

$$\sigma_\theta'=\frac{2(P_e-\alpha P_f)r_e^2-2C(\lambda+G)(r_e^2\ln r_e-r_i^2\ln r_i)}{(r_e^2-r_i^2)}+2C(\lambda+G)\ln r_i-GC \quad (2\text{-}26)$$

Après simplification la relation (2-26), nous avons :

$$\sigma_\theta'=\frac{2(P_e-mP_f)r_e^2}{r_e^2-r_i^2}+\frac{mP_f}{\ln\frac{r_e}{r_i}} \quad (2\text{-}27)$$

$$m=\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (2\text{-}28)$$

La relation (2-7) donne :

$$P = P_f \frac{\ln(\frac{r}{r_i})}{\ln(\frac{r_e}{r_i})} \quad (2\text{-}29)$$

P : pression interstitielle

Pour obtenir F_Z (force axiale résultante) nous avons :

$$F_Z = \pi P_e r_e^2 - \alpha \int_{r_i}^{r_e} 2\pi r P dr \quad (2\text{-}30)$$

2.3. Essais sans fluide interstitiel

Ce paragraphe présente les essais réalisés en condition sèche sur différents types de matériaux:
a) Deux grès et une dolomite (F.J. Santarelli et E.T. Brown, 1989)
b) Un grès et un calcaire (R.T. Ewy et N.G.W. Cook, 1990)
c) Une diatomite (J.P. Boehler, Th. Dietl, H. Ferdjani et A. Millien, 1994)
d) Un granite (M. Lee et B. Haimson, 1993)

2.3.1. Essais sur deux grès et une dolomite

2.3.1.1. Introduction

Ces essais ont été effectués par F.J. Santarelli et E.T. Brown [34, 35].
Les essais ont été réalisés sur le grès de Doddington, un grès du Carbonifère et la dolomite de Gebdykes.
La dolomite de Gebdykes provient de la mine de Gebdykes à Masham (Yorkshire, Royaume-Uni). Des analyses chimiques montrent que la dolomite de Gebdykes comprend 45% de magnésium, 50% de carbonate de calcium et 5% de silice.
Le grès du Carbonifère provient d'une mine à Huddersfield (Yorkshire, Royaume-Uni). Ce matériau est composé de grains de quartz, de feldspath et de mica blanc et noir. La matrice comprend des feldspaths, de la calcite et des minéraux argileux.
Le grès de Doddington provient d'une mine à Wooler (Northumberland, Royaume-Uni). Il est composé majoritairement de silice (95,2%) et contient quelques feldspaths et micas blancs.
Les caractéristiques physiques (porosité et masse volumique), et mécaniques (module d'Young (E), résistance à la compression simple (σ_c) et coefficient de Poisson (ν)) de ces trois matériaux sont présentées dans le Tableau 2.1.

	Grès de Doddington	Dolomite de Gebdykes	Grès du Carbonifère
Nombre d'échantillons	7	4	7
Porosité (%)	23	21	8
ρ_{sec} (gr/cm^3)	2,079	2,270	2,433
σ_c (MPa)	51,39	54,91	96,72
E (GPa)	20,73	19,08	17,49
ν	0,39	0,41	0,18

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques [35]

2.3.1.2. Dimensions des échantillons testés

Les éprouvettes cylindriques creuses ont pour dimensions nominales : 100 mm de diamètre externe, 25 mm de diamètre interne et 300 mm de hauteur approximativement.

2.3.1.3. Procédures d'essai

La pression externe (P_e) est augmentée linéairement dans le temps autour de l'éprouvette tandis que la pression interne (P_i) et la force axial (F) appliquée par un piston sont maintenues à zéro. La vitesse d'augmentation de la pression externe est de $3.7x10^{-2}$ MPa/sec pour la dolomite de Gebdykes et le grès de Doddington et de $5.6x10^{-2}$ MPa/sec pour le grès du carbonifère. La pression externe est augmentée jusqu'à la rupture de l'échantillon. Le système Terra Tek permet de contrôler la pression externe de façon manuelle ou automatique. Tous les paramètres mentionnés (P_e et P_i) sont exposés sur la Figure 2.1.

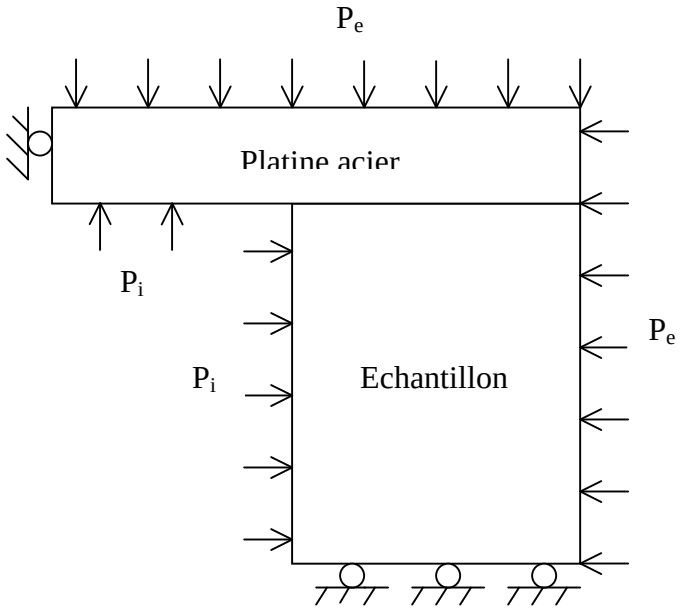


Figure 2.1 : Présentation des paramètres
(P_e et P_i) sur un cylindre creux

2.3.1.4. Résultats

Huit essais sur le grès de Doddington, cinq essais sur la dolomite de Gebdykes et six essais sur le grès du carbonifère ont été réalisés. Les résultats sont exposés sur la Figure 2.2.

2.3.1.5. Modes de rupture

Les échantillons de grès de Doddington ont montré des signes de rupture pour une pression externe de 60 MPa. Les ruptures sont matérialisées par une série de petites cavités difficilement visibles et dont les contours onduleux ont une longueur d'environ 5mm, une

largeur de 1mm et une profondeur de 1mm. L'échantillon testé à 65 MPa a montré que

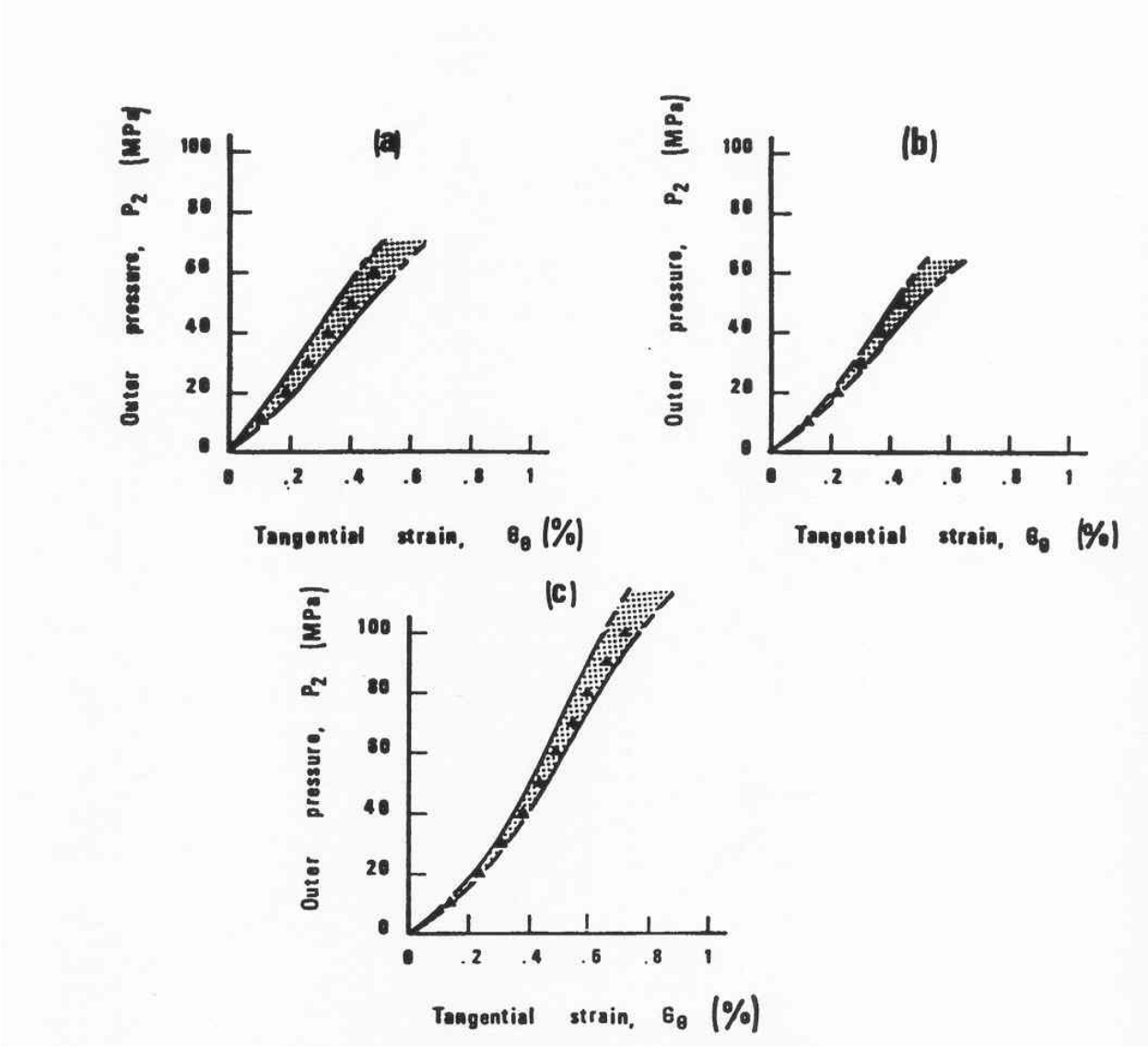


Figure 2.2 : Courbes de pression externe – déformation orthoradiale de la paroi interne du cylindre creux pour trois roches (a) grès de Doddington (b) dolomite de Gebdykes (c) grès du carbonifère. Les triangles montrent la valeur moyenne dans la région hachurée [35]

certains morceaux s'étaient liés pour former des bandes verticales onduleuses qui ont 20 mm de longueur, 1 à 2 mm de profondeur et 1 à 4 mm de largeur. Ces bandes sont presque parallèles entre elles et sont concentrées autour d'un diamètre du trou. Au delà de 70 MPa, tous les échantillons présentent des bandes de 2 mm de profondeur et de 1 à 4 mm de largeur. Ces bandes sont presque parallèles entre elles et sont aussi concentrées autour du diamètre du trou. Au delà de 70 MPa, tous les échantillons ont présenté une zone fracturée de part et d'autre du diamètre du trou (Figure 2.3).

La dolomite de Gebdykes a donné une image complètement différente du développement de la rupture autour du trou. A 60 MPa, la surface de la paroi a montré des fissures onduleuses presque axiales qui ont des longueurs comprises entre 10 et 40 mm. Les zones fracturées sont plus ou moins axisymétriques. Pour la pression la plus élevée (90 MPa), la rupture a

commencé de façon axisymétrique puis s'est poursuivi de façon non axisymétrique (Figure 2.4).
Dans le Grès du carbonifère, on remarque de petites cavités pendant les étapes initiales de la rupture comme dans les grès de Doddington et puis des fissures verticales se développent comme dans les échantillons de dolomite de Gebdykes.

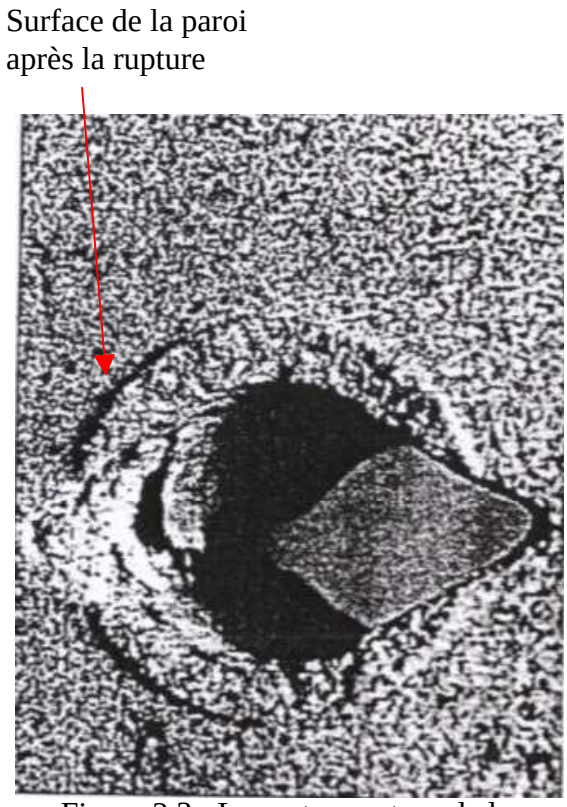


Figure 2.3 : La rupture autour de la paroi interne (grès de Doddington testé jusqu'à 90 MPa) [34]

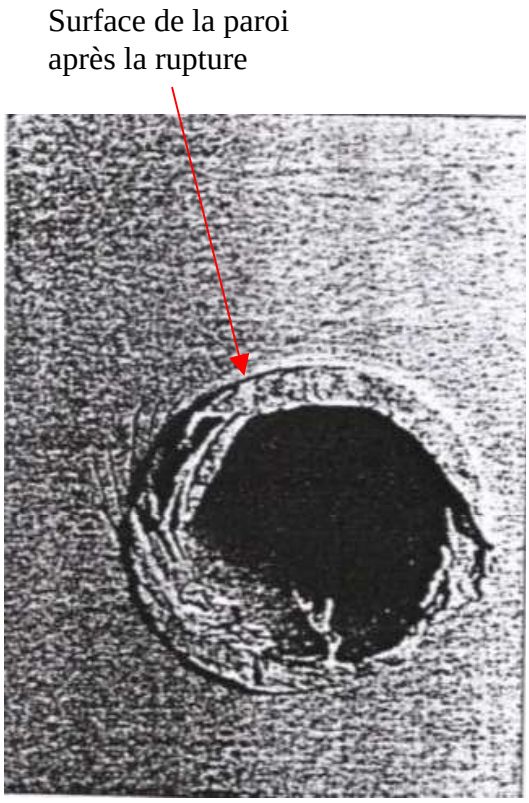


Figure 2.4 La rupture non axisymétrique autour de la paroi interne (dolomite de Gebdykes testé jusqu'à 90 MPa) [34]

2.3.2. Essais sur un grès et un calcaire

2.3.2.1. Introduction

Cette recherche a été conduite par R.T. Ewy et N.G.W. Cook [11].
Les essais ont été réalisés sur le grès de Berea et le calcaire d'Indiana.

2.3.2.2. Dimensions des échantillons testés

Les éprouvettes cylindriques creuses ont pour dimensions nominales : 89 mm de diamètre externe, 25,4 mm de diamètre interne et 146-152 mm de hauteur approximativement.

2.3.2.3. Procédures d'essai

Les essais ont été réalisés en condition de déformation plane ($\varepsilon_z=0$).
Deux types d'essai ont été réalisés :

1) Essai avec une pression externe croissante :

La pression externe est augmentée jusqu'à la rupture.

2) Essais avec une pression externe constante et une pression interne décroissante:
Ces essais sont constitués de deux phases : une première phase pendant laquelle la pression externe et la pression interne sont augmentées en même temps jusqu'à une valeur P_{max} (phase isotrope), une deuxième phase pendant laquelle la pression externe est maintenue constante à la valeur P_{max} et la pression interne est diminuée jusqu'à la rupture (phase déviatoire). Les échantillons ont été chauffés jusqu'à une température de 90°-95°C et ont été saturés avec du métal à l'état liquide (métal de Wood) sous une pression de 5 MPa pendant l'essai. Il a pu pénétrer dans les pores de dimensions inférieures à 0,1µm. Toutes les pressions appliquées ont été maintenues pendant que les structures de rupture étaient remplies avec le métal à l'état liquide et puis les échantillons ont été refroidis pour solidifier le métal. En solidifiant le métal a permis de préserver la morphologie de la rupture.

2.3.2.4. Résultats

Neuf essais sur le grès de Berea et quatre essais sur le calcaire ont été réalisés. Les ruptures sont apparues à haute pression externe et basse pression interne. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.2.

Echantillon	Chemin de chargement à la rupture	Commentaires
Berea 1	Augmentation P_{Ext} à 127 MPa et P_{Int}=0	4,97 mm d'épaisseur de membrane d'acier
Berea 2	Augmentation P_{Ext} à 125 MPa et P_{Int}=0	2,87 mm d'épaisseur de membrane d'acier
Berea 4	Augmentation P_{Ext} à 70 MPa et P_{Int}=0	Haute température mais pas de métal fondu dans l'échantillon
Berea 5	Augmentation P_{Ext} à 74 MPa et P_{Int}=0	Echantillon rempli avec métal fondu. Pas de membrane interne
Berea 6	Augmentation P_{Ext} à 131 MPa et P_{Int}=10,5 MPa puis diminution de P_{Int} à 6,6 MPa	
Berea 7	Diminution P_{Int} de 50 à 0 et P_{Ext}= 75 MPA	
Berea 9	Augmentation P_{Ext} à 129 MPa et P_{Int}=5 MPa	
Berea 10	Diminution brutale P_{Int} de 57 à 0 et P_{Ext}= 75 MPA	
Berea 11	Augmentation P_{Ext} à 75 MPa et P_{Int}=0	
Indiana 1	Augmentation P_{Ext} à 76 MPa et P_{Int}=0	

Indiana 2	Non	Fuite de pression externe dans l'échantillon
Indiana 3	Diminution rapide P_{Int} à 0 et P_{Ext}= 61 MPa	Fuite de pression externe dans l'échantillon après la saturation de l'échantillon avec métal fondu
Indiana 4	Non	Fuite de pression externe dans l'échantillon

Tableau 2.2 : Les résultats des essais [11]

Toutes les pressions sont des pressions effectives ($P_{ext}= P_t - P_{mf}$) (P_{mf}= pression de métal fondu)

2.3.2.5. Modes de rupture

L'analyse de lames minces a été réalisée pour déterminer l'orientation des plans de litage. Elles ont montré que l'axe des échantillons de grès de Berea (5-11) est parallèle au litage et que les ruptures ont eu lieu dans ces échantillons de part et d'autre d'un diamètre du trou. La

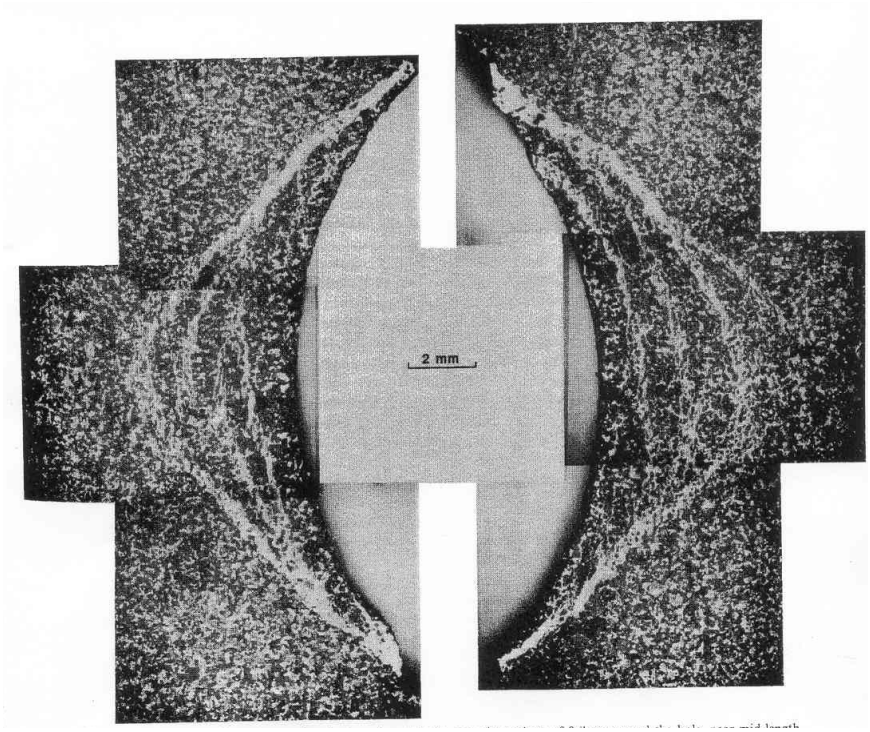


Figure 2.5. Ruptures autour d'un échantillon de grès de Berea (Berea 7) [11]

Figure 2.5 montre les figures typiques des ruptures observées dans le grès de Berea.
Les pores et les fissures ont été remplies par du métal de Wood solidifié (la portion claire) et l'existence de deux zones de rupture, diamétralement opposées, a été mise en évidence dans tous les échantillons de grès de Berea.
Le calcaire d'Indiana se comporte de façon plus isotrope que le grès de Berea. La Figure 2.6 montre les zones extensives de la rupture. Les fissures sont évidentes jusqu'à une profondeur 4.6 millimètres de la paroi du trou.

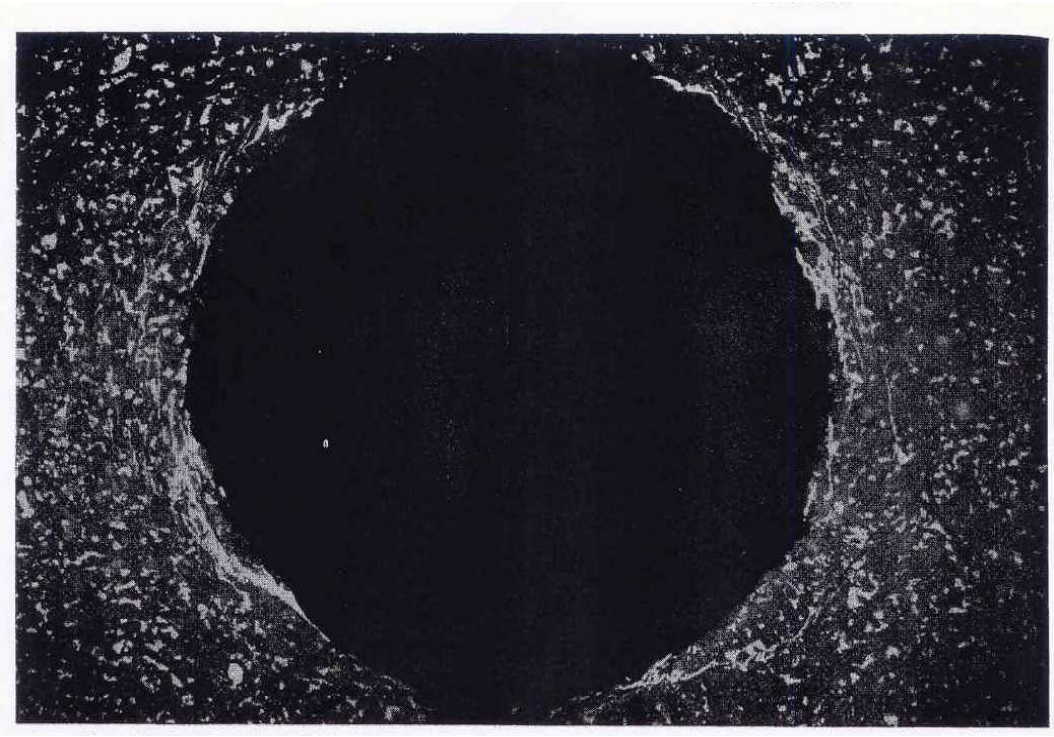


Figure 2.6. Ruptures autour d'un échantillon de calcaire d'Indiana (Indiana 1) [11]

2.3.3. Essais sur une diatomite

2.3.3.1. Introduction

Les essais ont été effectués par J.P. Boehler, Th. Dietl, H. Ferdjani et A. Millien [3].
Les études expérimentales antérieures, effectuées à Elf-Aquitaine sur l'Argilite de Tournemire, se sont heurtées à la difficulté de l'obtention d'éprouvettes intactes en forme de cylindre creux. Par la suite, la Diatomite de la Montagne d'Andance a donc été utilisée en remplacement de l'Argilite de Tournemire.
Ce matériau a une structure orthotrope de révolution. Les caractéristiques de la diatomite imprégnée au Carbowax 4000 (pour diminuer la porosité, porosité initiale entre 70% et 80%, et l'anisotropie déformabilité de la diatomite naturelle) sont présentées dans le Tableau 2.3.

E_1 (MPa)	E_3 (MPa)	G (MPa)	ν_1	ν_3
8249	2450	859	0,248	0,164

Tableau 2.3 : Caractéristiques de la diatomite [3]

E_1 et ν_1 sont le module d'Young et coefficient de Poisson dans le plan de la stratification et E_3 et ν_3 sont le module d'Young et coefficient de Poisson normal à ce plan.
Le matériau (Diatomite imprégnée) a une structure orthotrope de révolution autour de la direction ν_3 (Figure 2.7). Les cylindres sont repérés dans les axes (s, t, n) qui sont aussi les directions principales des contraintes appliquées, n étant l'axe de l'éprouvette.

Les éprouvettes cylindriques creuses ont été préparées sur cinq orientations différentes (θ = 0°, 30°, 45°, 75°, 90°) aux dimensions de diamètre externe=100 mm, de diamètre interne = 25 mm, h= 200 mm.
L'orientation des jauges collées sur la surface interne des cylindres creux est exposée sur la Figure2.8.

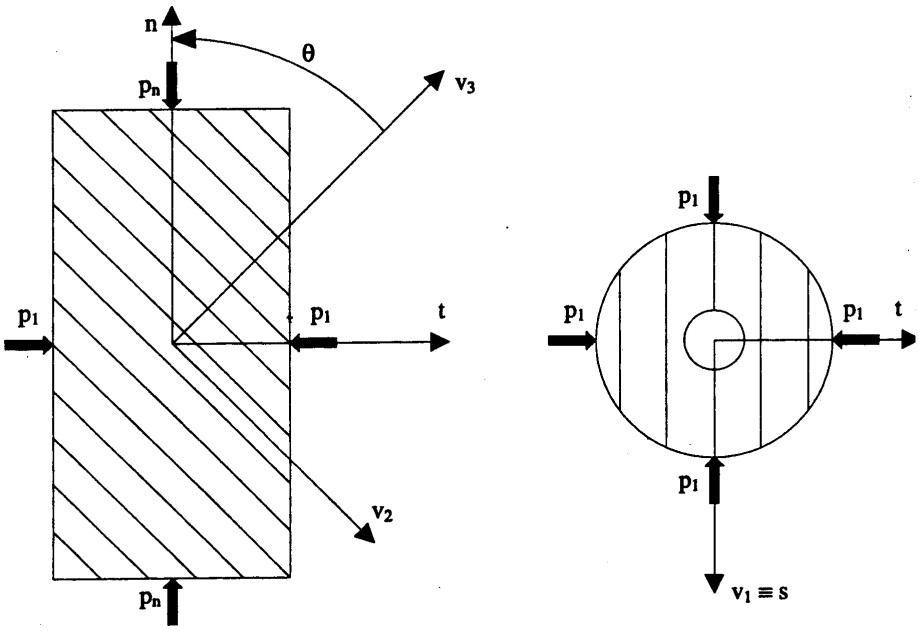


Figure 2.7 : Cylindre Creux d'un matériau orthotrope de révolution soumis à des pressions externes [3]

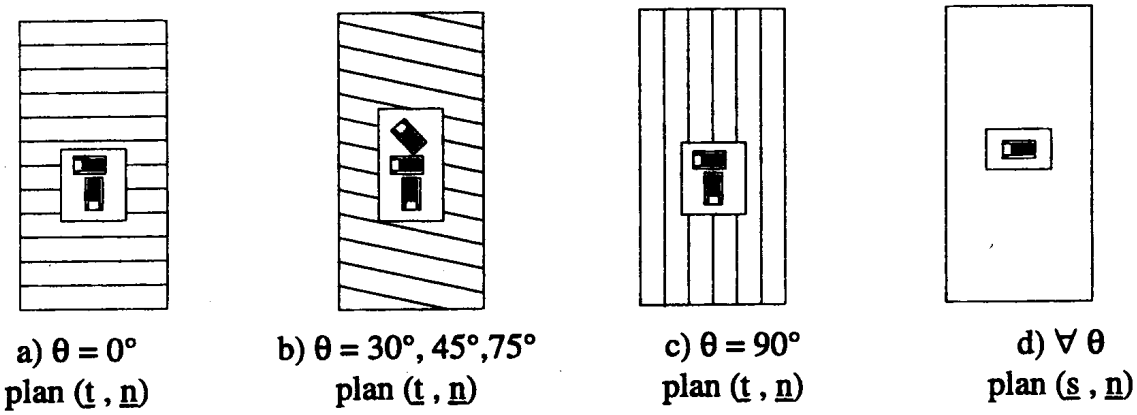


Figure 2.8 : Orientation des jauges collées sur la surface interne des cylindres creux [3]

2.3.3.2. Procédures d'essai

Deux types d'essai ont été réalisés :

1) Essais sous une pression externe croissante :
Les essais ont été réalisés pour cinq orientations d'éprouvettes (θ = 0°, 30°, 45°, 75, 90°) et la pression externe a été augmentée jusqu'à la rupture.
2) Essais sous une pression externe constante et une pression interne décroissante :
Les tests ont été réalisés pour trois orientations d'éprouvettes θ = 0°, 45°, 90°.
Les essais comprennent deux phases, une première phase pendant laquelle pression externe et la pression interne ont été augmentées en même temps jusqu'à une valeur $P_{max,}$ une deuxième phase pendant laquelle la pression externe est maintenue constante à la valeur P_{max} et la pression interne est diminuée jusqu'à la rupture.

2.3.3.3. Résultats

Les résultats de ces essais sont présentés dans deux parties :

1) Résultats d'essais sous une pression extérieure croissante :
Les valeurs des pressions P_r provoquant l'initialisation de la rupture interne sont données dans le Tableau 2.4 en fonction de l'orientation des cylindres.

θ	0°	30°	45°	75°	90°
P_r (MPa)	38	28	17,9-18,7	16	17

Tableau 2.4 : Les valeurs des pressions P_r provoquant l'initialisation de la rupture interne [3]

Les courbes contraintes-déformations de certains essais sont présentées sur la Figure 2.9.

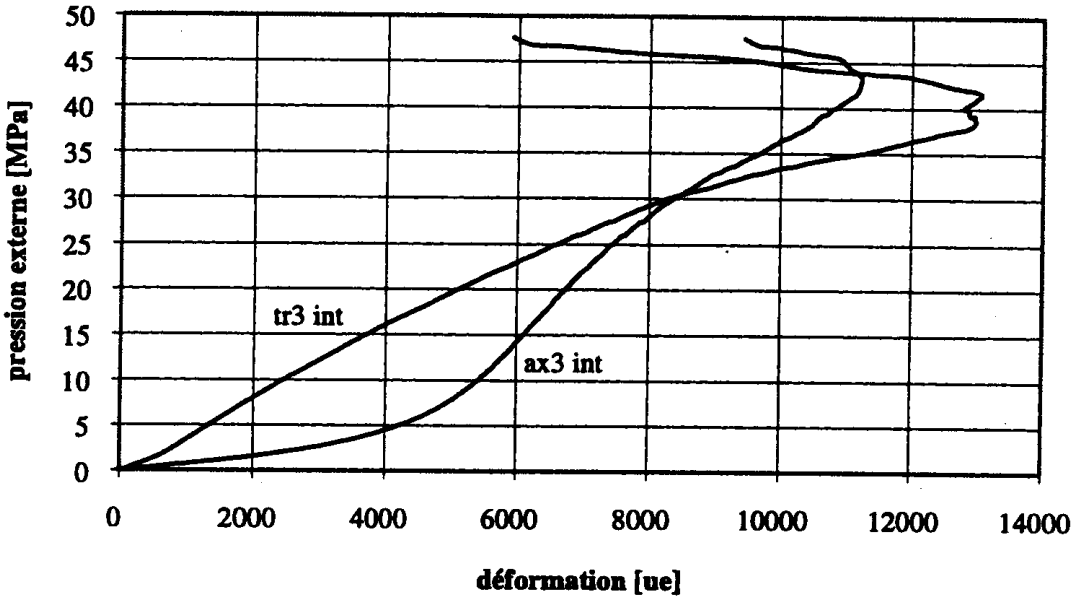


Figure 2.9 : Cylindre creux à θ= 0°, soumis à une pression externe croissante; Courbes contrainte-déformation, jauge axiale et jauge transversale internes sur la face3, plan (t, n) [3]

2) Résultats d'essais sous une pression extérieure constante et une pression intérieure décroissante :
Les valeurs de P_{max} , de P_{ir} correspondant à la rupture interne et de $\Delta P = P_{max} - P_{ir}$ sont présentées dans le Tableau 2.5 en fonction de l'orientation des éprouvettes.

θ	0°	45°	90°
P_{max} (MPa)	65,9	61,8	42
P_{ir} (MPa)	2	30	20
ΔP (MPa)	63,9	31,8	22

Tableau2.5 : Les valeurs des pressions P_{max} et P_{ir} provoquant l'initialisation de la rupture interne [3]

Les courbes contraintes-déformations sont présentées sur la Figure 2.10.

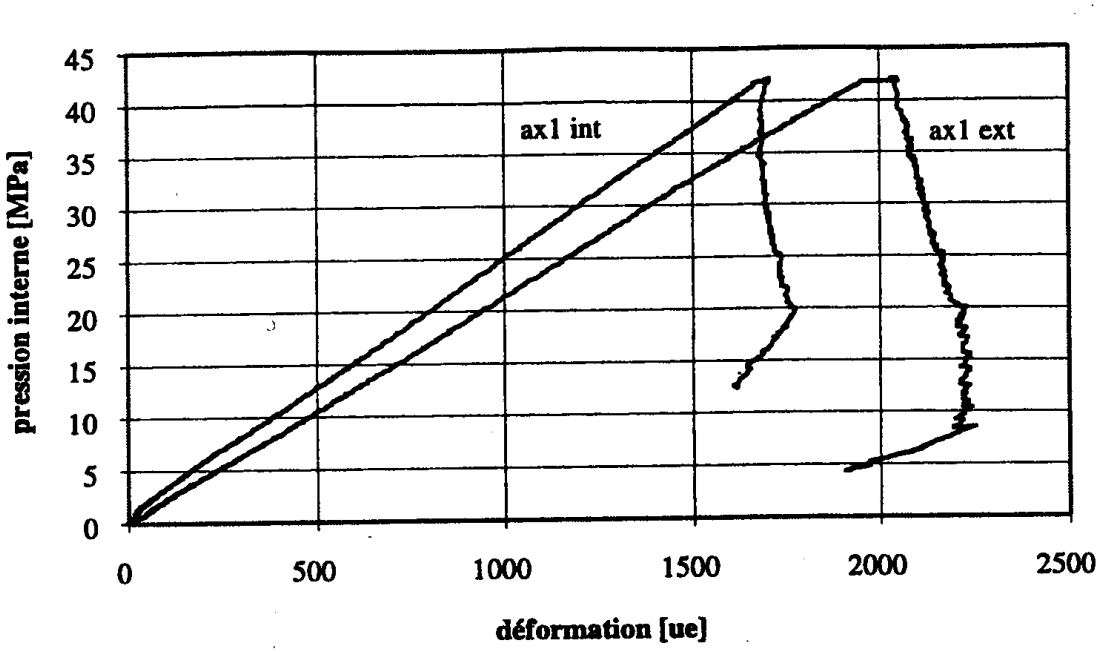


Figure 2.10 : Cylindre creux à θ= 90°, d'abord soumis à une pression interne et une pression externe égales, puis à une diminution de la pression interne ; jauge axiale interne et jauge axiale externe sur la face1, plan (t, n) [3]

2.3.3.4. Modes de rupture

Pour chaque orientation des cylindres, les modes de rupture sont observés. Pour les cylindres orientés à θ= 0°, la rupture se produit selon le mode *en travers* (rupture astructurale), cette rupture concerne la totalité de la surface interne et produit des écailles sous la forme de plaquettes ayant tendance à s'allonger parallèlement aux strates. Pour les autres orientations des cylindres θ= 30°,45°,75°, et 90° la rupture interne se produit selon le mode 'parallèle'

(rupture structurale). Le mode de rupture interne d'un cylindre creux orienté à θ= 90° est présenté sur la Figure 2.11.

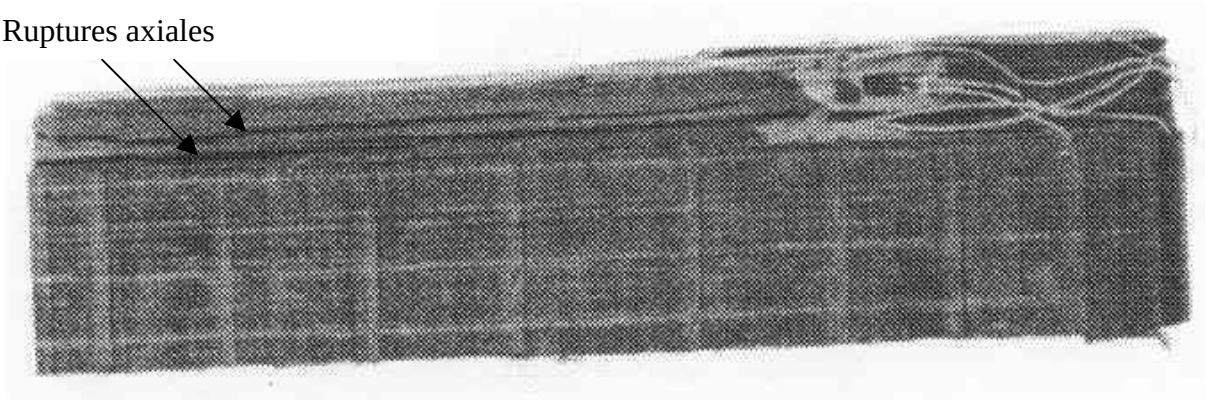


Figure 2.11 : Rupture interne d'un cylindre creux orienté à θ= 90° [3]

2.3.4. Essai sur un granite

2.3.4.1. Introduction

Cette recherche a été conduite par M. Lee et B. Haimson [24].
Les essais ont été réalisés sur le granite de lac du Bonnet. Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le Tableau 2.6.

σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
167±20	8,7±2,5	55±10	0,3±0,15

Tableau 2.6 : Caractéristiques mécaniques [24]

2.3.4.2. Dimensions des échantillons testés

Les éprouvettes cubiques creuses ont pour dimensions nominales : 10 cm de longueur, 10 cm de largeur, 10 cm de hauteur et 2,1 cm de diamètre interne.

2.3.4.3. Procédure d'essai

Les échantillons sont placés dans une cellule polyaxiale permettant d'appliquer deux contraintes horizontales différentes. Les valeurs des trois contraintes appliquées sur les échantillons sont :
a) La contrainte horizontale minimale (S_h) (perpendiculaire à l'axe du trou): de 10 MPa jusqu'à 40 MPa .
b) La contrainte verticale (S_v) (parallèle à l'axe du trou): soit proche de S_h soit de 12 jusqu'à 13 MPa.
c)La contrainte horizontale maximale (S_H) (perpendiculaire à l'axe du trou): pouvant être augmentée jusqu'à la rupture.

Pour chaque essai, S_h et S_v sont maintenues constantes et S_H est augmentée jusqu'à la rupture à la vitesse de 0,01 MPa/s.

2.3.4.4. Résultats et mode de rupture

La microfissuration autour des parois internes est surveillée par enregistrement des émissions acoustiques de l'échantillon (EA). La déformation diamétrale du trou dans les deux directions horizontales (celles de S_h et S_H) est aussi mesurée (Figure 2.12).
Les échantillons testés sont imprégnés avec un époxy de basse viscosité puis ils sont sciés suivant une direction perpendiculaire à l'axe du trou. Les tranches choisies sont collées sur des lames et sont polies jusqu'à atteindre une épaisseur de 0,03 mm.
Les résultats des essais réalisés sont présentés sur les Figures 2.13 et 2.14.

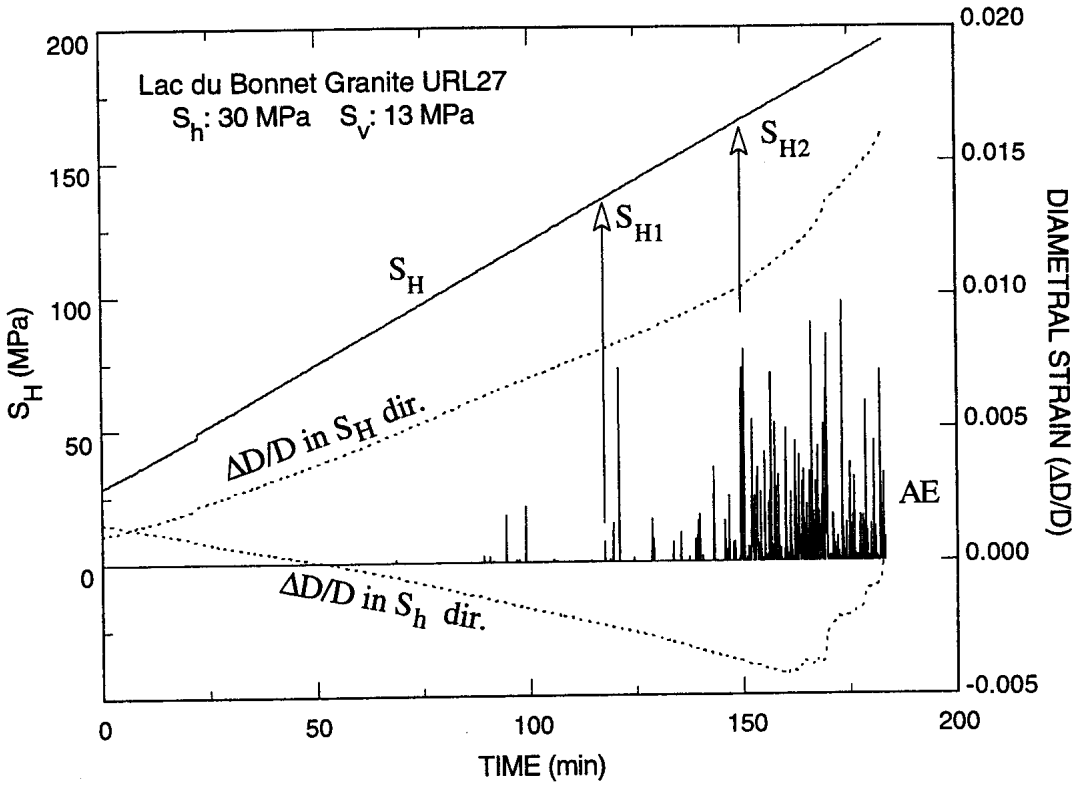


Figure 2.12 : Variation de S_H, réponse acoustique, déformation diamétrale dans les deux directions S_h et S_H en fonction du temps
Les seuils critiques de S_H, marquant l'initiation de la rupture, sont notés S_{H1} si l'on considère uniquement l'émission acoustique et S_{H2} si l'on considère à la fois la réponse acoustique et les déformations diamétrales [24]

La valeur de S_h a été augmentée de 10 jusqu'à 40 MPa mais le rapport de SH1/Sh a diminué de 10 /1 à 3 /1.
La figure 2.14 montre que la grandeur de S_{H2} augmente avec l'augmentation de S_h. Le mode de rupture dans les échantillons URL19 et URL42 est exposé sur les figures 2.15 et 2.16. Les

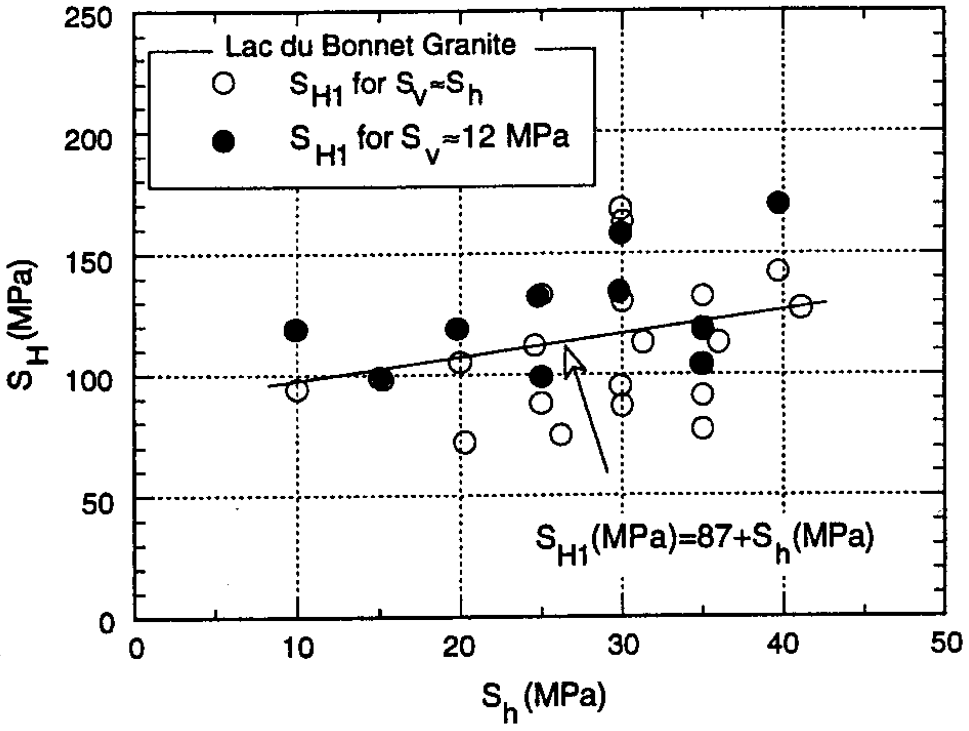


Figure 2.13 : Relation entre S_{H1} et S_h.[24]

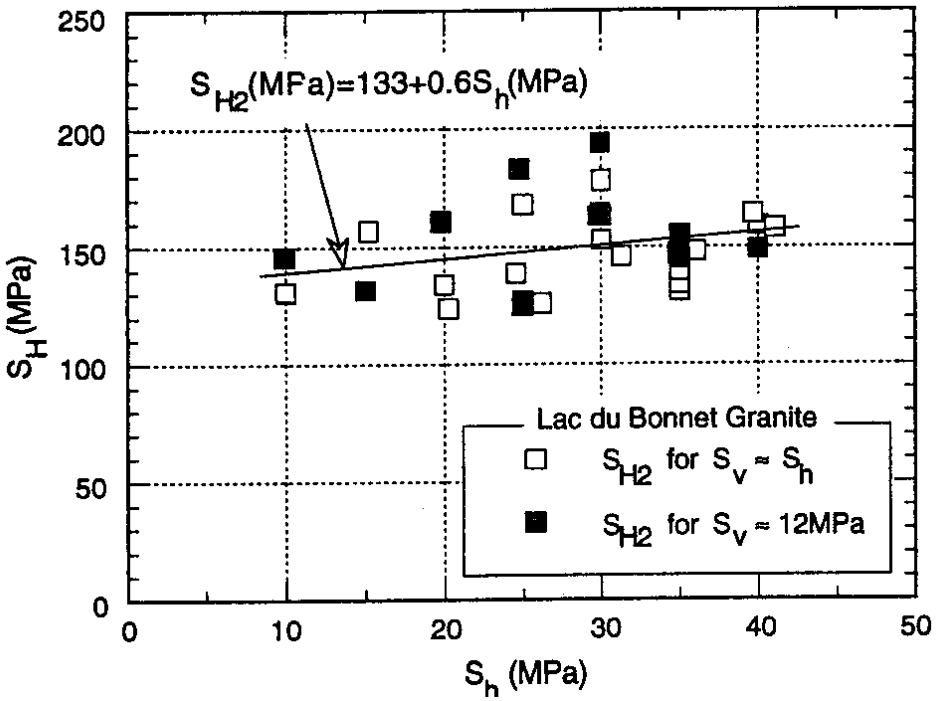


Figure 2.14 : Relation entre S_{H2} et S_h.[24]

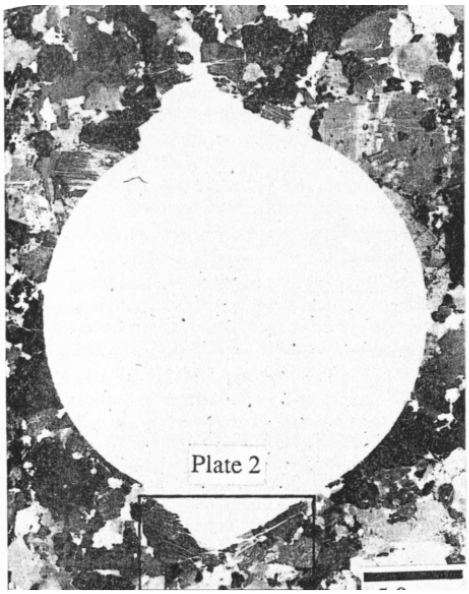


Figure 2.15 : Mode de la rupture de l'échantillon URL19, Sv=Sh=30MPa, S_H=190MPa et P_i=0 MPa [24]

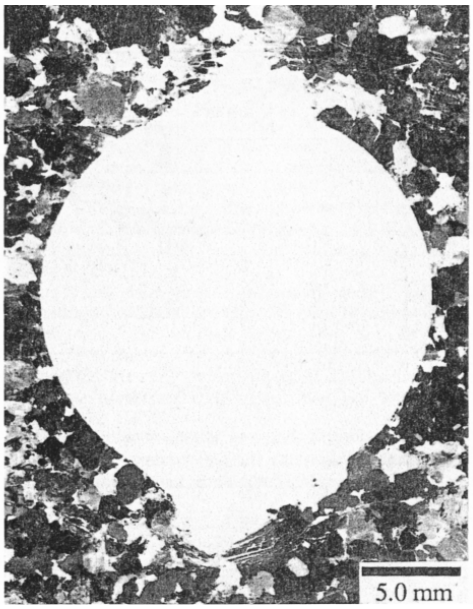


Figure2.16 : Mode de la rupture de l'échantillon URL42, Sv=Sh=30MPa, S_H=190MPa et P_i=14MPa [24]

2.4. Essais avec fluide interstitiel

Ce sous chapitre présente les essais réalisés sur différents types de matériaux:
a) Des roches argileuses (J.R. Marsden, J.W. Dennis et B. Wu, 1996)
b) Une argilite artificielle (X. Chen, C.P. Tan, B. Wu et C.M. Haberfield, 1998)
c) Un grès (B. Haimson et H. Lee, 2004)
d) Un grès (T.E. Unander, E. Papamichos, J. Tronvoll et A. Skjaerstein,1997)

2.4.1. Essai sur des roches argileuses

2.4.1.1. Introduction

Cette recherche a été conduite par J.R. Marsden, J.W. Dennis et B. Wu [26].
Les essais triaxial consolidé non drainé CU sont effectués sur des roches argileuses. Les caractéristiques des roches argileuses (cohésion (C) et angle de frottement interne (φ)) sont présentées dans le Tableau 2.7.

	Surconsolidé	Surconsolidé	Normalement Consolidé	Normalement Consolidé
Orientation	C(MPa)	φ (degré)	C(MPa)	φ (degré)
Parallèles au litage	0,59	15	1,97	
Perpendiculaire au litage	0,96	6,5	1,61	0

Tableau 2.7 : Caractéristiques des roches argileuses [26]

2.4.1.2. Dimension des échantillons testés

Les éprouvettes cylindriques creuses ont pour dimensions nominales : 100 mm de diamètre externe, 25 mm de diamètre interne et 200 mm de hauteur approximativement.

2.4.1.3. Procédures d'essai

Les essais ont été réalisés en condition de déformation plane ($\varepsilon_z=0$).
L'essai comprend les étapes suivantes :
a) Mise en place de l'échantillon dans la cellule
b) Augmentation de la pression externe et interne
c) Augmentation de la pression interstitielle.
d) Augmentation de la pression externe et interne en condition non drainée pour obtenir la saturation complète.
e) Consolidation de l'échantillon
f) Diminution de la pression interne jusqu'à la pression interstitielle.

2.4.1.4. Résultats

Les résultats de quatre essais sont présentés dans le Tableau 2.8 et les figures 2.17 et 2.18.

Essai	q_o(MPa)	p_o(MPa)	u_o(MPa)	p_y (MPa)	p_f (MPa)
HC1	30	30	20	28,6	24,9
HC2	30	30	20	27,6	27,6
HC3	20	20	15	17,2	15,5
HC4	20	20	15	19	14,8

Tableau 2.8 : Conditions et résultats des essais [26]

Où :
q_o: pression externe initiale
p_o: pression interne initiale
u_o: pression interstitielle initiale
p_y : pression interne au début rendement
p_f : pression interne à la rupture

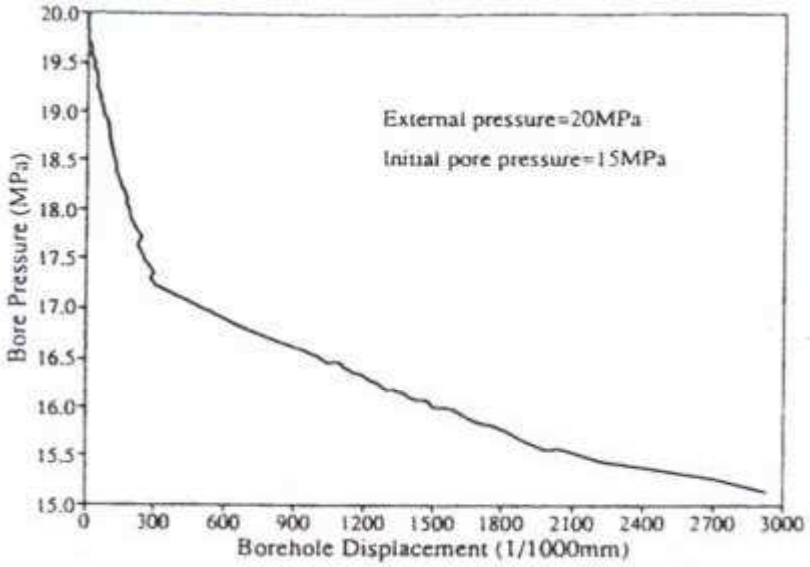


Figure 2.17 : Influence de la pression interne sur la fermeture du trou pour HC3 [26]

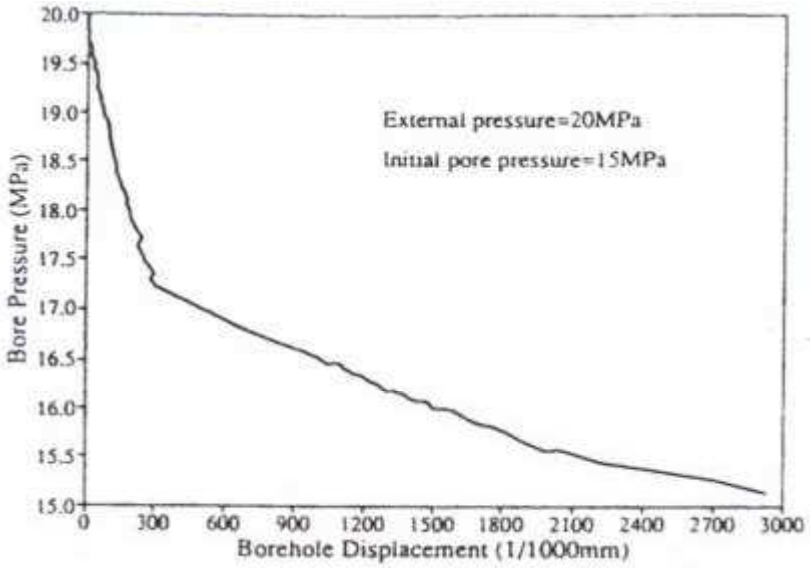


Figure 2.18 : Influence de la pression interne sur la fermeture du trou pour HC4 [26]

2.4.1.5. Mode de rupture

Après diminution de la pression interne (quelques MPa), l'initiation de la rupture a immédiatement eu lieu dans tous les échantillons. Les fissures sont initiées en paroi interne et se propagent le long d'un chemin où la contrainte de cisaillement est maximale (Figure 2.19).

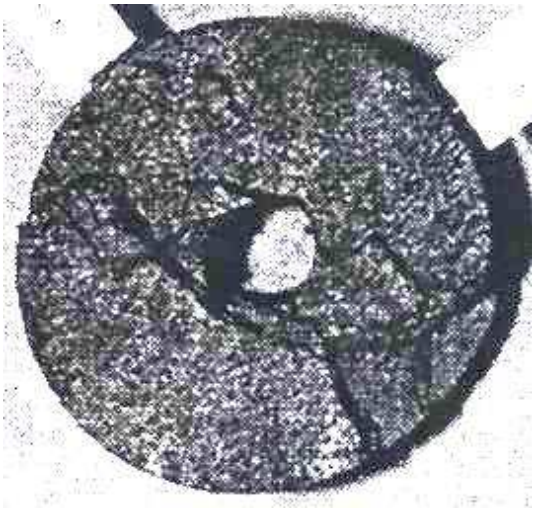


Figure 2.19 : Mode de rupture d'un échantillon cylindrique creux [26]

2.4.2. Essais sur une argilite artificielle

2.4.2.1. Introduction

Cet essai a été effectué par X. Chen, C.P. Tan, B. Wu et C. M. Haberfield [8].
L'argilite artificielle a été fabriquée à partir de poudre d'argilite, de ciment (20% de la masse de poudre d'argilite), de solution de chlorure de calcium à 10% (40% masse de ciment) et d'eau (18% du total de la masse de ciment et de poudre d'argilite). Tous les éléments sont mélangés puis sont placés dans un moule et sont compressés sous une pression axiale de 45 MPa.
Les caractéristiques de l'argilite obtenue sont présentées dans le Tableau 2.9.

C (MPa)	K (m/s)	σ_t (MPa)	φ (degré)	Porosité (%)	ρ (kg/m^3)
6,3	$5{,}14*10^{-13}$	2,07	36,2	24,23	2278

Tableau 2.9 : Caractéristiques de l'argilite artificielle [8]

2.4.2.2. Dimensions des échantillons testés

Les éprouvettes cylindriques creuses ont pour dimensions nominales : 80 mm de diamètre externe, 25 mm de diamètre interne et 160 mm de hauteur approximativement.

2.4.2.3. Procédures d'essai

Les procédures d'essai sont présentées ci-dessous :
1) Première étape :
   a) Pré-saturation de l'échantillon pendant 18 heures sous condition de vide.
   b) Mise en place de l'échantillon dans la cellule.
   c) Augmentation de la pression externe et interne à la vitesse de 0,5 MPa/min jusqu'à 7 MPa.
   d) Augmentation de la pression interstitielle à la vitesse de 0,5 MPa/min jusqu'à 5 MPa.
   e) Après la saturation complète de l'échantillon, fermeture des entrées de pression interstitielle en tête et pied et augmentation de la pression interne et externe à la vitesse de 0,5 MPa/min jusqu'à 68 MPa.
   f) Consolidation de l'échantillon, drainage par le pied de l'échantillon uniquement.
2) Deuxième étape :
   g) Fermeture du drainage puis maintien de la pression externe à la valeur de 68 MPa et ensuite diminution de la pression interne de 68 MPa jusqu'à 6 MPa à la vitesse de 0,3 MPa/min.
3) Troisième étape :
   h) Si les échantillons n'ont pas cassé, maintien de la pression interne à la valeur de 6 MPa et augmentation de la pression externe jusqu'à la rupture.

Les étapes d'un essai sont représentées sur la Figure 2.20.

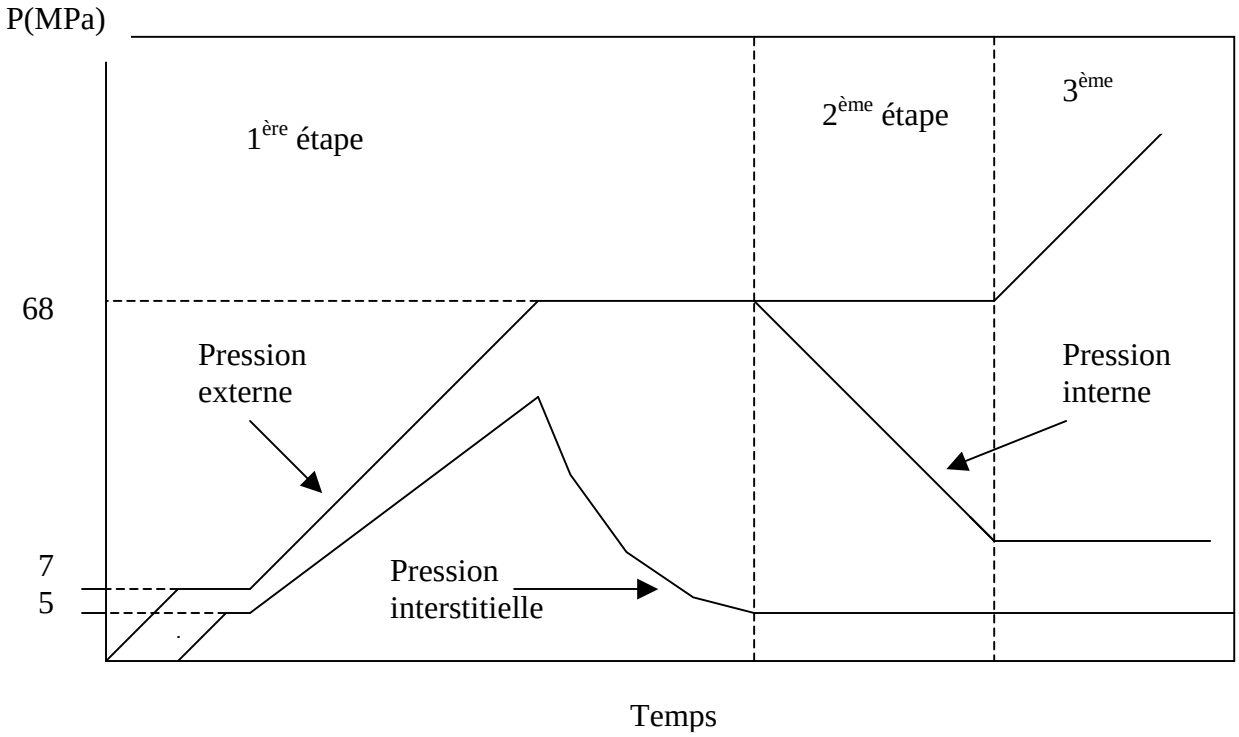


Figure 2.20 : Etape d'un essai

2.4.2.4. Résultats et mode de rupture

Les résultats des essais réalisés sont présentés sur les figures 2.21 et 2.22.

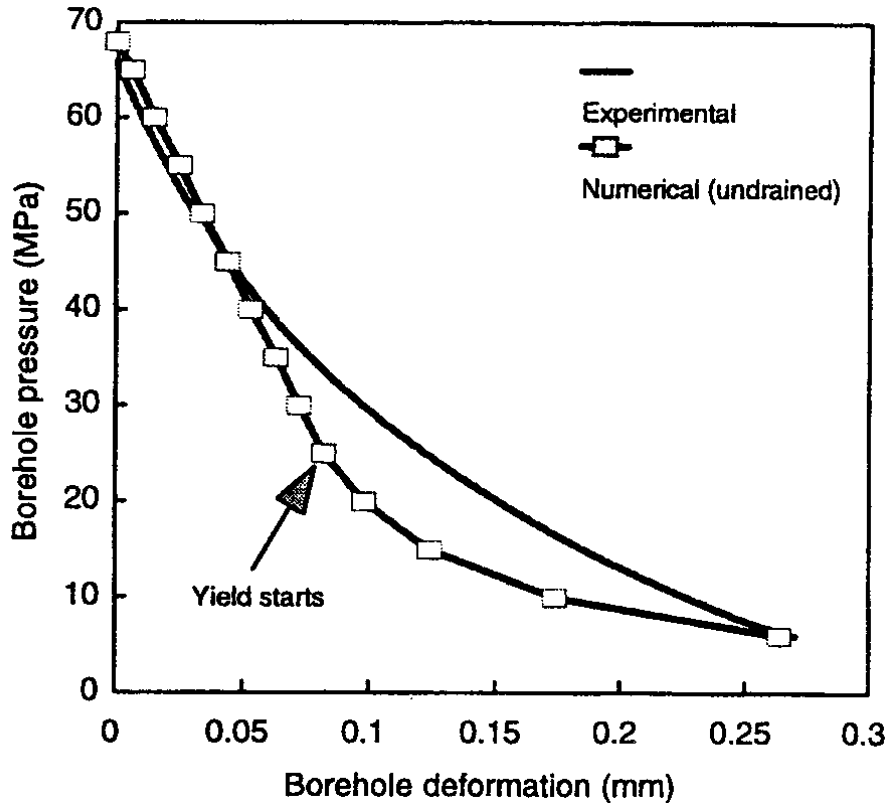


Figure 2.21 : Influence de la pression interne sur la fermeture du trou [8]

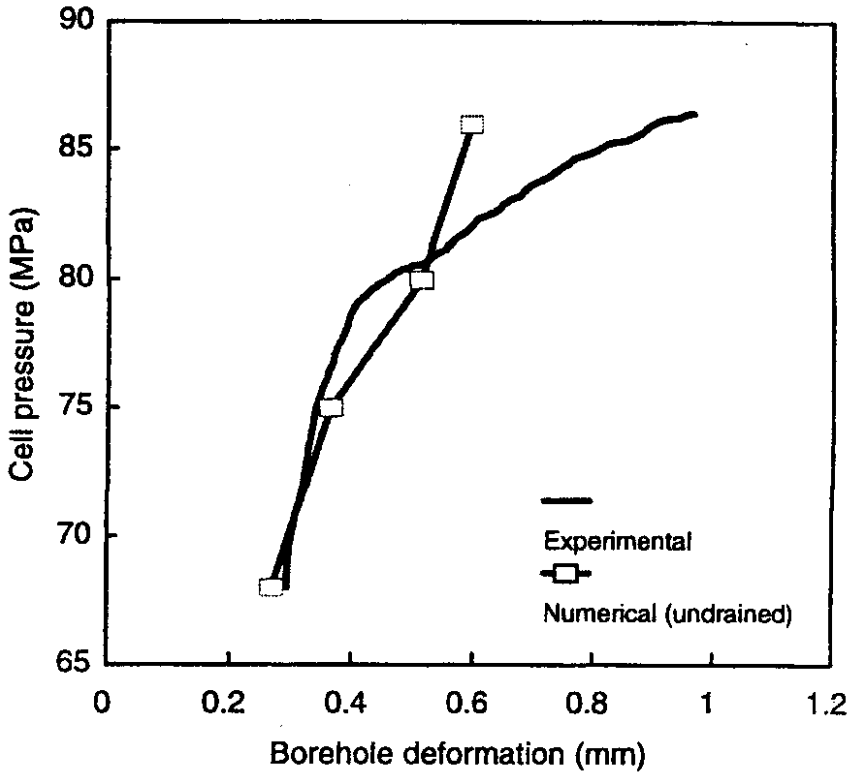


Figure 2.22 : Influence de la pression externe sur la fermeture du trou [8]

Les résultats expérimentaux montrent que la rupture a été initiée sur les parois du trou pour une pression externe de 80 MPa. Finalement, le cisaillement du matériau a eu lieu sur les parois du trou (Figure 2 .23). En conséquence, une grande déformation (Figure 2.23) a été observée.



Figure 2.23 : Mode de rupture d'un échantillon cylindrique creux [8]

2.4.3. Essai sur un grès

2.4.3.1. Introduction

Cette recherche a été conduite par B. Haimson et H. Lee [20].
Les essais sont effectués sur le grès de Tablerock et le grès de Mansfield. Le grès de Tablerock provient de Cloverdale Nursery (Idaho, Etats-Unis). Il est composé de quartz (55%) et de feldspath (37%). Le grès de Mansfield provient de Brazile (Indiana, Etats-Unis). Il est composé majoritairement de quartz (90%). La composition minéralogique et les caractéristiques de la texture sont présentées dans le Tableau 2.10.

Caractéristiques des roches	grès de Tablerock	grès de Mansfield
Composition minéralogie	55% quartz 37% feldspath 5% mica 3% argile	90% quartz 7%mica et mica altéré 2% feldspath 1% oxyde de fer
Cimentation primaire	quartz microcristallisé	contacts de grain suturés par quartz
Moyen de taille des grains	0,2 (±0,07mm)	0,2 (±0,06mm)

Tableau 2.10 : Composition minéralogique et les caractéristiques de la texture [20]

Les caractéristiques physiques et mécaniques des deux grès sont présentées dans le Tableau 2.11.

Caractéristiques des roches	grès de Tablerock	grès de Mansfield
Porosité (%)	28±3%	26±1%
E (GPa)	14,7±0,3	9,6±0,1
ν	0,2	0,27±0,04
σ_c (MPa)	39,5±4,8	22,4±0,5
σ_t (MPa) (essai Brézilien)	4,4±0,2	1,8±0,3

Tableau 2.11 : Caractéristiques physiques et mécaniques [20]

2.4.3.2. Dimension des échantillons testés

Les échantillons sont préparés perpendiculairement au plan de litage. Les éprouvettes ont une forme parallélépipédique et ont pour dimensions nominales : 150 mm de longueur, 150 mm de largeur, 230 mm de hauteur.

2.4.3.3. Procédures d'essai

Les procédures d'essai comprennent les étapes suivantes :

a) Application de trois contraintes ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$) (Figure 2.24) pour modéliser les conditions in situ aux grandes profondeurs.
b) Creusement d'un trou vertical (diamètre : 22 mm) à une cadence de pénétration constante (0,27 mm/s) tandis que les trois contraintes sont maintenues constantes. Un fluide de

creusement a été utilisé pour refroidir le carottier et enlever les débris de la roche. Un schéma du dispositif expérimental est représenté sur la Figure 2.25.
c) La contrainte horizontale minimale(σ_h) et la contrainte verticale sont maintenues constantes tandis que la contrainte horizontale maximale (σ_H) est augmentée.

2.4.3.4. Résultats

Plusieurs séries d'essais ont été réalisées sur le deux grès. Les résultats des essais sur le grès de Mansfield sont présentés sur les Figures 2.26 et 2.27. Entre 3 et 6 essais ont été effectués dans chaque série. Les résultats montrent que la longueur de la rupture augmente avec l'augmentation du rapport σ_H/σ_h et qu'elle est constante pour un rapport élevé de σ_H/σ_h. La valeur d'ouverture angulaire (θ_b) varie de 15° jusqu'à 45°dans le grès de Mansfield et de 40° jusqu'à 140° dans le grès de Tablerock.

2.4.3.5. Modes de rupture

Deux modes de rupture ont été observés : un mode de rupture en forme d'oreille de chien dans le grès de Tablerock (Figure 2.28) et un mode de rupture en fissures minces, tabulaires et longues dans le grès de Mansfield (Figure 2.29). Le mécanisme de formation de la rupture est différent dans les deux grès.

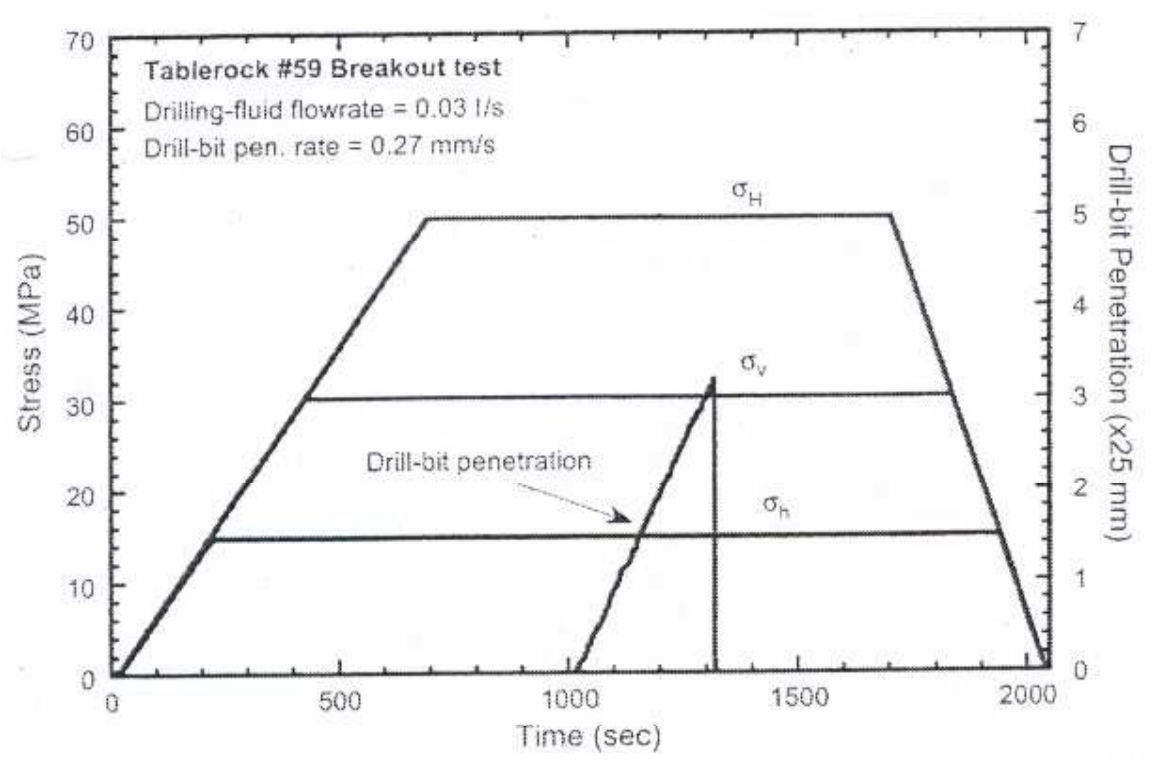


Figure 2.24 : Chemin de chargement-déchargement ; le processus de creusement et chemin de déchargement [20]

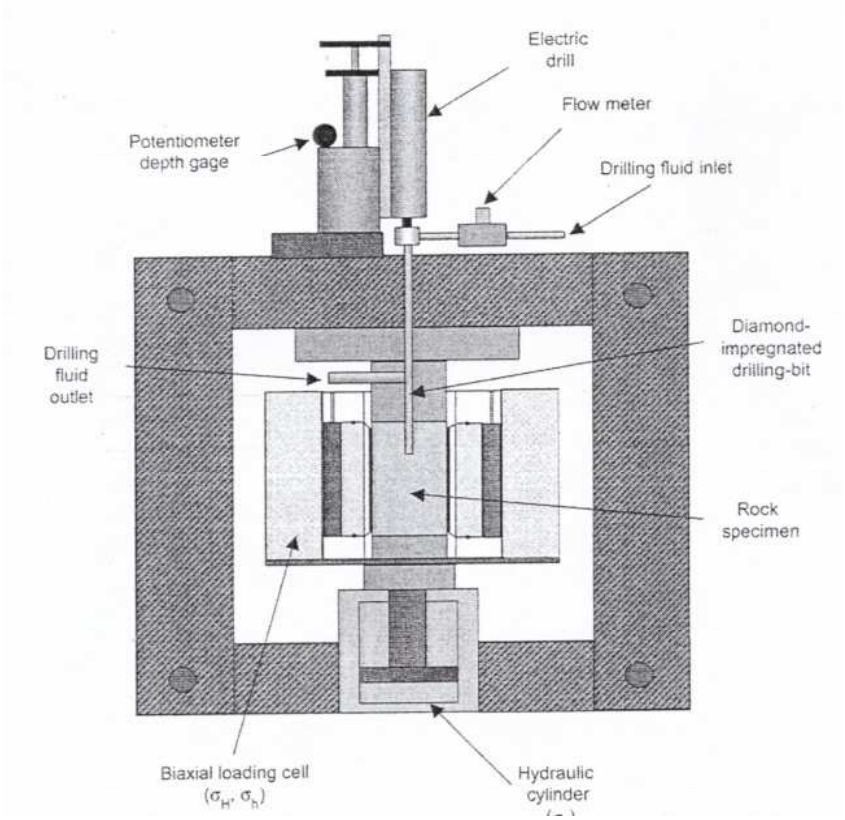


Figure 2.25 : Dispositif expérimental [20]

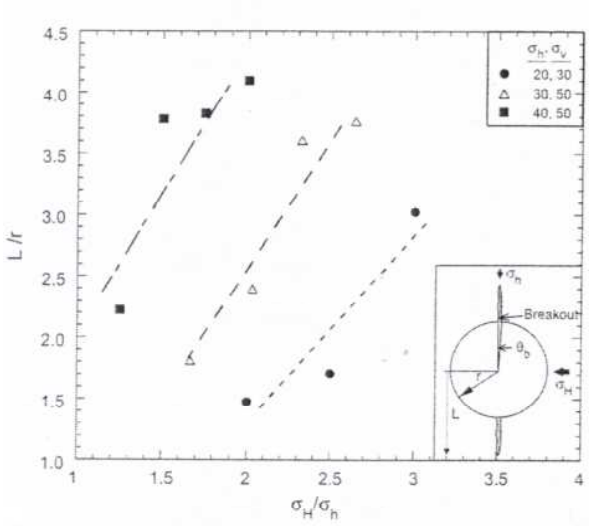


Figure 2.26 : Résultats de l'essai sur le grès de Mansfield [20]

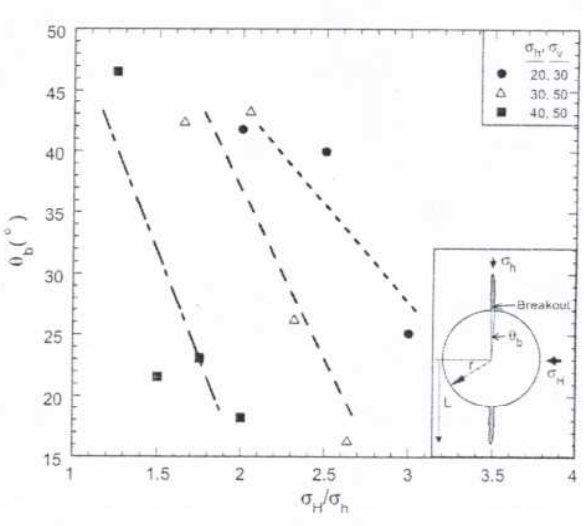


Figure 2.27 : Résultats de l'essai sur le grès de Mansfield [20]

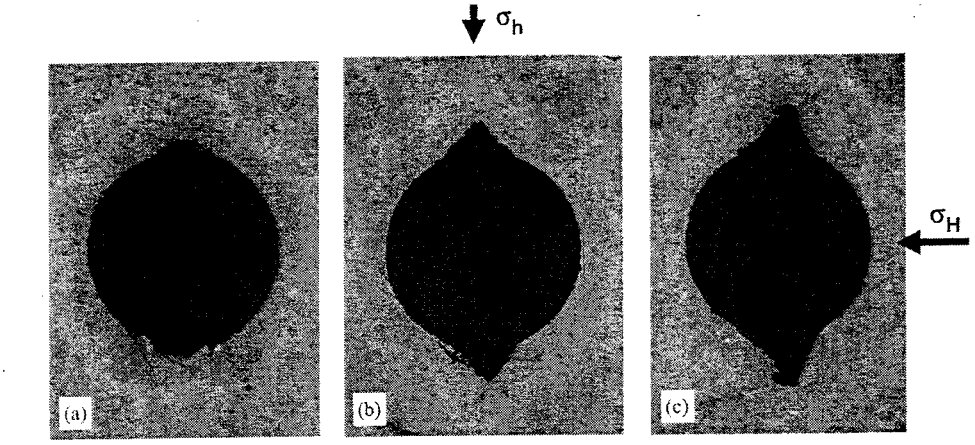


Figure 2.28 : Mode de rupture du grès de Tablerock (σ_V=30MPa, σ_h=15MPa, a) σ_H=50MPa, b) σ_H=60MPa, c) σ_H=70MPa [20]

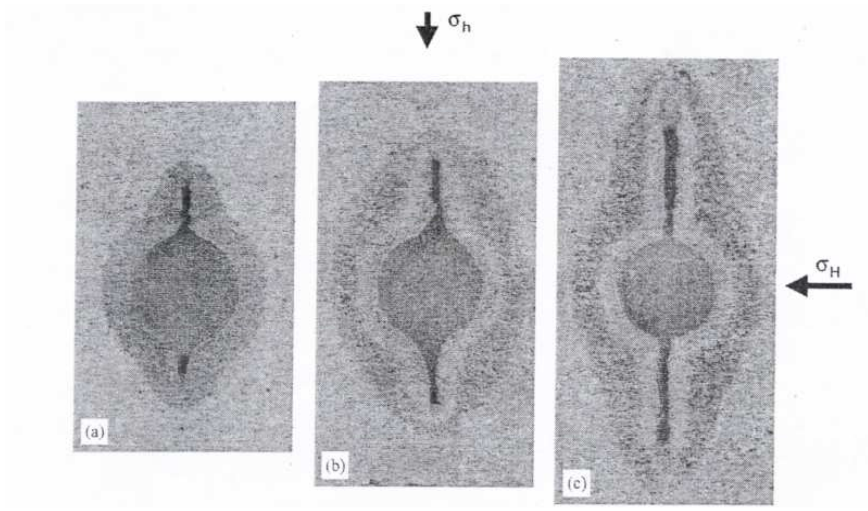


Figure 2.29 : Mode de rupture du grès de Mansfield (σ_V=30MPa, σ_h=15MPa, a) σ_H=50MPa, b) σ_H=60MPa, c) σ_H=70MPa [20]

2.4.4. Essai sur un grès

2.4.4.1. Introduction

Ces essais ont été effectués par T.E. Unander, E. Papamichos, J. Tronvoll et A.Skjaerstein [38].
Les essais ont été réalisés sur le grès de Red Wildmoor (RW). Les caractéristiques physiques et mécaniques sont présentées dans le Tableau 2.12.

Porosité	E GPa)	σ_c (MPa)
26%	2-3	10-12

Tableau 2.12 : Caractéristiques physiques et mécaniques [38]

2.4.4.2. Dimensions des échantillons testés

Les éprouvettes cylindriques creuses ont pour dimension nominale : 100 mm de diamètre externe, 20mm de diamètre interne, 60 mm de hauteur de trou et 150 mm de hauteur d'échantillon.

2.4.4.3. Procédures d'essai

Deux types d'essai sont réalisés : a) essai avec écoulement axial (Figure 2.30) b) essai avec écoulement radial (Figure 2.31).

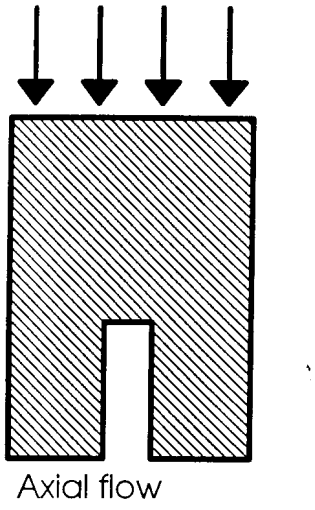


Figure 2.30 : Essai avec écoulement axial [38]

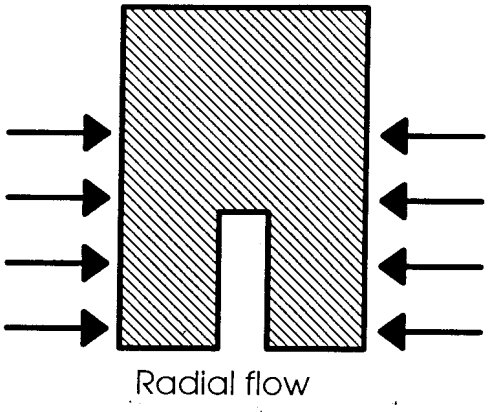


Figure 2.31 : Essai avec écoulement radial [38]

Deux types de chemin de contrainte ont été utilisés :

a) Les essais comprennent trois étapes : une première étape pendant laquelle la pression externe (pression de confinement) a été augmentée jusqu'à une valeur P_1, une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe a été augmentée à la valeur P_f, une troisième étape pendant laquelle la pression externe a été augmentée jusqu'à la rupture pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production tandis que la chute de pression interstitielle (différence entre la pression interstitielle externe et la pression interstitielle dans le trou) est constant (Figure 2.32). La pression interstitielle dans le trou est la pression atmosphérique.

b) Les essais comprennent trois étapes : une première étape pendant laquelle la pression externe (pression de confinement) a été augmentée jusqu'à une valeur P_1, une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe a été augmentée à la valeur P_f, une troisième étape pendant laquelle la pressions externe et la pression interstitielle externe ont été augmentées jusqu'à la rupture pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production tandis que la différentiel de pression interstitielle (différence entre la pression interstitielle externe et la pression interstitielle dans le trou) augmente pendant la production de pétrole (Figure 2.33).

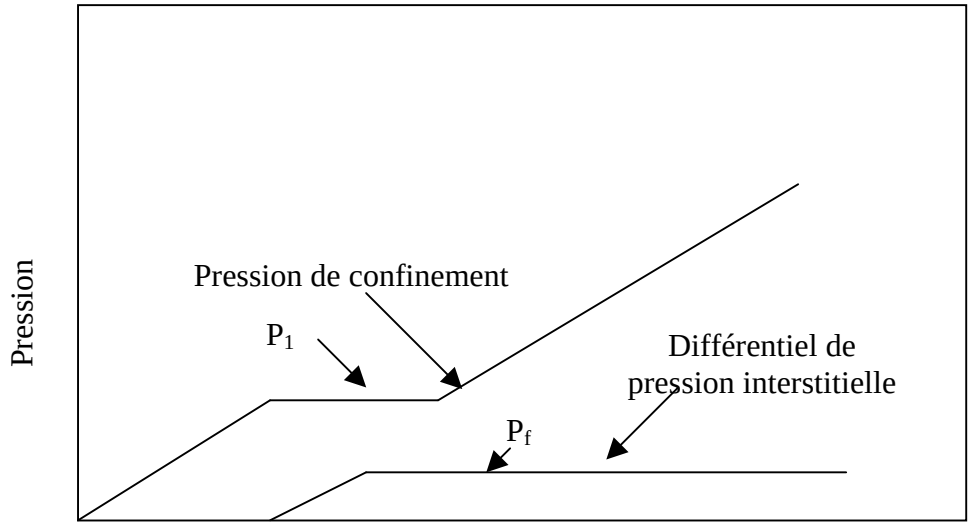


Figure 2.32 : Les étapes d'un essai

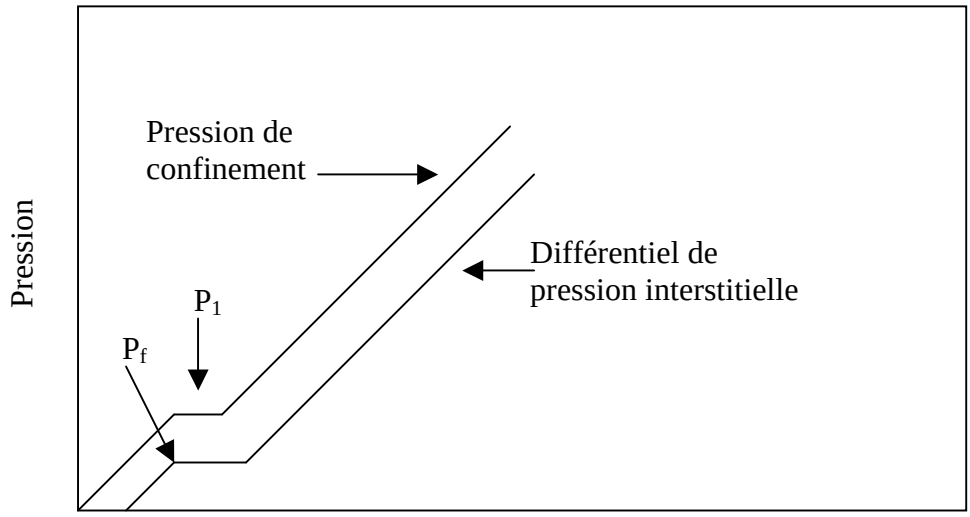


Figure 2.33 : Les étapes d'un essai

2.4.4.4. Résultats et mode de rupture

Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau 2.13 et sur les Figures 2.34 et 2.35. Le mode de rupture est en forme d'oreille de chien (Figure 2.36).
Les résultats montrent que :
a) L'initiation de la rupture a eu lieu en paroi interne dans deux cas (écoulement axial et écoulement radial).
b) Le mode de rupture est similaire dans deux cas (écoulement axial et écoulement radial).

c) Un fort gradient de pression interstitielle (avec l'écoulement radial) diminue un peu la résistance de cavité. L'écoulement de fluide peut enlever le matériel fissuré (production de sable).

Numéro d'essai	Type d'essai	Chemin de contrainte	Pression de confinement à la rupture (MPa)	Pression interstitielle (MPa)
32CAV02	Ecoulement radial	a	18	3
32CAV04	Ecoulement radial	a	19,3	7
32CAV03	Ecoulement radial	b	13,6	12,3
32CAV05	Ecoulement axial	b	18,7	16,2
32CAV07	Ecoulement axial	b	22,1	18,5
32CAV06	Sans fluide interstitiel	---	19,6	---
21CAV01	Sans fluide interstitiel	---	18,8	---
31CAV01	Saturé, sans écoulement	---	18,2	---

Tableau 2.13 : Résultats des essais [38]

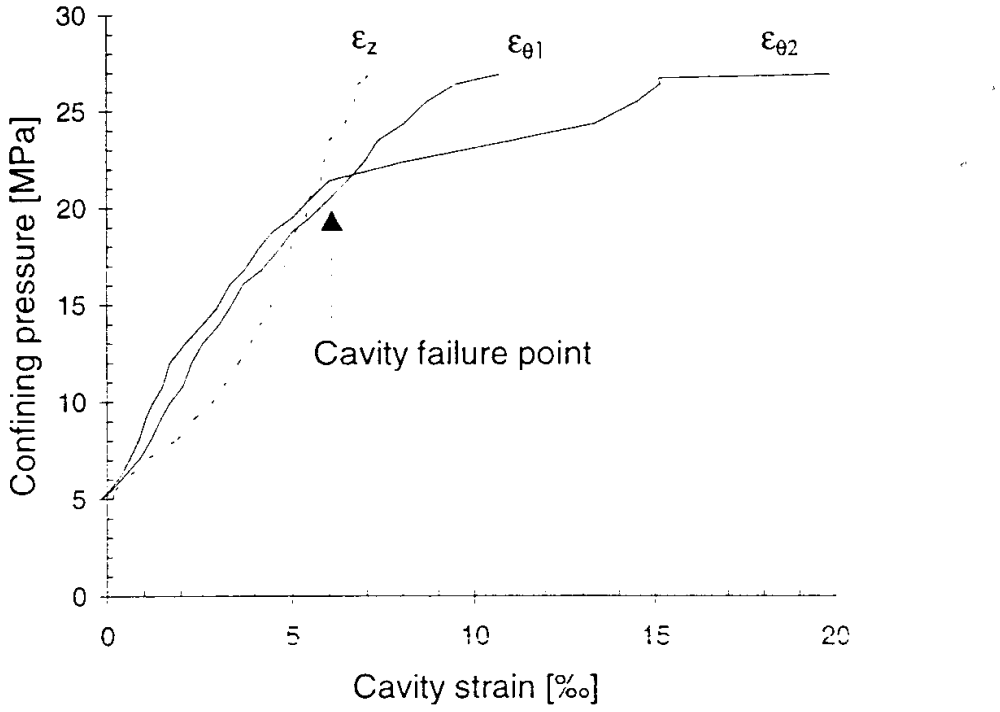


Figure 2.34 : Courbe de pression de confinement -- déformation orthoradiale et déformation axiale (essai : 32CAV07) [38]

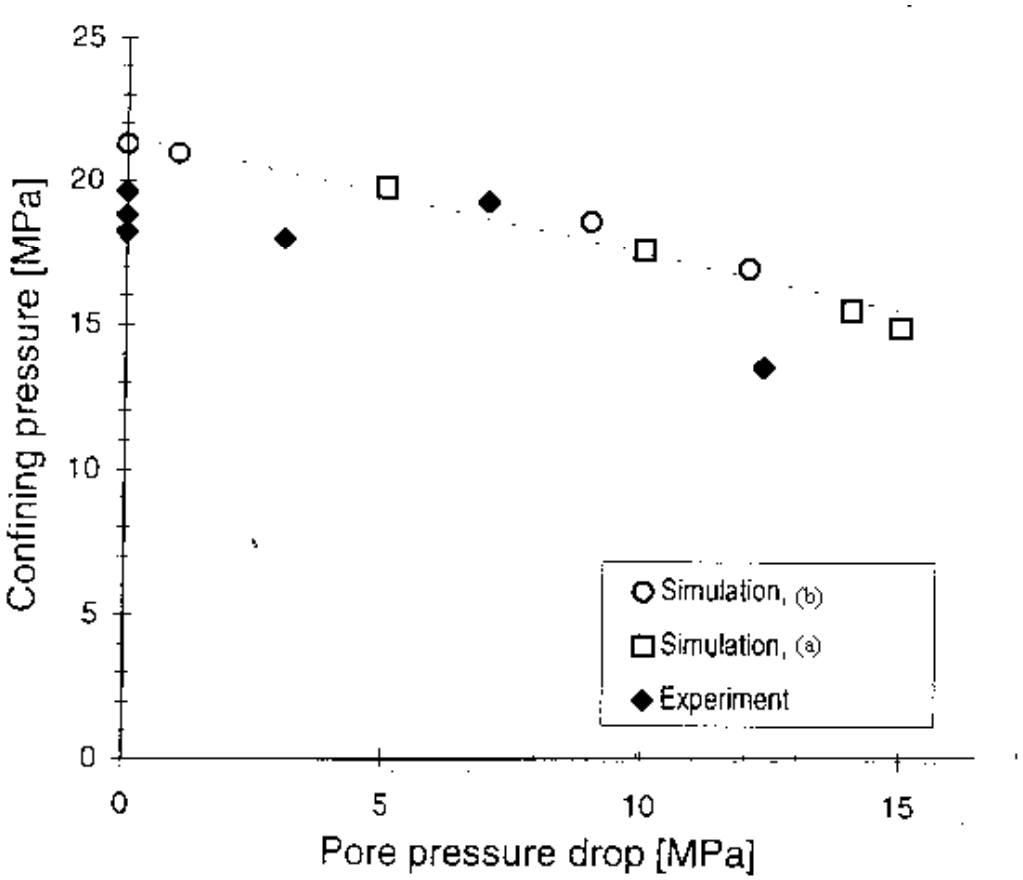


Figure 2.35 : Influence de pression interstitielle sur la pression à la rupture (simulation avec deux chemin de contrainte) [38]

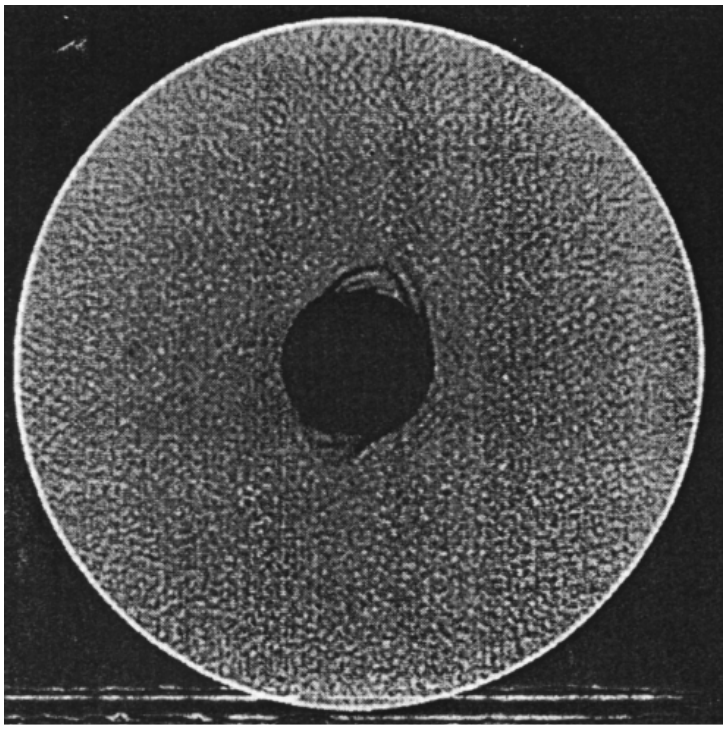


Figure2.36 : Mode de rupture[38] (Tomographie RX)

2.5. Interprétation des mécanismes de rupture

On distingue trois mécanismes de rupture dans les cylindres creux :

a) Mécanisme dilatant
b) Mécanisme compactant
c**)** Mécanisme par cisaillement

2.5.1. Mécanisme dilatant

La rupture se manifeste par la formation de fractures axiales (Figure 2.37) ou la formation de fractures en forme d'oreille de chien (en forme de 'V'). Un écaillage des parois internes se produit avec ce mécanisme.

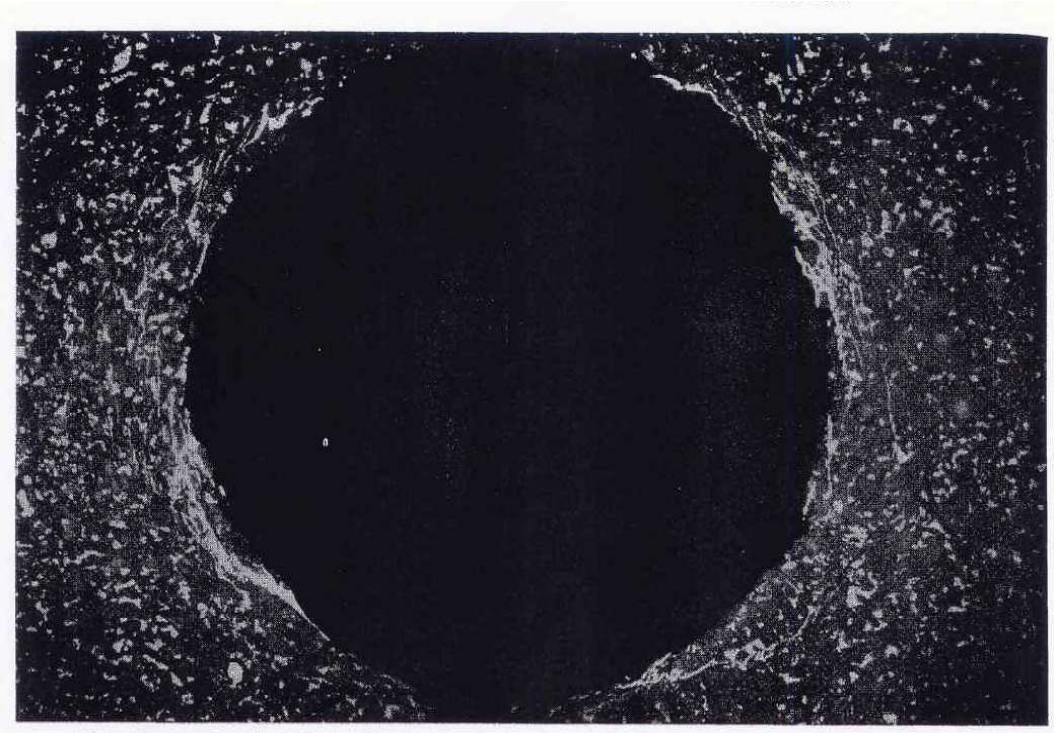


Figure 2.37 : Fractures axiales autour d'un échantillon
cylindrique de calcaire d'Indiana (Indiana 1) [11]

On peut expliquer le mécanisme de rupture par mécanisme dilatant à l'aide deux modèles suivants :
a) Le modèle élastique linéaire dépendant de la pression (Santarelli et al.1986, [36]) :
A la base de ce modèle, le module d'Young augmente avec l'augmentation de la pression de confinement. Dans ce cas, la contrainte orthoradiale est maximale derrière de parois interne (point d'initiation de la rupture) au lieu de paroi interne (dans le cas : module constant).
b) Le modèle de Zaitsev [35] :
Ce modèle peut expliquer qualitativement le mode de rupture. Il peut exprimer la propagation de microfissures existantes dans des matériaux hétérogène comme le béton et le grès dans deux cas suivants :.

1) La dureté des grains et celle de la matrice sont approximativement égales.

Dans ce cas, le point d'initiation de la rupture est derrière de parois interne et les microfissures se propagent parallèlement à la contrainte principale maximale (σ_θ). Finalement une rupture apparaît parallèlement à la paroi interne (comme le mode de rupture de dolomite de Gebdykes) (Figure 2.38).

2) La dureté des grains est plus grande que de la dureté de la matrice.

Dans ce cas, le point d'initiation de la rupture est derrière de parois interne et les microfissures se propagent parallèlement à la contrainte principale maximale (σ_θ). Puis elles se propagent dans la matrice rocheuse (rupture intergranulaire) vers la paroi interne (mécanisme par cisaillement). La déformation par cisaillement joue également un grand rôle dans la formation de la rupture (comme le grès de Doddington). Le mode de rupture est en forme d'oreille chien (couplage entre le mécanisme dilatant et le mécanisme par cisaillement) (Figure 2.39). .

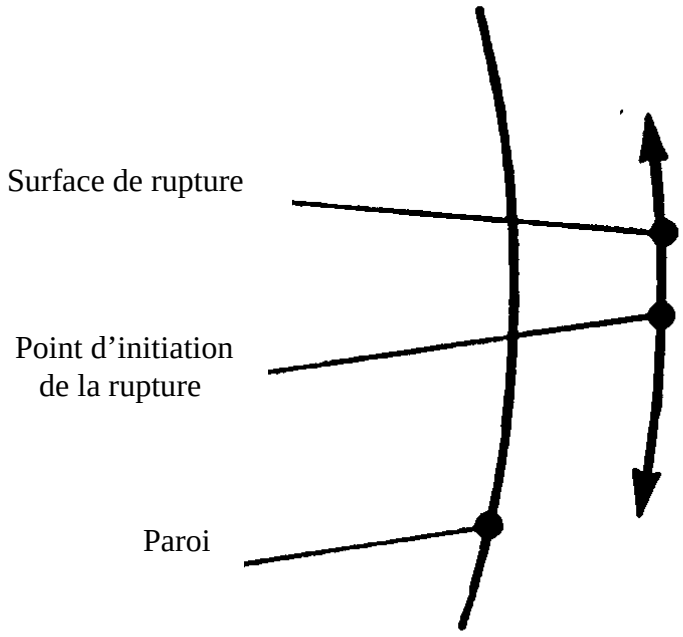


Figure 2.38 :Représentation schématique de l'initiation et du développement de la rupture en parois internes d'un cylindre creux (dolomite de Gebdykes) [34]

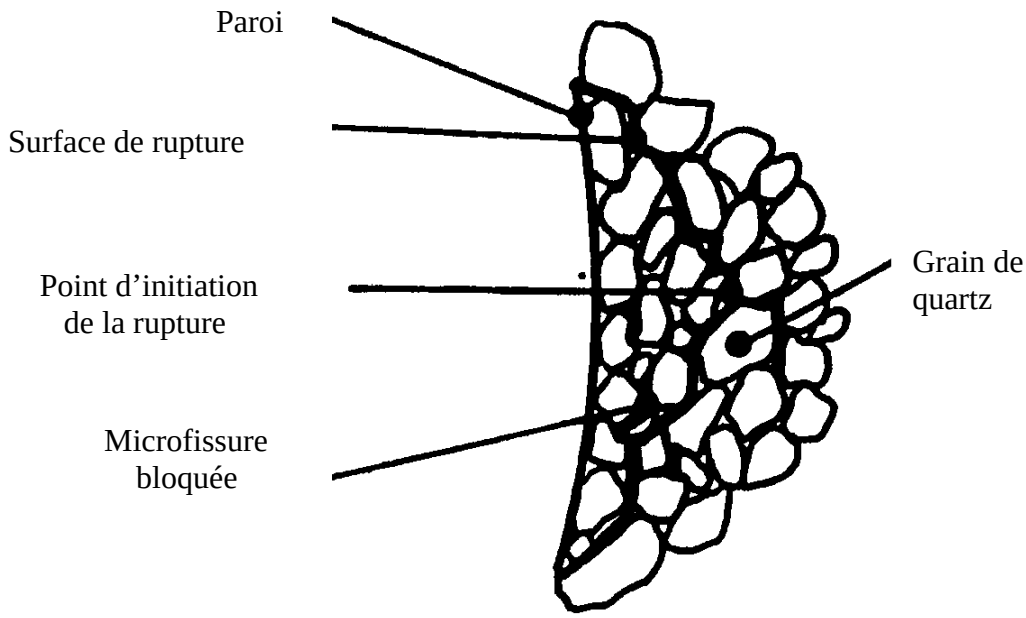


Figure 2.39 : Représentation schématique de l'initiation et du développement de la rupture en paroi interne d'un cylindre creux (grès de Doddington) [34]

2.5.2. Mécanisme compactant

Ce mécanisme est observé dans des roches très poreuses (plus de 25%). La porosité est un paramètre majeur pour que ce mécanisme puissent avoir lieu, cependant d'autre paramètre microstructuraux jouent également un grand rôle dans le mécanisme de la rupture, comme par exemple la cimentation. La rupture se manifeste par la formation de bandes de compaction.
Par exemple, une porosité bi-dimensionnelle a été mesurée dans le grès de Mansfield : la porosité dans la bande a été mesurée à 17,9% alors que dans le matériau intact elle est de 22% (Figure 2.40)[20].

2.5.3 Mécanisme par cisaillement

La rupture par le cisaillement se manifeste en forme de spirale (Figure 2.41) ou en forme d'oreille de chien (Figure 2.42). Les fissures sont initiées en paroi interne.
a) Forme d'oreille de chien :
Quand les microfissures se propagent le long de deux chemins où la contrainte de cisaillement est maximale elles s'intersectent au bout. Le mode de rupture est en forme d'oreille de chien.
b) Forme de spirale :
Quand les microfissures se propagent le long de plusieurs chemins où la contrainte de cisaillement est maximale (Figure 2.43). Le mode de rupture est en forme de spirale.

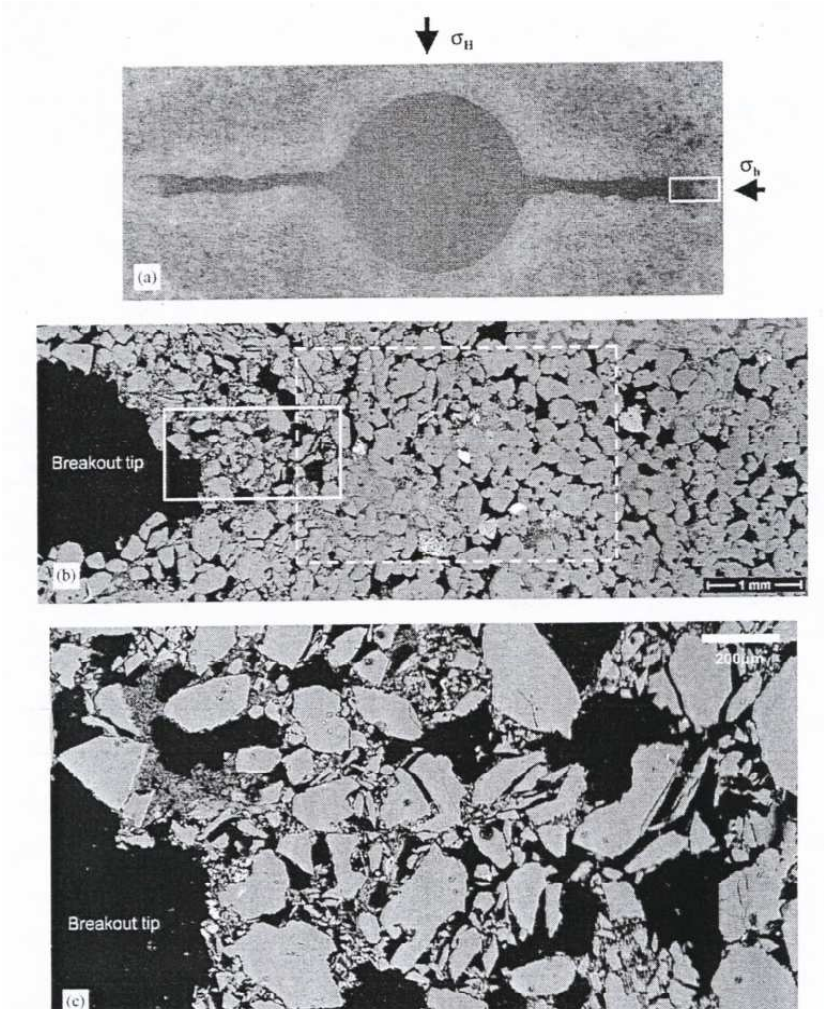


Figure 2.40 : Section horizontale d'un échantillon du grès de Mansfield (σ_V=30MPa, σ_h=20MPa, σ_H=60MPa) [20]

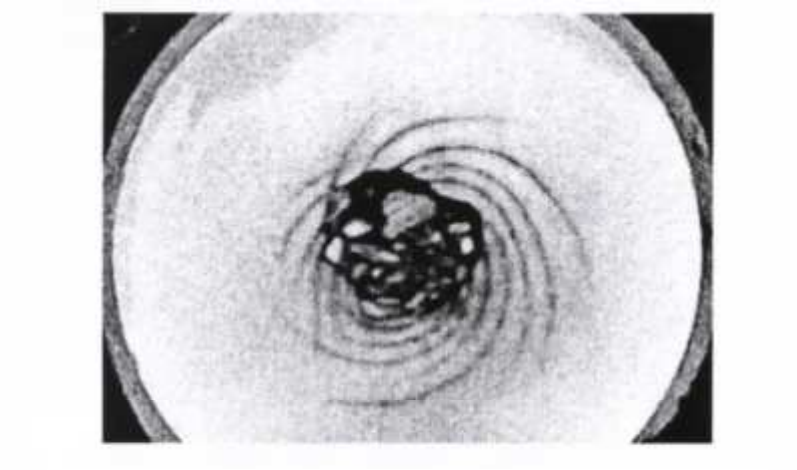


Figure 2.41 : La rupture par de cisaillement en forme de spirale (E. Papamichos et al., 2004) [30]

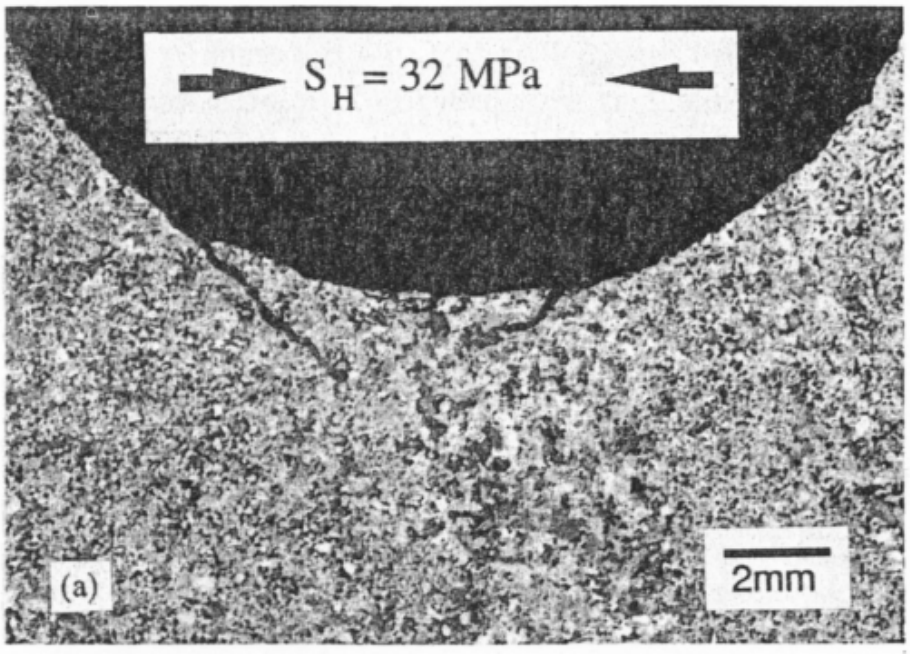


Figure 2.42 : Mode de rupture du calcaire de Cordova Cream (S_V=10 MPa, S_h= 5 MPa et S_H=32 MPa) [18]

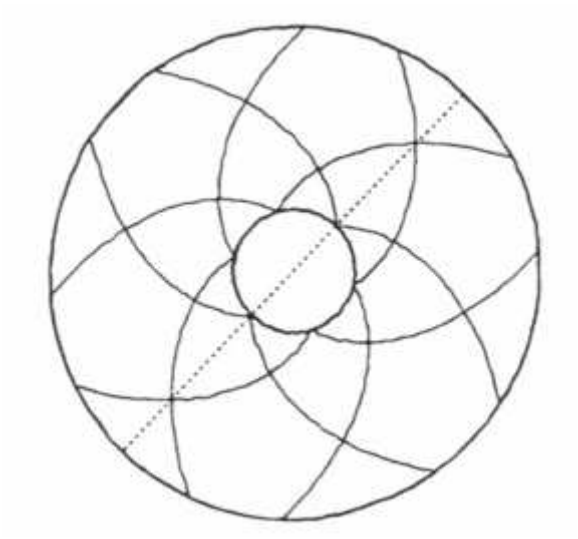


Figure 2.43 : Un schéma des chemins de contrainte de cisaillement maximale [26]

2.6. Dispositifs expérimentaux

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

2.6.1. Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition de déformation plane

Ce dispositif a été conduit par R.T. Ewy et N.G.W. Cook, 1990 [11]. Le schéma de la cellule est présenté sur la Figure 2.44.

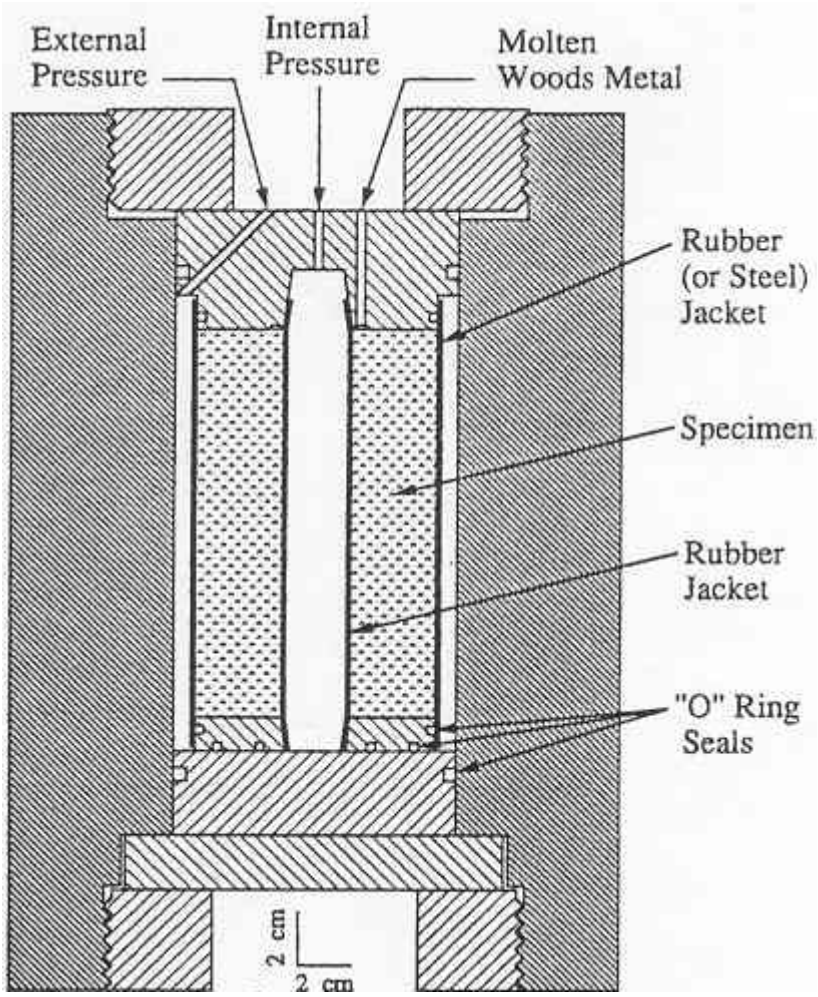


Figure 44. Schéma de la cellule [11].

Dans ce cas, l'échantillon a été bloqué à deux extrémités donc la déformation axiale est nulle et l'application des deux pressions externes et internes est possible.

2.6.2. Dispositif expérimental pour réaliser des essais avec application de trois contraintes différentes ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$)

Ce dispositif a été réalisé par B. Haimson et H. Lee, 2004 [20]. Le schéma du dispositif expérimental est présenté sur la Figure 2.45.

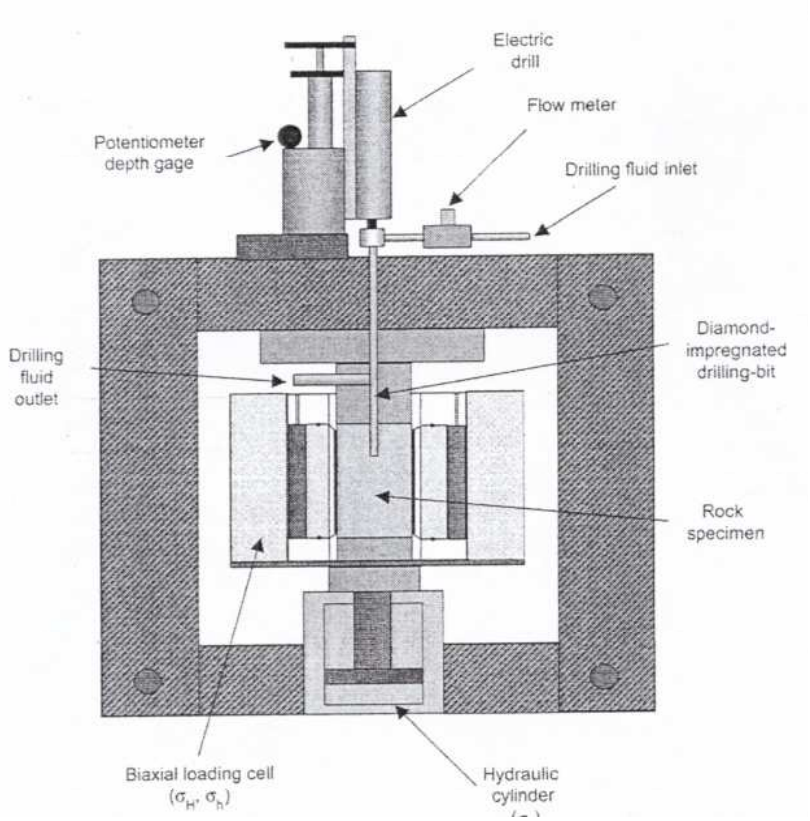
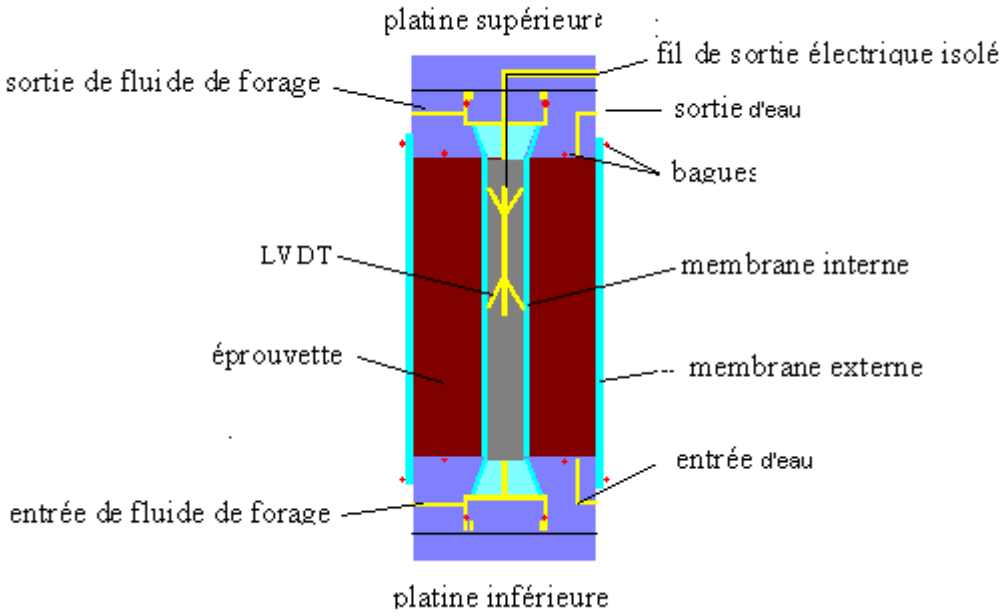


Figure 2.45 : Dispositif expérimental [20]

A l'aide de ce dispositif Il est possible modéliser le creusement de l'ouverture souterraine (comme puit pétrolier) avec injection d'un fluide de creusement et l'application de trois contraintes différentes est possible ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$).

2.6.3. Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition non drainé

Ce dispositif a été effectué par X. Chen et al., 1998 [6]. Le schéma de la cellule est présenté sur la Figure 2.46. A l'aide de ce dispositif, nous pouvons modéliser le comportement de l'ouverture souterraine (comme pour un puit pétrolier) pendant le creusement en condition non drainé.



Figures 2.46 : Schéma de la cellule
(communication personnelle)

2.6.4. Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition drainé avec écoulement radiale de fluide interstitiel

Ce dispositif a été conçu par E. Papamichos et al., 2001[29]. Il a utilisé cette cellule pour des essais de production de sable. Elle permet l'écoulement radial d'un fluide interstitiel (Figure 2.47) par contre avec ce dispositif, il n'est pas possible de mesurer le volume de fluide interstitiel sortant de l'échantillon. En conséquence, la mesure des variations de perméabilité en fonction de la pression externe n'est pas possible.

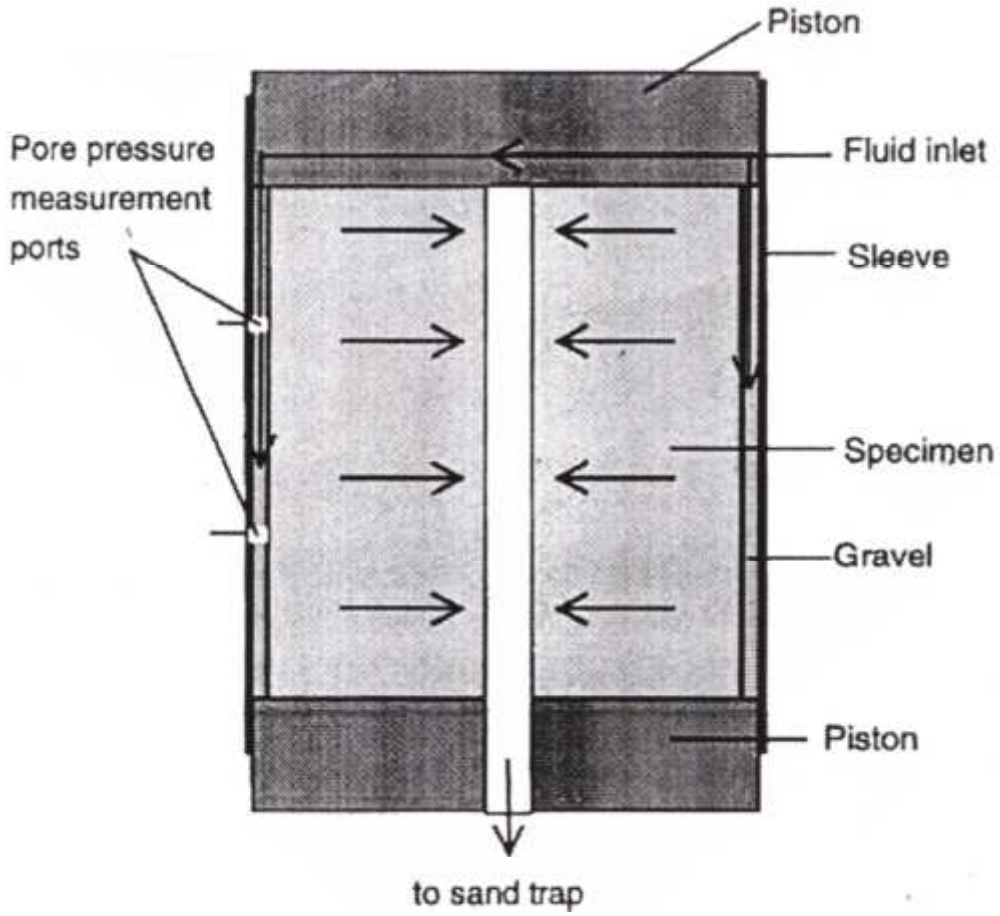


Figure 2.47 : Schéma de l'installation d'essai avec écoulement radial d'un fluide interstitielle, essai de production de sable sur échantillon cylindre creux [29]

2.7. Conclusion

Ce chapitre présente la position de problématique et un résumé de l'état concernant certains essais effectués sur cylindres creux de 1987 jusqu'à 2004 (essais sans et avec fluide interstitiel).
L'étude bibliographique a montré notamment que :

1) trois mécanismes de rupture existaient :
   a) Mécanisme dilatant
   b) Mécanisme compactant
   c) Mécanisme par cisaillement

2) Quatre types de dispositifs ont été utilisé pour réaliser des essais sur cylindres creux :
   a) Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition de déformation plane
   b) Dispositif expérimental pour réaliser des essais avec application de trois contraintes différentes ($\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$)
   c) Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition non drainé
   d) Dispositif expérimental pour réaliser des essais en condition drainé

Notre recherche se caractérise par deux point particuliers importants :

1) Type du 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 avec une porosité basse ou moyenne.
Notre étude est réalisée sur un matériau artificiel très poreux (Voir Chapitre 3). Son comportement est similaire à certains grès très poreux qui constituent des réservoirs pétroliers.

2) 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 Papamichos qui permet un écoulement radial mais avec ce dispositif sans mesure de volume du fluide interstitiel sortant de l'échantillon (le calculer de la perméabilité radiale n'est pas possible).

La partie principale de la présente recherche consiste à créer et développer un dispositif expérimental pour réaliser des essais sur cylindre creux à paroi épaisse sous deux conditions distinctes :
1) Essais sans fluide interstitiel :
2) Essais avec écoulement radial convergent du fluide interstitiel (c'est un des avantages de ce dispositif expérimental puisque dans la majorité des cas, cette possibilité d'écoulement n'existe pas.), permettant de modéliser le comportement des puits pétroliers pendant la production de pétrole et pour trouver les variations de perméabilité en fonction de la contrainte effective.

Chapitre 3

Caractéristiques du matériau étudié

3.1. Introduction

Ce chapitre présente les caractéristiques techniques du matériau étudié, les étapes de préparation des échantillons et les résultats d'essais classiques (par exemple: essais uniaxiaux, essais triaxiaux et essais de perméabilité). L'obtention des caractéristiques mécaniques et physiques a été l'objectif de ces essais. Ces caractéristiques sont utilisées dans les calculs nécessaires pour choisir les composantes du dispositif expérimental (par exemple la perméabilité du matériau doit être connue pour pouvoir choisir une pompe adéquate) et pour étudier les résultats expérimentaux sur cylindres creux.

3.2. Motivation du choix du matériau

Nous avons choisi de travailler sur un matériau artificiel. 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[13]. Il est peu résistant par rapport à la moyenne des grès.

3.3. Caractéristiques techniques

Le matériau appelé CPIR 09 est un matériau à base d'argile. L'argile et des cendres volantes sont malaxées avec de l'eau et certaines colles organiques, avant d'être pressées. Le mélange est ensuite séché sous atmosphère et finalement cuit à plus de 1300°C.
L'analyse chimique de ce matériau est présentée dans le Tableau 3.1.

Analyse chimique	Unité	Valeur
SiO_2	%	56,8
AL_2O_3	%	34
TiO_2	%	1,5
Fe_2O_3	%	3,2
CaO	%	0,8
MgO	%	0,7
Na_2O+K_2O	%	3

Tableau 3.1 : Analyse chimique

Le fournisseur des blocs est l'entreprise Céramiques Techniques et Industrielles (CTI).

3.4. Préparation des échantillons

Les blocs de matériaux ont pour dimension nominale :
a) Longueur : 600 mm

b) Largeur : 150 mm
c) Profondeur : 100 mm

Etapes de préparation de l'échantillon

L'objectif est de préparer un échantillon cylindrique de diamètre externe 100mm, de diamètre interne 25mm et de hauteur 200mm
Voici les étapes successives de préparation :
1) Scier le bloc (Figure 3.1).
2) Préparer la carotteuse (Figure 3.2) située au laboratoire LIRIGM.
3) Fixer le bloc sous la carotteuse avec des serre-joints.
4) Monter le carottier ϕ100 mm pour centrer le carottier par rapport au bloc.
5) Monter le carottier ϕ 20 mm et percer le trou central ϕ25 mm.
6) Monter le carottier ϕ100 mm et carotter l'échantillon de 100 mm (Figure 3.3).
7) Rectifier l'échantillon avec une rectifieuse (Figure 3.4).
8) Placer l'échantillon 24 heures à l'étuve à une température de 100°C.
9) Mesurer la hauteur et la diamètre de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse.
10) Vérifier le parallélisme avec un comparateur.

3.5. Réalisation des essais classiques

3.5.1. Porosité

On a mesuré la porosité par saturation à l'eau d'un échantillon. L'échantillon est pesé avant et après la saturation par l'eau. La différence de masse mesurée est le volume d'eau (ρ_{eau}=1 gr/cm^3) contenu dans l'échantillon (V_p). On peut déterminer le volume de l'échantillon (V) par mesures directes de ces dimensions. En résultat, Nous avons:

$$n(\%) = \frac{V_p}{V} \times 100 \qquad (3\text{-}1)$$

Nous avons effectué quelques essais pour mesurer la porosité et la masse volumique sur des échantillons cubiques et cylindriques. Nous avons carotté suivant deux directions (Figure 3.5) pour étudier l'anisotropie éventuelle du matériau (afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques). Par la suite les cylindres creux ont été carottés uniquement dans la direction 1 du fait de l'absence d'anisotropie. Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau 3.2.

Direction	Echantillon	n (%)	ρ_{sec} (gr/cm^3)	ρ_{sat} (gr/cm^3)
1	Cub1	45,87	0,892	1,351
1	Cub2	46,27	0,891	1,354
1	Cub3	46,35	0,903	1,366
1	CyL1	47,46	0,913	1,387
2	CyL2	47,97	0,896	1,376
1	Moyen	46,48	0,899	1,367

Tableau 3.2 : Porosité et masse volumique du matériau étudié



Figure 3.1 : Scier le bloc

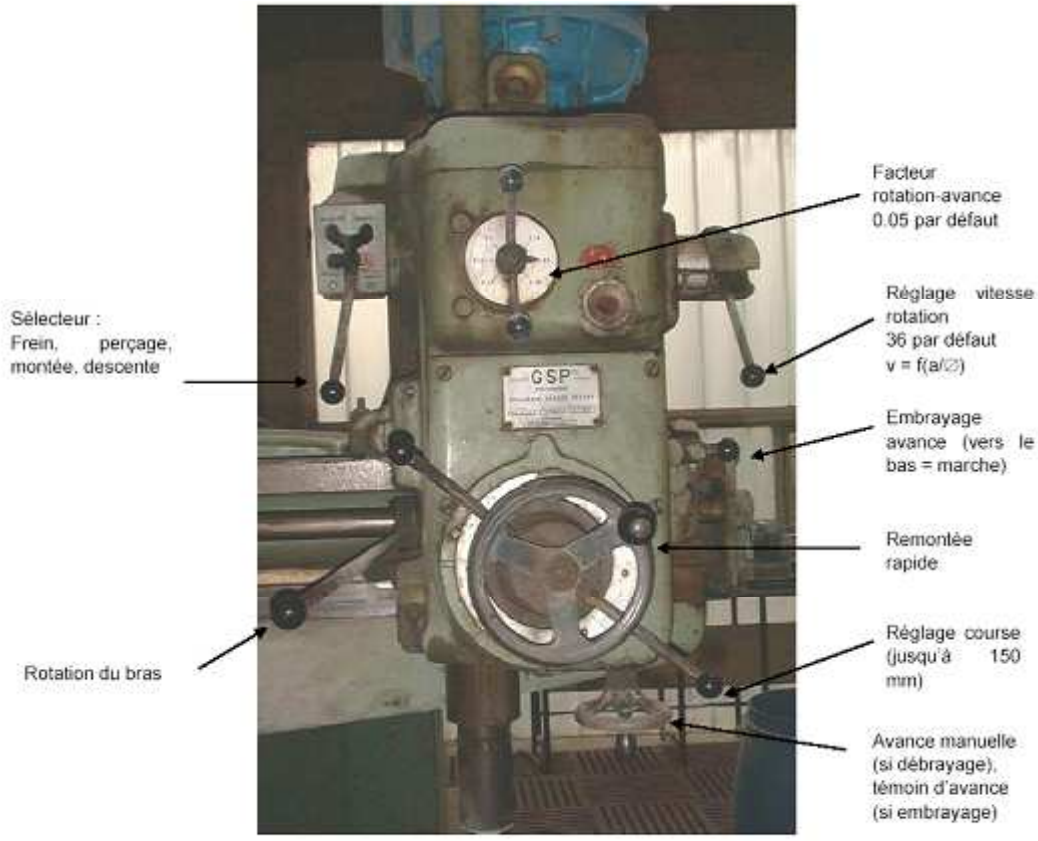


Figure 3.2 : Carotteuse

Echantillon (ϕ_{ext}=100 mm et ϕ_{int}=25 mm)

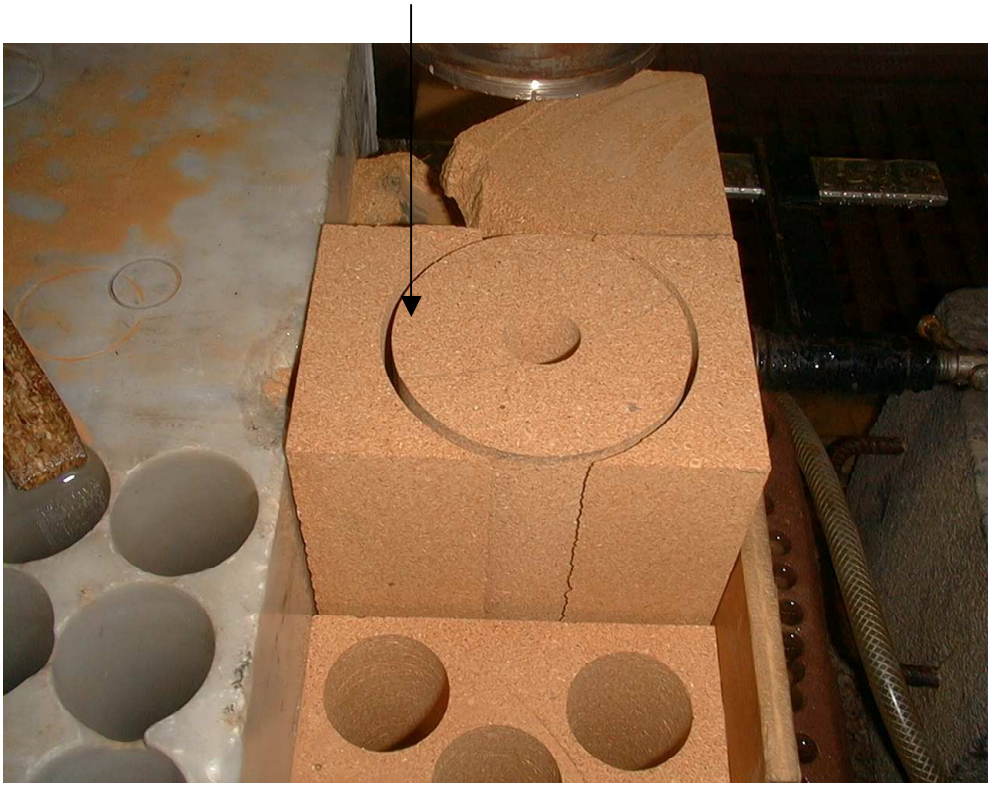


Figure 3.3 :Echantillon après carottage



Figure 3.4 : Rectifieuse

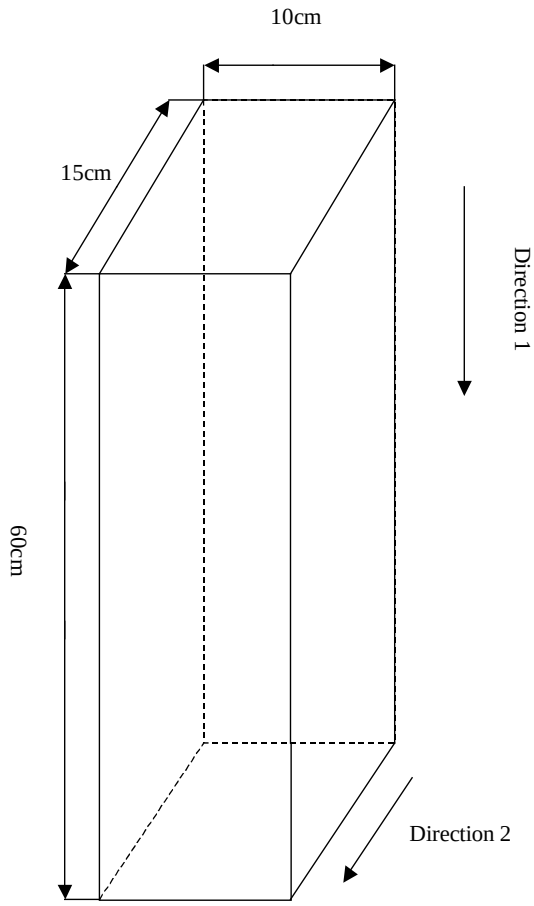


Figure 3.5 : Directions du carottage

3.5.2. Essais uniaxiaux

Nous avons effectué 9 essais uniaxiaux au laboratoire LIRIGM (Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique) pour mesurer la résistance en compression uniaxiale, le module d'Young et le coefficient de Poisson et pour étudier le comportement du matériau. Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau 3.3.

Direction	Echantillon	Jauge	σ_c (MPa)	ν	E (GPa)
2	Mono1	Non	17,11	----	
2	Mono2	Non	22	----	
2	Mono3	Oui	19,61	0,196	9,2
1	Mono4	Oui	18,2	0,17	7,1
1	Mono5	Non	19,87	----	----
1	Mono6	Non	22	----	----
2	Mono7	Oui	19,60	0,179	7,9
1	Mono8	Oui	16,73	0,165	7,4
1	Mono9	Oui	16,53	0,199	9,6
1	moyen		18,6	0,18	8

Tableau 3.3 : Caractéristiques mécaniques

Le rapport $\frac{H}{D}$ vaut deux (H=80mm et D=40mm) pour tous les essais.

Les résultats d'un des essais sont présentés sur les Figures 3.6 et 3.7. Le comportement du matériau est élastique fragile et le mode de rupture en condition uniaxiale est la rupture axiale et la rupture horizontale (bande de compaction) (Figure 3.8). Les déformations axiales et transversales ont été mesurées par jauge CEA-06-125UN-120 (fabricant Vishay). La valeur de la pente de la courbe sur la Figure 3.6 est le module d'Young et la valeur absolue de la pente de la courbe sur la Figure 3.7 est le coefficient de Poisson.

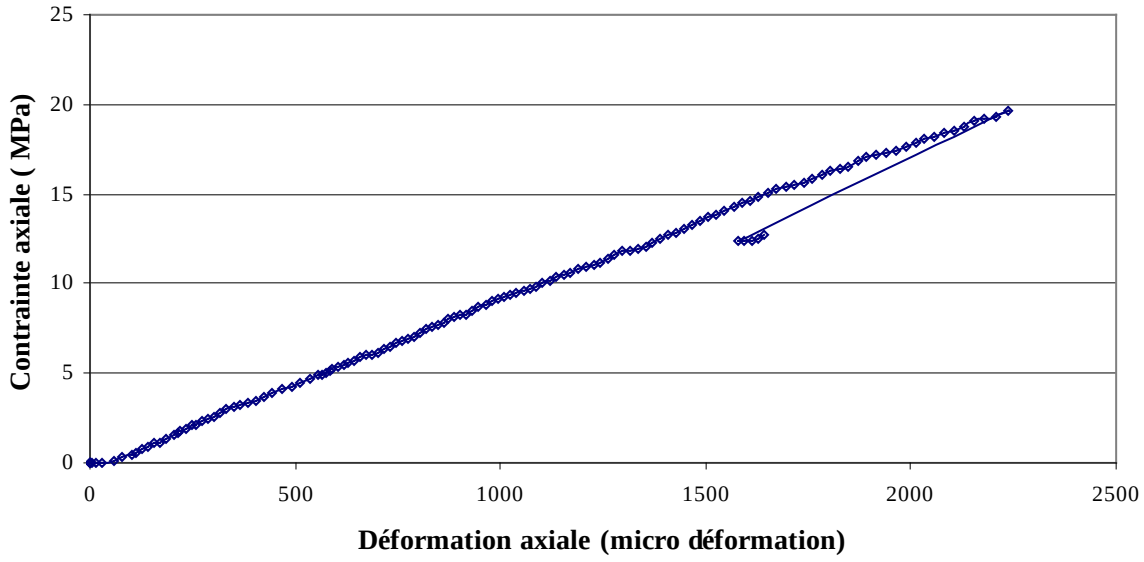


Figure 3.6 : Courbe de contrainte axiale-déformation axiale (essai Mono3)

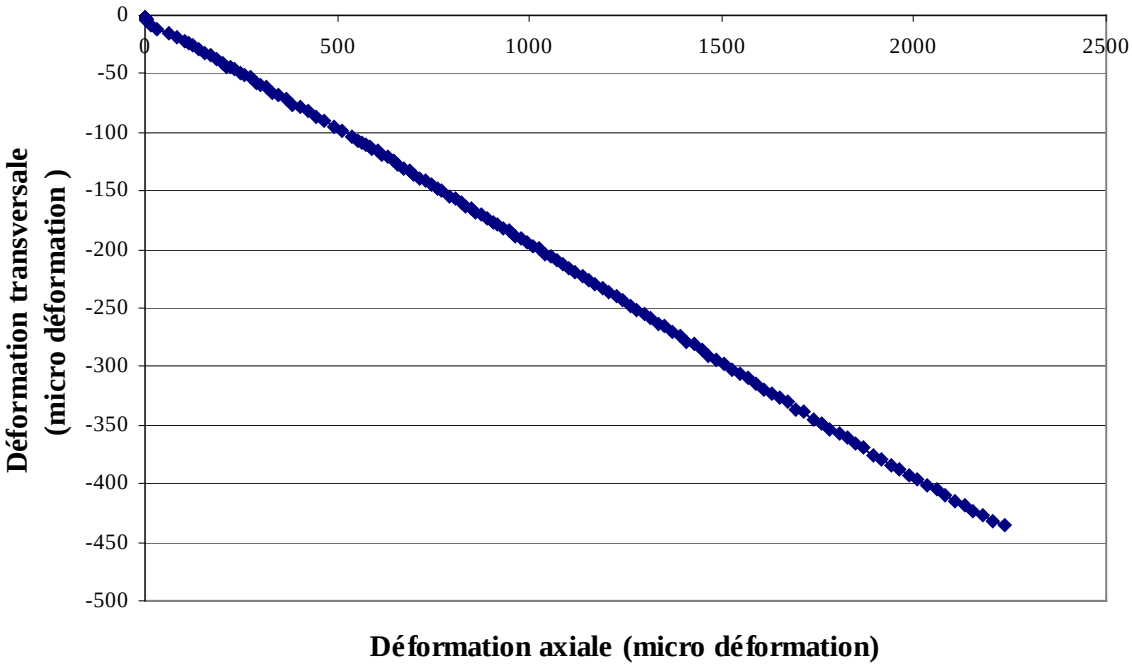


Figure 3.7 : Courbe de déformation transversale-déformation axiale (essai Mono3)

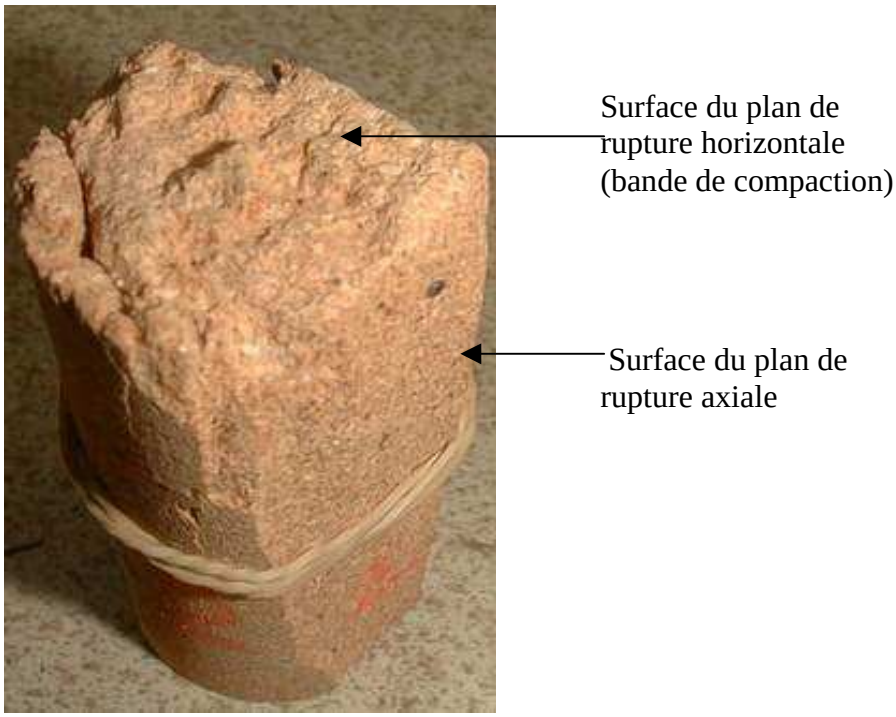


Figure 3.8 : Ruptures axiale et horizontale (échantillon Mono2)

3.5.3. Essais triaxiaux

Nous avons réalisé 7 essais triaxiaux (sans fluide interstitiel) au laboratoire LIRIGM pour déterminer les seuils de rupture.
Le coefficient de frottement (μ) est la pente de la surface de charge plastique dans le plan de la contrainte de cisaillement équivalente de Mises en fonction de la contrainte moyenne (Figure 3.9). Proche du chargement maximum, la surface de charge plastique est supposée proche de la surface de rupture et la valeur de μ est approximativement $\mu = \frac{dq/dp}{\sqrt{3}}$ [40]. La valeur de μ est positive aux basses pressions de confinement et négative aux hautes pressions de confinement pour les matériaux poreux. Les résultats d'essais (Figure 3.10) montrent que la valeur de μ est négative même aux basses pressions de confinement. Le matériau CPIR 09 est un matériau très poreux (porosité 46%) à base d'argile. La valeur négative de μ est fonction de la diminution de la résistance de cisaillement en raison de l'écrasement des grains. Le matériau CPIR 09 est peu résistant et fragile ce qui explique la valeur négative de μ aux basses pressions de confinement.
Les résultats son présentés dans le Tableau 3.4. Deux essais de compression isotrope ont été réalisés. Les autres essais sont des compressions déviatoires. La mesure des déformations n'a pas été réalisée car nous n'en avions pas les moyens techniques. La mesure du déplacement axial a cependant été possible avec un comparateur mais les valeurs mesurées sont peu précises. Nous avons utilisé une cellule triaxiale dont la capacité maximale est de 60 MPa et une presse de type AMSLER d'une capacité maximum de 3000 kN (Figures 3.11 et 3.12)

Echantillon	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	P (MPa)	q (MPa)
Tri1	10	27,61	15,87	17,61
Tri2	24,33	24,33	24,33	0
Tri3	20	27,69	22,56	7,69
Tri4	7	25,35	13,11	18,35
Tri5	3	24,58	9,6	20
Tri6	23,73	23,73	23,73	0
Tri7	11	27	16,33	16

Tableau 3.4 : Résultats des essais triaxiaux

Où :

$p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$

$q=\sigma_1-\sigma_3$

Nous avons observé des bandes de compaction (Figure 3.13) après la rupture de tous les échantillons (sauf essai hydrostatique). Généralement, les bandes de compaction sont observées dans des roches très poreuses.

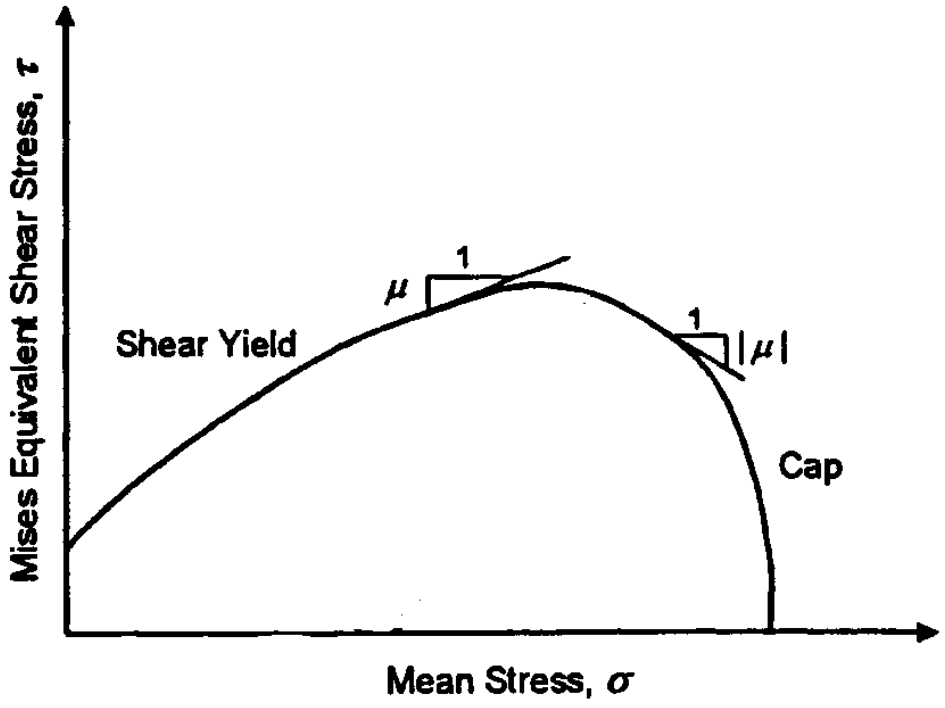


Figure 3.9 : Surface de charge plastique pour des grès poreux [23]

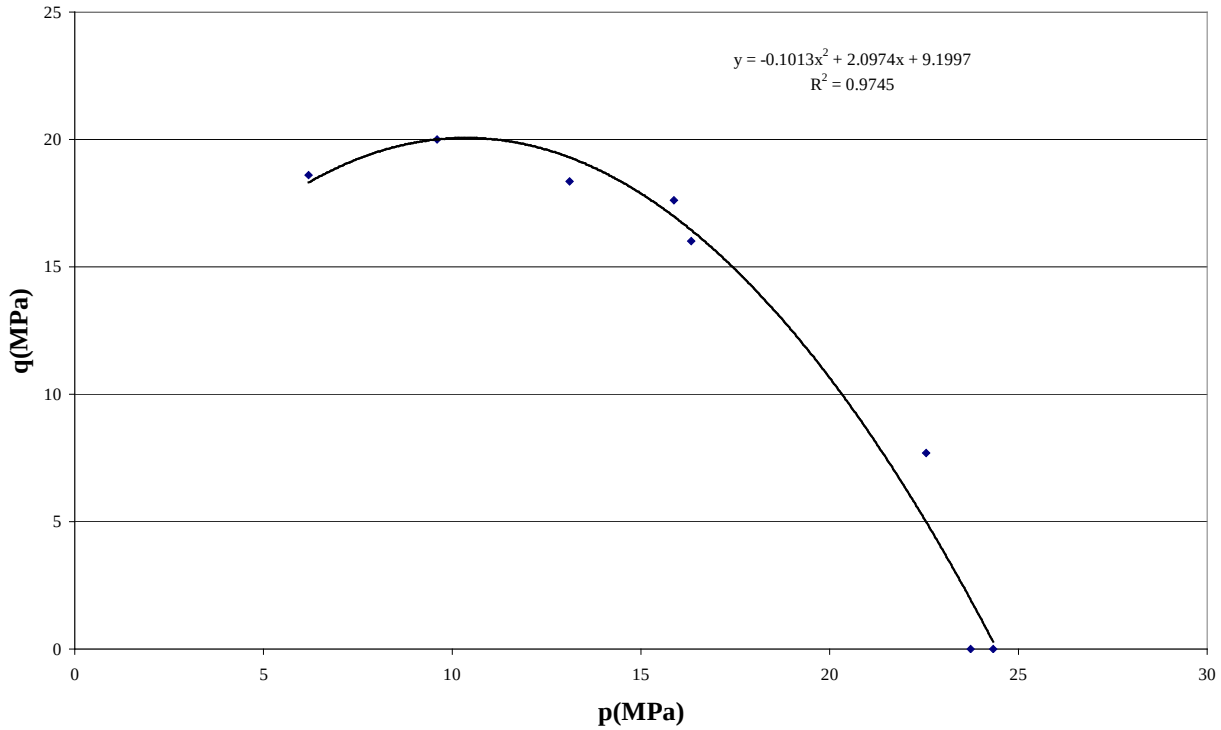


Figure 3.10 : Les seuils de rupture

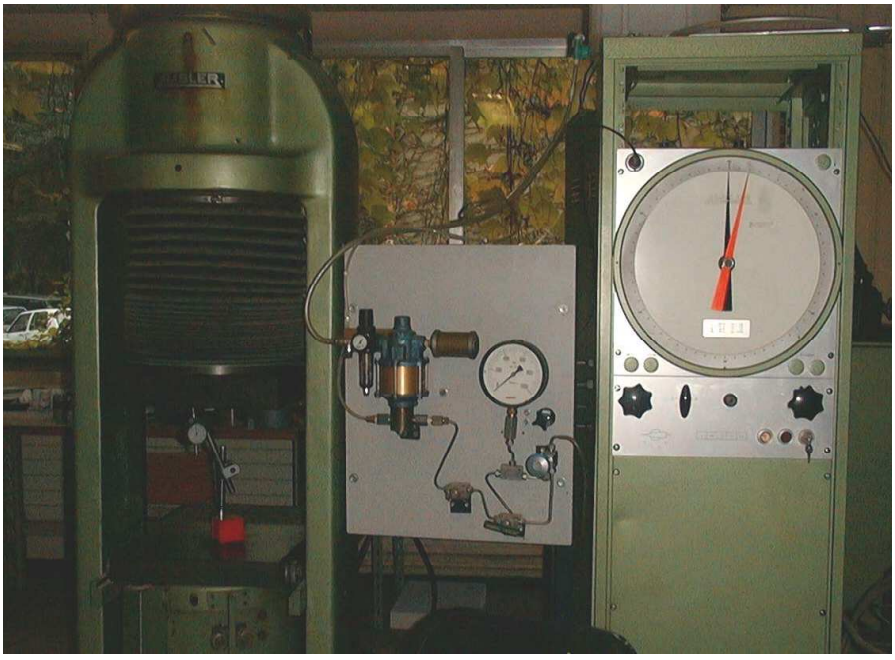


Figure 3.11 : Presse AMSLER (Capacité 3000 kN)



Figure3.12 : Cellule triaxiale sous la presse (Capacité de la cellule 60 MPa)



Figure 3.13 : Mode de rupture (échantillon Tri5)

3.5.4. Essais de perméabilité

Deux essais ont été réalisés au laboratoire LIRIGM pour mesurer la perméabilité radiale des échantillons creux. Les dimensions des échantillons sont présentées dans le Tableau 3.5.

Echantillon	l (mm)	l' (mm)	r_e (mm)	r_i (mm)
1	130	80	50	12
2	125	75	50	12

Tableau 3.5. Dimensions des échantillons

Où:

l : longueur d'échantillon

l' : longueur effective du trou

r_e : rayon externe

r_i : rayon interne

La relation (3-1) est utilisée pour calculer la perméabilité [29].

$$K = \frac{Q\mu \ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi l' P_f} \qquad (3\text{-}1)$$

Où :

μ : viscosité dynamique de fluide (MPa/s)

K : perméabilité (m^2)

Q : débit sorti de l'échantillon (m^3/s)

P_f : Pression de fluide (MPa)

Les résultats des essais sont dans les Tableau 3.6 et 3.7.

P (MPa)	K (m^2)	P (MPa)	K (m^2)
0,02	$1,22.10^{-13}$	0,07	$7,62.10^{-14}$
0,03	$1,02.10^{-13}$	0,1	$7,47.10^{-14}$
0,04	$8,94.10^{-14}$	0,15	$6,28.10^{-14}$
0,05	$8,63.10^{-14}$		

Tableau 3.6 : Résultats de l'essai sur Echantillon 1

P (MPa)	K (m^2)	P (MPa)	K (m^2)
0,02	$1,39.10^{-13}$	0,05	$9,7.10^{-14}$
0,03	$1,25.10^{-13}$	0,07	$8,5.10^{-14}$
0,04	$1,05.10^{-13}$	----	----

Tableau 3.7 : Résultats de l'essai sur Echantillon 2

Les composants utilisés lors de ces essais figurent sur les pages suivantes (Figures 3.14, 3.15, 3.16 et 3.17).



Figure 3.14 : Cellule d'essai



Figure 3.15 : Echantillon d'essais de perméabilité

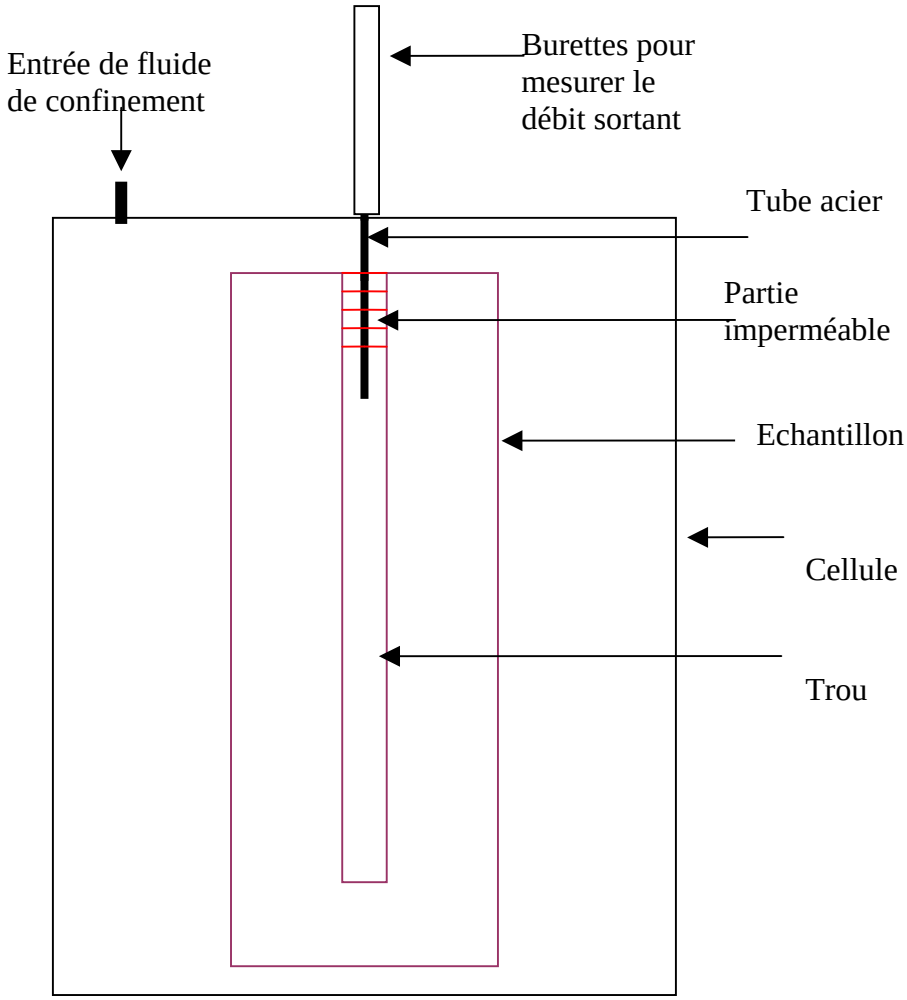


Figure 3.16 : Schéma du dispositif expérimental



Figure 3.17 : Système de régulation de la pression

3.6. Conclusion

Ce chapitre décrit les caractéristiques techniques du matériau, les étapes de préparation des échantillons et les résultats des mesures des caractéristiques du matériau. Ces caractéristiques sont utilisées dans les calculs nécessaires pour choisir les composantes du dispositif expérimental et pour étudier les résultats expérimentaux sur cylindres creux.
Les résultats des essais montrent que ce matériau est très poreux (porosité moyenne 46%), son comportement est élastique fragile et avec l'augmentation de la pression de confinement, la résistance du matériau diminue. Le mode de rupture en essai monoaxial (confinement nul) est une combinaison de ruptures axiales (fissures ouvertes) et horizontales (bandes de compaction) et en essai triaxial on observe des bandes de compaction (les bandes de compaction sont observées dans les grès très poreux en condition de haute pression de confinement [2]).

Chapitre 4

Développement et mise au point de l'installation de dispositif expérimental

4.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'équipement du dispositif et le système d'acquisition de données utilisées pour les essais sans et avec fluide interstitiel.

4.2. Installation du dispositif (essai sans fluide interstitiel)

4.2.1. Cellule triaxiale

Nous avons utilisé une cellule triaxiale développée initialement par le professeur Jean Paul Boehler [3] pour étudier la stabilité des trous de forages pétroliers dans les roches (Figure 4.1 et Figure 4.2). C'est une cellule spéciale qui est utilisée pour étudier le mécanisme de rupture des ouvertures souterraines. Il y a 8 passages de fils de jauge (4 passages pour installer 4 jauges dans le trou central et 4 passages pour installer 4 jauges sur la surface externe de l'échantillon).

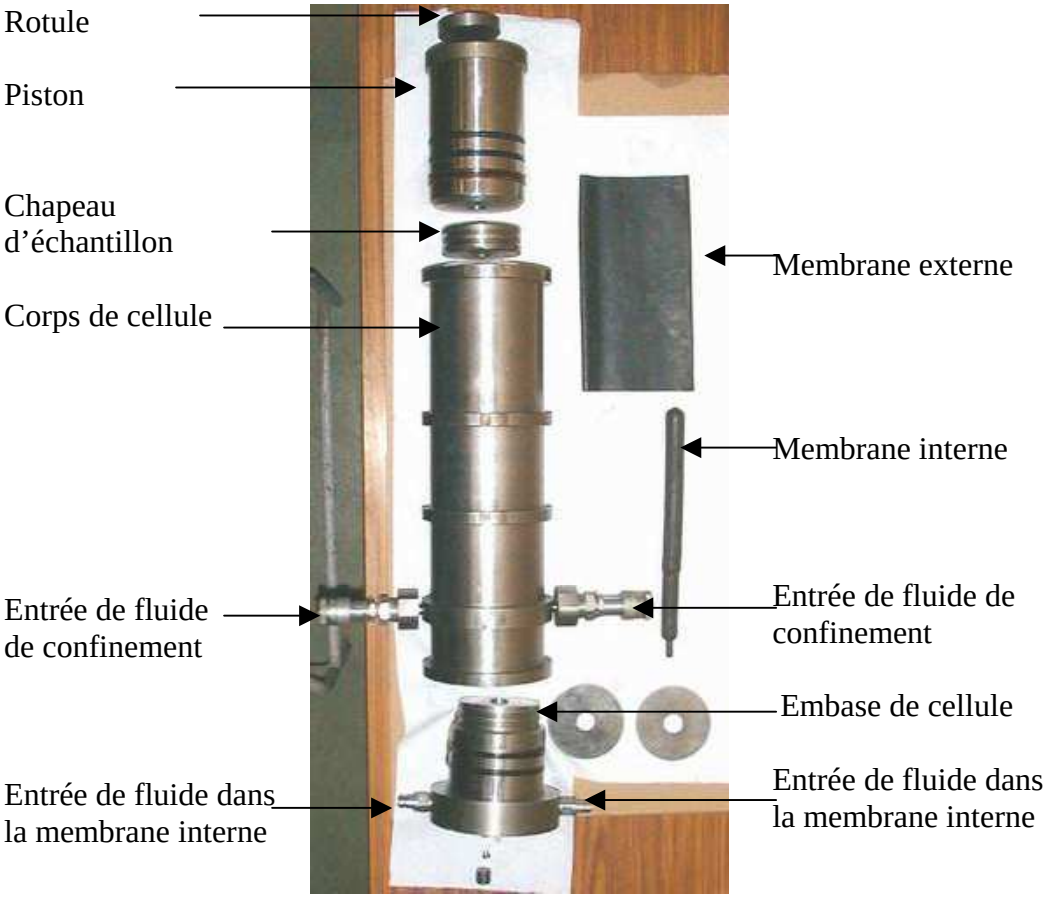


Figure 4.1 : Cellule triaxiale

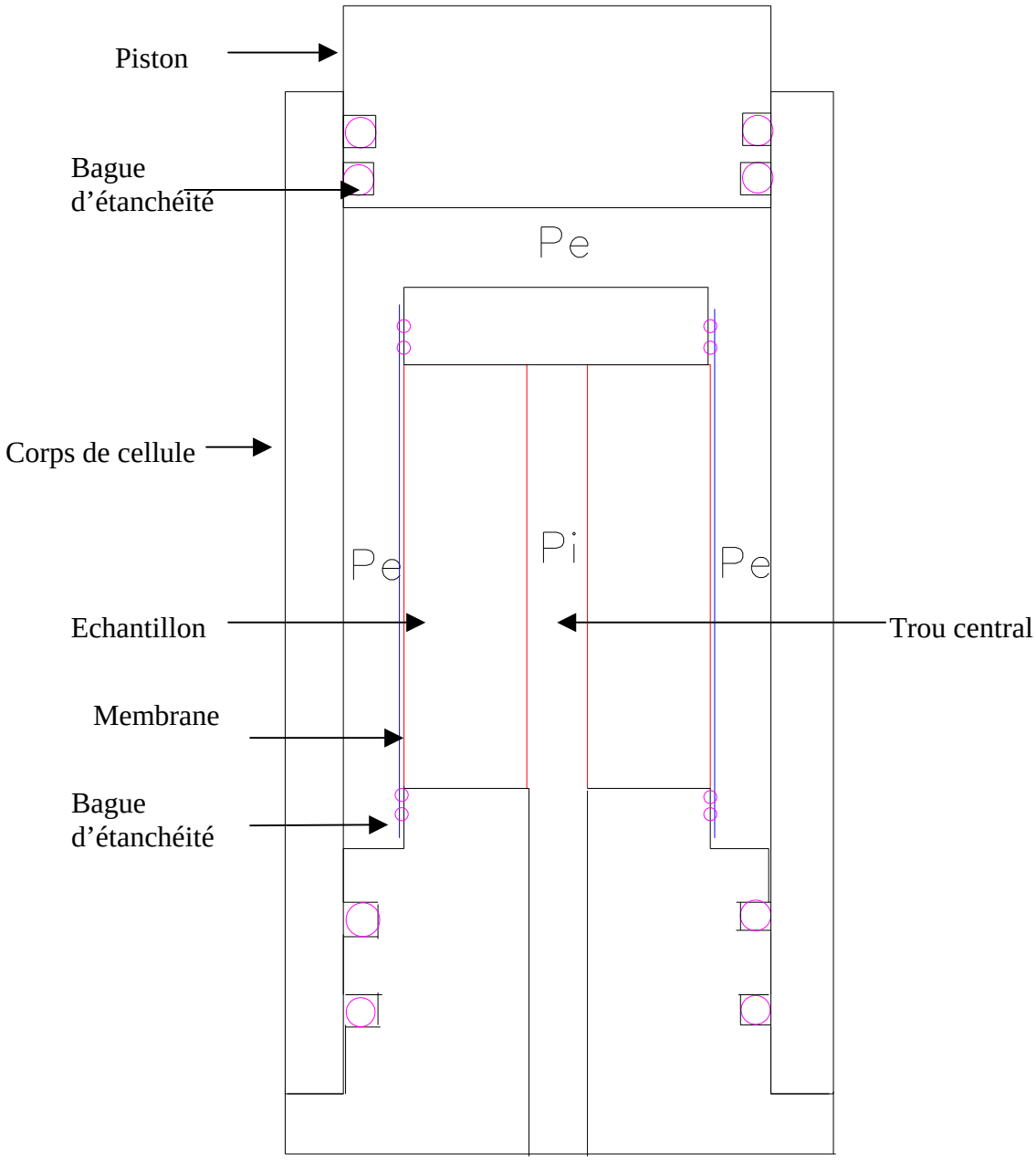


Figure 4.2 : Schéma de la cellule après le montage

4.2.2. Pompe à main

Cette pompe a été utilisée pour maintenir la pression constante autour de l'échantillon lorsque la pression interne diminue. Les caractéristiques de cette pompe (fabricant : ENERPAC) figurent ci- dessous (Tableau 4.1 et Figure 4.3) :

Modèle	Pression maximale (MPa)	Volume par course 1er vitesse(cm^3/course)	Volume par course 2ème vitesse (cm^3/course)	Capacité d'huile utile(litre)
P-142	70	3,62	0,9	0,33

Tableau 4.1 : Caractéristiques de la Pompe



Figure 4.3 : Pompe à main P-142

4.2.3. Capteur de pression

Deux capteurs de pression de type TP 14- 700 bars (fabricant : RDP Electronics) ont été utilisés pour mesurer les pressions externe et interne (Tableau 4.2 et Figure 4.4).

Modèle	Précision(%)	Signal(mA)	Gamme de Mesure(MPa)	Alimentation DC (V)
TP-14	0,1	4-20	70	12- 24

Tableau 4.2 : Caractéristiques des capteurs de pression



Figure 4.4 : Capteur de pression

4.2.4. Membranes

Les membranes sont en néoprène. Deux types de membrane sont utilisées pour l'étanchéité entre l'éprouvette et la pression interne et entre l'éprouvette et la pression externe (pour appliquer la contrainte totale). Les caractéristiques de ces membranes sont présentées dans le Tableau 4.3.

Type	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)
Membrane externe	95	280	10/10
Membrane interne	25	330	12/10

Tableau 4.3 : Caractéristiques de ces membranes

4.2.5. Presse

Une bâti de capacité 500 kN a été utilisé (Figure 4.5).



Figure 4.5 : Presse

4.2.6. Générateur de pression

Le générateur de WF40080 (fabricant : Wykeham Farrance) produit une pression maximale de 140 MPa et peut maintenir une pression constante autour de l'échantillon. Le réglage et la régulation se fait à l'aide de poids. (Tableau 4.4 et Figure 4.6) :
Nous avons utilisé ce générateur pour produire les pressions externe et interne.

Modèle	Capacité de Réservoir(litre)	Précision de manomètre(MPa)	Maximum de sortie de pompe (CC/min)	Type de l'huile
WF40080	12	± 0,5	75	Tellus 32

Tableau 4.4 :Caractéristiques de générateur de pression

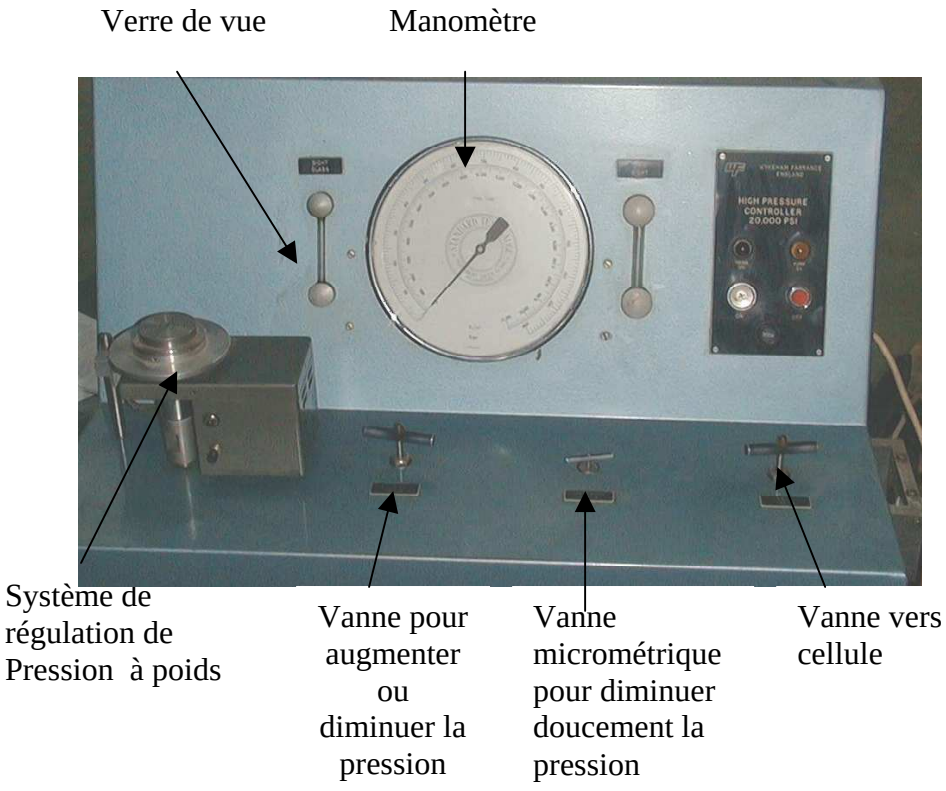


Figure 4.6 : Générateur de pression

4.2.7. Jauge de déformation

On a utilisé les jauges 1-XY31- 3/350 (fabricant : HBM). Elles ont une grille active de longueur 3 mm et de largeur 3 mm. L'élongation maximale de ces jauges est ± 5%. Les caractéristiques de ces jauges figurent ci-dessous (Tableau 4.5 et Figure 4.7) :

Type de Jauge	Longueur de grille(chaque jauge) (mm)	Largeur de grille(chaque jauge) (mm)	Résistance(Ω)	Maximum excitation(V)
1- XY 31-3/350	3	3	350	10

Tableau 4.5 : Caractéristiques des Jauges

4.2.8. Colles

Deux colles sont utilisées :

a) Colle Z 70 (fabricant : HBM) : C'est un mono composant, à la base d'éther alkyle d'acide cyanoacryle. Le temps de son durcissement est compris entre 60 et 120 secondes pour une température ambiante de 20°C. Son allongement maximum est de 6% et la pression d'un pouce pour durcir est suffisante.
b) Colle GA-2 (fabricant : Vishay micro mesure) : La colle consiste en deux composants, la colle GA-2 peut polymériser en 6 heures à une température ambiante de 24°C. Cette colle en résine époxy est préparée par addition d'un durcisseur à une résine. Son allongement maximum est de 10% à 15% .

Le collage des jauges est une opération très délicate. Il doit être adapté aux types de surface des roches, laquelle peut être lisse ou rugueuse. En cas de trop grande rugosité, il faut toujours effectuer une préparation de la surface, c'est-à-dire un nettoyage et l'application d'une couche de colle pour préparer les surfaces. Nous avons utilisé la colle GA-2 en pellicule mince, laquelle est poncée avec du papier abrasif jusqu'à l'apparition des grains de la roche. Avant le collage sur la colle GA-2, la position définitive de la jauge doit être marquée à l'aide de traits très fins. La colle Z70 a été utilisée pour coller la jauge sur la surface préparée (Figure 4.8). Pour le collage des jauges internes, nous avons marqué à l'aide de traits très fins sur un tube en plastique la position définitive de la jauge. Ensuite, on colle un ruban adhésif double face épais sur le tube et la jauge sur le ruban adhésif. Puis, on dépose une goutte de colle Z70 sur le verso de la jauge. On introduit le tube dans le trou et on appuie sur ses deux extrémités. La jauge est collée sur la surface de l'échantillon au bout de deux minutes. Enfin, on retire le tube.



Figure 4.7 : Jauge 1-XY31-3/350



Figure 4.8 : Jauge après collage

4.2.9. Acquisition de données

4.2.9.1. Conditionnement et acquisition

L'acquisition choisie (Fieldpoint, fabricant : National Instruments) est constituée de modules : Module AI-110, module SG-140, module Fieldpoint 1600 (Figure 4.9).

1) Module Fieldpoint 1600 :
Le Module de communication ethernet avec PC.

2) Module AI-110 (module d'entrées analogiques):
C'est un module analogique 8 voies de résolution 16 bits, les gammes utilisables sont présentées ci-dessous :
± 60 mV, ± 300 mV, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V, 0-1V,0-5 V et 0-10 V
0-20 mA, 4-20 mA et ± 20 mA
Deux capteurs de pression sont connectés à ce module.

3) Module SG-140 (module de jauge) :
C'est un module analogique 8 voies de résolution 16 bits. L'excitation est programmable pour chaque voie avec des valeurs 2,5, 5 et 10 V.

Nous pouvons choisir une des quatre sensibilités des ± 3,5, ± 7,5, ± 30 et ± 60 mV/V. Il y a deux options pour le câblage des jauges : 1) demi-pont 2) pont complet. Nous avons eu besoin d'un montage quart de pont obtenu avec le demi-pont complété par une résistance 350Ω calibrée.

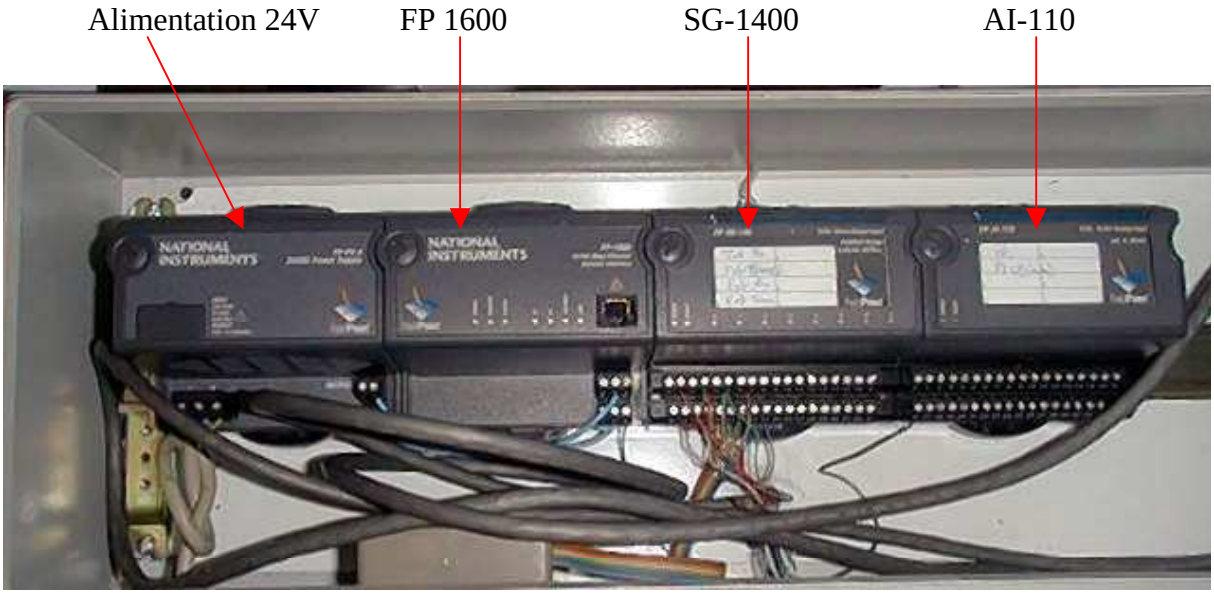


Figure 4.9 : Acquisition

4.2.9.2. Programme d'acquisition (Logiciel Labview)

Labview est un langage de programmation graphique qui utilise des icônes à la place de lignes de texte pour créer des applications. Contrairement aux langages de programme textuel où les instructions déterminent l'exécution du programme, Labview utilise une programmation par flux de données dans laquelle les données déterminent l'exécution. Labview est entièrement équipé pour faciliter la communication avec du matériel tel que le GPIB, VXI, PXI, RS-232, RS-485 et des périphériques d'acquisition de données enfichables. La Programmation d'acquisition a été effectué par C. Rousseau.

4.3. Installation du dispositif (essai avec fluide interstitiel)

4.3.1. Cellule triaxiale

La cellule initiale n'étant pas prévue pour réaliser des essais drainés, sept pièces ont été conçues, usinées et ont été soit mises à la place de pièces existantes (par exemple: le piston), soit ont été ajoutées au système pour permettre le drainage (Figure 4.10 et Figure 4.11). Les plans des pièces mécaniques sont présentés dans l'annexe VII.
A l'aide d' un tube acier, le fluide interstitiel entre dans la plaque. Il y a 12 rainures (Figure 4.10) pour passer le fluide dans la plaque. Cette pièce (pièce numéro 1) est vissée dans l'autre pièce (Pièce numéro 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'épaisseur de 0,3 mm autour de la plaque. Cette méthode a été choisie pour éviter le percement de la membrane. L'échantillon est enveloppé dans une gaine constituée d'un matériau drainant (cf. paragraphe 4.3.10) 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 (Figure 4.11). A la sortie de la paroi interne, à pression atmosphérique, il s'écoule le long de celle-ci. Il est collecté en pied

d'échantillon à la sortie du trou central, et il est recueilli dans un récipient posé sur une balance.



Figure 4.10 : Nouvelles pièces usinées et l'échantillon cylindrique creux

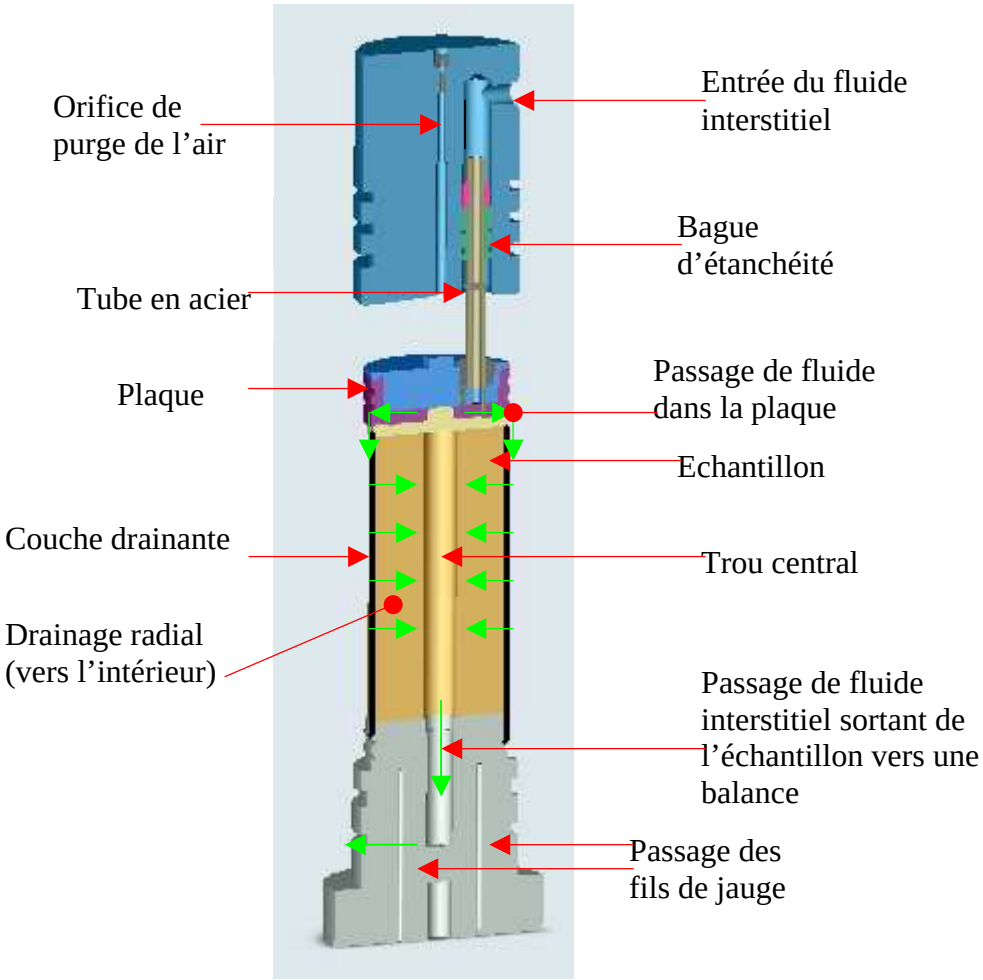


Figure 4.11 : Schéma des parties du montage internes à la cellule

4.3.2 Pompe

La pompe CAT 3CP1130 (fabricant : Barthod pompe) a généré la pression interstitielle (Tableau 4.6 et Figure 4.12). C'est une pompe volumétrique.

Modèle	Débit (l/min)	Pression(MPa)	Vitesse rotation(t/min)	Puissance monteur (kW)	Pression alimentation (MPa)
CAT 3CP1130	1,9	1-7	356	0,55	0,1

Tableau 4.6 : Caractéristiques de la Pompe

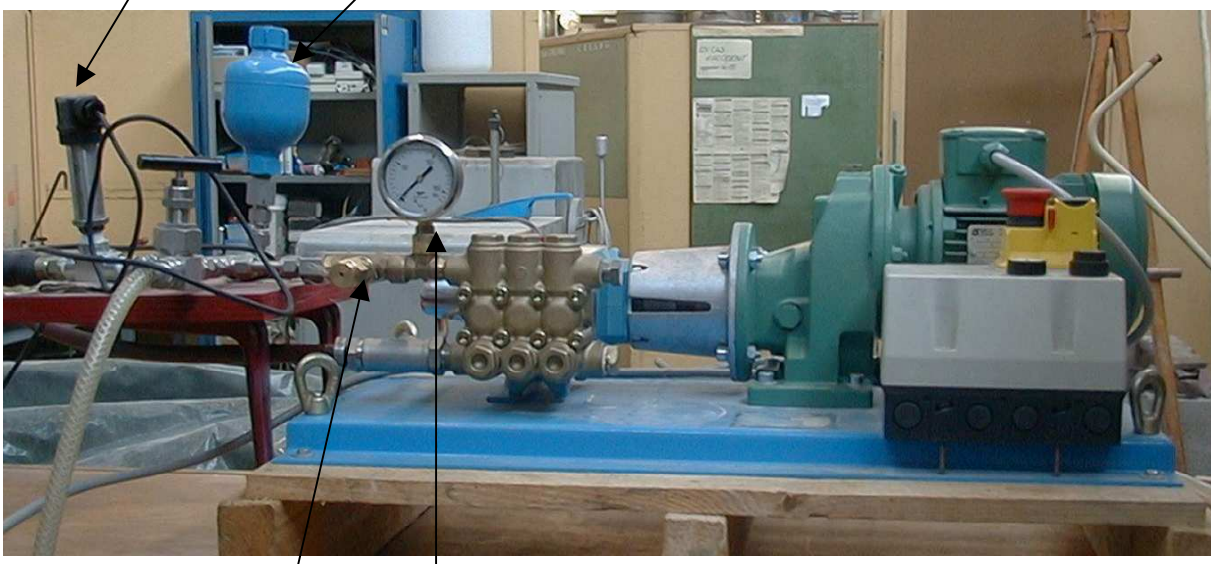


Figure 4.12 : Pompe CAT 3CP1130

4.3.3. Capteur de pression

Le capteur de pression TP 14-100 bars (fabricant : RDP Electronics) a été monté pour mesurer la pression interstitielle externe (Tableau 4.7)

Modèle	Précision(%)	Signal(mA)	Gamme de Mesure(MPa)	Alimentation DC (V)
TP-14	0,1	4-20	10	12- 24

Tableau 4.7 : Caractéristiques des capteurs de pression

4.3.4. Membrane

Une membrane (Tableau 4.8) en néoprène a été utilisée pour l'étanchéité entre l'éprouvette et la pression externe (pour appliquer la contrainte totale).

Type	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)
Membrane externe	95	320	10/10

Tableau 4.8 : Caractéristiques de la membrane

4.3.5. Presse

Idem 4.2.5.

4.3.6. Générateur de pression

Idem 4.2.6.

4.3.7. Balance

La Balance DP 60 (fabricant : Ohaus) a été utilisée pour mesurer la masse de fluide sortant de l'échantillon (Tableau 4.9). Elle communique avec le PC via une liaison RS232.

Type	Capacité (kg)	Précision (g)	Dimension plateau(cm)
DP60	60	2	40x50

Tableau 4.9 : Caractéristiques de la balance

4.3.8. Jauge et colles

Idem 4.2.7 et 4.2.8.

4.3.9. Acquisition de données

Idem 4.2.9.

4.3.10. Matériau drainant

Dans un premier temps, nous avons utilisé du sable comme matériau drainant mais la membrane perçait dans des pores d'échantillon entraînant une chute de la pression de confinement. De plus, le sable posait des problèmes avec les pièces mécaniques. Finalement, Nous avons retenu la méthode suivante :
Une couche de "scotch brite" placée autour de l'échantillon (Voir annexe VI, Figure VI.7). C'est le matériau drainant et autour du scotch brite, une couche de géotextile pour éviter que la membrane se perce à cause des pores d'échantillon (Voir annexe VI, Figure VI.8).

4.3.11. Fluide interstitiel

Des échantillons sont saturés à l'huile hydraulique Azolla ZS 32. Dans ce cas, l'interaction chimique entre le fluide et la roche diminue par rapport à l'eau. Pour tenir compte du fait que la viscosité du fluide varie avec la température, nous avons effectué les mesures (Voir annexe VI).

4.4. Obtention des grandeurs mesurées (essai sans fluide interstitiel)

Il y a mesure de :
1)Deux pressions (pression externe et pression interne)

2)Quatre déformations (déformation axiale et transversale sur la surface interne et déformation axiale et transversale sur la surface externe de l'échantillon).
L'interface utilisateur du programme Crylaxis (nom du dispositif expérimental) est présenté sur la Figure 4.13.

4.4.1. Etalonnage des capteurs de pression

A l'aide d'un capteur de référence du laboratoire 3S, Nous avons étalonné les deux capteurs de pression pour l'acquisition de pressions externe et interne (courbes d'étalonnage : annexe I**)**. On a obtenu les coefficients 'a'et 'b' (P=ai+b, P : pression et i : le courant mesuré). Une fois les coefficients saisis, le programme Labview calcule la pression pour chaque valeur de i.

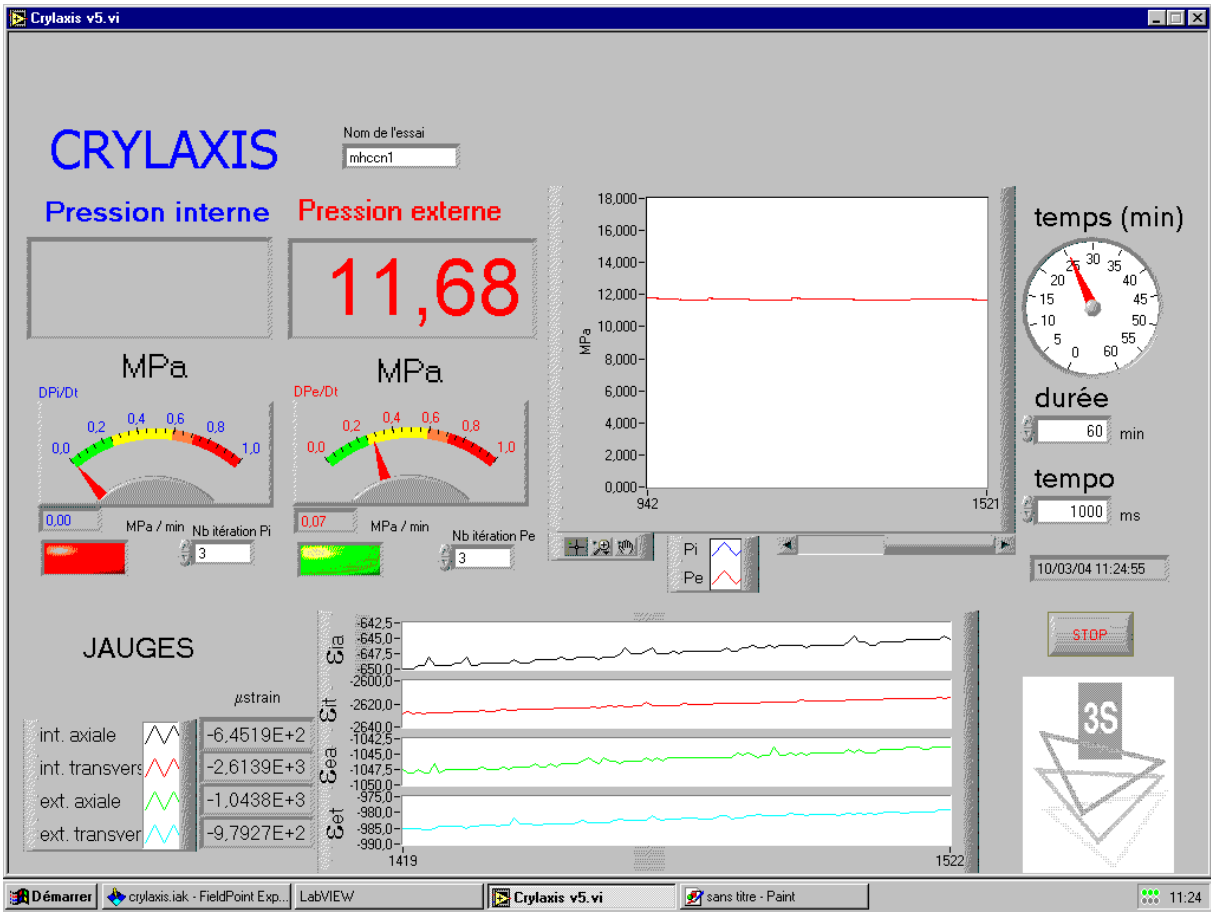


Figure 4.13 : Interface utilisateur du programme Crylaxis V5.vi

4.4.2. Etalonnage des voies du module de jauge

Pour l'acquisition des quatre déformations (déformation axiale et transversale sur la surface interne et déformation axiale et transversale sur la surface externe de l'échantillon).

Nous avons :

$$\frac{\Delta R}{R}=a(\frac{\Delta V}{V})+b$$

$$\frac{\Delta R}{R}=K\varepsilon$$

où :

R : résistance de jauge
K : Facteur de jauge (donné par le fabricant)

Nous avons fait varier la résistance de jauge active à l'aide d'un simulateur Vishay / Ellis-40. Cet appareil est utilisé pour étalonnage des voies du module de jauge (Figure 4.14). Nous avons obtenu les coefficients 'a' et 'b' (courbe d'étalonnage : annexe II) après avoir tracé la courbe $\frac{\Delta R}{R}$ par rapport à $\frac{\Delta V}{V}$ (sortie d'acquisition). Une fois les coefficients saisis, le programme Labview calcule la déformation pour chaque valeur de $\frac{\Delta V}{V}$.



Figure 4.14 : Simulateur Vishay / Ellis-40

4.5. Obtention des grandeurs mesurées (essai avec fluide interstitiel)

Il y a mesure de :
1) Deux pressions (pression externe et pression interstitielle externe),
2) Quatre déformations (déformation axiale et transversale dans le trou et déformation axiale et transversale sur la surface externe de l'échantillon)
3) Volume de fluide interstitiel sortant de l'échantillon.
L'interface utilisateur du programme Crylaxis (nom du dispositif expérimental) est présentée sur la Figure 4.15.

4.5.1. Etalonnage des capteurs de pression

A l'aide d'un capteur de référence du laboratoire 3S , Nous avons étalonné le capteur de pression pour l'acquisition de la pression interstitielle externe (courbe d'étalonnage : annexe I). Nous avons obtenu les coefficients 'a'et 'b' (P=ai+b).

4.5.2. Etalonnage des voies du module de jauge

Idem 4.4.2.

4.5.3. Volume de fluide sortant de l'échantillon

Le calcul du volume de fluide est très facile. La masse de fluide sortant de l'échantillon est mesurée par une balance DP 60 qui a une interface RS232.

Nous avons :

$$V=\frac{M}{\rho}$$

ρ : masse volumique de fluide

Labview calcule le volume pour chaque valeur de M.

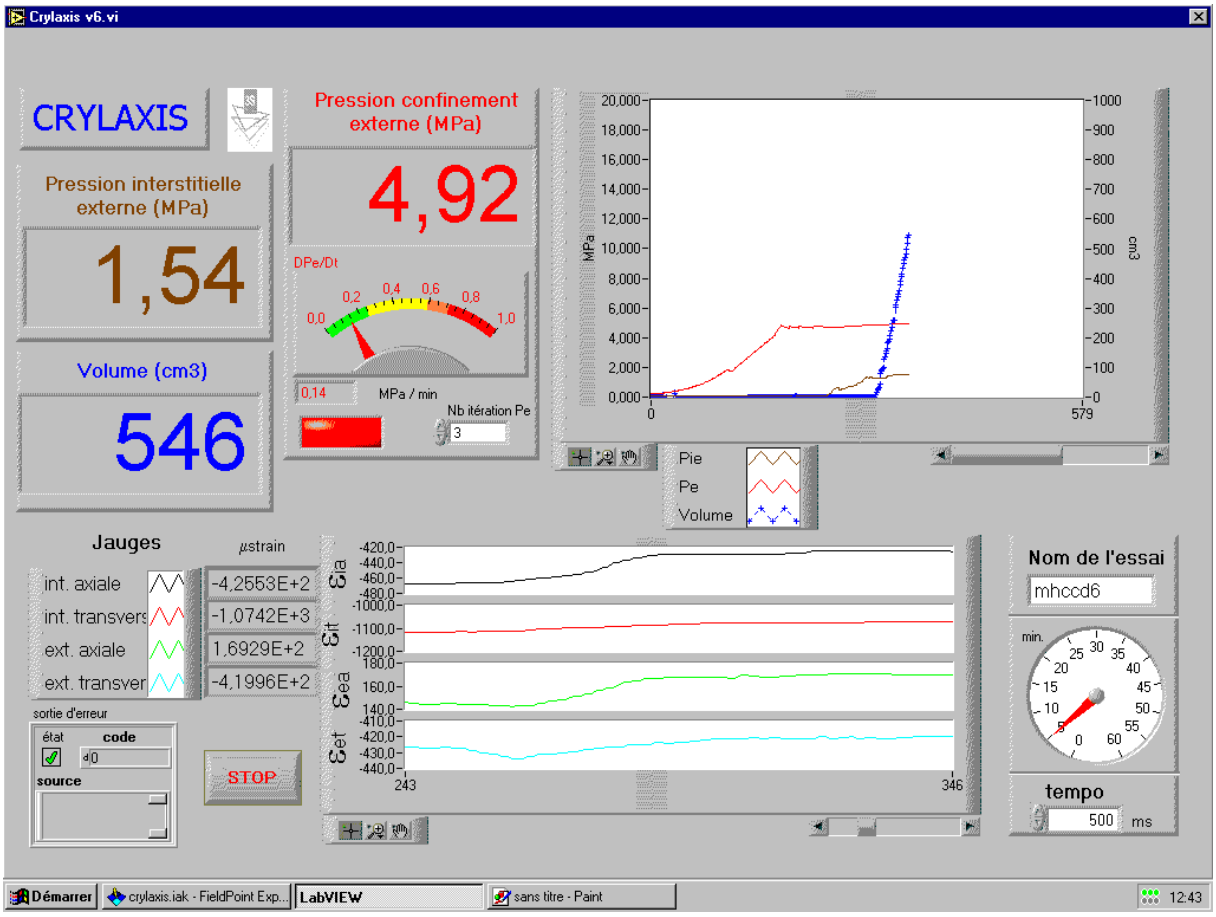


Figure 4.15 : Interface utilisateur du programme Crylaxis V6.vi

4.6. Conclusion

Ce chapitre décrit les caractéristiques des composantes du dispositif expérimental, les composantes et le programme d'acquisition, la méthode d'obtention des grandeurs mesurées dans les deux cas, sans et avec pression interstitielle. Ce dispositif est performant et permet de réaliser des essais sur des cylindres creux à paroi épaisse sous deux conditions distinctes :

1) Essais sans fluide interstitiel :

a) Essais sous une pression de confinement croissante.
b) Essais sous une pression de confinement constante et une pression interne décroissante.

2) Essais avec écoulement radial convergent de fluide interstitiel (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):

a) Essais sous une pression de confinement croissante et une pression interstitielle externe constante.
b) Essais sous une pression de confinement constante et une pression interstitielle externe croissante.
On peut étudier la déformation et la rupture en parois de forages en condition sèche et 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.

Chapitre 5

Programme et résultats d'essais

5.1. Programme d'essais

Ce sous chapitre présente les types d'essais que nous avons réalisés sur des échantillons cylindriques creux en condition sans et avec fluide interstitiel.

5.1.1. Types d'essais (essais sans fluide interstitiel)

Deux types d'essai sont réalisés en condition sans fluide interstitiel (en condition sèche).

5.1.1.1. Essais sous une pression externe croissante (sans pression interne)

La pression externe (pression de confinement) a été augmentée jusqu'à la rupture (pour trouver la pression $P_{e,}$ Provoquant la rupture en paroi interne du cylindre sous l'action d'une pression externe).

5.1.1.2. Essais sous une pression externe constante et une pression interne décroissante

Les essais comprennent deux étapes : une première étape pendant laquelle la pression externe et la pression interne ont été augmentées en même temps jusqu'à une valeur P_{max} (Supérieur à la valeur P_e), une deuxième étape pendant laquelle la pression externe est maintenue constante à la valeur P_{max} et la pression interne est diminuée jusqu'à la rupture pour modéliser l'ouverture souterraine pendant le creusement (Figure 5.1).

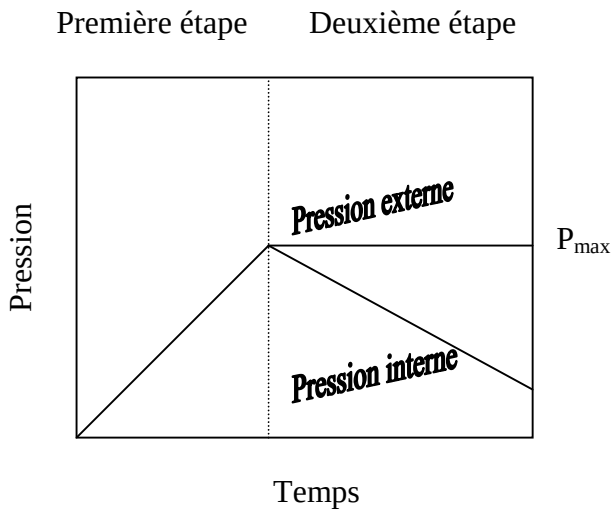


Figure 5.1. : Deuxième type d'essai

5.1.2. Types d'essais (essais avec fluide interstitiel)

Deux types d'essai sont réalisés avec écoulement radial de fluide interstitiel.

5.1.2.1. 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) a été augmentée jusqu'à une valeur $P_{1,}$ une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe a été augmentée à la valeur $P_{f,}$ une troisième étape pendant laquelle la pression externe a été augmentée jusqu'à la rupture pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production tandis que la différentiel de pression interstitielle (différence entre la pression interstitielle externe et la pression interstitielle dans le trou) est constant (Figure 5.2). La pression interstitielle dans le trou est nulle.

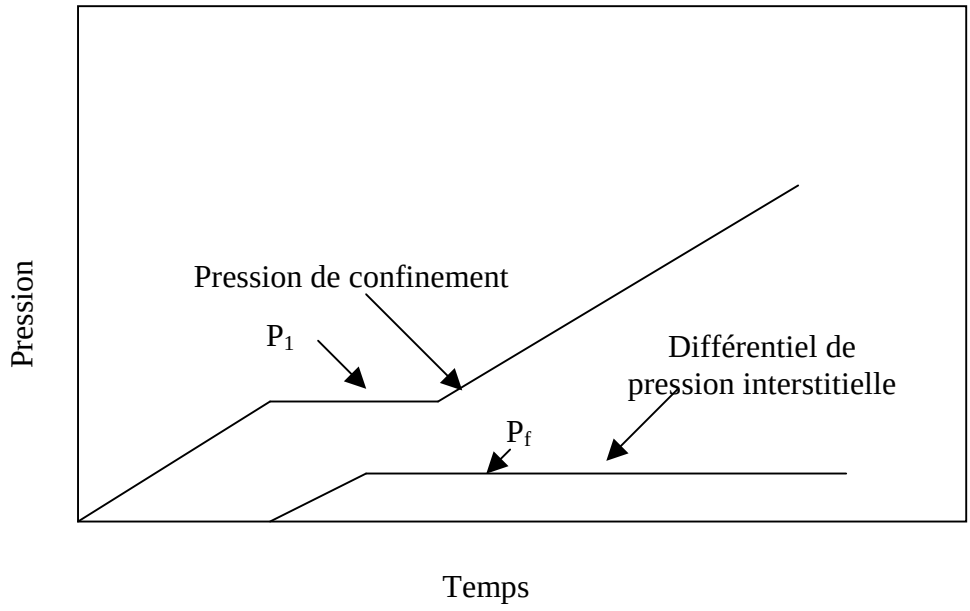


Figure 5.2 : Les étapes d'un essai

5.1.2.2. 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) a été augmentée jusqu'à une valeur $P_{1,}$ une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe a été augmentée à la valeur $P_{f,}$ une troisième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe a été augmentée par palier jusqu'à la rupture pour modéliser le puits de pétrole pendant sa phase de production tandis que la différentiel de pression interstitielle (différence entre la pression interstitielle externe et la pression interstitielle dans le trou) augmente pendant la production de pétrole (Figure 5.3). 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.

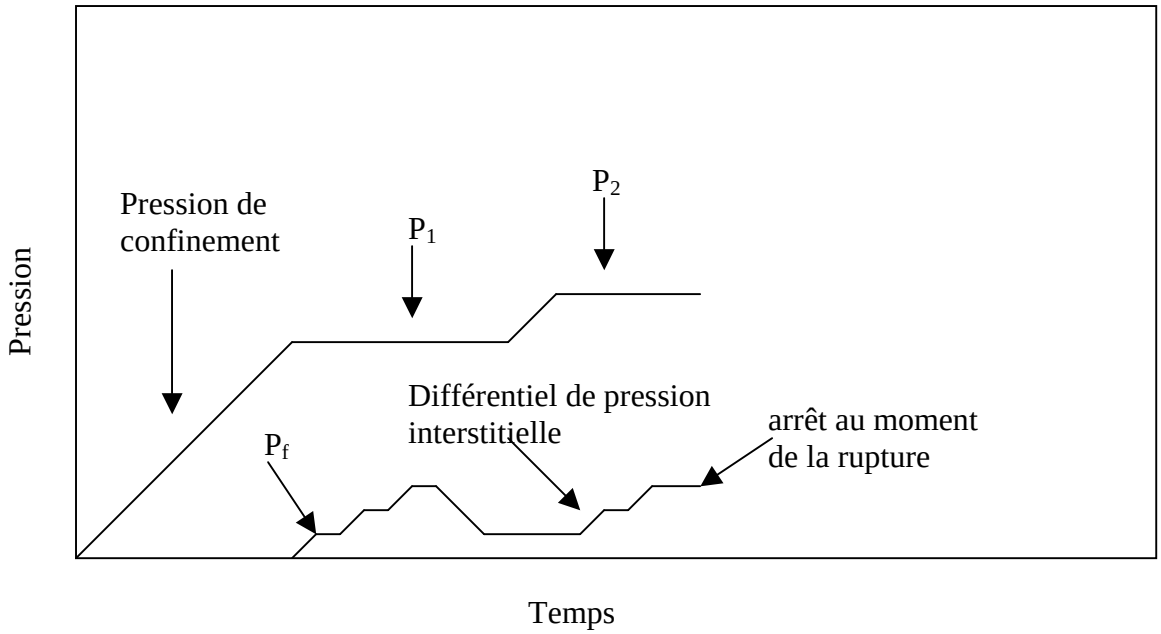


Figure 5.3 : Les étapes d'un essai

5.2. Résultats d'essais (essais sans fluide interstitiel)

Nous avons réalisé 12 essais en condition sèche (sans fluide interstitiel) mais certains essais n'ont pu être menés jusqu'à la fin en raison de problèmes techniques.
Avant de réaliser les essais principaux (voir sous-chapitre 5.1.1.1 et 5.1.1.2), nous avons effectué un essai pour explorer le comportement du matériau.
Les caractéristiques de l'échantillon et les résultats de cet essai sont présentés dans le Tableau 5.1 et sur les Figures 5.4 et 5.5.
Nous avons augmenté la pression externe (pression de confinement) jusqu'à 11,65 MPa ensuite nous avons diminué la pression externe jusqu'à 3 MPa (Figure 5.4). Les résultats montrent que la courbe de déchargement coïncide assez bien avec la courbe chargement. En conséquence, nous pouvons dire que le comportement du matériau dans ce cas est élastique jusqu à la rupture.
Le comportement à court terme est présenté sur la Figure 5.5. Nous avons encore augmenté la pression externe jusqu'à 7.8 MPa puis après 10 minutes (temps d'attente) la pression externe est augmentée jusqu'à 11,7MPa ensuite après 15 minutes (temps d'attente) elle est augmentée jusqu'à la rupture (P_e=12,9 MPa).

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	173
Diamètre externe (mm)	98,9
Diamètre interne (mm)	25,53
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$9{,}3.10^{-4}$

Tableau 5.1 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccn1)

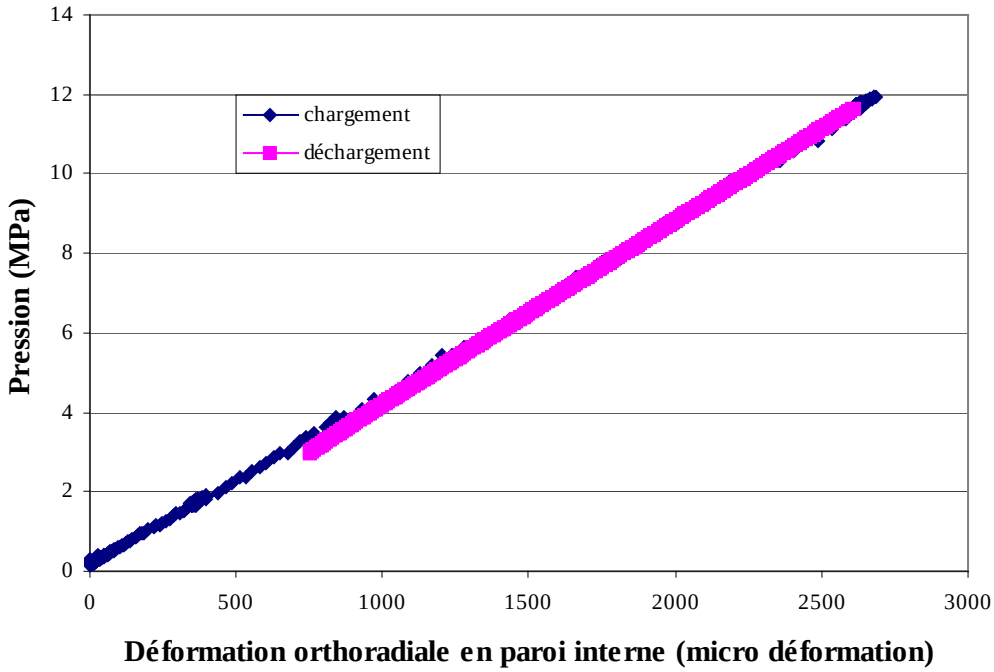


Figure 5.4 : Essai sous une pression externe croissante sur cylindre creux (chargement-déchargement) (essai mhccn1)

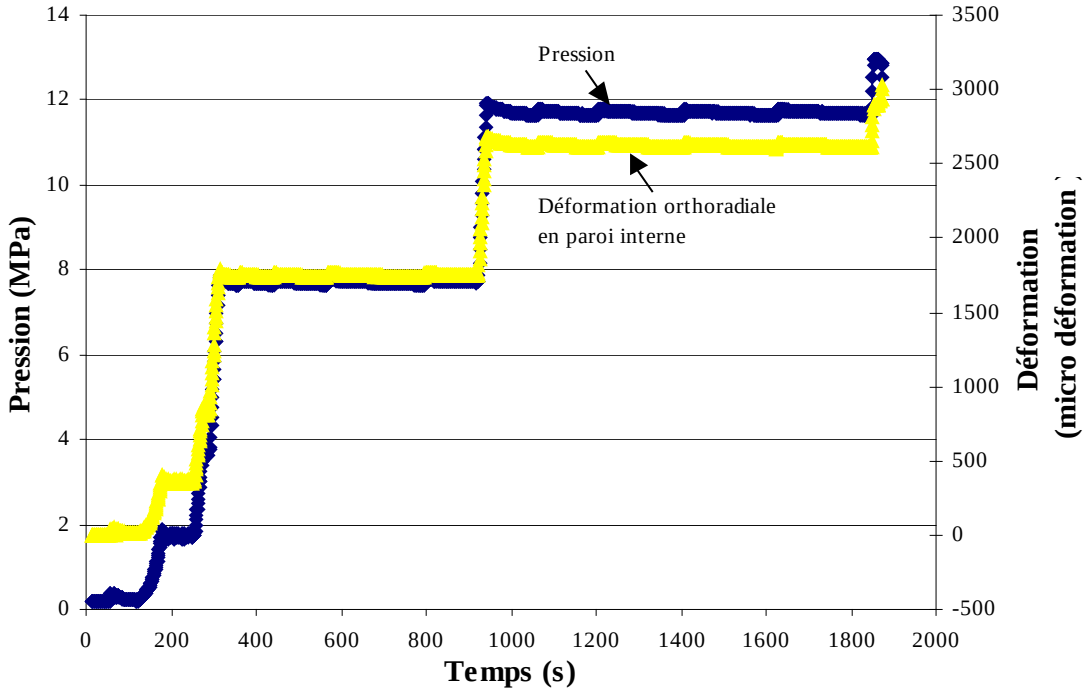


Figure 5.5 : Essai sous une pression externe croissante sur cylindre creux (essai mhccn1)

5.2.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante

Les résultats d'un essai typique sont présentés dans cette partie et les résultats des autres essais sont présentés dans l'annexe III. Les caractéristiques de l'échantillon sont données dans le Tableau 5.2.
Les déformations axiale et orthoradiale en paroi interne et sur la surface externe de l'échantillon sont mesurées (Figures 5.6 et 5.7). L'échantillon s'est fracturé à la pression externe de 13,2 MPa. Nous avons observé une paire de plans de rupture radiaux (Figure 5.8).
Nous avons observé des lames minces sous une loupe binoculaire (laboratoire LGIT) qui est équipée d'une caméra numérique DP 10 Olympus.

Matériau	CPIR09
Forme géométrique	Cylindre creux
Hauteur (mm)	200,5
Diamètre externe (mm)	98,9
Diamètre interne (mm)	25,70
Parallélisme (rad) < $1{,}25.10^{-3}$	$1{,}015.10^{-3}$

Tableau 5.2 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhcc3)

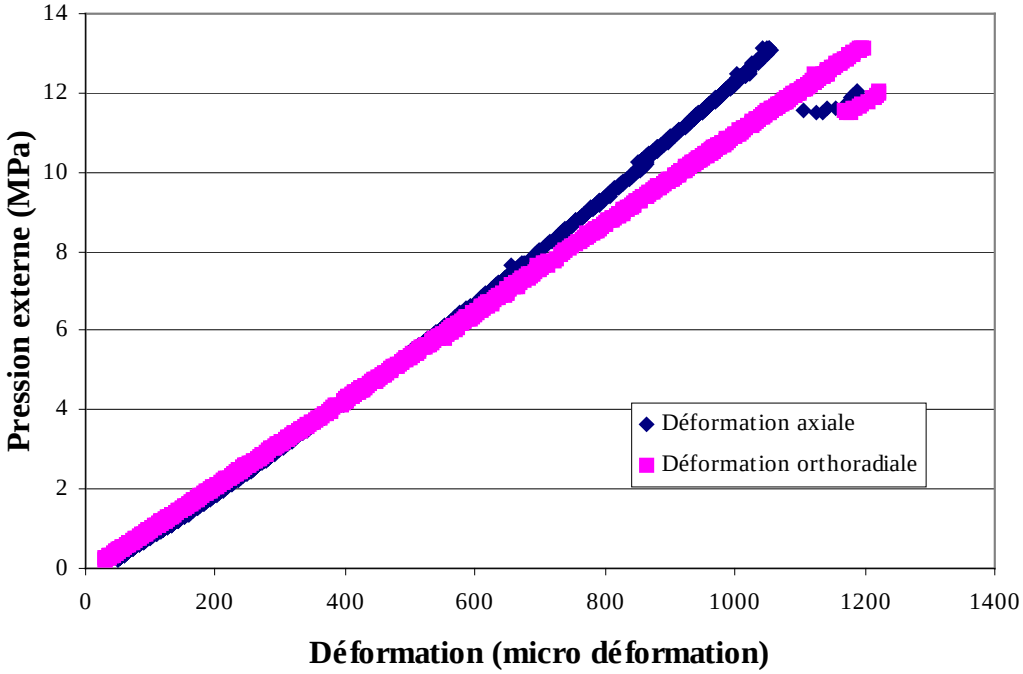


Figure 5.6 : Courbe de pression externe - déformation sur la surface externe de l'échantillon (essai mhcc3)

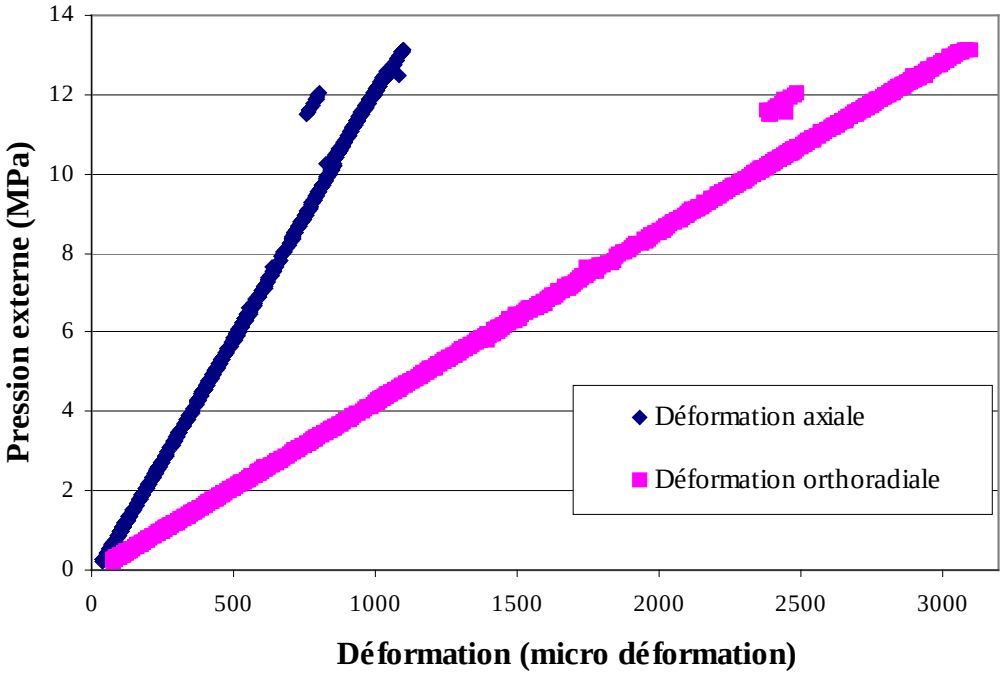


Figure 5.7 : Courbe de pression externe - déformation en paroi interne (essai mhcc3)

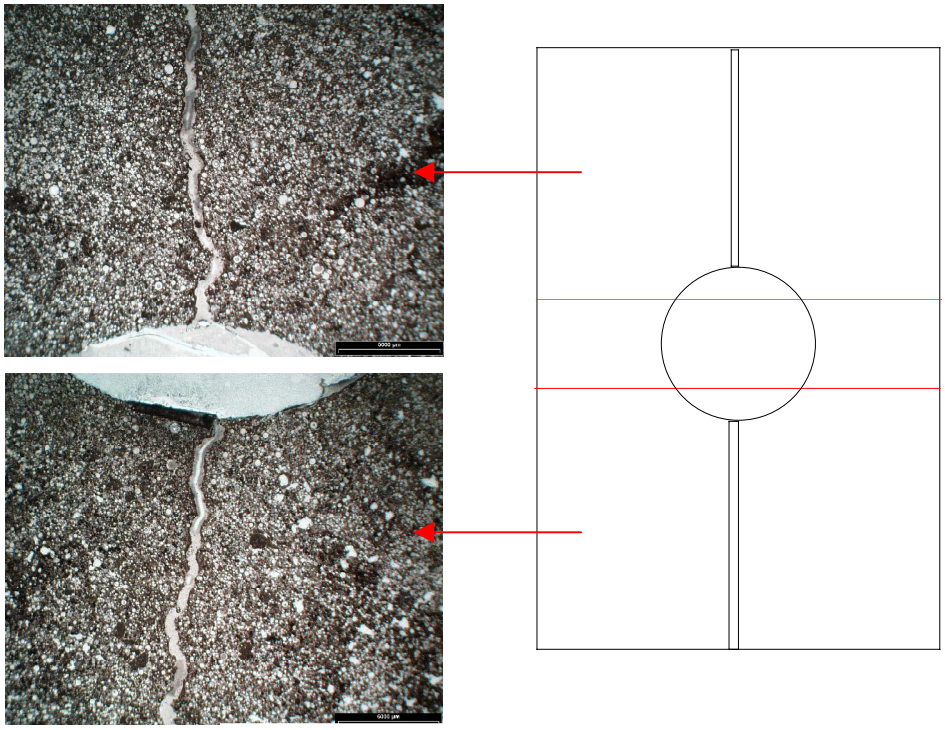


Figure5.8 : Mode de rupture (perpendiculaire à l'axe du trou)

5.2.2. Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interne décroissante

Les résultats d'un essai typique sont présentés dans cette partie et les résultats des autres essais sont présentés dans l'annexe III. Les caractéristiques de l'échantillon sont données dans le Tableau 5.3.

Matériau	CPIR09
Forme géométrique	Cylindre creux
Hauteur (mm)	200
∅ externe (mm)	98,90
∅ interne (mm)	25, 38
Parallélisme α (rad) < $1,25.10^{-3}$	$7,61.10^{-4}$

Tableau 5.3 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhcc9)

Dans une première étape, nous avons augmenté les pressions interne et externe en même temps jusqu'à 16,5 MPa (si la pression interne est augmentée plus de 18 MPa l'échantillon pourrait se fissurer en condition de compression isotrope. En conséquence, les essais sont réalisés avec une pression comprise entre 16,5 MPa et 17,7 MPa). Le comportement du matériau est isotrope (déformation axiale = déformation orthoradiale, Figure 5.9). Dans une deuxième étape, la pression externe est maintenue constante (P_{ext}=16,5MPa) et la pression interne est diminuée. L'échantillon s'est fracturé à la pression interne de 3,5MPa (Figure 5.10). Le mode de la rupture est identique à celui de essai précèdent (Figure 5.8).

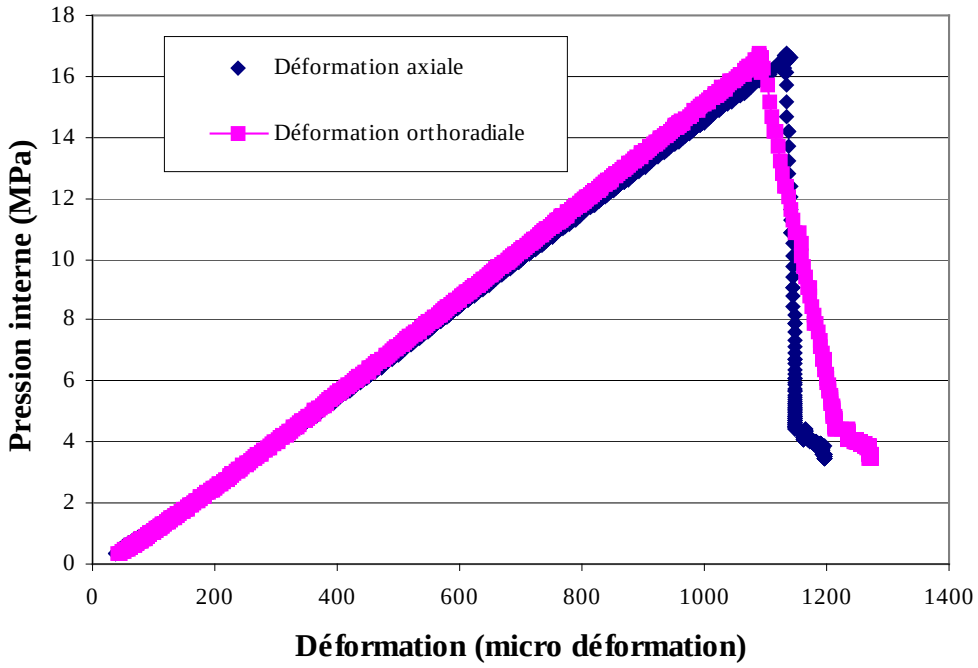


Figure 5.9 : Courbe de pression interne - déformation sur la surface externe de l'échantillon (essai mhcc9)

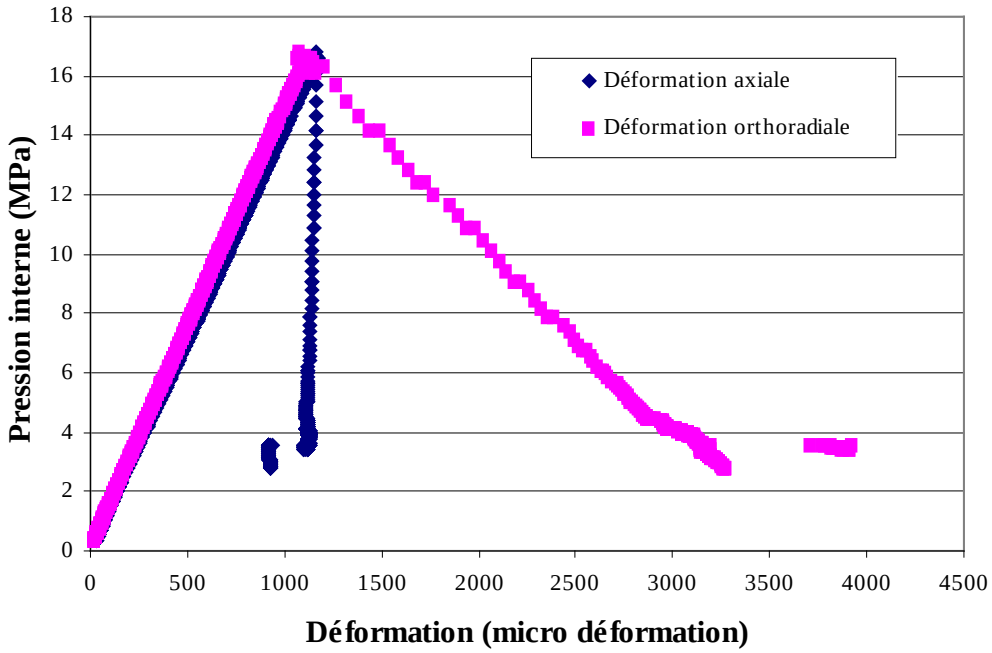


Figure 5.10 : Courbe de pression interne - déformation
en parois interne (essai mhcc9)

5.3. Résultats d'essais (essais avec fluide interstitiel)

Les résultats d'un essai sont présentés dans ce sous chapitre et les résultats des autres essais sont présentés dans l'annexe IV. Nous avons effectué 15 essais en condition avec fluide interstitiel mais certains essais n'ont pu être menés jusqu'au bout en raison de problèmes techniques.

5.3.1. 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 d'essai sont présentés dans le Tableau 5.4 et sur les Figures 5.11 - 5.13.
Les valeurs de la perméabilité diminuent avec l'augmentation de pression externe (les valeurs de la perméabilité ont été calculées avec la formule 3-1). On n'observe pas de changement de régime dans la courbe en approchant de la rupture.

$$K=\frac{Q\mu \ln\frac{r_e}{r_i}}{2\pi d' P_f}$$ (formule 3-1, voir la chapitre 3)

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	99,15
Diamètre interne (mm)	25,53
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}11.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau 5.4 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdnn3)

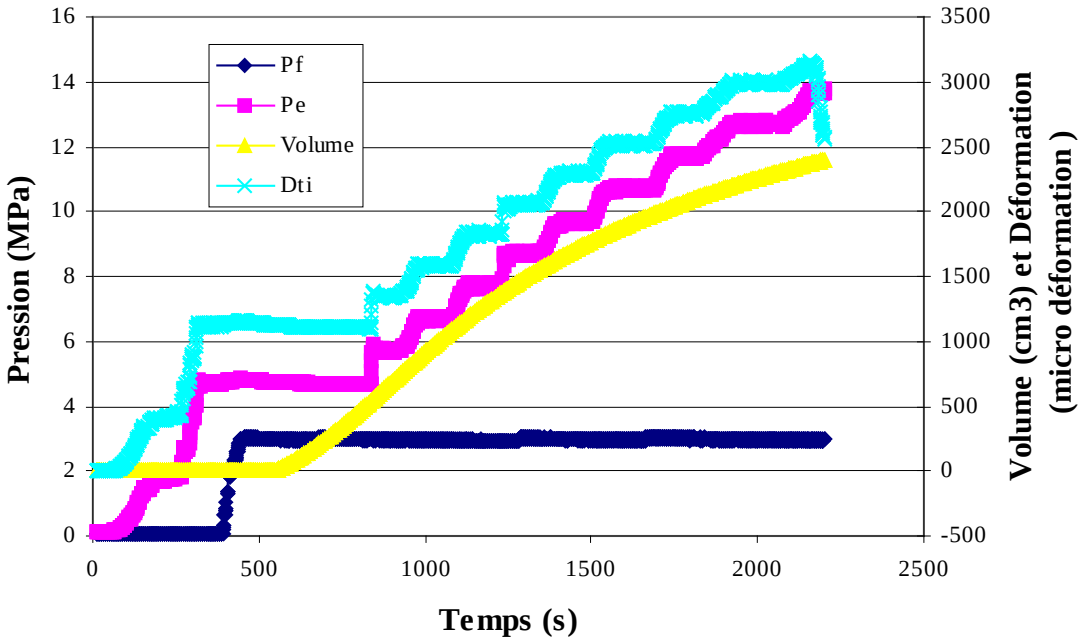


Figure 5.11 : Courbes de pression, déformation et volume
en fonction du temps (essai mhccdnn3)

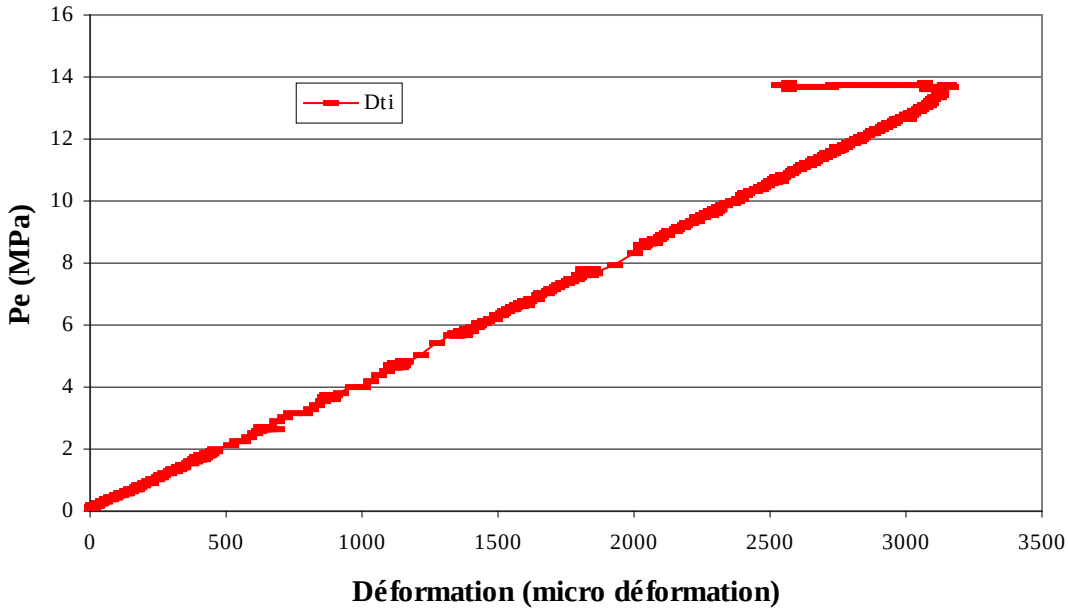


Figure 5.12 : Courbe de Pression externe - Déformation
(essai mhccdnn3)

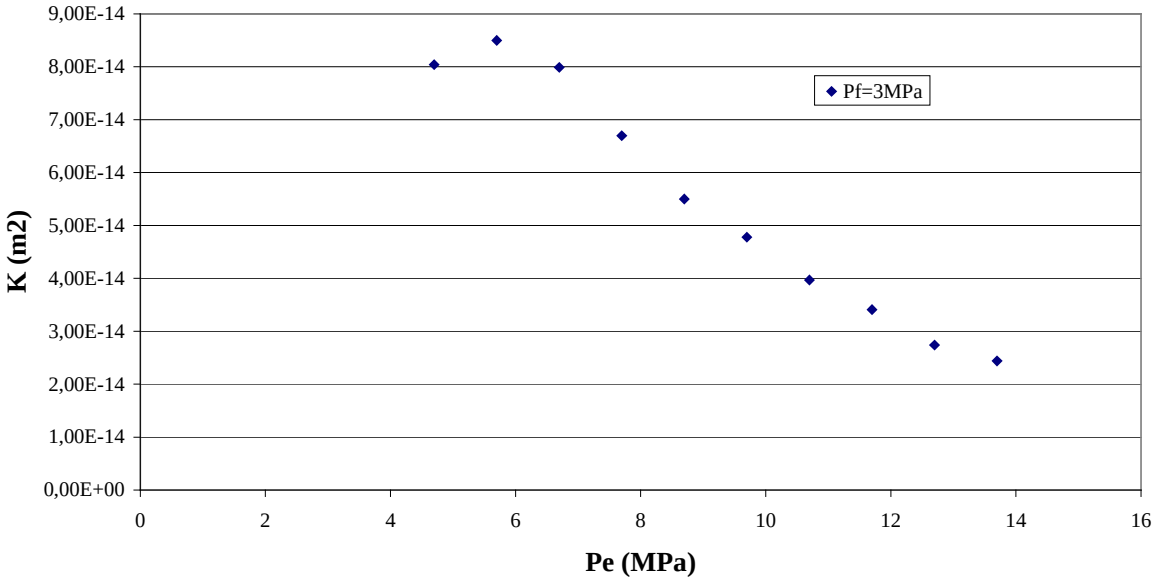


Figure 5.13 : Variations de perméabilité en fonction de la pression externe
(essai mhccdnn3)

5.3.2. 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 et 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 5.5 et sur les Figures 5.14 - 5.16.
Les valeurs de la perméabilité augmentent avec l'augmentation de la pression interstitielle externe (Figure 5.16).

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	98,98
Diamètre interne (mm)	25,63
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}31.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau 5.5 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdn9)

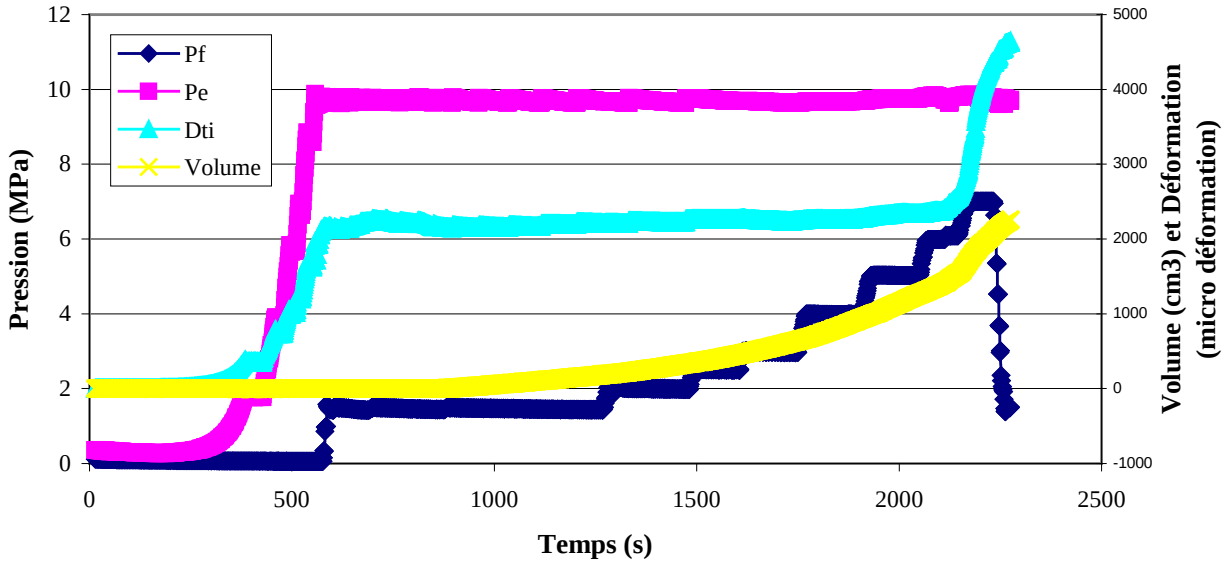


Figure 5.14 : Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps (essai mhccdn9)

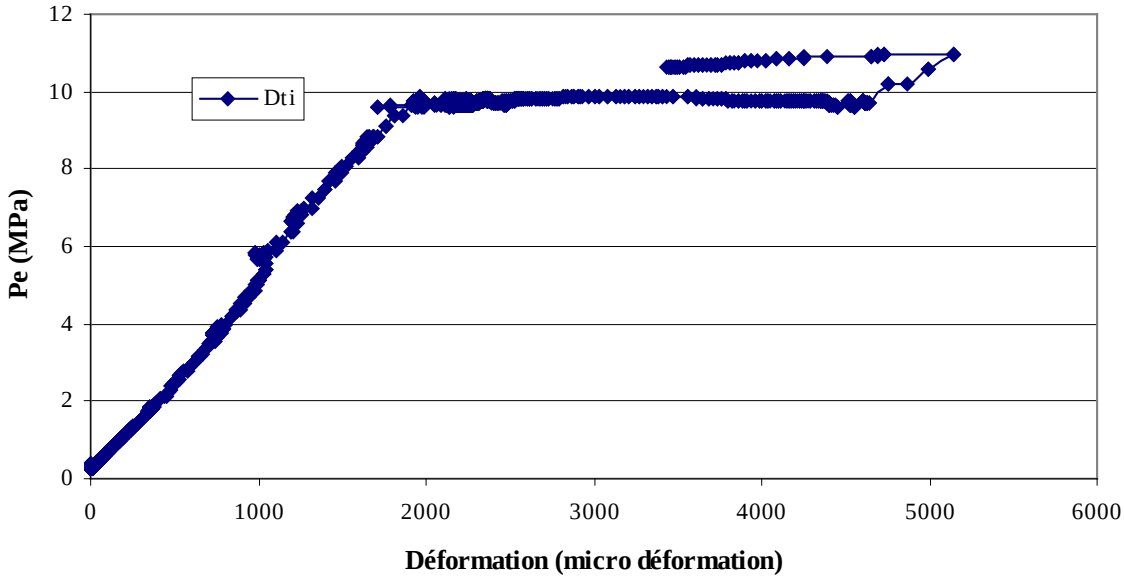


Figure 5.15 : Courbe de Pression externe – Déformation (essai mhccdn9)

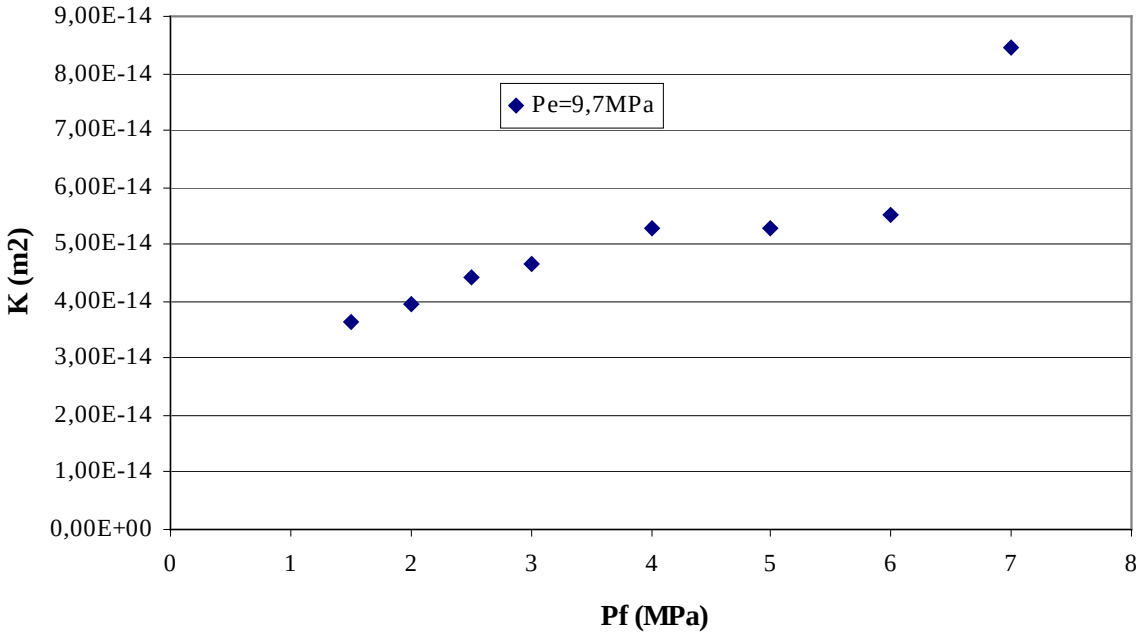


Figure 5.16 : Variations de perméabilité en fonction de la pression externe (essai mhccdn9)

5.4. Commentaire sur les résultats

Cette partie présente une analyse des résultats d'essais. Cette analyse a été réalisée pour trouver des réponses aux questions qui ont été présentées au chapitre 1.

5.4.1. Effet d'écoulement radial convergent de fluide interstitiel sur l'instabilité du trou

On a réalisé les essais en condition sèche pour explorer le comportement du matériau, la forme de rupture et trouver la pression P_e, provoquant la rupture en paroi interne du cylindre sous l'action d'une pression externe. A l'aide d'information mentionnée ci-dessus, on peut étudier l'effet de l'écoulement radial convergent de fluide interstitiel sur l'instabilité du trou.
A l'aide de la théorie élastique linéaire (Voir Annexe V), nous avons obtenu la courbe de pression externe-déformation (essai mhcc3). Les résultats montrent que le comportement du matériau est élastique jusqu'à la rupture (Figure 5.17).
Les résultats des autres essais montrent que les échantillons se sont fracturés pour une pression externe comprise entre 9,7 MPa et 13,7 MPa. La dispersion des résultats due à l'hétérogénéité d'un bloc à l'autre, dans lesquels sont prélevés les échantillons. Nous avons observé une paire de plans de rupture radiaux.

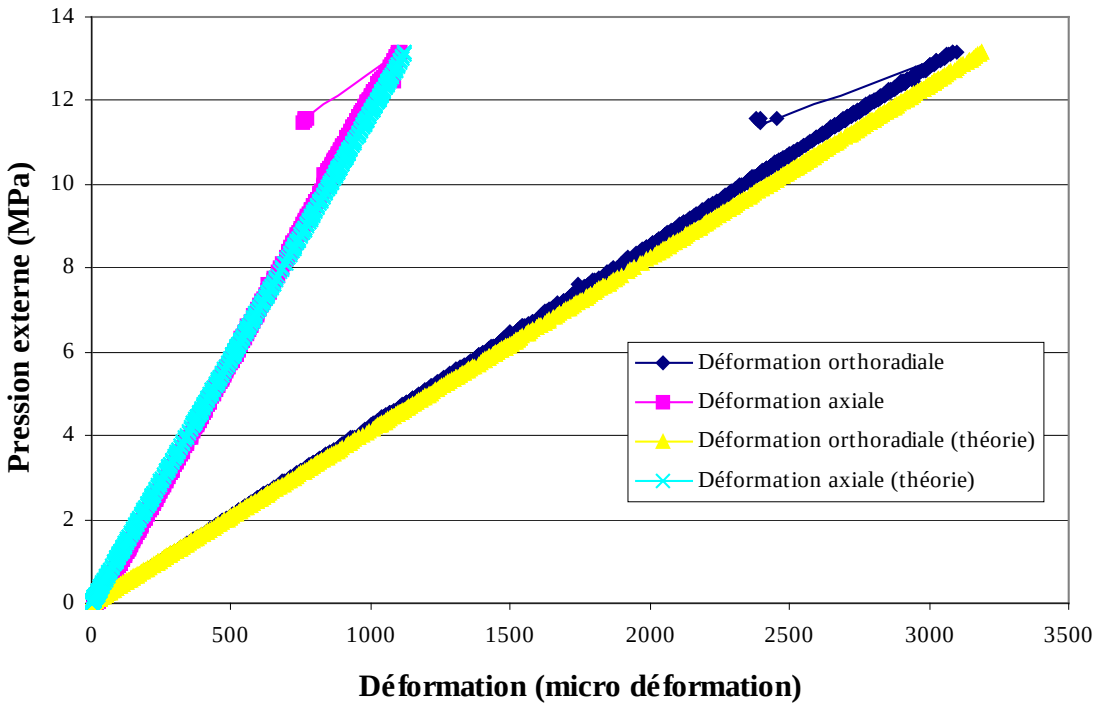


Figure 5.17 : Courbe de pression externe – déformation en paroi interne (essai mhcc3, module d'Young = 8000 MPa et coefficient de Poisson = 0,18)

Les résultats d'essais (essais sous une pression de confinement constante et une pression interstitielle externe croissante) sont présentés dans le Tableau 5.6.

Essai	Pression externe à la rupture (MPa)	Pression interstitielle externe à la rupture (MPa)
mhccdn9	9,7	6
mhccdnn1	9,7	2
mhccdnn2	9,7	2,5
mhccdnn4	11,7	5

Tableau 5.6 : Les résultats d'essais sous une pression de confinement constante et une pression interstitielle externe croissante .

A l'aide de la solution poroélastique du cylindre creux (Voir chapitre 2), nous avons calculé les contraintes effectives en paroi interne ($r=r_i$) pour l'essai mhccdn9. nous avons :

Fin de première étape, avant d'injecter du fluide :

Si P_e=9,7 MPa et P_f =0 MPa, ν= 0,18 et E=8000 MPa

$\sigma_\theta = \sigma'_\theta =$ 20,69 MPa $\quad \sigma_r = \sigma'_r =$ 0 MPa $\quad \sigma_z = \sigma'_z =$ 10,34 MPa

en posant : $q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma'_\theta - \sigma'_r)^2 + (\sigma'_\theta - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_r)^2}$ (le second invariant de la contrainte) et $p' = \frac{\sigma'_\theta + \sigma'_r + \sigma'_z}{3}$ (la contrainte moyenne effective)

q = 17,91 MPa et p' = 10,34 MPa

au moment de la rupture

Si P_e=9,7 MPa et P_f=6 MPa, ν= 0,18, α=1 et E=8000 MPa

$\sigma'_\theta =$ 17,39 MPa $\quad \sigma'_r =$ 0 MPa $\quad \sigma'_z =$ 6,11 MPa

q = 15,28 MPa et p' =7,83 MPa

Au vu de ces calculs, on s'attend à ce que l'état de contrainte au bord du trou intérieur s'éloigne de la condition rupture lorsque l'on commence à injecter le fluide interstitiel (Figure 5.18).

L'enveloppe de rupture , dans le plan q - p', a une pente négative (commun aux roches très poreuses), et donc une diminution des valeurs q et p' induites par l'augmentation de pression interstitielle rend l'état de contrainte moins critique. Le mécanisme de rupture du matériau est

compactant (et non par cisaillement) donc l'augmentation de pression interstitielle favorise la stabilité du trou car les contraintes effectives diminuent.
Une interprétation des causes possibles de la rupture des échantillons sous l'augmentation de la pression interstitielle externe sont présentées ci-dessous :
La courbe des résultats d'essai mhccdn9 (Figure 5.19) montre que l'échantillon s'est fracturé à la pression externe de 9,7 MPa et la pression interstitielle externe 6 MPa (en raison de la fracturation, la vitesse de déformation augmente en paroi interne).
Avant l'injection de fluide interstitiel externe (fin première étape) des compactions locales se sont probablement formées dans certains espaces poreux (on entendait des bruits pendant

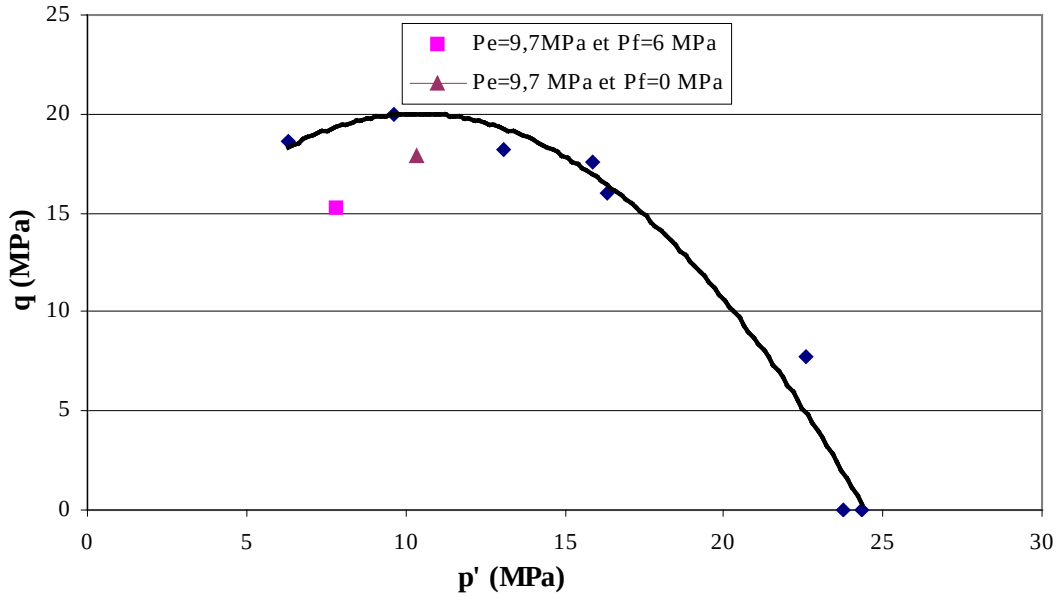


Figure 5.18 : Les seuils de rupture

cette étape). Les tailles de ces fissures étaient probablement petites donc le trou restait stable.
Après l'injection le fluide interstitiel, la matières broyée (dans la première étape) s'est érodée et a été déplacée par la force d'infiltration. Cette force augmente avec l'augmentation de pression interstitielle externe. On a observé des fragments due à une érosion dans le récipient de recueil du fluide interstitiel.
De nouvelles compactions locales peuvent se former en raison du déplacement de matière broyée. A cause de la fracturation, la contrainte qui est portée par le squelette du matériau (σ') est transférée au fluide interstitiel. Ce transfert crée un pic dans la pression interstitielle.
Ce pic dans la pression interstitielle provoque la propagation de fracture et enfin une paire de plans de rupture radiaux.
On a préparé d'autre échantillon dans le même bloc (échantillon mhccdn8). Cet échantillon s'est fracturé à la pression externe de 9,9 MPa avant l'injection du fluide interstitielle.
A la fin, nous pouvons conclure que le différentiel de pression interstitielle peut légèrement diminuer la résistance des échantillons (comme les résultats de recherche d'Unander et al. [38]).
L'écoulement radial convergent de fluide interstitiel n'a pas d'effet sur la forme de la rupture mais cet écoulement enlève de la matières broyée donc des bandes de rupture sont érodées.
On a mesuré par moyenne mobile l'efficacité d'écoulement (flow efficiency [42]) (Q/P_f) interstitiel (Figure 5.20). 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. Puis elle

augmente en raison de l'enlèvement de la matière broyée. Enfin l'efficacité d'écoulement diminue en raison de la fermeture des bandes de localisation. Après la fermeture des bandes de localisation, de la matière broyée est à nouveau enlevée, donc l'efficacité d'écoulement augmente encore.

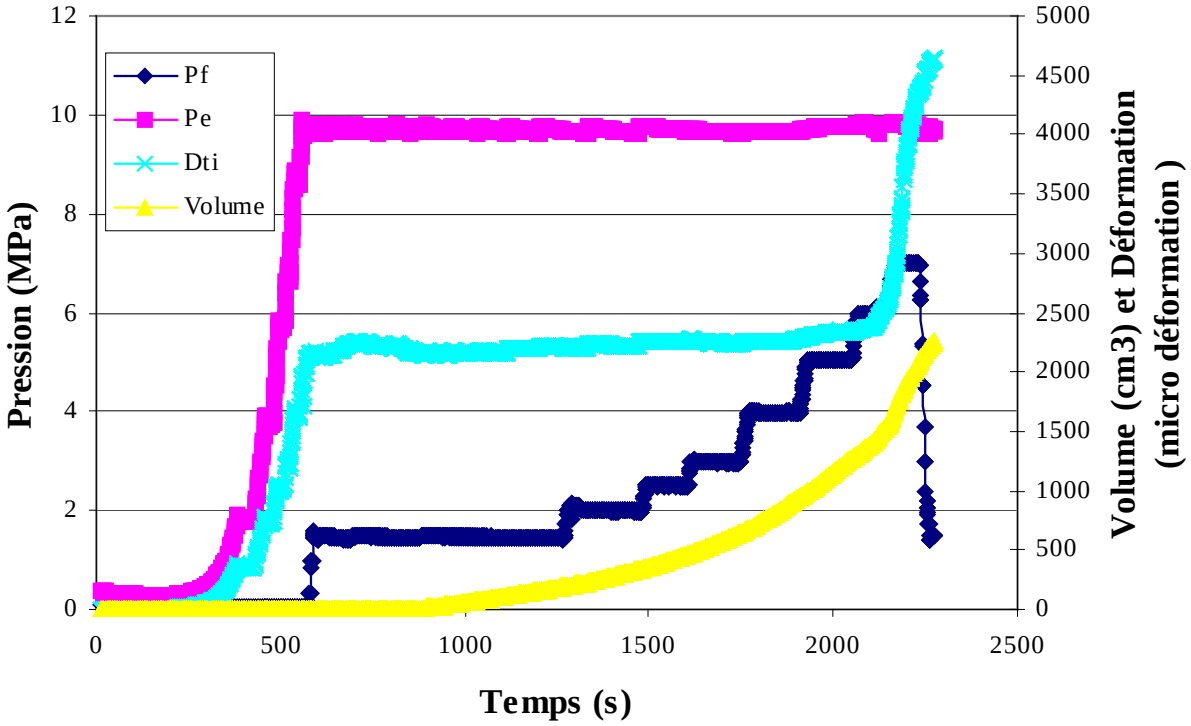


Figure 5.19 : Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps (essai mhccdn9)

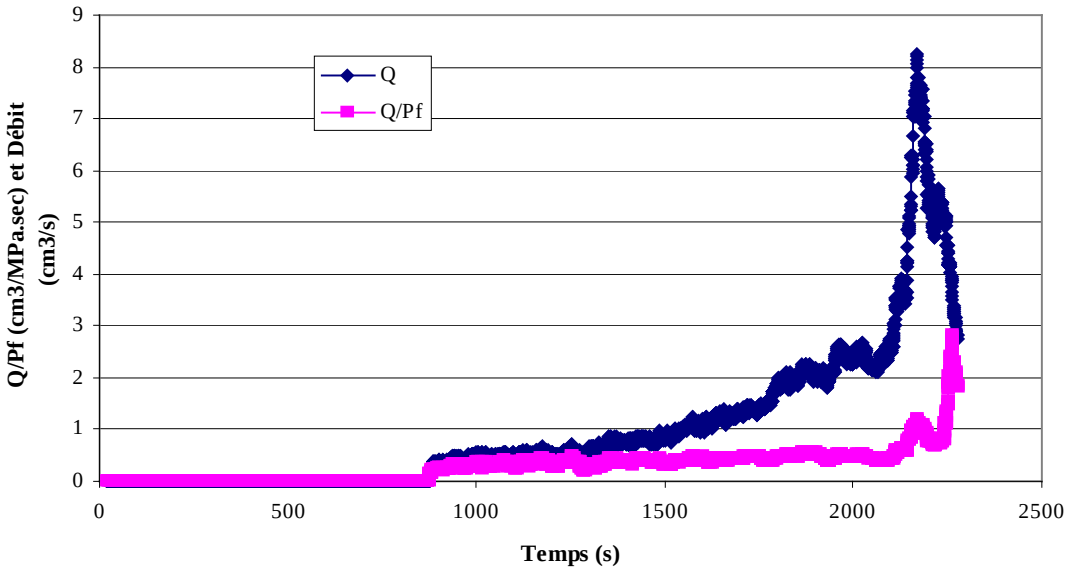


Figure 5.20 : Courbes de débit et efficacité d'écoulement (Q/Pf) en fonction du temps (mhccdn9)

5.4.2. Variation de perméabilité en fonction de la contrainte effective

Les résultats d'essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante montrent que les valeurs de la perméabilité diminuent avec l'augmentation de pression externe parce que l'échantillon poreux est compacté avec la pression externe. Après rupture, la présence des bandes de localisation n'a pas d'effet sur la perméabilité globale de l'échantillon. Par exemple dans l'essai mhccdnn3, la rupture se produit à 13,7 MPa (Tableau 5.7). On a mesuré les valeurs de la perméabilité sur ce palier avant et après rupture. Les résultats de perméabilité ne montrent pas de différence mesurable.
Les valeurs de la perméabilité augmentent avec l'augmentation de pression interstitielle externe.

On présente une explication (simpliste) de la variation de perméabilité après rupture par localisation sous forme de bande (Figure 5.21).

Essai	Pression externe à la rupture (MPa)	Pression interstitielle externe à la rupture (MPa)	K (m2)
mhccdn5	13,2	3	$2{,}47.10^{-14}$
mhccdn7	12,70	3	$1{,}5.10^{-14}$
Mhccdnn3	13,70	3	$2{,}44.10^{-14}$

Figure 5.7 : Les résultats d'essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante

K : La perméabilité globale avant et après la rupture

$Q = K_bS_b+K_{hb}S_{hb}$

Où :
Q : débit sorti de l'échantillon
K_b : perméabilité de bande de localisation
K_{hb} : perméabilité de hors bande
S_b : section de bande perpendiculaire à la direction de l'écoulement
S_{hb} : section de hors bande perpendiculaire à la direction de l'écoulement
On a :

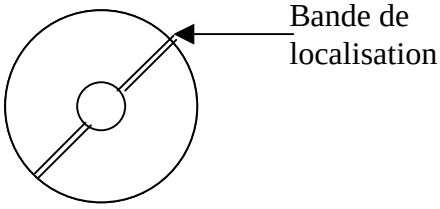


Figure 5.21 Mode de rupture (perpendiculaire à l'axe de trou

$K_b = nK_{hb}$ avec n un facteur décrivant l'évolution de perméabilité dans la bande.
$S_{hb} = 1000S_b$, par exemple

Après simplification :

$Q = nK_{hb}S_b+K_{hb}S_{hb} =K_{hb}(nS_b+S_{hb})=K_{hb}S_{hb}(n/1000 +1)$

La relation montre que la valeur de perméabilité après rupture dépend de la valeur de n. Si la valeur de n est petite la présence de bande de localisation n'a pas d'effet sur la perméabilité de

globale de l'échantillon (comme on peut le supposer pour les bandes de compaction observées dans nos essais).

5.4.3. Mécanisme de formation de la rupture

Nous avons observé une paire de plans de rupture radiaux (dans deux cas : essais sans fluide et avec fluide interstitiel) diamétralement opposés, parallèles à l'axe du trou et perpendiculaires à la paroi interne. Ces bandes sont orthogonales à la contrainte principale la plus compressive (contrainte orthoradiale), elles correspondent à des bandes de compaction.
Par ailleurs, Les résultats d'essai montrent que la présence de bande 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 perméabilité globale aurait vraisemblablement augmenté. On peut conclure que la bande de localisation est compactante.

Chapitre 6
Conclusions et perspectives

6.1. Conclusions

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, Tan et Haberfield, 2000, [7]). Afin de limiter les problèmes d'instabilités relatifs à des excavations souterraines la prévision de l'évolution des contraintes et des déformations à proximité de l'ouverture est essentielle.
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 :

1) Essais sans fluide interstitiel (pour modéliser l'ouverture souterraine pendant et après le creusement) :

a) Essais sous une pression de confinement croissante.
b) Essais sous une pression de confinement constante et une pression interne décroissante.

2) Essais avec écoulement radial convergent de fluide interstitiel (pour modéliser le puit de pétrole pendant sa phase de production).
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 :

a) Essais sous une pression de confinement croissante et une pression interstitielle externe constante.
b) Essais sous une pression de confinement constante et une pression interstitielle externe croissante.

La seconde partie de cette recherche était la partie expérimentale qui est réalisée sur le matériau appelé CPIR 09. 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 [13].

Les conclusions de ce travail de recherche s'articulent autour de 6 parties principales :

1) Le mode de la 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 contrainte principale la plus compressive (contrainte orthoradiale).

2) Les mesures montrent que les valeurs de la perméabilité diminuent avec l'augmentation de pression externe. Des mesures de perméabilité effectuées avant et après rupture ne montrent pas de différence mesurable. La présence des bandes de localisation (compactante) n'a pas d'effet sur la perméabilité globale de l'échantillon. Si le mécanisme de rupture avait

été dilatant la valeur de perméabilité globale aurait vraisemblablement augmenté. Les autres essais montrent essentiellement les mêmes résultats.
3) Le mécanisme de rupture rapporté généralement dans des roches avec une porosité moyenne (moins de 25%) est le mécanisme dilatant ou le mécanisme par cisaillement. Par contre, on a montré ici que le mécanisme de rupture dans ce matériau artificiel étudié est le mécanisme compactant. Ce mécanisme est observé dans des roches très poreuses (plus de 25%, [20]). La porosité est un paramètre majeur pour que ce mécanisme puisse avoir lieu, cependant d'autres paramètres microstructuraux jouent également un grand rôle dans le mécanisme de la rupture, comme par exemple la cimentation.

4) L'écoulement radial convergent de fluide interstitiel (en raison du différentiel de pression interstitielle) diminue légèrement la résistance des échantillons.

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

6) Les valeurs de la perméabilité augmentent avec l'augmentation de pression interstitielle externe.

6.2. Perspectives

A l'aide de dispositif disponible, nous pouvons modéliser le puits pétroliers pendant sa phase de production. Nous ne pouvons pas modéliser le puit pétrolier pendant le creusement avec le dispositif disponible, car cela nécessite un contrôle de la contrainte totale et interstitielle à l'intérieure du trou.
Il serait intéressant de compléter ce travail par le développement du dispositif disponible. On présente un schéma de la cellule après la modification (Figure 6.1). Les modifications suivantes sont nécessaires :
1) L'installation un capteur de pressions à la sortie du fluide interstitiel pour mesurer la pression interstitielle dans le trou.
2) Placer une couche drainante dans le trou central.
3) créer une sortie de fluide interstitiel.
4) l'installation une vanne micrométrique à la sortie du fluide interstitiel pour contrôler la pression interstitielle dans le trou central.

On présente les étapes d'essai sur la Figure 6.2.

Les essais pourraient comprendre cinq étapes : une première étape pendant laquelle la pression externe et la pression interne seraient augmentées en même temps jusqu'à une valeur P_2, une deuxième étape pendant laquelle la pression interstitielle externe sera augmentée à la valeur P_1 (pour saturer l'échantillon), une troisième étape pendant laquelle la pression externe et la pression interne seraient augmentées en même temps jusqu'à une valeur P_{max} et pendant laquelle la pression interstitielle externe sera augmentée à la valeur P_f, une quatrième étape pendant laquelle la pression externe et la pression interstitielle externe seraient maintenues constantes à la valeur P_{max} et P_f ; la pression interne et la pression interstitielle dans le trou central seraient diminuées jusqu'à la rupture pour modéliser le puit pétrolier pendant le creusement. Si la rupture ne s'est pas produite, on maintiendra les pressions interne et interstitielle dans le trou central et on augmentera la pression externe jusqu'à la rupture.

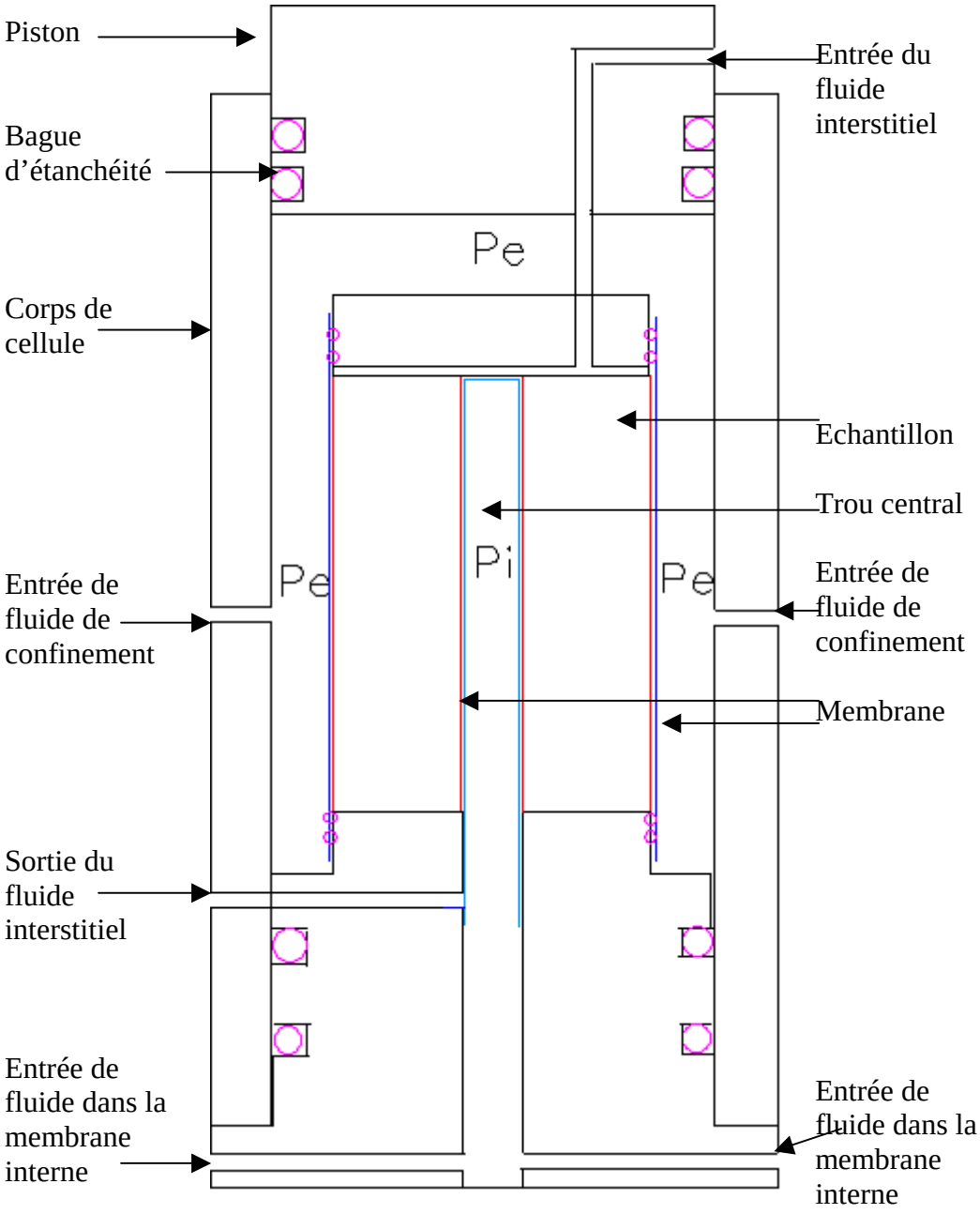


Figure 6.1 : Schéma de la cellule après la modification

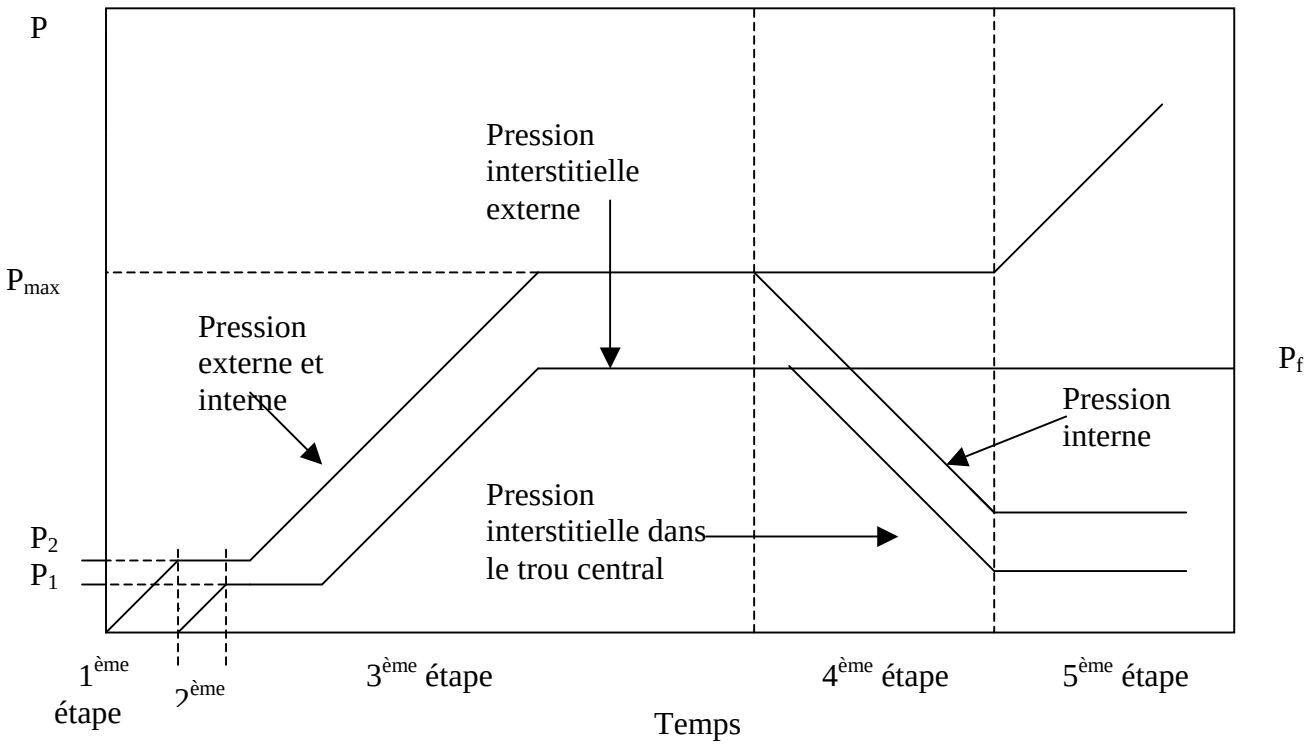


Figure 6.2 : Etape d'un essai

Références

[1] Baraka-Lokmane, S., *"A new resin impregnation technique for characterising fracture geometry in sandstone cores"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 39, pp. 815-823, 2000.

[2] Baud, P., Klein, E. & Wong, T.F., *"Compaction localization in porous sandstone spatial evolution of damage and acoustic emission activity"*, J. Stru. Geolo., Vol. 26, pp. 603-624, 2004.

[3] Boehler, J.P., Dietl, T. & Millien, A., *"Rupture anisotrope des trous de forage pétrolier"*, Rapport, 1994.

[4] Bésuelle, P., *"Compacting and dilating shear band in porous rock: Theoretical and experimental conditions"*, J. Geophy. Research, Vol. 106, pp. 13435-13442, 2001.

[5] Boidy, E., *"Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines"*, Ph.D. Thesis, Univ. Grenoble 1, 315 P, 2002.

[6] Brady, B.H.G. & Brown, E.T., *"Rock mechanics for underground mining"*, Chapman & hall, 1992.

[7] Chen, X., Tan, C.P. & Haberfield, C.M., *"Numerical evaluation of the deformation behaviour of thick walled hollow cylinders of shale"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 37, pp. 947-961, 2000.

[8] Chen, X., Tan, C.P., Wu, B. & Haberfield, C.M., *"Modelling of the undrained behaviour of wellbores"*, The geotechnics of hard soils-soft rocks, Balkema Rotterdam, 1998.

[9] Cook, J.C., Jaeger, N.G. & Cook, N.G.W. *"Fundamentals of rock mechanics"*, Chapman and Hall, 1976.

[10] Elkadi, A.S. & van Mier, J.G.M., *"Scaled hollow-cylinder tests for studying effect in fracture processes of concrete"*, 5th. Int. Conf. on fracture mecha. Of concrete structures, April 2004.

[11] Ewy, R.T. & Cook, N.G.W., *"Deformation and fracture around cylindrical opening in rock"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 27, pp. 387-417, 1990.

[12] Fabre, D. & Gustkiewicz, J., *"Poroelastic properties of limestones and sandstones under hydrostatic conditions"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 34, pp. 127-134, 1997.

[13] Ferfera, F.M.R., Sarda, J.P., Boutéca, M. & Vincké, O., *"Experimental study of monophasic permeability changes under various stress paths", "*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 37, 1997.

[14] Ferfera, F.M.R., *"Mécanismes physiques de l'évolution de la perméabilité d'un grès sous chargement simulant la déplétion d'un gisement"*, Oil & gas Sci. and Tech., Vol. 56, pp. 347-355, 2001.

[15] Gatelier, N., *"Etude expérimentale et théorique de l'endommagement des roches anisotropes"*, Ph.D. Thesis, Univ. Grenoble 1, 422 P., 2001.

[16] Gay, N.C., *"Fracture growth around openings in thick-walled cylinders of rock subjected to hydrostatic compression"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol.10, pp. 209-233, 1973.

[17] Han, G. & Dusseault, M.B., *"Description of fluid flow around a wellbore with stress-dependant porosity and permeability"*, J. Petroleum Sci. Eng., Vol. 40, pp. 1-16, 2003.

[18] Haimson, B.C. & Song, I., *"Laboratory study of borehole breakout in Cordova Cream: a case shear failure mechanism"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 30, pp. 1047-1056, 1993.

[19] Haimson, B.C., *"Fracture-like borehole breakout in high porosity sandstone: are they caused by compaction bands?"*, Phy. Che. Earth (A), Vol. 26, pp. 15-20, 2001.

[20] Haimson, B. & Lee, H., *"Borehole breakout and compaction bands in two high porosity sandstones"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 41, pp. 287-301, 2004.

[21] Hoek, E. & Brown, E.T., *"Underground excavation in rock"*, IMM, 1980.

[22] Hoskins, E.R., *"The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 6, pp. 99-125, 1969.

[23] Issen, K.A. & Rudnicki, J.W., *"Conditions for compaction bands in porous rock"*, J. Geophy. Research, Vol. 105, pp. 21529-21536, 2000.

[24] Lee, M. & Haimson, B., *"Laboratory study of borehole breakout in lac du Bonnet granite: a case of extensile failure mechanism"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 30, pp. 1039-1045, 1993.

[25] Lion, M., Skoczylas, F. & Ledésert, B., *"Determination of the main hydraulic and poro-elastic properties of a limestone from Bourgogne, France"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 41, pp. 915-925, 2004.

[26] Marsden, J.R., Dennis, J.W. & Wu, B., *"Deformation and failure of thick-walled hollow cylinders of mudrock a study of wellbore instability in weak rock"*, Eurock 96, Balkema Rotterdam, 1996.

[27] Olsson, W.A., Holcomb, D.J. & Rudnicki, J.W., *"Compaction localization in porous sandstone: implications for reservoir mechanics"*, Oil & gas Sci. and Tech., Vol. 57, pp. 591-599, 2002.

[28] Ortega,G., *"Développement d'une cellule triaxiale haute pression pour essai sur roche poreuses saturées, Application aux grès"*, Ph.D. Thesis, Univ. Grenoble 1, 168 P., 1994.

[29] Papamichos, E., Vardoulakis, I., Tronovll, J. & Skjaerstein, A., *"Volumetric sand production model and experiment"*, Int. J. Num. & Analy. Methods in Geomech., Vol. 25, pp. 789-808, 2001.

[30] Papamichos, E., Liolios, P. & van den Hoek, P.J., *"Breakout stability experiment and analysis"*, Proceeding of Gulf Rock 2004, Houston, USA, June 5-9 2004.

[31] Papamichos, E., Tronovll, J., Skjaerstein, A. & Unander, T.E., *"The effecte of plane-strain and isotropic loading in hollow cylinder strength"*, Eurock 9, Balkema, Rotterdam, 1996.

[32] Papamichos, E., *"Sand production and well productivity in conventional reservoirs"*, Rock Mechanics for Industry, Balkema, Rotterdam, 1999.

[33] Papamichos, E., Skjaerstein, A. & Tronovll, J., *"A volumetrique sand production expriment"*, Pacific Rocks, Balkema, Rotterdam, 2000.

[34] Santarelli, F.J., *"Theoretical and experimental investigation of the stability of the axisymmetric wellbore"*, Ph.D. Thesis, Univ. of London, 1987.

[35] Santarelli, F.J. & Brown, E.T., *"Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 26, pp. 401-413, 1989.

[36] Santarelli, F.J., Brown, E.T. & Maury, V., *"Analysis of borehole stresses using pressure-dependent, linear elasticity"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 23, pp. 445-449, 1986.

[37] Tronovll, J., Skjaerstein, A. & Papamichos, E., *"Sand production : mechanical failure or hydrodynamic erosion ?"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 291, 1997.

[38] Unander, T.E., Papamichos, P., Tronovll, J. & Skjaerstein, A., *"Flow geometry effects on sand production from an oil producing perforation cavity"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 293, 1997.

[39] Wang, Y. & Wu, B., *"Borehole collapse and sand production evaluation: experimental testing, analytical solutions and field implications"*, 38th U.S. Rock Mech. Sym., Washington DC, 2001.

[40] Wong, T.F., Baud, P. & Klein, E., *"Localized failure modes in a compactant porous rock"*, Geophy. Research Letters, Vol. 28, pp. 2521-2524, 2001.

[41] Bernaix, J., *"New laboratory methods of studying the mechanical properties of rocks"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 6, January 1969.

[42] Tronvoll, J. & Fjaer, E., *"Experimental study of sand production from perforation cavities"*, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 31, pp. 393-410, 1994.

Annexe I
Courbes d'étalonnage des capteurs de pression

Les courbes d'étalonnage des capteurs sont présentées dans cette partie. Nous avons étalonné les trois capteurs de pression pour l'acquisition de pressions externe et interne et interstitielle externe.

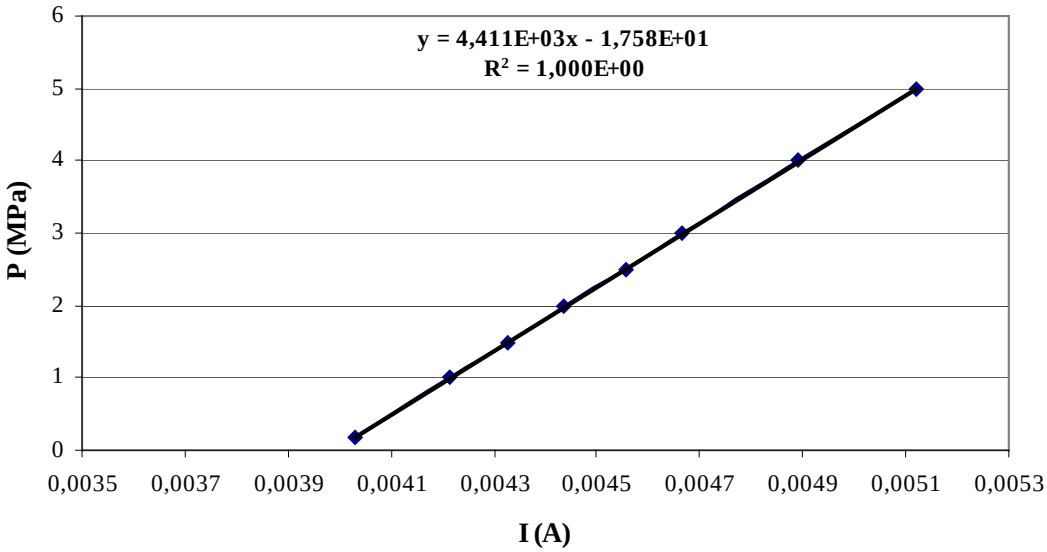


Figure I.1 : Courbe d'étalonnage de capteur de pression
(pour l'acquisition de pression interne)

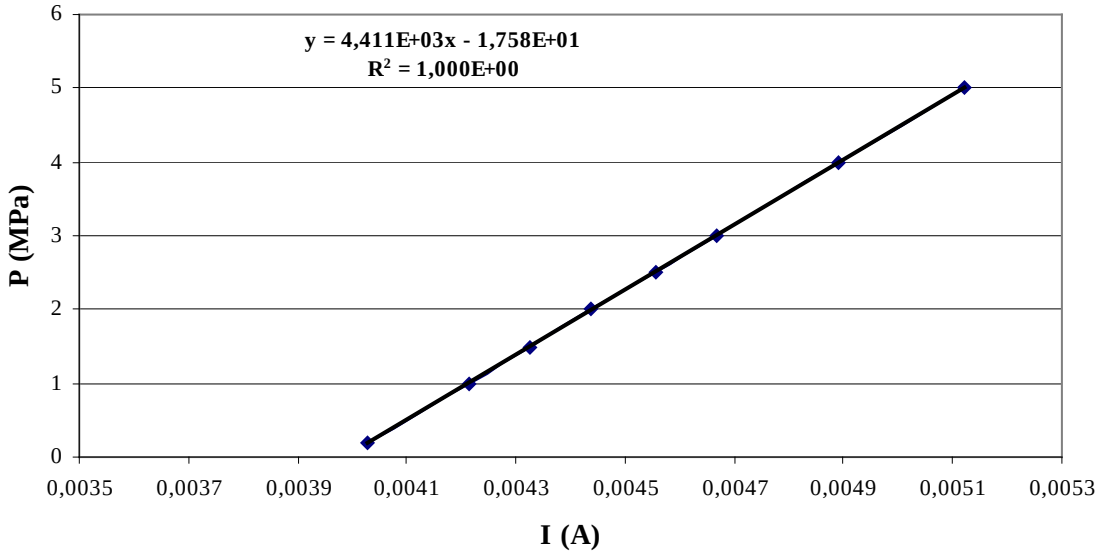


Figure I.2 : Courbe d'étalonnage de capteur de pression
(pour l'acquisition de pression externe)

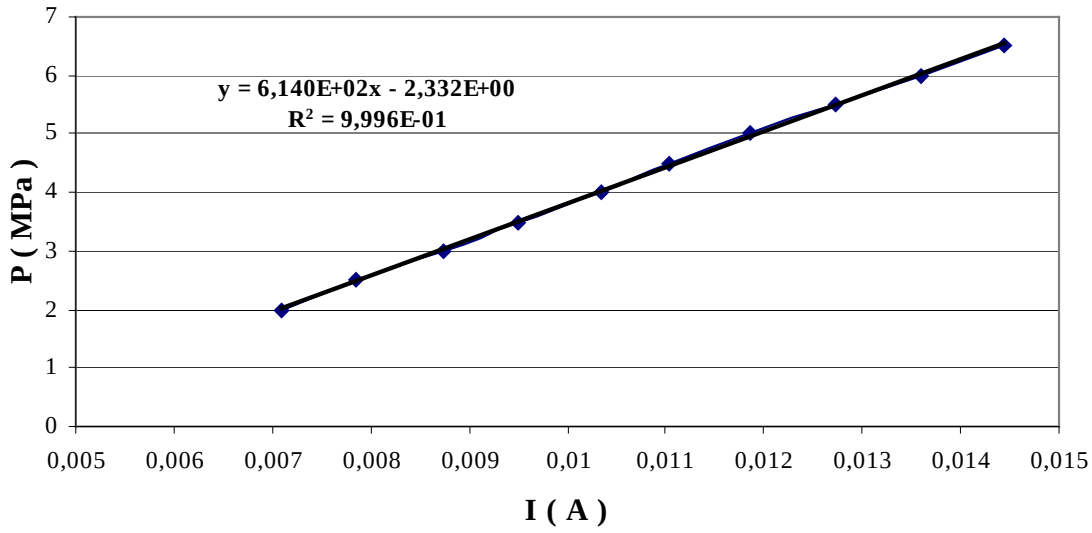


Figure I.3 : Courbe d'étalonnage de capteur de pression
(pour l'acquisition de pression interstitielle externe)

Annexe II
Courbes d'étalonnage des voies du module de jauge

Les courbes d'étalonnage des voies du module de jauge sont présentées dans cette partie. Nous avons étalonné quatre voies du module de jauge pour l'acquisition de déformations axiale et transversale en paroi interne et sur la surface externe de l'échantillon.

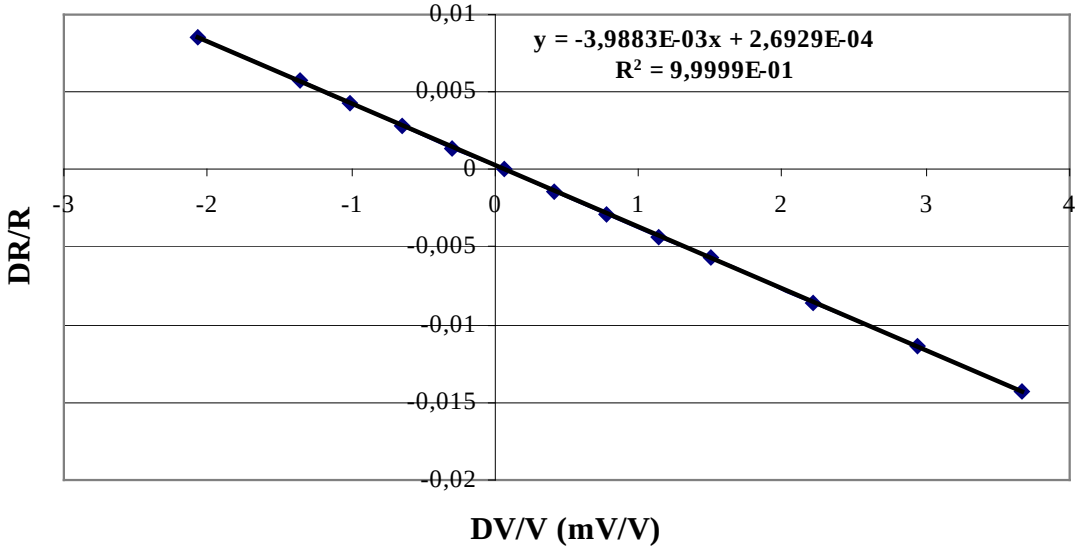


Figure II.1 : Courbe d'étalonnage de voie 0
(pour l'acquisition de déformation axiale en paroi interne)

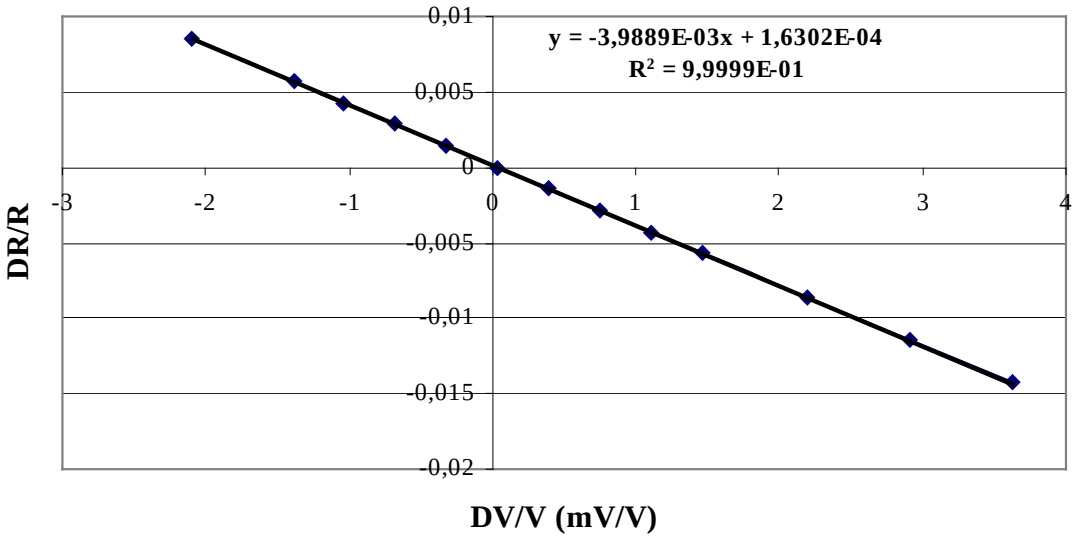


Figure II.2 : Courbe d'étalonnage de voie 1
(pour l'acquisition de déformation transversale en paroi interne)

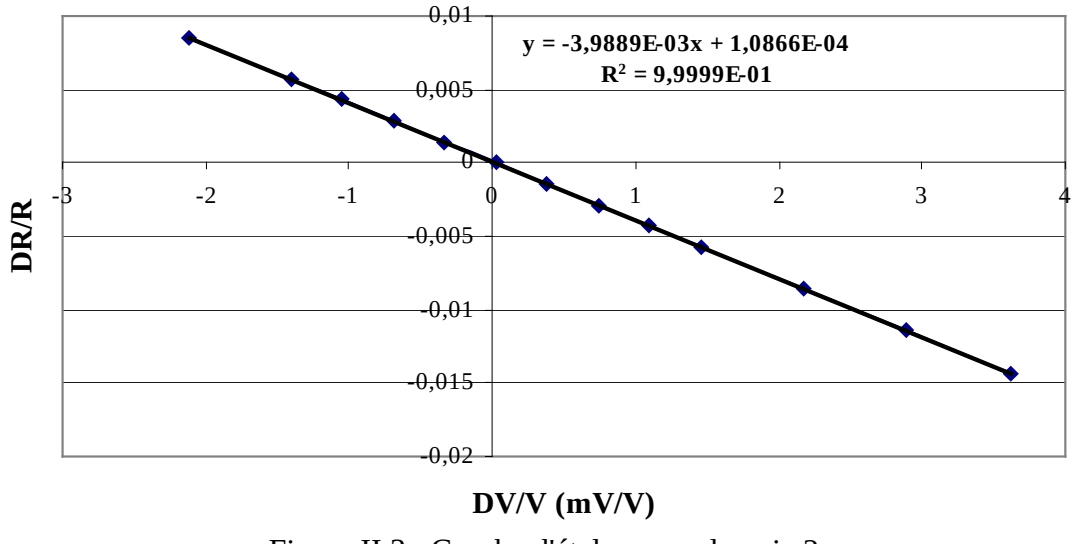


Figure II.3 : Courbe d'étalonnage de voie 2
(pour l'acquisition de déformation axiale sur la surface externe de l'échantillon)

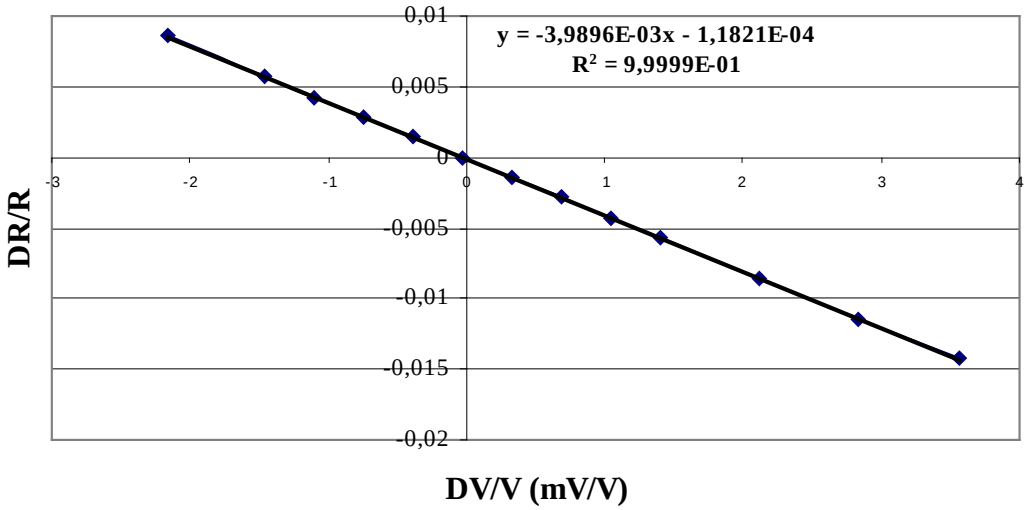


Figure II.4 : Courbe d'étalonnage de voie 3
(pour l'acquisition de déformation transversale sur la surface externe de l'échantillon)

Annexe III

Résultats d'essais (essais sans fluide interstitiel)

III.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante

Matériau	CPIR09
Forme géométrique	Cylindre creux
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	98,85
Diamètre interne (mm)	25,41
Parallélisme α (rad) < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}71.10^{-4}$

Tableau III.1 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhcc12)

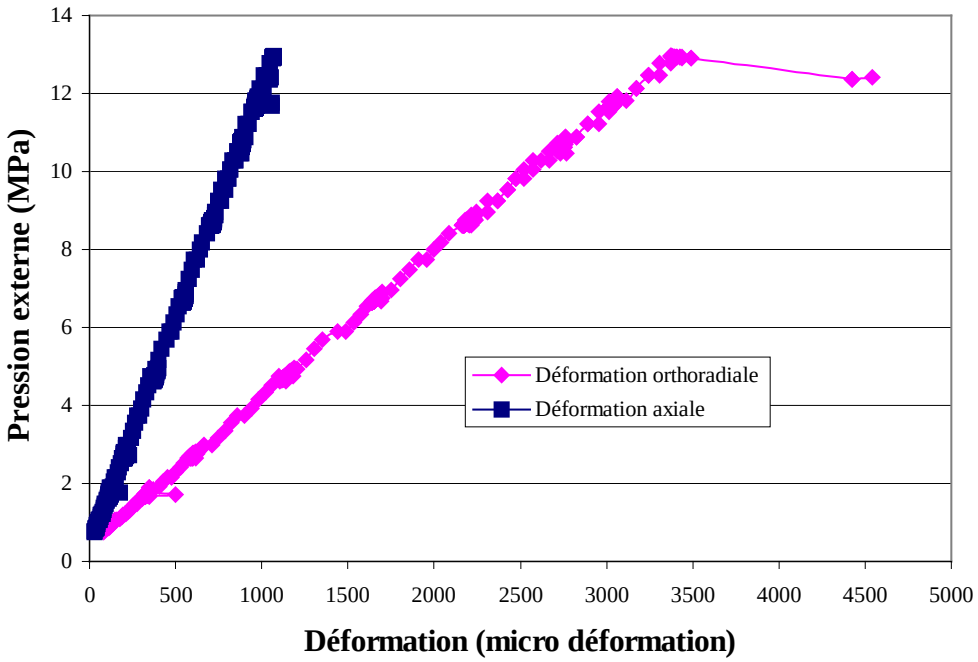


Figure III.1 : Courbe de pression externe - déformation en paroi interne (essai mhcc12)

Matériau	CPIR09
Forme géométrique	Cylindre creux
Hauteur (mm)	200,5
Diamètre externe (mm)	98,86
Diamètre interne (mm)	25,45
Parallélisme α (rad) < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}73.10^{-4}$

Tableau III.2 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccn2)

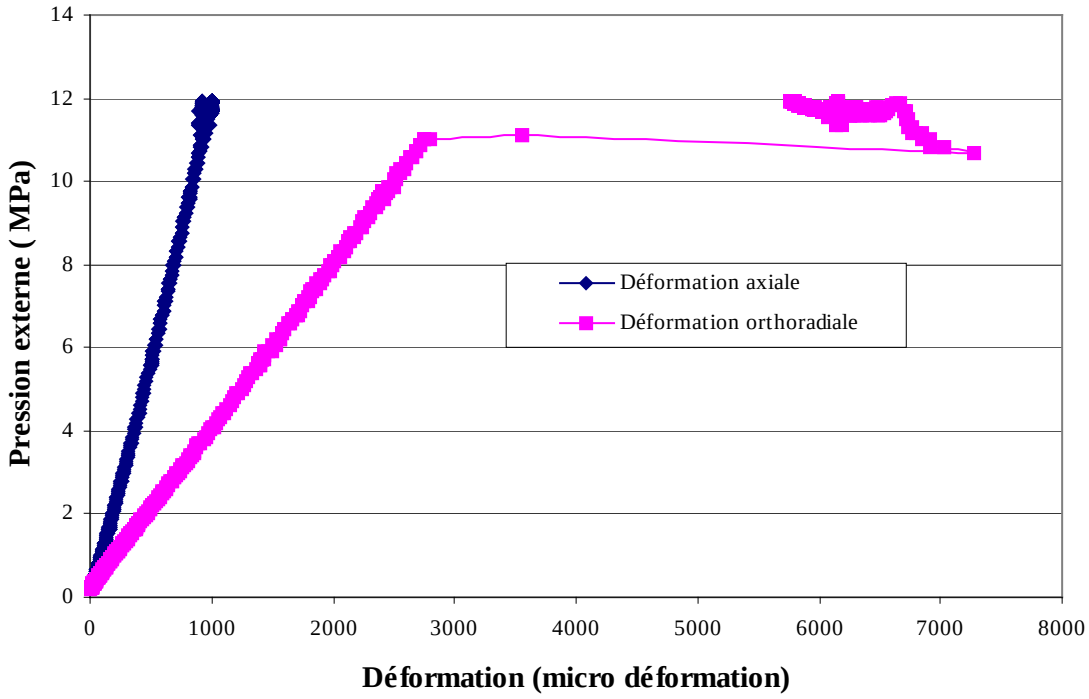


Figure III.2 : Courbe de pression externe - déformation en paroi interne (essai mhccn2)

III.2. Résultats d'essais sous une pression externe constante et une pression interne décroissante

Matériau	CPIR09
Forme géométrique	Cylindre creux
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	98,77
Diamètre interne (mm)	25,53
Parallélisme α (rad) < $1{,}25.10^{-3}$	$9{,}6.10^{-4}$

Tableau III.3 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhcc11)

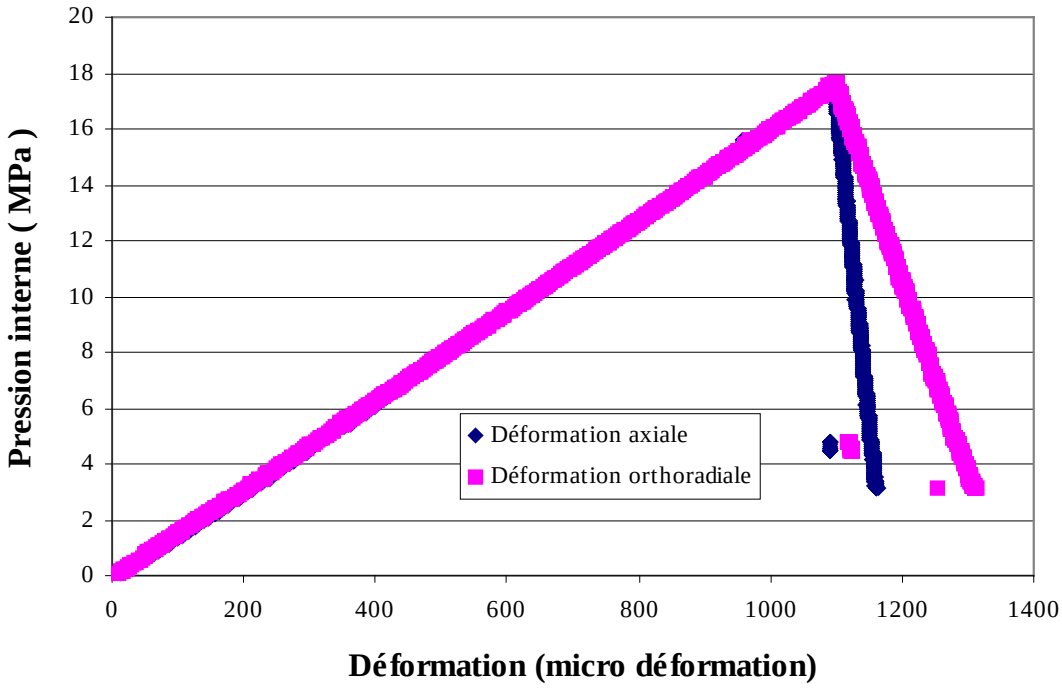


Figure III.3 : Courbe de pression interne - déformation sur la surface externe de l'échantillon (essai mhcc11)

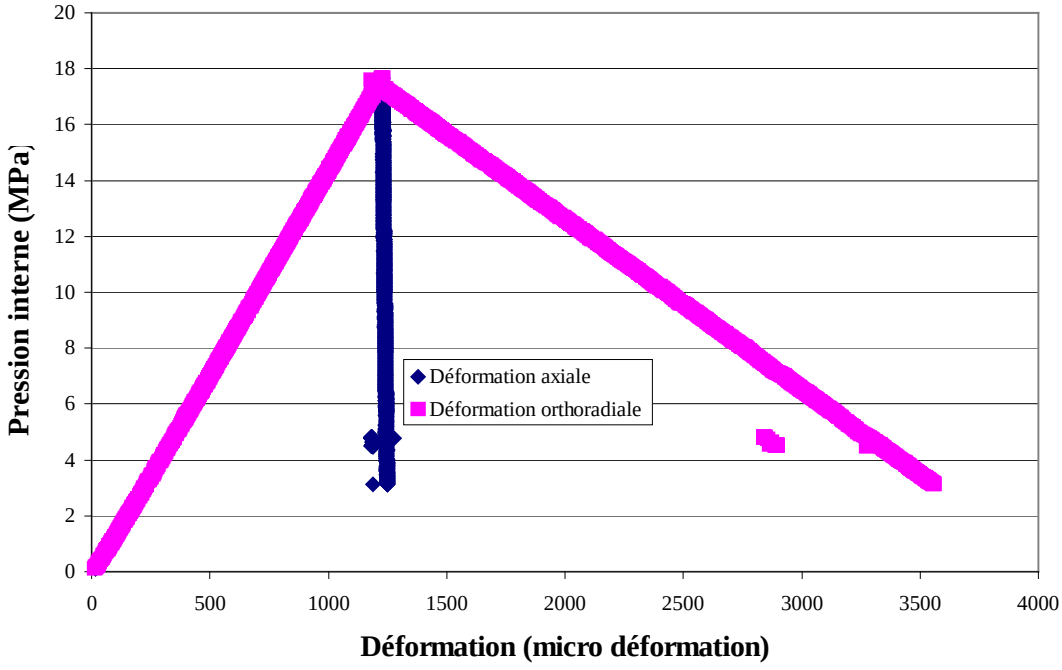


Figure III.4 : Courbe de pression interne - déformation en parois interne (essai mhcc11)

Matériau	CPIR09
Forme géométrique	Cylindre creux
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	98,85
Diamètre interne (mm)	25,48
Parallélisme α (rad) < $1{,}25.10^{-3}$	$9{,}6.10^{-4}$

Tableau III.4 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhcc10)

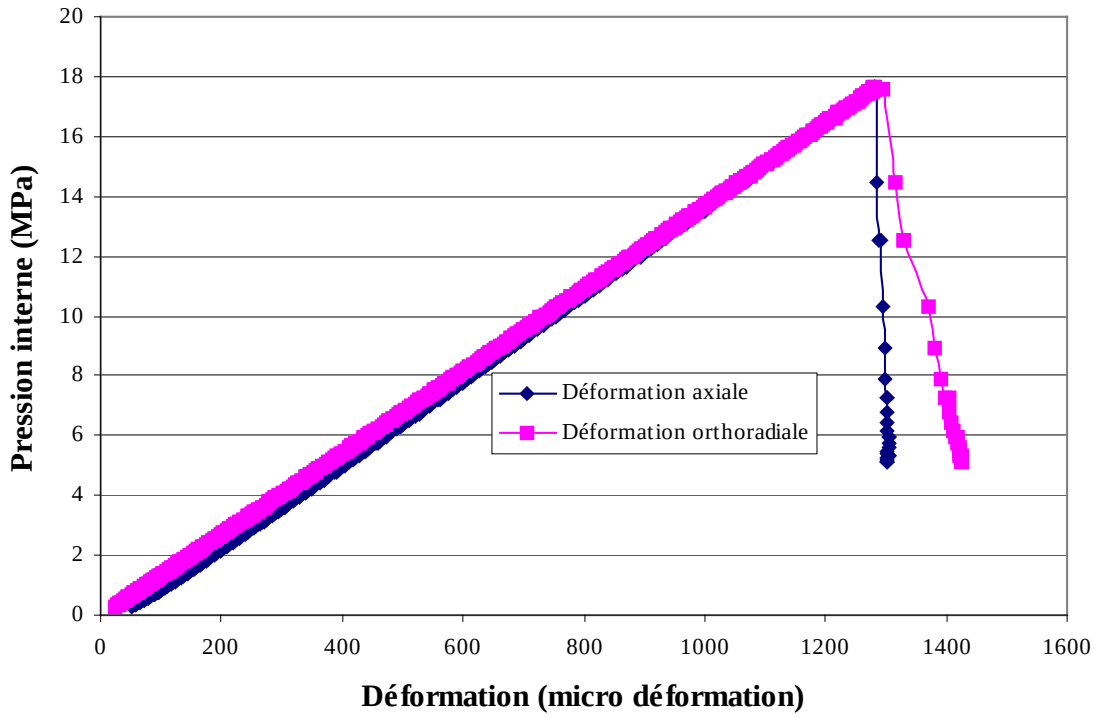


Figure III.5 : Courbe de pression interne - déformation sur la surface externe de l'échantillon (essai mhcc10)

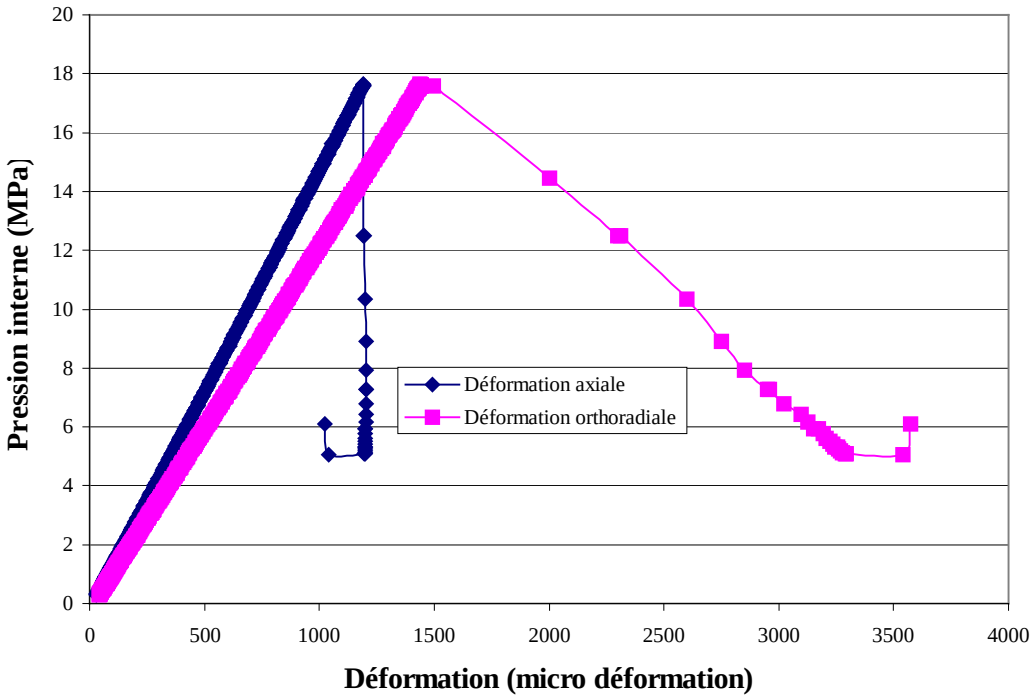


Figure III.6 : Courbe de pression interne - déformation en parois interne (essai mhcc10)

Annexe IV
Résultats d'essais (essais avec fluide interstitiel)

IV.1. Résultats d'essais sous une pression externe croissante et une pression interstitielle externe constante

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200,5
Diamètre externe (mm)	99,05
Diamètre interne (mm)	25,6
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}31.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau IV.1 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdn5)

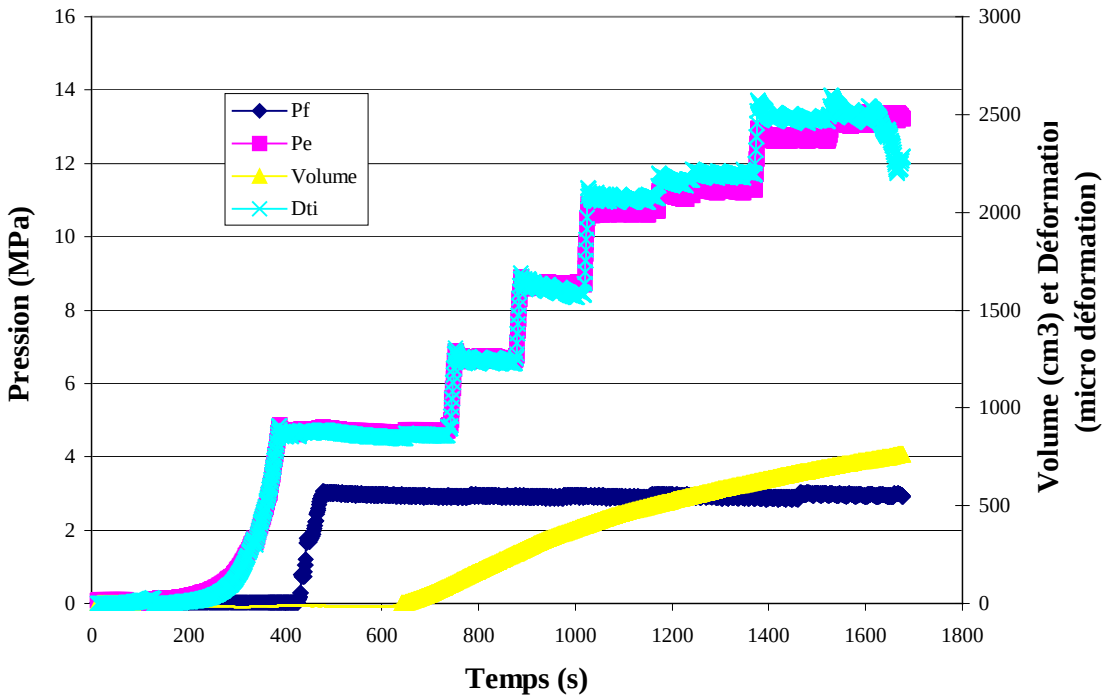


Figure IV.1 : Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps (essai mhccdn5, température : 25°C)

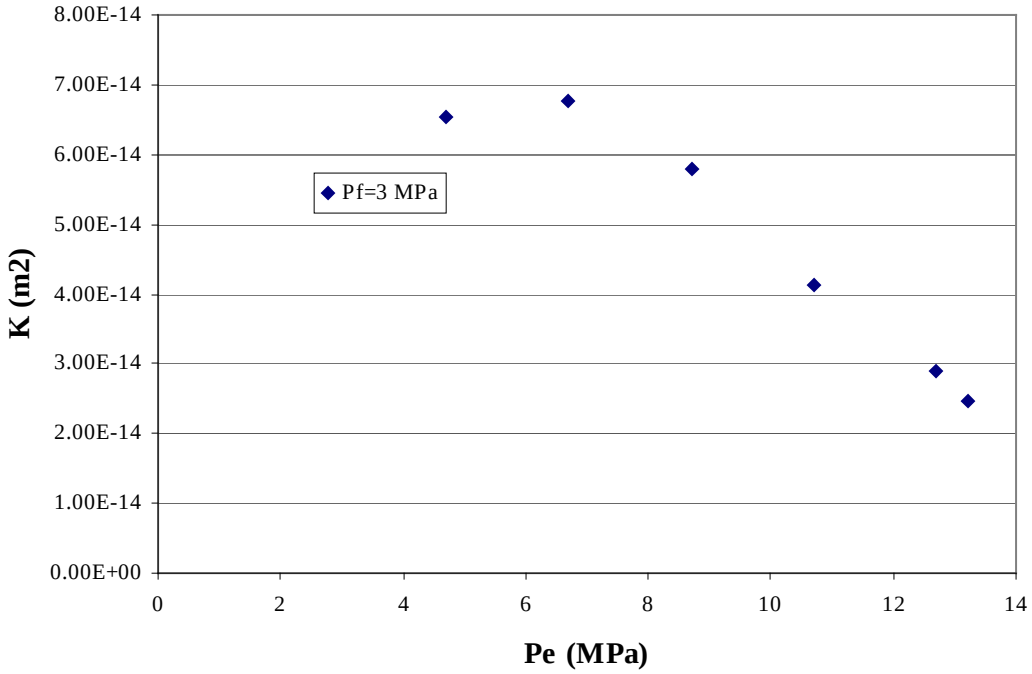


Figure IV.2 : Variations de perméabilité en fonction de la pression externe (essai mhccdn5)

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	99,1
Diamètre interne (mm)	25,60
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}91.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau IV.2 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdn7)

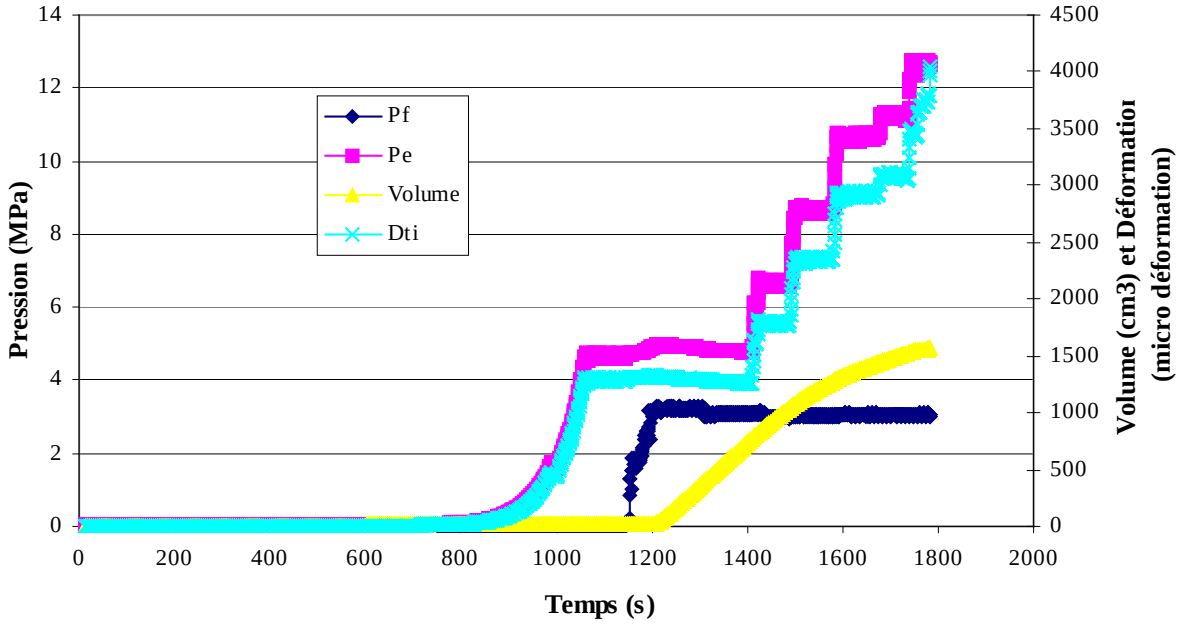


Figure IV.3 : Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps (essai mhccdn7, température : 30°C)

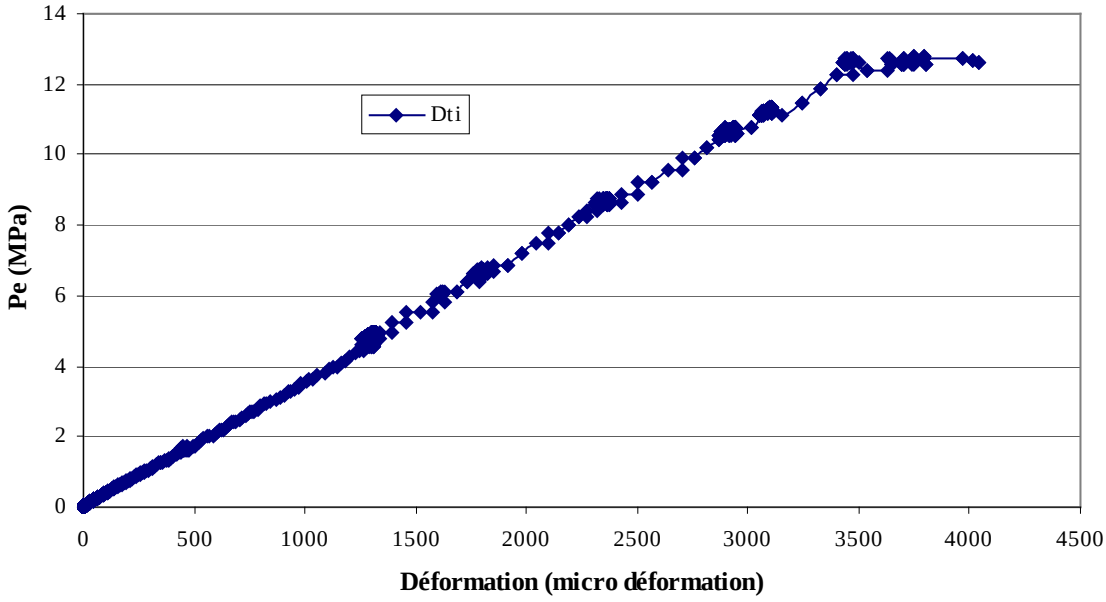


Figure IV.4 : Courbe de pression externe – déformation (essai mhccdn7)

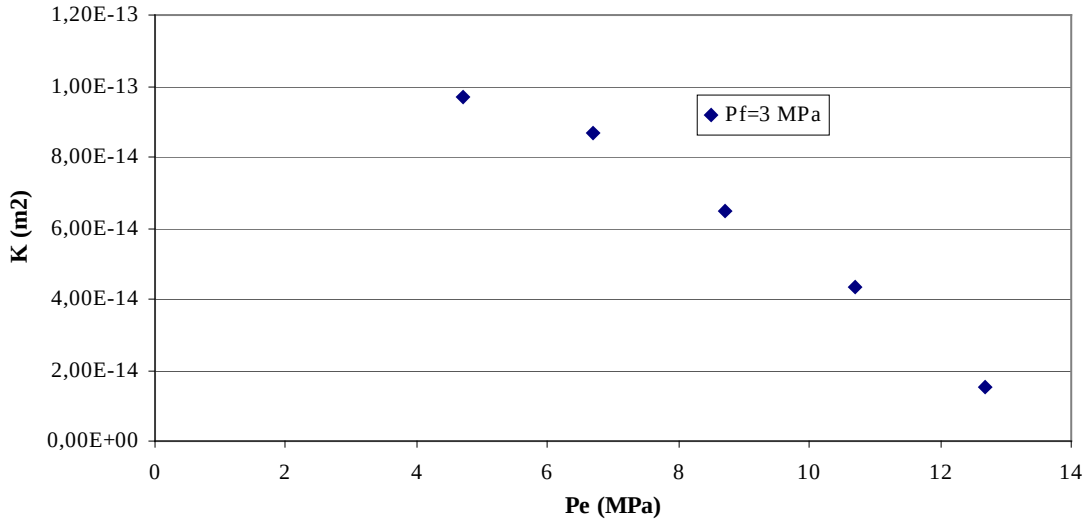


Figure IV.5 : Variations de perméabilité en fonction de la pression externe (essai mhccdn7)

IV.2. Essais sous une pression externe constante et une pression interstitielle externe croissante

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200
Diamètre externe (mm)	99,15
Diamètre interne (mm)	25,65
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}71.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau IV.3 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdnn1)

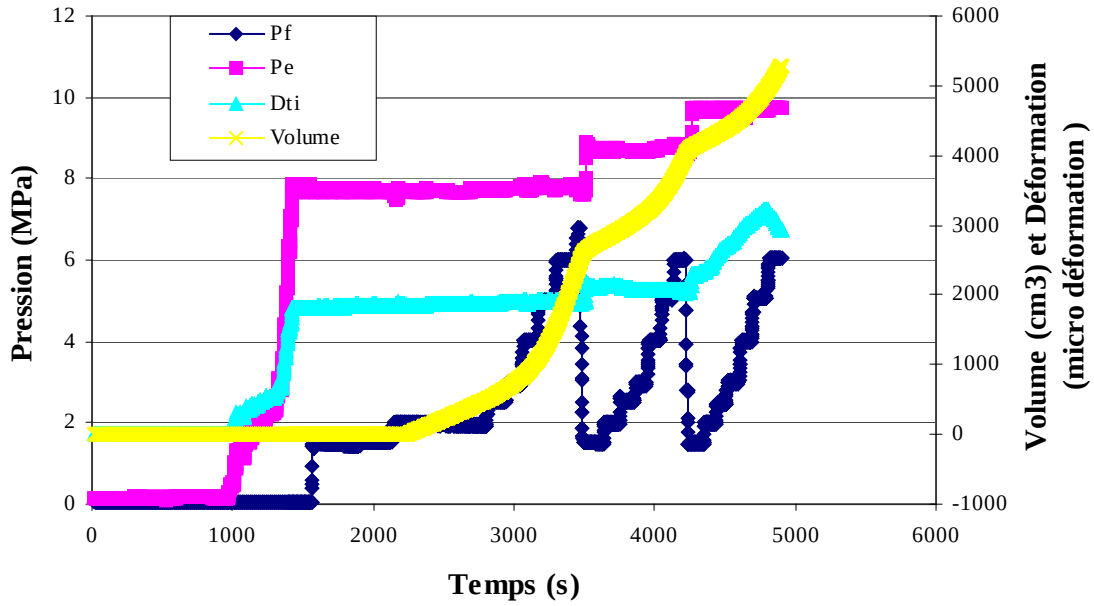


Figure IV.6 : Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps (essai mhccdnn1, température : 24,5°C)

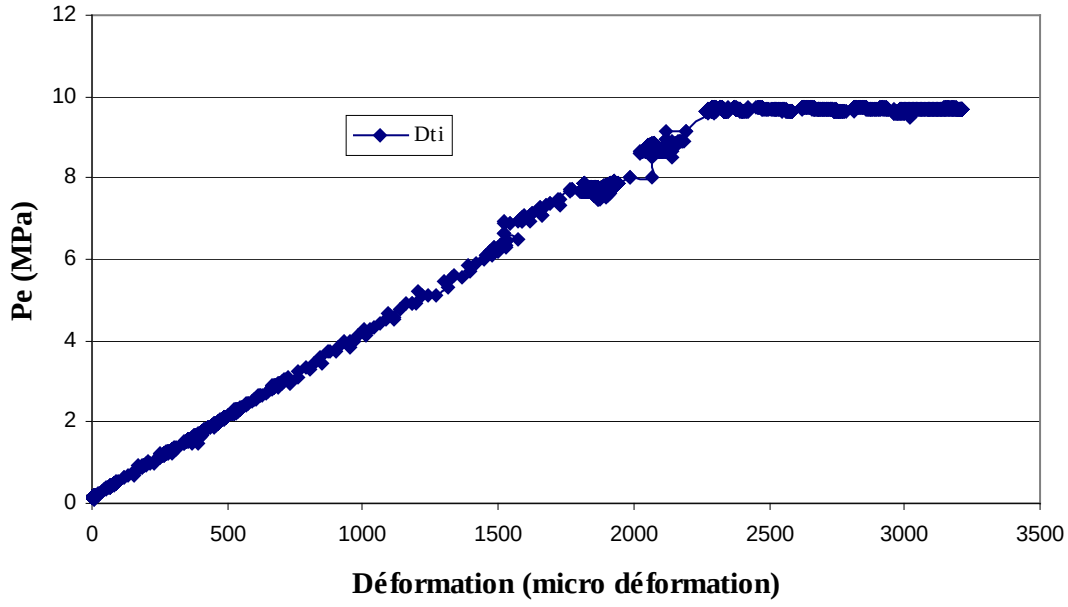


Figure IV.7 : Courbe de pression externe – déformation (essai mhccdnn1)

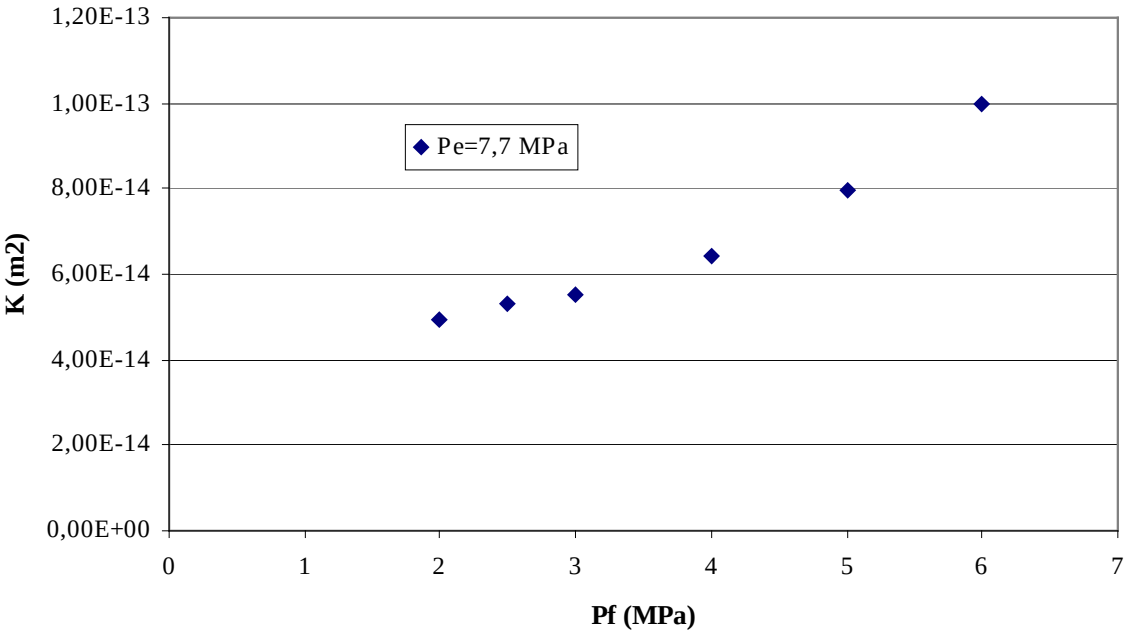


Figure IV.8 : Variations de perméabilité en fonction de la pression interstitielle externe (essai mhccdnn1)

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200,5
Diamètre externe (mm)	99,05
Diamètre interne (mm)	25,65
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}83.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau IV.4 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdnn2)

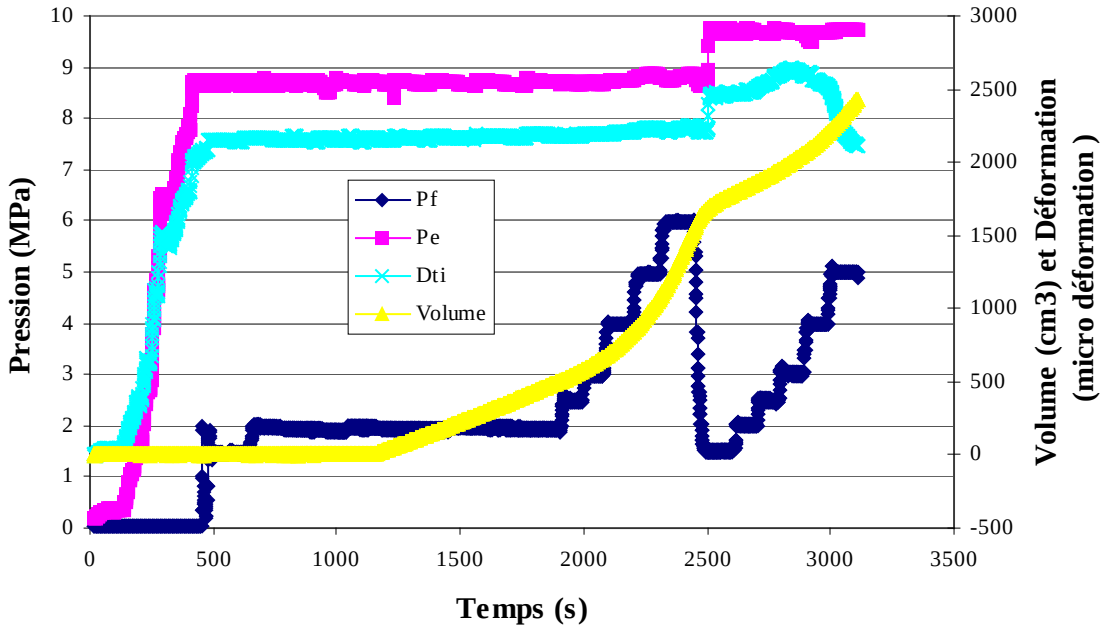


Figure IV.9 : Courbes de pression, déformation et volume en fonction du temps (essai mhccdnn2, température : 25°C)

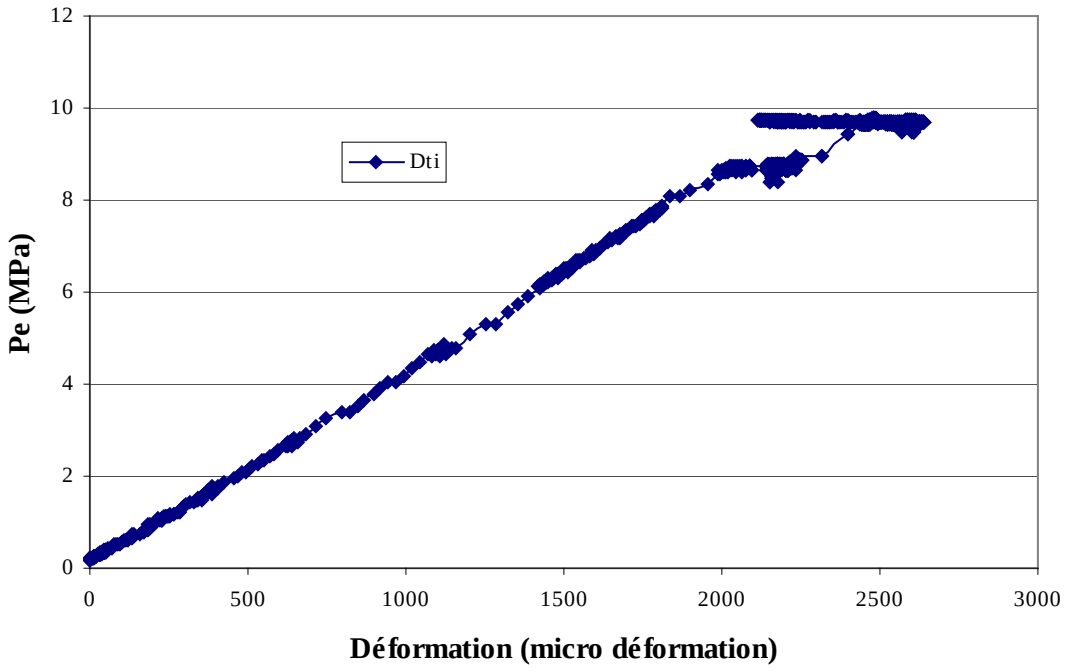


Figure IV.10 : Courbe de pression externe – déformation (essai mhccdnn2)

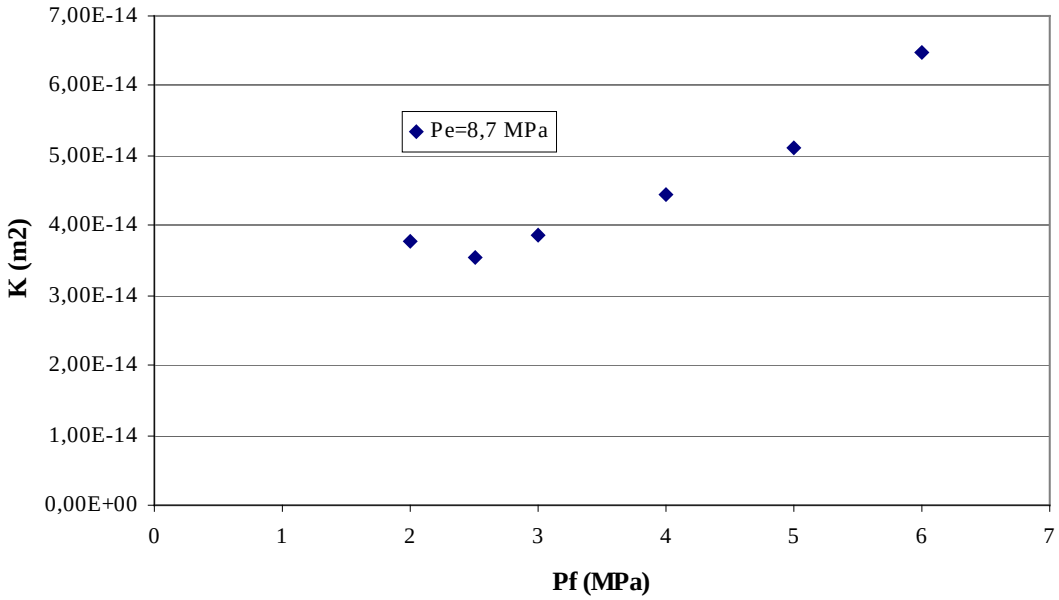


Figure IV.11 : Variations de perméabilité en fonction de la pression interstitielle externe (essai mhccdnn2)

Matériau	CPIR09
Forme	Cylindrique
Hauteur (mm)	200,5
Diamètre externe (mm)	99,15
Diamètre interne (mm)	25,51
Parallélisme < $1{,}25.10^{-3}$	$8{,}51.10^{-4}$
Longueur de partie perméable (cm)	12,5

Tableau IV.5 : Les caractéristiques de l'échantillon (essai mhccdnn4)

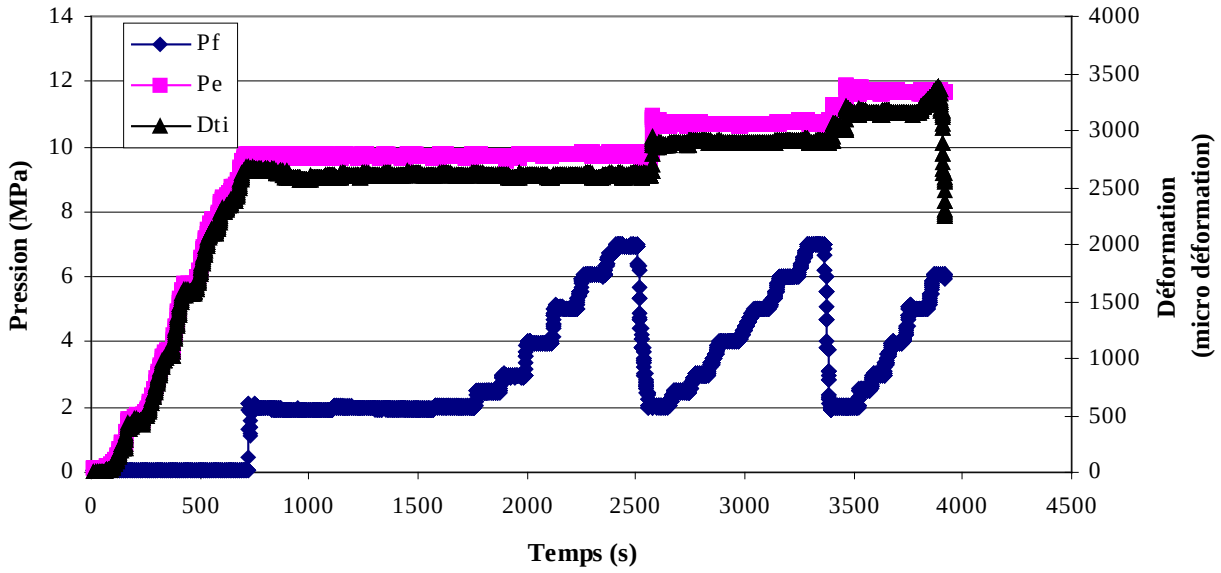


Figure IV.12 : Courbes de pression, déformation en fonction du temps
(essai mhccdnn4 température : 25°C)

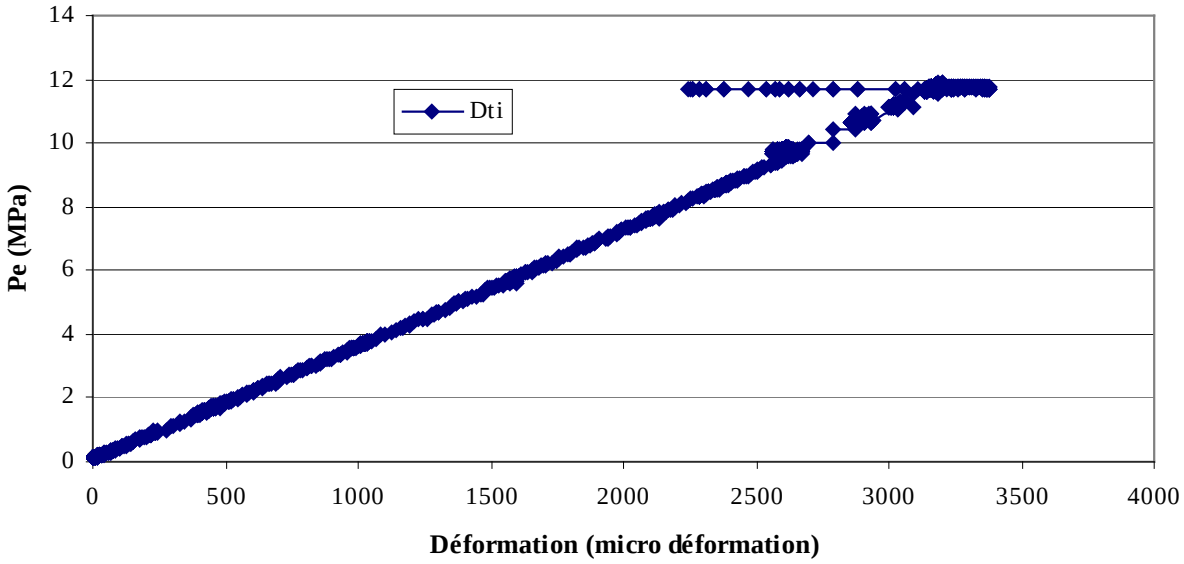


Figure IV.13 : Courbe de pression externe – déformation (essai mhccdnn4)

Annexe V
Solution du cylindre creux en élasticité (sans fluide interstitiel)

Nous considérons un cylindre creux de rayon interne r_i et de rayon externe r_e.
Les contraintes et les déplacements sont traités en coordonnées cylindriques (r,θ,z) avec les hypothèses suivantes :

Matériau supposé continu, homogène, isotrope et élastique.

Dans le cas du cylindre creux axisymétrique, les équations d'équilibre conduisent à l'équation différentielle [34] :

$$\frac{d\sigma_r}{dr}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0 \qquad \text{(V-1)}$$

Où:
σ_r : contrainte radiale
σ_θ : contrainte orthoradiale

Si on considère une relation constitutive de type élastique linéaire isotrope pour le matériau homogène [9] :

$$\sigma_\theta=\lambda e+2G\varepsilon_\theta \qquad \text{(V-2)}$$

$$\sigma_r=\lambda e+2G\varepsilon_r \qquad \text{(V-3)}$$

$$\sigma_z=\lambda e+2G\varepsilon_z \qquad \text{(V-4)}$$

$$e=\varepsilon_r+\varepsilon_\theta+\varepsilon_z \qquad \text{(V-5)}$$

Où :
ε_r : déformation radiale
ε_θ : déformation orthoradiale
ε_z : déformation axiale
G : module de cisaillement
$\lambda=\frac{2\nu G}{(1-2\nu)}$
e : déformation volumique
σ_z : contrainte axiale

$$\varepsilon_r=\frac{du}{dr} \qquad \text{(V-6)}$$

$$\varepsilon_\theta=\frac{u}{r} \qquad (u \text{ est le déplacement radial}) \qquad \text{(V-7)}$$

Les relations (V-2), (V-3), (V-6) et (V-7) sont remplacées dans la relation (V-1) :

$$(\lambda+2G)\frac{d}{dr}(\frac{du}{dr}+\frac{u}{r}+\varepsilon_z)=0 \qquad \text{(V-8)}$$

La réponse de cette équation est :

$$u=Ar+\frac{B}{r} \qquad \text{(V-9)}$$

pour déterminer A et B, nous utilisons les conditions frontalières :

$$\sigma_r(r_e)=P_e \qquad \text{(V-10)}$$

$$\sigma_r(r_i)=P_i \qquad \text{(V-11)}$$

Les relations (V-10) et (V-11) sont remplacées dans la relation (V-3) :

$$P_i=2(\lambda+G)(A)+\lambda\varepsilon_z-2G\frac{B}{r_i^2} \qquad \text{(V-12)}$$

$$P_e=2(\lambda+G)(A)+\lambda\varepsilon_z-2G\frac{B}{r_e^2} \qquad \text{(V-13)}$$

Où :

P_e : pression externe

P_i : pression interne

r_e : rayon externe

r_i : rayon interne

Enfin :

$$A=\frac{P_e r_e^2-P_i r_i^2-\lambda\varepsilon_z(r_e^2-r_i^2)}{2(\lambda+G)(r_e^2-r_i^2)} \qquad \text{(V-14)}$$

$$B=\frac{(P_e-P_i)r_e^2 r_i^2}{2G(r_e^2-r_i^2)} \qquad \text{(V-15)}$$

Les relations (V-14) et (V-15) sont remplacées dans les relations (V-2) et (V-3) pour obtenir σ_r et σ_θ :

$$\sigma_r=\frac{(P_e r_e^2-P_i r_i^2)}{r_e^2-r_i^2}-\frac{(P_e-P_i)r_e^2 r_i^2}{r^2(r_e^2-r_i^2)} \qquad \text{(V-16)}$$

$$\sigma_\theta=\frac{(P_e r_e^2-P_i r_i^2)}{r_e^2-r_i^2}+\frac{(P_e-P_i)r_e^2 r_i^2}{r^2(r_e^2-r_i^2)} \qquad \text{(V-17)}$$

Annexe VI
Protocoles expérimentaux

Cette partie présente la préparation d'essai, la mode emploi du générateur de pression Wykham, le câblage de Module AI-110 et SG-140 et la variation de viscosité du fluide interstitiel en fonction de la température.

VI.1. Préparation d'essai (essai sans fluide interstitiel)

1) Installer les jauges.
2) Installer la membrane interne (pour essai avec pression interne).
3) Fermer la vis pour fixer la membrane interne (pour essai avec pression interne).
4) Placer l'échantillon sur la base de cellule.
5) Souder les fils des jauges.
6) Placer la plaque en haut d'échantillon.
7) Placer deux rubans membrane(longueur 5 cm) en haut (entre l'échantillon et la plaque) et en bas (entre l'échantillon et base de cellule) pour étanchéité (Figure VI.1).
8) Placer la membrane sur l'échantillon (Figure VI.2).
9) Installer les o-rings (Figure VI.3).
10) Retourner la base de cellule avec échantillon et installer sur un tube.
11) Remplir la membrane interne avec l'huile (pour essai avec pression interne).
12) Fermer le vis en bas de cellule.
13) Placer corps de cellule sur l'embase.
14) Installer la cellule sous la presse.
15) Mettre la plaque acier sur le corps de cellule.
16) Enfoncer le corps de cellule sur l'embase avec une presse.
17) Remplir la cellule avec un bidon de l'huile (environ 1 litre).
18) Enlever la vis de purge d'air (en haut de piston).
19) Placer le piston sur le corps de cellule.
20) Enfoncer le piston dans le corps de cellule avec presse (l'orifice de purge doit être libre pour permettre à l'air de sortir).
21) Installer les capteurs de pression et la pompe à main.
22) Faire tourner le générateur de pression.
23) Lors que l'huile sort de l'orifice fermer la vis.
24) Placer la cellule dans l'axe.
25) Mettre le chapeau de piston et la plaque rotule.
26) Bloquer la cellule sur la presse (Figure VI.4).
27) Lancer le programme Labview.



Figure VI.1 : Etape de préparation après avoir placé deux rubans de membrane



Figure VI.2 : Etape de préparation pendant placer la membrane autour de l'échantillon



Figure VI.3 : Etape préparation après avoir placé les o-rings



Figure VI.4 : Etape de préparation après avoir installé tous les instruments

VI.2. Préparation d'essai (essai avec fluide interstitiel)

1) Installer les jauges.
2) Placer l'échantillon sur la base de cellule.
3) Souder les fils des jauges.
4) Placer deux rubans membrane en bas (entre l'échantillon et base de cellule) pour étanchéité des passages des fils) et en haut (entre l'échantillon et plaque) (Figure VI.5).
5) Placer la plaque sur la tête d'échantillon (Figure VI.6).
6) Placer le scotch brite autour d'échantillon (Figure VI.7).
7) Placer le géotextile autour du scotch brite (Figure VI.8).
8) Placer la membrane autour d'échantillon (Figure VI.9).
9) Installer les o-rings (Figure VI.10).
10) Enfoncer le corps de cellule sur l'embase avec une presse.
11) Remplir la cellule avec un bidon d'huile.
12) Enlever la vis de purge d'air (en haut de piston).
13) Placer le piston sur le corps de cellule (Figure VI.11).
14) Enfoncer le piston dans le corps de cellule avec presse (Figure VI.12).
15) Installer les capteurs de pression
16) Connecter les flexibles de la sortie de générateur et de pompe à cellule par coupleur rapide (Figure VI.13).
17) Connecter la sorti de fluide à bidonne par coupleur rapide.
18) Faire tourner le générateur de pression.
19) Lors que l'huile sort de l'orifice fermer la vis (Figure VI.14).
20) Placer la cellule dans l'axe.
21) Mettre le chapeau de piston et la plaque rotule.
22) Bloquer la cellule sur la presse.
23) Allumer la balance.
24) Allumer la pompe.
25) Ouvrir le robinet de bidon qui est sur la balance.
26) Lancer le programme Labview.



Figure VI.5 : Etape de préparation après avoir placé deux rubans de membrane



Figure VI.6 : Etape de préparation après avoir placé la plaque



Figure VI.7 : Etape de préparation après avoir placé le Scotch brite autour de l'échantillon



Figure VI.8 : Etape de préparation après avoir placé le géotextile autour de l'échantillon



Figure VI.9 : Etape de préparation pendant placer la membrane autour de l'échantillon



Figure VI.10 : Etape de préparation après avoir placé placer la membrane avec les o-rings



Figure VI.11 : Etape de préparation pendante placer le piston sur le corps de cellule

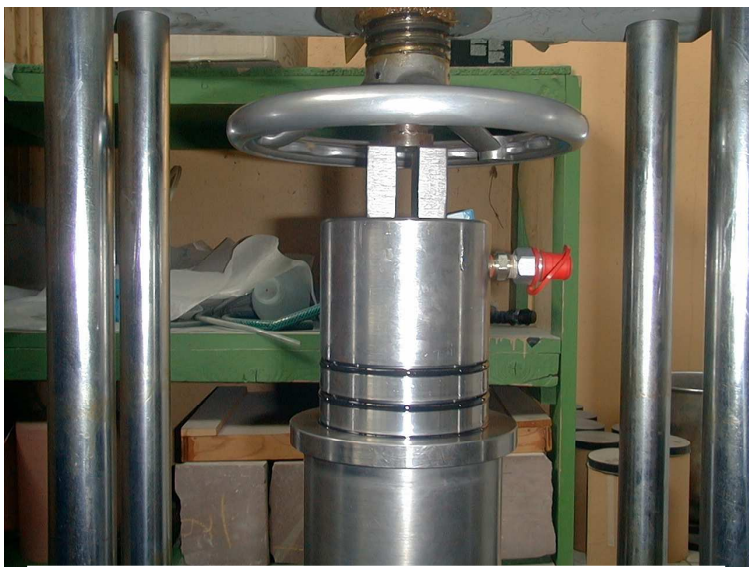


Figure VI.12 : Etape de préparation pendant pénétrer le piston dans le corps de cellule grâce à la presse



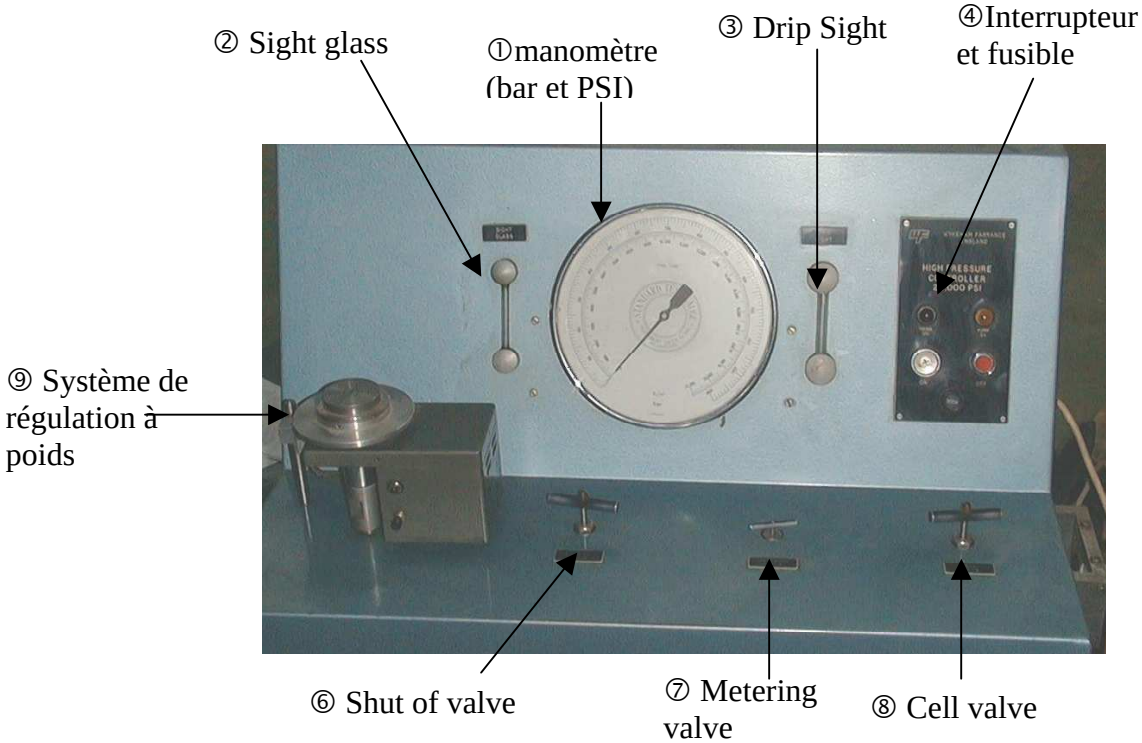
Figure VI.13 : Etape de préparation après avoir Connecté les flexibles de la sortie de générateur et de pompe à cellule par coupleur rapide



Figure VI.14 : Etape de préparation pendant fermer la vis de purge

VI.3. Mode d'emploi du générateur de pression Wykeham

Les figures VI.15 et VI.16 montrent le pupitre de commande et le Circuit hydraulique du générateur de pression.



)

Figure VI.15 : Générateur de pression Wykeham

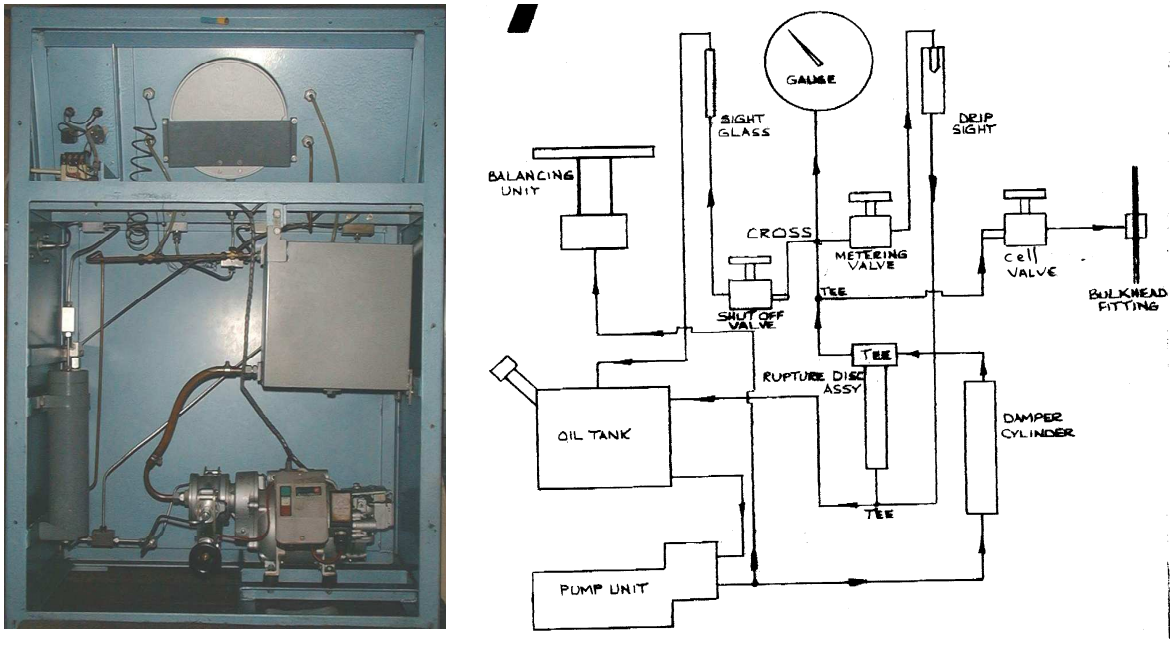


Figure VI.16 : Circuit hydraulique

1) Brancher le flexible sur la cellule.

2) Ouvrir ⑥ et ⑧, fermer ⑦.

3) Mettre en marche ④ sans poids sur le système de régulation ⑨ ; faire tourner le plateau.

4) Laisser tourner et attendre que l'air soit parti en visualisant avec ②.

5) Lorsque la cellule est purgée, fermer le bouchon de cellule.

6) Fermer ⑥ ; Pour augmenter la pression (ça peut être long au début). La pression maxi est fonction des poids sur le plateau. A noter que sans plateau, la pression maxi initiale est de 20 bar. Par exemple, il faut mettre un plateau de 180 bar pour atteindre une pression maxi de 200 bar.
Lorsqu'elle est atteinte, les poids montent et disjonctent la pompe. Lorsque la pression baisse, les poids descendent et la pompe est remise en marche.

7) Contrôler la montée et la descente avec ⑦ (réglage fin)

8) Pour baisser la pression rapidement, ouvrir ⑥.

en cas d'urgence, ouvrir la vanne « shut of valve » ⑥ pour revenir rapidement à la pression ambiante.

VI.4. Câblage de module AI-110 et SG -140

VI.4.1. Module AI-110

Voie	AI-110	Com	I
0	P_e	18 (jaune+blanc+blindage)	2 (bleu)
1	P_i	20 (jaune+blanc+blindage)	4 (bleu)
2	P_{ie}	22 (jaune+blanc+blindage)	6 (bleu)

Tableau VI.1 : Câblage du module AI-110

Pour le capteur de pression alimentation est fil rouge qui est relié à la alimentation.
Le Com du module est relié au Com de l'alimentation (fil noir)

VI.4.2. Module SG-140 (module de jauge)

Voie	SG-140	Com	V_{exc}
0	Interne axiale	1 (Orange)	17 (rouge)
	Compensation 1	1 (marron)	18 (rouge)
1	Interne transversale	3 (rouge)	19 (blanc)
	Compensation 2	3 (orange)	20 (jaune)
2	Externe axiale	5 (vert)	21 (orange)
	Compensation 3	5 (vert)	22 (bleu clair)
3	Externe transversale	7 (rouge)	23 (bleu foncé)
	Compensation 4	7 (gris)	24 (violet)

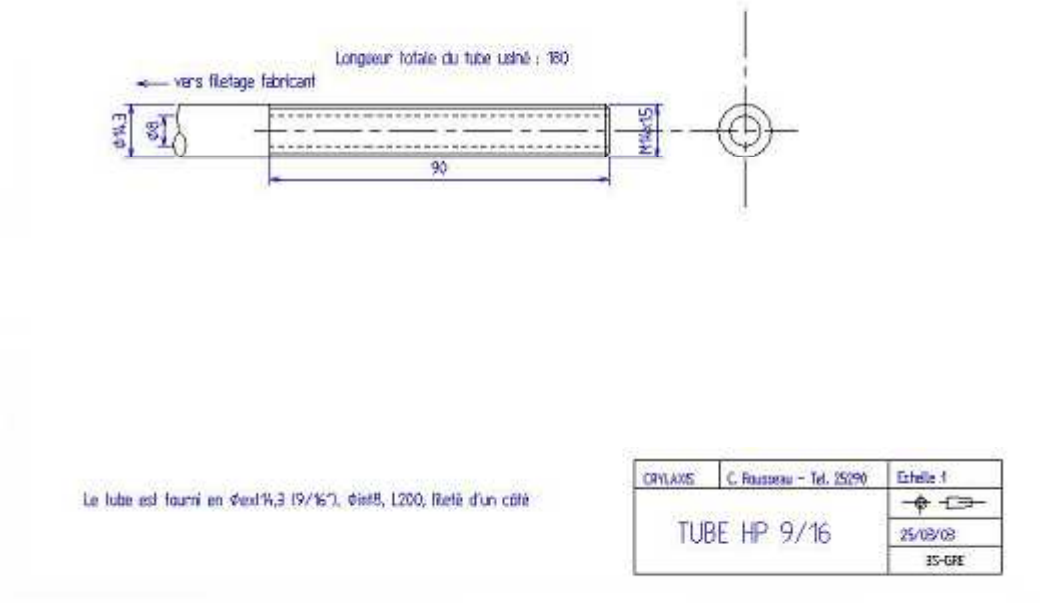
Tableau VI.2 : Câblage du module SG-140

VI.5. Variations de viscosité du fluide interstitiel en fonction de la température

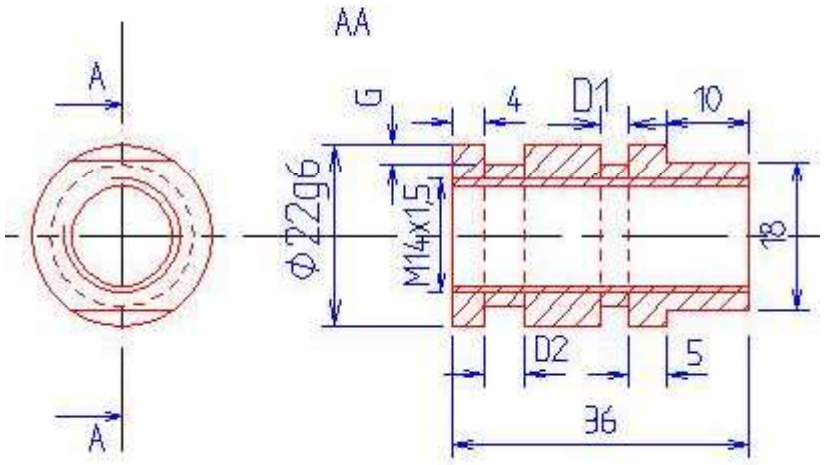
T (°C)	µ (cp)	T (°C)	µ (cp)
22	69,5	28	58
23	67,5	29	48,5
24	65,1	30	45,9
25	63	31	43
26	62,8	32	41,1
27	61	33	39,8

Tableau VI.3 : Variations de viscosité du fluide interstitiel en fonction de la température

Annexe VII
Plans des pièces mécaniques



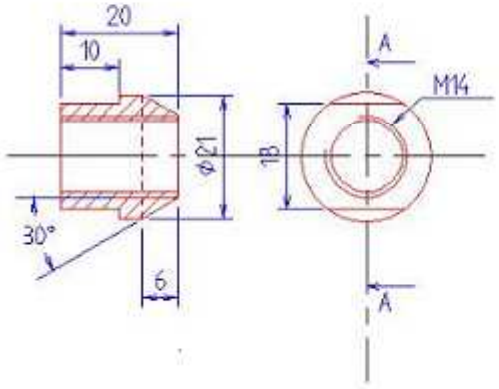
Les cotes non tolérancées sont à +/- 0,2



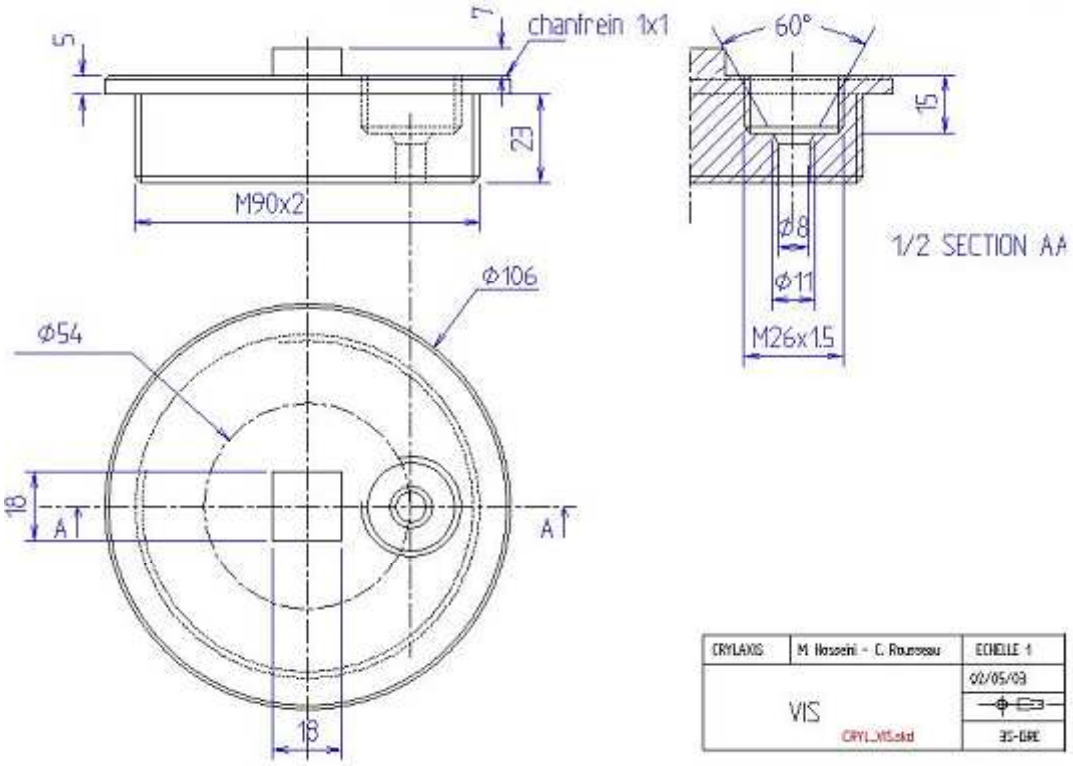
$D1 = 3{,}40^{+0{,}1}_{-0}$ $D2 = 4{,}8^{+0{,}1}_{-0{,}1}$ $G = 2{,}30^{0}_{-0{,}5}$

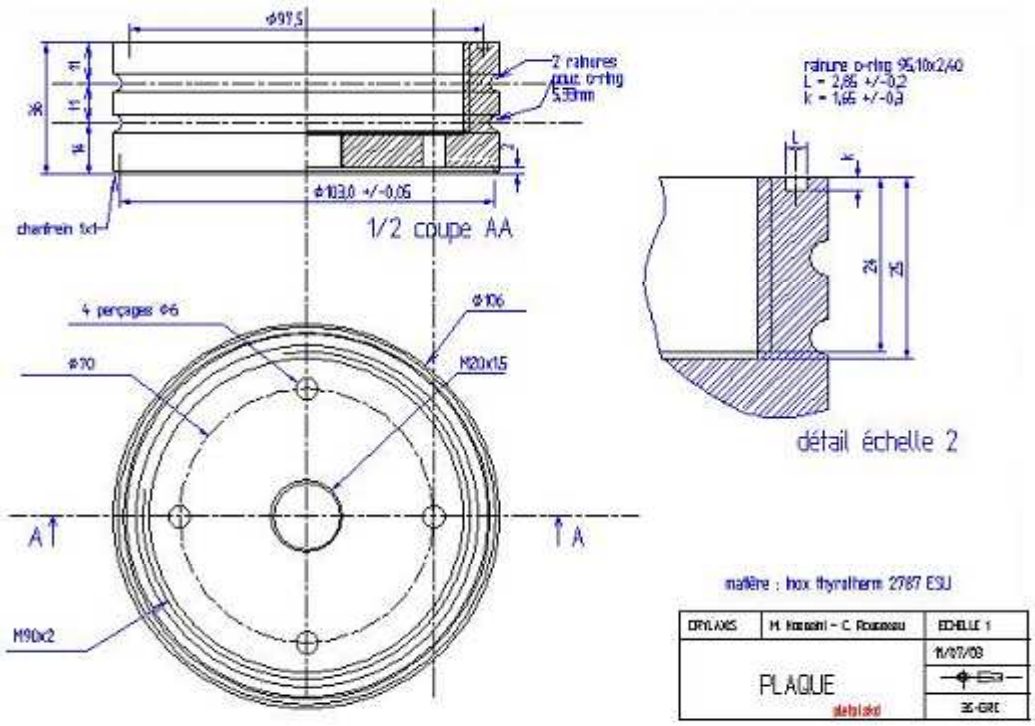
CRYLAXIS	C. Rousseau - Tel. 25290	Echelle 2
BAGUE bague.skd		02/04/03 3S-GRE

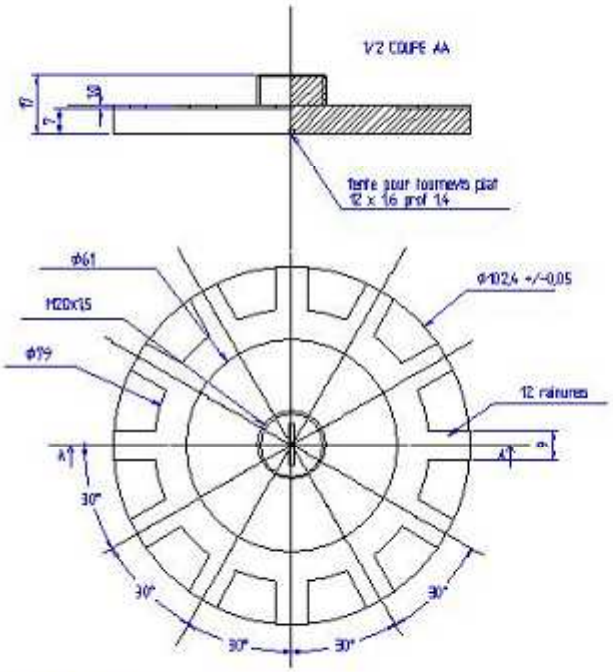
Les cotes sont à +/-0.2, l'angle à +/-2°



CRYLAXIS	C. Rousseau - Tel. 25290	Echelle 2
ECROU ecrou.skd		02/04/03
		3S-GRE


5
7
chanfrein 1x1
23
M90x2
Ø106
Ø54
18
A
A
18
60°
15
Ø8
Ø11
M26x1.5
1/2 SECTION AA
CRYLAXIS
M Hosseini - C Rousseau
ECHELLE 1
02/05/03
VIS
CRYL_VIS.sld
3D-GRE

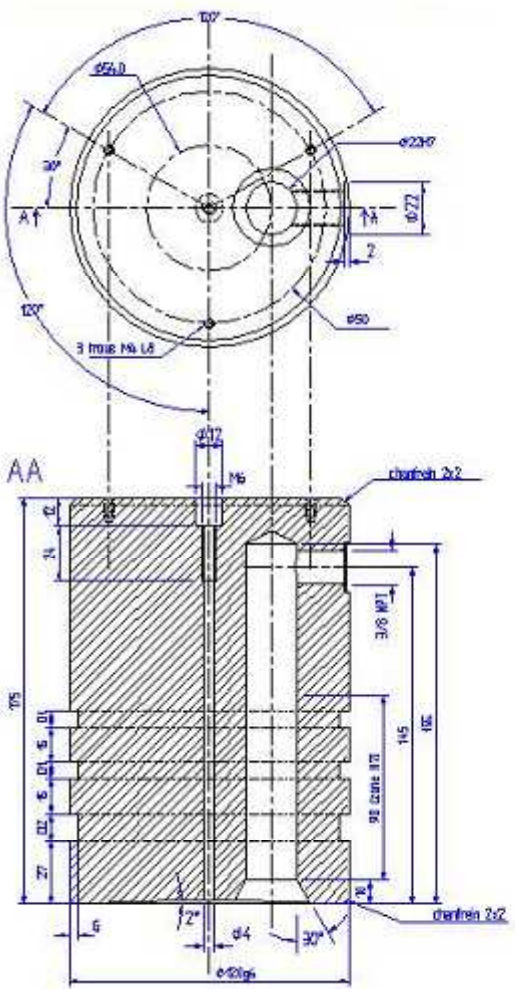

ø97,5
2 rainures pour o-ring 5,33mm
ø103,0 +/-0,05
chanfrein 1x1
1/2 coupe AA
4 perçages ø6
ø70
ø106
M20x1,5
M90x2
A
A
rainure o-ring 95,10x2,40
L = 2,86 +/-0,2
k = 1,66 +/-0,1
détail échelle 2
matière : Inox thyrotherm 2787 ESU
DRYLAXIS
M. Hanssini - C. Rousseau
ECHELLE 1
PLAQUE
16/07/03
35-GRE



Matière : inox thyrotherm 2787 ESU – X 2Cr Ni 17 RSL

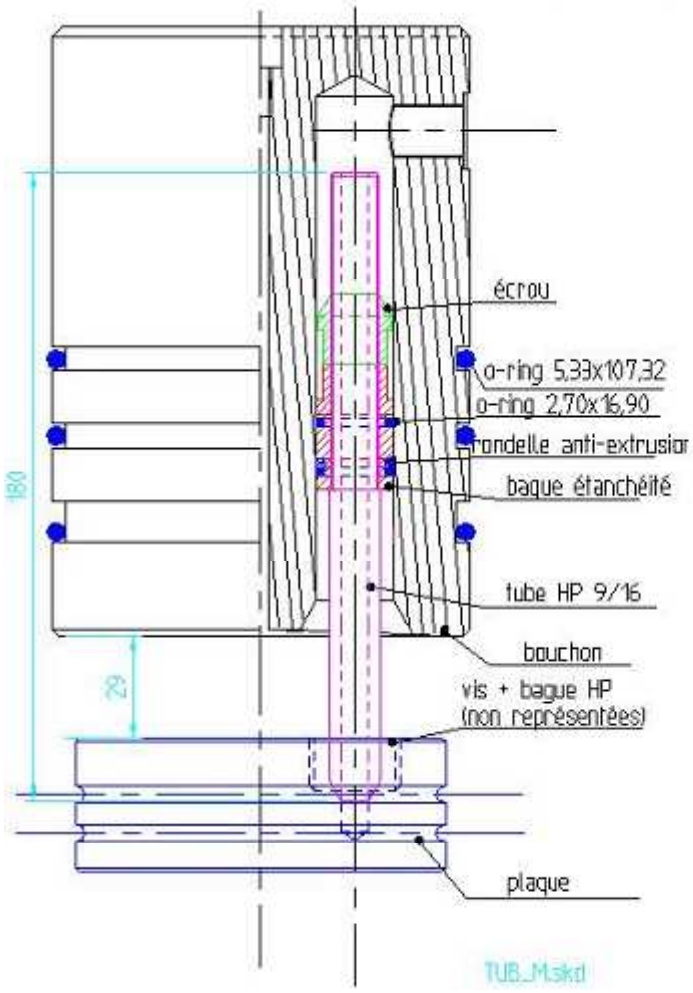
Tolérances (si non précisée) : +/-0,1

CRYLAXIS	C. Rousseau	ECHELLE 1
PLAQUE VIS		11/07/08
plaque_vis.sld		35-GRE



Etanchéité : o-ring 5,33 - dimensions :
01 = 7,1 +0,1 / -0
02 = 8,6 +/- 0,1
G = 4,35 (profondeur des 3 gorges)

CRYLAXIS	C. Rousseau - Tel. 25290	Echelle 2/3
BOUCHON bouch23.skd		16/04/09
		3S-GRE



ORYLAXIS	C. Rousseau - Tél. 35290	Echelle 1
MONTAGE Vue d'ensemble		20/08/08 35-GRE