

gen 2000 2145

50376  
1998  
147

**UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE (USTL)**

**Laboratoire de Mécanique de Lille (URA 1441 CNRS)**



**THESE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE  
LILLE (USTL)**

***Discipline : Génie Civil***

Présentée et soutenue publiquement

par

**KARAMI Mohammad Hassan**

le 06/ juillet /1998



**Titre :**

**ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT  
POROMECANIQUE D'UNE ROCHE ENDOMMAGEABLE**

**JURY**

MM :

- |  |              |
|--|--------------|
| HENRY J. P. - Professeur - Ecole des Mines d'Alès                      | , Président  |
| VOUILLE G. - Professeur - Ecole des Mines de Paris                     | , Rapporteur |
| BOULON M. - Professeur - Université Grenoble I                         | , Rapporteur |
| SHAO J. F. - Professeur - USTL   | , Examineur  |
| SCHRÖDER C. - Ingénieur de recherche principal - L.G.V. Liège Belgique | , Examineur  |
| SIBAI M. - Ingénieur de recherche - USTL                               | , Examineur  |



*A la mémoire des dizaines de milliers de mes compatriotes qui se sont sacrifiés pour l'IRAN, son indépendance, sa liberté et sa gloire.*

## **AVANT PROPOS**

---

---

*Je tiens tout d'abord à remercier monsieur le professeur J.P. HENRY pour avoir bien voulu m'accueillir au sein de son équipe de recherche au Laboratoire de Mécanique de Lille et avoir accepté d'être le président du jury de thèse.*

*J'adresse tous mes remerciements à monsieur le professeur J.F. SHAO pour ses conseils très précieux qui ont été indispensables dans la réussite de ce travail.*

*Je souhaite remercier très chaleureusement monsieur M. SIBAI, docteur ingénieur au Laboratoire de Mécanique de Lille, pour sa disponibilité et ses aides fondamentales tout au long de ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à messieurs G. VOUILLE, professeur à l'Ecole des Mines de Paris et M. BOULON, professeur à l'Université de Grenoble I, qui ont accepté de participer au jury de thèse et d'en être rapporteurs.*

*Je remercie monsieur C. SCHRÖDER, ingénieur de recherche principal à L.G.V. Liège, pour avoir également accepté de participer au jury de thèse.*

*Je remercie tous les collègues et amis, je pense notamment à P. SANSEN et J.B. EYOGO avec qui j'ai partagé le bureau. L'aide apportée par M. BART, M. QUIERTAN, A.S. CHIARELLI, H. WELEMANE dans la phase de rédaction a été très précieuse, merci pour la patience et la disponibilité apportées par chacun.*

*Ce travail a été réalisé avec l'aide financière du ministère de la culture et de l'enseignement supérieur de l'IRAN, je l'en remercie vivement. J'ai une pensée particulière pour monsieur Amir PARVIN, conseiller scientifique et chargé des affaires des étudiants à l'ambassade d'IRAN à Paris, qui nous a quitté.*

*Enfin je remercie mon épouse pour sa patience, son aide et son soutien qu'elle m'a apportés tout au long de ces années de thèse. J'ai une pensée affectueuse pour elle et pour nos enfants Javané et Niki.*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>12</b>
I.1 Généralités	13
I.2 Mécanique des Milieux Poreux.....	16
I.2.1 Thermoporoélasticité Linéaire	17
I.2.1.1 Comportement Thermoporoélastique Linéaire Isotrope.....	20
I.2.1.2 Détermination Expérimentale des Coefficients Poroélastiques Linéaires Isotropes (cas isotherme $T=T_0$ )	21
I.2.1.3 Comportement Thermoporoélastique Linéaire Anisotrope.....	24
I.2.2 Poroélastoplasticité	25
I.2.2.1 Critère de Plasticité et le Règle d'Écoulement .....	26
I.2.2.2 Comportement Poroélastoplastique Isotrope	27
I.2.3 Matériau Poreux avec Endommagement.....	28
I.3 Perméabilité	30
I.3.1 Détermination expérimentale de la Perméabilité.....	31
<b>CHAPITRE II : PROGRAMME D'ESSAIS ET MODES OPERATOIRES</b>	<b>33</b>
II.1 Identification du matériau étudié	34
II.1.1 Présentation générale.....	34
II.1.2 Porosité	34
II.2 Description du Dispositif Expérimental.....	35
II.2.1 Dispositif Expérimental	35
II.2.2 Dispositif de Mesure.....	39
II.3 Modes Opératoires	41
II.3.1 Carottage et Rectification.....	42

II.4 3.2 Collage des Jauges	42
II.3.3 Préparation de Membranes et Mis en Gaine de l'Eprouvette.....	43
II.3.4 Mise en place de l'Echantillon	43
II.3.5 Saturation sous Pression.....	43
II.4 Chemins de Chargements Effectués	45
II.4.1 Chemin de Compression Hydrostatique.....	47
II.4.1.1 Chemin Drainé	47
II.4.1.2 Chemin Non Drainé.....	48
II.4.1.3 Chemin à Drainage Partiel	48
II.4.1.4 Chemin à $\Delta\sigma_m = \Delta P$ .....	50
II.4.2 Chemin de Compression Triaxiale Monotone	50
II.4.2.1 Chemin Drainé.....	51
II.4.2.2 Chemin Non Drainé	52
II.4.2.3 Chemin Drainé avec Montées en P et détermination de la Perméabilité	
II.4.2.4 Chemin Non Drainé avec Chutes de P.....	53
II.4.3 Chemin de Compression Triaxiale avec Cycles de Déchargement - Rechargement Déviatorique.....	54
II.4.3.1 Chemin Drainé	55
II.4.3 2 Chemin Non Drainé.....	55
II.4.3.3 Chemin Drainé avec Montées en P et détermination de la Perméabilité	
II.4.4 Chemin Drainé de Compression Triaxiale avec Cycles de Chargement - Déchargement - Rechargement Latéral.....	56
II.4.5 Chemin d'Extension Latérale Non Drainé	57
II.4.6 Chemin de Chargement Proportionnel Non Drainé.....	58

<b>CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTALE</b>	<b>61</b>
--	-----------

III.1 Caractérisation de l'endommagement sous charges mécaniques	62
III.1.1 Essais sur des Eprouvettes Non Saturées.....	62
III.1.1.1 Essai de Compression hydrostatique	62
III.1.1.2 Essai de Compression Triaxiale Monotone.....	63

III.1.1.3 Essai de Compression Triaxiale Drainée avec cycles de Chargement - Déchargement Déviatorique	65
III.1.2 Essais sur des Eprouvettes Saturées.....	68
III.1.2.1 Essai de Compression Triaxiale Monotone Drainée	69
III.1.2.2 Essai de Compression Triaxiale Drainée avec cycles de Chargement - Déchargement Latéral.....	71
III.2 Essais de Caractérisation et de Détermination des coefficients de Couplage	76
III.2.1 Essai de Compression hydrostatique.....	76
III.2.1.1 Essai Hydrostatique Drainé	76
III.2.1.2 Essai Hydrostatique Non Drainé.....	79
III.2.1.3 Essai Hydrostatique à $\Delta\sigma_m=\Delta P$	79
III.2.1.4 Essai Hydrostatique à Drainage Partiel.....	81
III.2.2 Essai de Compression Triaxiale	83
III.2.2.1 Essai Drainé avec Montées en P et détermination de la Perméabilité	
III.2.2.2 Essai Non Drainé avec Chutes de P.....	89
III.2.3 Essai de Compression Triaxiale avec Cycles de Chargement-Déchargement Déviatorique .....	92
III.2.3.1 Essai Drainé avec Montées en P et détermination de la Perméabilité	
III.2.3.2 Essai Non Drainé.....	97
III.3 Essais Triaxiaux de Validation	99
III.3.1 Essai Monotone Non Drainé.....	99
III.3.2 Essai d'Extension latérale Non Drainé	101
III.3.3 Essai du Chargement Proportionnel Non Drainé.....	101
III.4 Conclusion	104

<b>CHAPITRE IV: EXPLOITATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX</b>	<b>106</b>
--	------------

IV.1 Essais Hydrostatiques : Détermination des Paramètres Poroélastiques du Matériau Non Endommagé	107
IV.1.1 Calcul du Coefficient de Biot b.....	107

IV.2 Essais Triaxiaux : Evolution des Paramètres Poroélastiques en Fonction de l'Endommagement	110
IV.2.1 Loi Incrémentale Tangente de la Poroélasticité Anisotrope.....	110
IV.2.2 Application de la Loi	113
IV.2.3 Calcul des Coefficients de Biot.....	115
IV.3 Conclusion	121

<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>122</b>
----------------------------	------------

<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>126</b>
----------------------	------------

<b>ANNEXES</b>	<b>132</b>
----------------	------------

Annexe I : Résultats des Essais Effectués	132
Annexe II : Caractéristiques du Méthanol.....	166
Annexe III : Photos du Dispositif Expérimental et des Echantillons	168

## NOTATIONS

A	Tenseur de contrainte thermique
B	Tenseur des coefficients de la contrainte effective de Biot
$B_s$	Coefficient de Skempton
b	Coefficient de la contrainte effective dans le cas du matériau isotrope
C	Tenseur des modules élastiques non drainés
$C_\varepsilon$	Chaleur volumique non drainée à déformation volumique constante
E	Module d'Young élastique non drainé
$E_o$	Module d'Young élastique drainé
$f(\sigma, P)$	Fonction de charge plastique
$g_m$	Enthalpie libre massique du fluide
G	Module de cisaillement
H	Tenseur des modules poroélastiques non drainés
H	Tenseur des modules poroélastiques drainés
$H_1$	Module poroélastique dans la direction 1, la pente de la courbe P- $\varepsilon_1$
$H_2$ ou $H_3$	Module poroélastique dans le plan d'isotropie, la pente de la courbe P- $\varepsilon_2$
$H_v$	Module poroélastique volumique, la pente de la courbe P- $\varepsilon_v$
K	Module d'incompressibilité non drainé
$K^o$	Module d'incompressibilité à l'état sec
$K_o$	Module d'incompressibilité drainé
$K_s$	Module d'incompressibilité de la matrice solide
$K_{fl}$	Module d'incompressibilité du fluide interstitiel (Méthanol)
k	Perméabilité intrinsèque
m ou $\omega$	Apport de la masse fluide par unité du volume
$m^p$	Apport de la masse fluide plastique
M	Module de Biot
P	Pression interstitielle
$P_c$	Pression de confinement
$P_{cf}$	Pression de fermeture des microfissures naturelles
R	Tenseur de compliances non drainé
$R_o$	Tenseur de compliance drainé
s	Entropie du système
$s_m$	Entropie massique du fluide
T	Température
t	Temps
$U(V_x)$	Energie bloquée par l'érouissage
$V_x$	Variable(s) d'érouissage
v	Vitesse de l'écoulement du fluide

$V$	Volume total initial
$V_p$	Volume des pores

### ***NOTATIONS GREQUES***

$\alpha$	Coefficient de dilatation thermique linéique non drainé
$\alpha_o$	Coefficient de dilatation thermique linéique drainé
$\alpha_m$	Coefficient d'apport de masse fluide thermique isochore drainé
$\delta$	Symbole de Kronocker
$\varepsilon_1$	Déformation longitudinale
$\varepsilon_2, \varepsilon_3$	Déformations transversales
$\varepsilon^p$	Tenseur des déformations plastiques
$\varepsilon_v$	Déformation volumique égale à $\varepsilon_v = \text{tr}\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$
$\phi$	Porosité
$\phi^p$	Porosité plastique
$\phi_f$	Porosité de microfissures naturelles
$\Phi^p$	Dissipation plastique
$\phi_1$	Dissipation intrinsèque ou volumique
$\gamma$	Poids volumique du fluide
$\lambda$	Multiplicateur plastique
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide :
$\nu$	Coefficient de Poisson non drainé
$\nu^o$	Coefficient de Poisson à l'état sec
$\nu_o$	Coefficient de Poisson drainé
$\rho_o^{fl}$	Masse volumique initial du fluide
$\sigma_1$	Contrainte axiale
$\sigma_2, \sigma_3$	Contrainte latérale
$\sigma_1 - \sigma_3$	Contrainte déviatorique
$\sigma_c$	Résistance à la pression uniaxiale
$\sigma_{eff}$	Contrainte effective
$\sigma_m$	Contrainte moyenne égale à $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
$\omega$ ou $m$	Apport de la masse fluide par unité du volume
$\psi$	Energie libre du système

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

**D**ans de nombreuses applications industrielles en génie civil, en génie pétrolier ainsi que dans le stockage des déchets radioactifs, les problèmes d'interaction entre les déformations du squelette, des échanges de fluide avec le milieu environnant et les transferts de chaleur dans le matériau deviennent essentiels. L'étude des effets interactifs des comportements mécanique, hydraulique et thermique des matériaux est une branche relativement récente dans le domaine de la mécanique des solides. Elle pourtant a fait l'objet d'un grand nombre de travaux de modélisation (comportement thermo-hydro-mécanique) basés la plupart d'entre eux sur la théorie de Biot. Le type de loi de comportement mécanique couplé aux comportements hydraulique et thermique est lié au comportement de la phase solide du matériau poreux considéré, qui peut être élastique (isotrope ou non), élastoplastique avec ou sans endommagement. Les travaux considérant le milieu poreux comme un solide poro-endommageable sont encore peu nombreux sur le plan théorique et rares sur le plan expérimental.

Le présent travail, essentiellement expérimental, a pour but d'explorer l'effet de la microfissuration anisotrope induite sur les paramètres de l'interaction fluide-squelette, plus particulièrement sur le coefficient des contraintes effectives de Biot. Le matériau choisi est un grès des Vosges dans lequel le mécanisme principal des déformations irréversibles est le développement de microfissures orientées. On se propose ainsi de créer une base de données expérimentales sur ce matériau soumis à différents chemins de sollicitation. En effet, un grand nombre de données concernant le comportement mécanique de ce matériau sont déjà disponibles dans notre laboratoire.

La présente étude comporte quatre chapitres :

I) Le premier chapitre donnera une brève présentation de la théorie générale de la mécanique des milieux poreux saturés, notamment concernant le comportement thermoporoélastique des matériaux isotropes et anisotropes.

II) Le deuxième chapitre portera sur la présentation du matériau étudié, du programme d'essais élaboré et du dispositif expérimental adopté pour notre étude en laboratoire. Les procédures utilisées pour la préparation des échantillons et la réalisation des essais sous différents chemins de sollicitations seront également précisées dans ce chapitre. En outre, chaque type d'essai sera motivé par un objectif précis.

III) Dans le troisième chapitre, nous présenteront les résultats de notre étude expérimentale en trois parties :

i) En premier lieu les résultats obtenus à partir des essais de caractérisation de la microfissuration, comprenant des essais de compression hydrostatique, de compression triaxiale monotone et avec des cycles de chargement-déchargement axial ainsi que latéral, seront présentés. A travers ces essais, nous montrerons clairement l'anisotropie induite du comportement mécanique du matériau et le développement de microfissures qui apparaissent comme étant l'origine des déformations irréversibles et de la rupture.

ii) La deuxième partie est consacrée aux essais de détermination des paramètres de couplage poroélastique du matériau « sain » sous différents chemins de compression hydrostatique. L'influence de l'endommagement induit sur le couplage poromécanique est étudiée par des chemins déviatoriques. Les résultats obtenus sont présentés et interprétés en détail. On montre alors clairement l'anisotropie de l'interaction fluide-squelette due essentiellement à l'anisotropie induite du comportement mécanique du matériau.

iii) Dans la troisième partie, nous présenterons les résultats des essais de validation. Ces essais particuliers, certains d'entre eux effectués pour la première fois dans le laboratoire, sont en fait des chemins non conventionnels qui vont nous permettre de valider les modèles poromécaniques développés à partir des essais conventionnels.

IV) Dans le quatrième chapitre, un dépouillement détaillé des résultats obtenus sera présenté. Tout d'abord, les différentes constantes poroélastiques du matériau dans son état naturel (non endommagé) seront déterminées. Ensuite, l'influence de l'endommagement induit sur les variations des paramètres de couplage sera étudiée. En se basant sur l'hypothèse d'une loi poroélastique incrémentalement linéaire anisotrope, nous déterminerons la variation significative des paramètres de couplage, plus particulièrement le tenseur des coefficients de contrainte effective de Biot. On montrera notamment l'anisotropie induite dans ces coefficients, due au développement de microfissures orientées.

# **CHAPITRE 1**

**ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES**

## I.1 Généralités

L'étude de l'interaction fluide-squelette dans les milieux poreux a été initiée par TERZAGHI [TERZ. 1923] en 1923, qui avait abordé le problème de la consolidation unidimensionnelle dans les sols, c'est à dire dans les matériaux granulaires essentiellement sans cohésion. Il avait énoncé la notion de contrainte effective comme étant la contrainte responsable des déformations du squelette du milieu saturé. Ce concept s'exprime par la relation suivante :

$$\tilde{\sigma}_{\text{eff}} = \tilde{\sigma} + P\tilde{\delta} \quad (\text{I-1})$$

où  $\tilde{\sigma}$  est le tenseur de contrainte total,  $P$  la pression interstitielle et  $\tilde{\delta}$  le symbole de Kronecker. Cette notion, purement empirique, est établie sur les hypothèses suivantes:

- le milieu est saturé avec un seul fluide,
- les grains constituant la matrice solide et le fluide saturant l'espace vide du milieu sont incompressibles,
- l'écoulement du fluide à travers les pores est laminaire et obéit à la loi de Darcy.

L'utilisation de ce concept se justifie bien dans la plupart des cas en mécanique des sols. Sa validité ayant été expérimentalement étudiée et vérifiée même dans le cas d'un écoulement suffisamment rapide (vitesse apparente à 0,36 m/sec) d'un gaz, supposé pourtant laminaire, à travers un milieu granulaire [KARA. 1993]. Cependant, elle ne peut pas être appliquée dans le cas des roches pour lesquelles il existe une cohésion non négligeable. L'hypothèse de l'incompressibilité de la matrice solide et du fluide interstitiel apparaît incohérente pour décrire correctement le comportement de la plupart des roches saturées [ZIMM. 1986]. Son unique utilisation appropriée en mécanique des roches, se restreint au cas particulier d'une roche possédant une matrice solide élastiquement et plastiquement incompressible [COUS. 1991].

La première formulation générale d'un modèle de comportement pour un matériau poreux saturé, dans le but d'une analyse tridimensionnelle de la consolidation, a été présentée par BIOT en 1941 [BIOT. 1941]. L'idée principale de la théorie de BIOT est en fait la superposition, de façon linéaire, des effets de la pression interstitielle sur les déformations engendrées par les contraintes appliquées. Les hypothèses suivantes ont été utilisées dans cette première théorie de BIOT :

- le milieu est isotrope, homogène et parfaitement saturé,
- les transformations sont petites, ce qui implique l'hypothèse de petites perturbations,

- les relations contraintes déformations sont linéaires et réversibles,
- l'écoulement du fluide à travers l'espace poreux obéit à la loi de Darcy,
- la phase fluide est continue, c'est à dire que seule la porosité connectée est prise en compte et que la porosité non connectée (occluse) est considérée comme étant partie intégrante de la matrice solide,
- la transformation est supposée, soit adiabatique, soit isotherme.

Les travaux de BIOT ont été complétés tout d'abord par GEERTSMA [GEER. 1957a, 1957b], qui, en utilisant le théorème de réciprocité, a trouvé des résultats semblables à ceux obtenus par BIOT. Ensuite RICE et CLEARY [RICE. 1976] ont reformulé la théorie de BIOT en exprimant la loi de comportement élastique linéaire en fonction d'autres paramètres physiques tels que les coefficients de Skempton et de Poisson non drainé.

Plus tard, BIOT a généralisé sa théorie poroélastique aux milieux poroélastiques anisotropes [BIOT. 1955, 1956a], ainsi qu'aux milieux poroviscoélastiques anisotropes [BIOT. 1956b]. Il a également présenté l'interaction fluide-squelette pour les matériaux élastiques non linéaires [BIOT. 1961], [BIOT. 1965], [BIOT. 1972], [BIOT. 1973], [VAN. 1959], [CARO. 1980].

L'extension des travaux de BIOT, RICE et CLEARY au cas non isotherme a été faite par MAC TIGUE [MAC. 1986] qui a ajouté aux équations poroélastiques l'influence de la variation de température.

Le problème d'irréversibilité de comportement des milieux poreux a été abordé par plusieurs auteurs. On peut citer RICE [RICE. 1975] et RUNICKI [RUNI. 1985] qui ont proposé des critères de plasticité pour les milieux poreux, YAMADA [YAMA. 1981] et récemment COUSSY qui a établi la théorie générale de la poroélastoplasticité pour des matériaux poreux saturés en introduisant les notions de contrainte effective plastique et de porosité plastique [COUS. 1989]

L'approche de BIOT est macroscopique, elle ignore les caractéristiques microscopiques des constituants du milieu poreux et permet d'appliquer les principes et les concepts généraux de la mécanique des milieux continus [BOUR. 1986]. En reprenant la théorie des milieux poreux, COUSSY a élaboré la théorie générale de la thermodynamique de milieu poreux en utilisant les grands principes de la conservation et en a déduit une formulation générale de comportement des milieux poreux dans le cas réversible et irréversible. Tout au long de la présente étude, nous suivrons la formulation et la notation établies par cet auteur [COUS. 1991].

Sur le plan expérimental, BIOT et WILLIS [BIOT. 1957] ont les premiers discuté la procédure expérimentale de mesure des différents coefficients poroélastiques dans le cas isotrope et anisotrope. Sur ce plan, on peut par exemple citer les travaux de SIBAI [SIBA.1990] et ORTEGA B. [ORTE. 1994] essentiellement sur les grès dans le domaine poroélastique, les travaux effectués sur les mesures thermoporoélastiques par REUSCHIL [REUS. 1990] et les travaux de KHERBOUCHE [KHER. 1994] sur l'étude poroélastoplastique d'une craie dans le cas isotherme.

En ce qui concerne l'étude de l'effet de la microfissuration sur l'interaction fluide-squelette, on connaît relativement peu de choses jusqu'à présent. La question a été expérimentalement abordée, dans le cas isotrope (microfissuration volumique), tout d'abord par Sibai [SIBA. 1990] sur un grès, puis par Ortega [ORTE. 1994] sur trois grès différents. Malgré quelques divergences, l'ensemble des résultats établis par ces deux auteurs est significatif (cf §I.2.3).

Sur le plan théorique, on peut distinguer trois types d'approches différentes :

- les approches utilisant les aspects généraux de la mécanique de la rupture pour décrire le comportement mécanique du matériau poreux. On peut citer les travaux de Bruhwiber [BRUH. 1993], de Reich [REIC. 1994] et de Dormieux [DORM. 1996].
- les approches qui ont privilégié les notions de la mécanique de l'endommagement pour la constitution d'un modèle capable de décrire les effets de la pression interstitielle sur le développement des microfissures [BOUR. 91, 92, 94], [BARY. 1996].
- enfin les approches utilisant les outils de la mécanique du milieu poreux élastoplastique. Dans l'approche proposée par Fauchet [FAUC. 1994] la porosité plastique modélise l'apparition de la microfissuration.

Après ce propos général sur l'interaction fluide-squelette, la suite de ce chapitre consistera en une brève présentation de la mécanique des milieux poreux saturés, la formulation du comportement poroélastique linéaire dans le cas isotrope et anisotrope, la poroélastoplasticité et la mécanique des matériaux poreux avec l'endommagement.

## I.2 Mécanique des Milieux Poreux

Un milieu poreux saturé, d'après COUSSY [COUS. 1991, 94], est constitué d'un squelette déformable et d'un fluide saturant l'espace interstitiel. Du point de vue mécanique et dans une description continue à l'échelle macroscopique, un milieu poreux saturé peut être considéré comme la superposition, dans le temps et l'espace, de deux milieux continus en interaction mécanique : le solide et le fluide interstitiel (Figure 1).

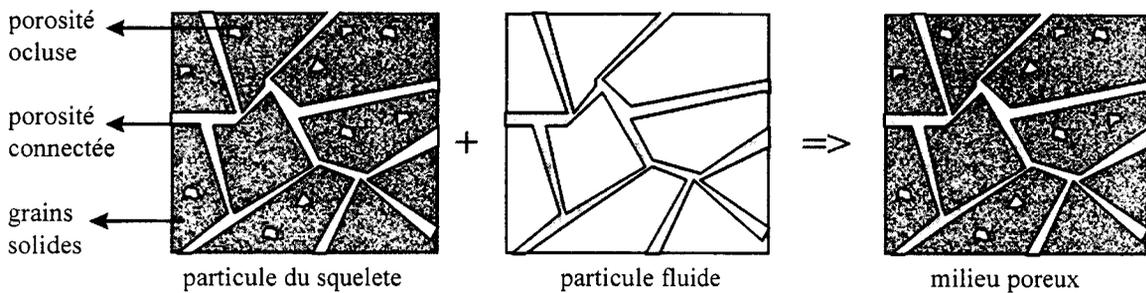


Figure I.1 : Milieu poreux considéré comme la superposition de deux milieux continus en interaction [COUS. 1991]

Ce milieu, d'un point de vue thermodynamique (toujours à l'échelle macroscopique), peut être considéré comme étant un système thermodynamique ouvert. En effet, le milieu poreux, contrairement à un milieu continu classique considéré comme thermodynamiquement fermé, échange de la masse fluide avec l'extérieur. C'est en fait à partir de ces deux points de vue que Coussy a élaboré une généralisation purement macroscopique de la théorie du milieu poreux conforme aux principes de la mécanique des milieux continus et de la thermodynamique. Cette théorie est basée sur les hypothèses suivantes:

- le milieu est constitué d'une matrice solide et d'un espace poreux connecté et saturé par un même fluide interstitiel,
- un point géométrique se partitionne en deux particules coïncidant en ce même point, l'une attachée au squelette et l'autre au fluide. Cela veut dire qu'au niveau de la description, il n'y a pas de différenciation entre le fluide et le solide,
- le milieu poreux est considéré comme un système thermodynamique ouvert,
- les mouvements (déplacement, déformation, vitesse) du milieu sont repérés par rapport à son squelette,
- les pores non connectés (occlus), saturés ou non, sont considérés comme faisant partie de la matrice solide,
- le milieu poreux est continu, c'est en fait cette hypothèse qui permet une description cohérente de la déformation et de la cinématique du milieu poreux,
- les diffusions hydraulique et thermique suivent les lois de la diffusivité "hydraulique de Darcy" et "thermique de Fourier".

En se basant sur la théorie générale de la mécanique des milieux poreux, Coussy [COUS. 1991], a exposé le comportement thermoporoélastique linéaire (isotrope et anisotrope), et le comportement poroélastoplastique en introduisant un critère de plasticité et les notions de déformation et de porosité plastique. Il a également présenté les comportements différés, c'est à dire les comportements qui font intervenir explicitement le temps physique rendant ainsi compte des phénomènes de viscosité de matrice solide dans le cas où cette dernière est supposée élastique ou plastique. Nous allons présenter ci-dessous la formulation de la loi thermoporoélastique linéaire, dans le cas isotrope et anisotrope, qui est en fait un cas particulier déduit de la théorie générale des milieux poreux saturés sous certaines hypothèses.

### I.2.1 Thermoporoélasticité Linéaire[COUS. 1991,94a]

#### *Equations d'état*

Sous les hypothèses d'une transformation infinitésimale et de la réversibilité de comportement et dans le cadre de la théorie générale de la mécanique des milieux poreux, le postulat de l'état local nous permet de supposer l'existence d'une fonction scalaire  $\psi$ , l'énergie libre du système, soit:

$$\Psi = \Psi(\tilde{\varepsilon}, m, T) \quad (I.2)$$

où les variables  $\tilde{\varepsilon}$  le tenseur de la déformation,  $m$  l'apport de masse fluide et  $T$  la température, constituent un paramétrage de variables d'état qui définissent l'état du système à chaque instant  $t$ . Le terme thermoporoélastique implique en fait un comportement linéaire réversible, défini par la nullité de la dissipation volumique. Cette dissipation, appelée parfois volumique ou intrinsèque, est donnée par l'inégalité de Clausius-Duhem qui définit l'admissibilité thermodynamique du système, c'est à dire la non négativité de la dissipation sous toutes ses formes. Son expression est :

$$\phi_1 = \tilde{\sigma} \frac{d\tilde{\varepsilon}}{dt} + g_m \frac{dm}{dt} - s \frac{dT}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \geq 0 \quad (I.3)$$

En supposant que dans l'évolution du système, chaque variable d'état peut évoluer indépendamment des autres, en utilisant (I.2) et sachant que  $\phi_1=0$  (comportement réversible), la substitution de la différentielle totale de  $\frac{d\psi}{dt}$  dans (I.3) conduit à:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\partial \Psi}{\partial \tilde{\varepsilon}} \quad g_m = \frac{\partial \Psi}{\partial m} \quad s = - \frac{\partial \Psi}{\partial T} \quad (I.4)$$

Ces relations constituent les équations d'état du système élémentaire.  $\sigma$  la contrainte,  $g_m$  l'enthalpie libre massique du fluide et  $s$  l'entropie du système, sont respectivement les forces thermodynamiques associées aux variables observables  $\tilde{\varepsilon}$ ,  $m$  et  $T$ .

### Equations d'état du Fluidè

L'état thermodynamique du fluide saturant le milieu poreux est défini par les variables d'état  $P$  la pression thermodynamique, et  $T$  la température. Les équations d'état du fluide relient la masse volumique  $\rho^f$  et l'entropie massique  $s_m$  du fluide, d'après la thermodynamique classique des fluides, sont:

$$\frac{1}{\rho^f} = \frac{\partial g_m}{\partial P} \quad s_m = -\frac{\partial g_m}{\partial T} \quad (I.5)$$

où  $g_m = g_m(P, T)$ , fonction d'état du fluide, est l'enthalpie libre massique du fluide.

### Equations du Comportement

En tenant compte des équations d'état du fluide (I.5) et de (I.2), la différentiation des équations d'état du système élémentaire (I.4), aboutit à la loi de comportement thermoporoélastique incrémentale, soit:

$$d\sigma = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon^2} : d\varepsilon + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon \partial m} dm + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon \partial T} dT \quad (I.6)$$

$$\frac{dP}{\rho^f} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial m \partial \varepsilon} : d\varepsilon + \frac{\partial^2 \psi}{\partial m^2} dm + \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial m \partial T} + s_m \right) dT \quad (I.7)$$

$$ds = s_m dm - \frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \varepsilon} : d\varepsilon - \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial m \partial T} + s_m \right) dm - \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} dT \quad (I.8)$$

Après avoir posé:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon^2} & A &= -\frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \varepsilon} \\ \frac{C_\varepsilon}{T} &= -\frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} & 3M\alpha_m &= \rho^f \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial m} + s_m \right) \end{aligned} \quad (I.9)$$

$$M = \rho_o^{fl^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial m^2} \quad -MB = \rho_o^{fl} \frac{\partial^2 \psi}{\partial m \partial \varepsilon}$$

l'intégration des relations (I.6) à (I.8) conduit aux « équations de comportement thermoporoélastique linéaire »:

$$\sigma - \sigma_o = C:\varepsilon - MB \frac{m}{\rho_o^{fl}} - A(T - T_o) \quad (I.10)$$

$$P - P_o = M \left[ -B:\varepsilon + \frac{m}{\rho_o^{fl}} + 3\alpha_m(T - T_o) \right] \quad (I.11)$$

$$s - s_o = s_m^o m + A:\varepsilon - 3M\alpha_m \frac{m}{\rho_o^{fl}} + \frac{C_\varepsilon}{T_o}(T - T_o) \quad (I.12)$$

où:

C: est le tenseur d'ordre quatre des modules élastiques non drainés.

B: est le tenseur des coefficients des contraintes effectives de Biot.

M: est le module de Biot.

A: est le tenseur des contraintes thermiques.

$\alpha_m$ : est le coefficient d'apport de masse fluide thermique drainé et isochore.

$C_\varepsilon$ : est la chaleur volumique non drainé à déformation constante.

Ces tenseurs et caractéristiques poroélastiques sont considérés comme constants dans toutes les évolutions du système.

### **Contrainte Effective en Thermoporoélasticité**

En utilisant (I.11), on peut réécrire la relation (I.10) sous la forme suivante:

$$\sigma - \sigma_o = C_o:\varepsilon - B(P - P_o) - A_o(T - T_o) \quad (I.13)$$

$$\text{où:} \quad A_o = A - 3\alpha_m MB \quad \text{et} \quad C_o = C - MB \otimes B \quad (I.14)$$

$C_o$  est le tenseur de rigidité des modules élastiques isothermes drainés. Il a la même symétrie que le tenseur C.  $A_o$  est également symétrique. En posant les relations:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma + BP \quad \sigma_{\text{o,eff}} = \sigma_o + BP_o \quad (I.15)$$

la relation (I.13) peut se mettre sous la forme suivante:

$$\sigma_{\text{eff}} - \sigma_{\text{o,eff}} = C_{\text{o}} : \varepsilon - A_{\text{o}}(T - T_{\text{o}}) \quad (\text{I.16})$$

### I.2.1.1 Comportement Thermoporoélastique Linéaire Isotrope [COUS. 1991]

Dans le cas d'un matériau homogène, isotrope et dans l'hypothèse des transformations infinitésimales, en utilisant les constantes élastiques du matériau, les relations (I.10) à (I.12) peuvent se mettre sous la forme indicielle suivant:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{\text{o,ij}} = \left(k - \frac{2G}{3}\right) \text{tr}\varepsilon \delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij} - Mb \left(\frac{m}{\rho_{\text{o}}}\right) \delta_{ij} - 3\alpha k (T - T_{\text{o}}) \delta_{ij} \quad (\text{I.17})$$

$$P - P_{\text{o}} = M \left[ -b \text{tr}\varepsilon + \frac{m}{\rho_{\text{o}}} + 3\alpha_m (T - T_{\text{o}}) \right] \quad (\text{I.18})$$

$$s - s_{\text{o}} = s_{\text{m}}^{\text{o}} m + 3\alpha k \text{tr}\varepsilon - 3\alpha_m M \left(\frac{m}{\rho_{\text{o}}}\right) - \frac{C_{\varepsilon}}{T_{\text{o}}} (T - T_{\text{o}}) \quad (\text{I.19})$$

où  $K$  et  $G$  sont respectivement le module d'incompressibilité et le module de cisaillement isotherme non drainé de matériau.  $b$ , un simple scalaire dans ce cas, est le coefficient de contrainte effective de Biot.

La relation (I.17), par inversion, peut être réécrite sous la forme:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{ij} - \sigma_{\text{o,ij}}) - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\sigma - \sigma_{\text{o}}) \delta_{ij} + \frac{bM}{3K} \left(\frac{m}{\rho_{\text{o}}}\right) + \alpha (T - T_{\text{o}}) \delta_{ij} \quad (\text{I.20})$$

En utilisant les relations (I.14), les équations de comportement (I.17) et (I.19), peuvent être présentées en terme des caractéristiques élastiques drainées à savoir:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{\text{o,ij}} = \left(k_{\text{o}} - \frac{2G_{\text{o}}}{3}\right) \text{tr}\varepsilon \delta_{ij} + 2G_{\text{o}} \varepsilon_{ij} - b(P - P_{\text{o}}) \delta_{ij} - 3\alpha_{\text{o}} k_{\text{o}} (T - T_{\text{o}}) \delta_{ij} \quad (\text{I.21})$$

$$s - s_{\text{o}} = s_{\text{m}}^{\text{o}} m + 3\alpha_{\text{o}} k_{\text{o}} \text{tr}\varepsilon - 3\alpha_{\text{m}} (P - P_{\text{o}}) - \frac{C_{\varepsilon}^{\text{o}}}{T_{\text{o}}} (T - T_{\text{o}}) \quad (\text{I.22})$$

où  $K_0$  et  $G_0$  sont les modules élastiques drainés. Il est à noter que seules les composantes normales des déformations sont affectées par la variation de la pression interstitielle et cela a pour conséquence l'égalité de  $G$  avec  $G_0$ .

Le volume du fluide échangé avec l'extérieur dans ce cas peut être calculé à partir des relations (I.17) et (I.18) soit :

$$\frac{m}{\rho_0^n} = \frac{1}{M} \left(1 + \frac{b^2 M}{K_0}\right) (P - P_0) + \frac{b}{3K_0} \text{tr}(\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_0) + 3(b\alpha_0 - \alpha_m)(T - T_0) \quad (I.23)$$

Comme dans le cas non drainé la relation contrainte-déformation (I.21) peut s'inverser sous la forme :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu_0}{E_0} (\sigma_{ij} - \sigma_{0,ij}) - \frac{\nu_0}{E_0} \text{tr}(\sigma - \sigma) \delta_{ij} + \frac{b}{3K_0} (P - P_0) \delta_{ij} + \alpha_0 (T - T_0) \delta_{ij} \quad (I.24)$$

La relation de la contrainte effective (I.16) dans le cas de la thermoporoélasticité linéaire pour les matériaux isotropes peut être écrite sous la forme suivante:

$$\sigma_{\text{eff}} - \sigma_{0,\text{eff}} = \left(k_0 - \frac{2G_0}{3}\right) \text{tr}\varepsilon \delta_{ij} + 2G_0 \varepsilon_{ij} - 3\alpha_0 k_0 (T - T_0) \delta_{ij} \quad (I.25)$$

D'après cette brève présentation, on voit que la connaissance du comportement thermoporoélastique linéaire dans le cas isotrope exige la détermination de sept coefficients indépendants, quatre concernant les constantes poroélastiques et les trois autres relatives aux caractéristiques thermiques.

### I.2.1.2 Détermination Expérimentale des Coefficients Poroélastiques Linéaires Isotropes (Cas Isotherme, $T=T_0$ )

#### *Cas Non Drainé*

\*De l'équation (I.17) dans le cas non drainé ( $\Delta m/\rho=0$ ), c'est à dire sans aucun échange du fluide avec l'extérieur, on peut déduire:

$$\text{tr}(\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_0) = 3K \text{tr}\tilde{\varepsilon} \quad (I.26)$$

et de la relation (I.23) on aura:

$$-\frac{1}{M} \left(1 + \frac{b^2 M}{K_0}\right) (P - P_0) = \frac{b}{3K_0} \text{tr}(\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_0) \quad (\text{I.27})$$

Dans un essai de compression isotrope non drainé où  $\sigma_0 = P_0 = 0$  on a :

$$K = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_v} \quad (\text{I.28})$$

où  $\sigma_m = \text{tr}\tilde{\sigma}/3$  est la contrainte isotrope,  $\varepsilon_v = \text{tr}\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  est la déformation volumique et  $K$  est, rappelons le, le module d'incompressibilité non drainé. A partir de cet essai on peut également mesurer l'évolution de la pression interstitielle en fonction de la variation de contrainte isotrope  $\sigma_m$ . Le rapport entre ces deux variations est le coefficient de Skempton, soit :

$$B_s = \frac{\Delta P}{\Delta\sigma_m}$$

ou bien d'après (I.27) : (I.29)

$$B_s = \frac{b \cdot M}{K_0 + b^2 M} \quad \text{ou bien} \quad B_s = \frac{b \cdot M}{K}$$

### Cas Drainé

\*De même à partir des équations (I.21) et (I.23) dans le cas drainé, c'est à dire avec l'échange du fluide ( $\Delta m/\rho_0^{\text{fl}} \neq 0$ ), mais à  $\Delta P = 0$  on peut respectivement avoir :

$$\text{tr}(\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_0) = 3K_0 \text{tr}\tilde{\varepsilon} \quad (\text{I.30})$$

et

$$\frac{m}{\rho_0^{\text{fl}}} = \frac{b}{3K_0} \text{tr}(\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_0) \quad (\text{I.31})$$

Dans un essai de compression isotrope drainé à pression interstitielle constante,  $P = P_0$ , et pour le cas où  $\sigma_0 = 0$  on a :

$$K_0 = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_v} \quad (\text{I.32})$$

et 
$$H_o = \frac{K_o}{b} = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta \frac{m}{\rho_o^n}} \quad (I.33)$$

C'est à partir des résultats de cette expérience que l'on peut calculer le coefficient de la contrainte effective de Biot  $b$ , dans le cas d'un matériau poroélastique isotrope, soit :

$$b = \frac{H_o}{K_o} \quad (I.34)$$

\*La variation de la déformation volumique peut être aisément calculé à partir de la relation (I.24), soit:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{K_o} \left[ \frac{\text{tr}(\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_o)}{3} + b(P - P_o) \right] \quad (I.35)$$

Dans une expérience hydrostatique drainée, nommé par la suite « essai de drainage partiel », où  $\sigma_o=0$  et  $P=P_o$ , on considère deux types de chargement isotrope :

- 1)  $\Delta\sigma_m \neq 0$  et  $\Delta P = 0$ , d'après (I.35) on a :  $(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0} = \frac{\Delta\sigma_m}{K_o}$
- 2)  $\Delta\sigma_m = 0$  mais  $\Delta P \neq 0$ , la relation (I.35) aura alors la forme :  $(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0} = \frac{b}{K_o} \Delta P$

Dans le cas où les incréments des contraintes isotropes  $\Delta\sigma_m$  sont égales aux incréments de pression des pores  $\Delta P$ , on peut avoir directement le coefficient de la contrainte effective à partir des mesures des déformations, soit :

$$b = \frac{(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0}}{(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0}} \quad (I.36)$$

\*On accepte, comme le suggère l'intuition physique, que dans un essai de compression hydrostatique drainé où  $\Delta\sigma_m = \Delta P$ , ce sont les grains de la matrice solide qui subissent la contrainte. Déduisant des relations (I.17) ou (I.20) on peut alors écrire :

$$K_s = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_v} \quad (I.37)$$

où  $K_s$  est le module d'incompressibilité de la matrice solide du matériau.

### I.2.1.3 Comportement Thermoporoélastique Linéaire Anisotrope [BIOT. 1955], [CARR. 1979], [COUS.6 1991]

Sous l'hypothèse des petites perturbations, la relation contrainte - déformation (I.10) pour un matériau poroélastique orthotrope et dans le repère d'orthotropie, se développe comme suivant :

$$\sigma_{11} - \sigma_{\circ 11} = c_{11}\varepsilon_{11} + c_{12}\varepsilon_{22} + c_{13}\varepsilon_{33} - b_1 M \left( \frac{m}{\rho_{\circ}} \right) - a_1 (T - T_{\circ}) \quad (I.38)$$

$$\sigma_{22} - \sigma_{\circ 22} = c_{12}\varepsilon_{11} + c_{22}\varepsilon_{22} + c_{23}\varepsilon_{33} - b_2 M \left( \frac{m}{\rho_{\circ}} \right) - a_2 (T - T_{\circ}) \quad (I.39)$$

$$\sigma_{33} - \sigma_{\circ 33} = c_{13}\varepsilon_{11} + c_{23}\varepsilon_{22} + c_{33}\varepsilon_{33} - b_3 M \left( \frac{m}{\rho_{\circ}} \right) - a_3 (T - T_{\circ}) \quad (I.40)$$

$$\sigma_{12} = c_{66}\varepsilon_{12} \quad \sigma_{13} = c_{55}\varepsilon_{13} \quad \sigma_{23} = c_{44}\varepsilon_{23} \quad (I.41)$$

et les variations de pression interstitielle (I.11) et d'entropie (I.12) ont les formes :

$$P - P_{\circ} = M \left( -b_1\varepsilon_{11} - b_2\varepsilon_{22} - b_3\varepsilon_{33} + \frac{m}{\rho_{\circ}} \right) + 3\alpha_m M (T - T_{\circ}) \quad (I.42)$$

$$s - s_{\circ} = m s_{\circ m} + a_1\varepsilon_{11} + a_2\varepsilon_{22} + a_3\varepsilon_{33} - 3\alpha_m M \left( \frac{m}{\rho_{\circ}} \right) + \frac{C_{\varepsilon}}{T_{\circ}} (T - T_{\circ}) \quad (I.43)$$

Avec la condition de symétrie, il y a alors 18 coefficients, 13 concernant le comportement poromécanique et 5 relatifs au comportement thermique du matériau.

Les équations (I.38) à (I.41) peuvent s'inverser, soit en terme des caractéristiques élastiques non drainées :

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{R}} : (\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_{\circ}) + \tilde{\mathbf{H}} \left( \frac{m}{\rho_{\circ}} \right) \tilde{\mathbf{I}} + \alpha (T - T_{\circ}) \tilde{\mathbf{I}} \quad (I.44)$$

soit en terme des caractéristiques élastiques drainées du matériau :

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{R}}_o : (\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_o) + \tilde{\mathbf{H}}_o (P - P_o) \tilde{\mathbf{I}} + \alpha_o (T - T_o) \tilde{\mathbf{I}} \quad (\text{I.45})$$

$\tilde{\mathbf{R}}$  et  $\tilde{\mathbf{H}}$  sont respectivement le tenseur des coefficients élastiques et le tenseur des coefficients poroélastiques en cas non drainé et  $\tilde{\mathbf{R}}_o, \tilde{\mathbf{H}}_o$  sont ces tenseurs en régime drainé.

### I.2.2 Poroélastoplasticité [COUS. 1991, 94b]

Dans le cas poroélastoplastique, contrairement au comportement poroélastique, les variables observables ne seront plus suffisantes pour caractériser l'état actuel du matériau. On a alors besoin de variables supplémentaires pour décrire les phénomènes dissipatifs liés à l'évolution irréversible du matériau telles que les déformations plastiques. Ces variables, du type internes dans ce cas, sont  $\varepsilon^p$  et  $m^p$ . Elles représentent respectivement le tenseur des déformations permanentes et le rapport de masse fluide plastique. Ce dernier peut être constaté après une décharge complète et lors de la restauration de l'état initial des contraintes et de la pression interstitielle.

On définit la porosité plastique  $\phi^p$  de telle sorte que  $\phi^p d\Omega_o$  ( $\Omega_o$  volume élémentaire) représente la variation irréversible du volume vide du matériau. Cette définition nous permet d'écrire :

$$m^p = \rho_o^f \phi^p \quad (\text{I.46})$$

Dans le cas poroélastoplastique l'expression d'énergie libre du système est généralement retenue comme suit :

$$\psi = \psi(T, \varepsilon, \varepsilon^p, m, \phi^p) + U(V_x) \quad (\text{I.47})$$

et celle de la dissipation intrinsèque comme :

$$\Phi_1 = \Phi^p - \frac{\partial U}{\partial V_x} \cdot \frac{dV_x}{dt} \geq 0 \quad (\text{I.48})$$

où  $\Phi^p$ , la dissipation plastique, est donnée par la relation :  $\Phi^p = \sigma : \frac{d\varepsilon^p}{dt} + p \frac{d\phi^p}{dt}$

$U$  est un terme spécifique d'énergie dite « énergie bloquée par écoulement » et supposée indépendante des variables élastiques  $\varepsilon^{el}$  et  $m^{el}$  ainsi que de la température.  $V_x$  représente la(les) variable(s) internes caractérisant l'état d'écrouissage. En utilisant les équations d'état du système élémentaire (I.4) tenant compte de (I.47) et des équations d'état du fluide (I.5),

avec une démarche similaire que pour le cas thermoporoélastique (cf. §1.2.1), on peut écrire les « équations de comportement thermoporoélastoplastique », soit :

$$\sigma - \sigma_0 = C:(\varepsilon - \varepsilon^p) - MB\left(\frac{m}{\rho_0^f} - \phi^p\right) - A(T - T_0) \quad (I.49)$$

$$P - P_0 = M\left[-B:(\varepsilon - \varepsilon^p) + \left(\frac{m}{\rho_0^f} - \phi^p\right) + 3\alpha_m(T - T_0)\right] \quad (I.50)$$

$$s - s_0 = s_m^0 m + A:(\varepsilon - \varepsilon^p) - 3M\alpha_m\left(\frac{m}{\rho_0^f} - \phi^p\right) + \frac{C_\varepsilon}{T_0}(T - T_0) \quad (I.51)$$

On voit que ces relations, à l'exception de (I.51), sont identiques à celles du cas thermoporoélastique (I.10 à I.12) dans lesquelles le tenseur de déformation  $\varepsilon$  et le rapport de masse du fluide saturant  $m$  sont remplacés respectivement par  $\varepsilon^{el} = \varepsilon - \varepsilon^p$  et  $m^{el} = m - \rho_0^f \phi^p$ . Tous les tenseurs et les constantes présentés dans ces équations, sont identiques à ceux en thermoporoélastique et partagent les mêmes définitions et significations.

### I.2.2.1 Critère de Plasticité et Règle d'Écoulement

Par référence au cas des solides élastoplastiques, ici aussi on définit, pour un matériau poroélastoplastique parfait, le domaine d'élasticité initial par une fonction scalaire  $f=f(\sigma, p)$ ,<sup>1</sup> (figure 2), appelée aussi fonction ou surface de charge. Pour toutes les valeurs de  $f(\sigma, p) < 0$  on se trouve à l'intérieur de la zone élastique et on est donc réversible. Le critère ou le seuil de plasticité est alors donné par les valeurs  $f(\sigma, P)=0$  qui représentent en fait la frontière du domaine d'élasticité.

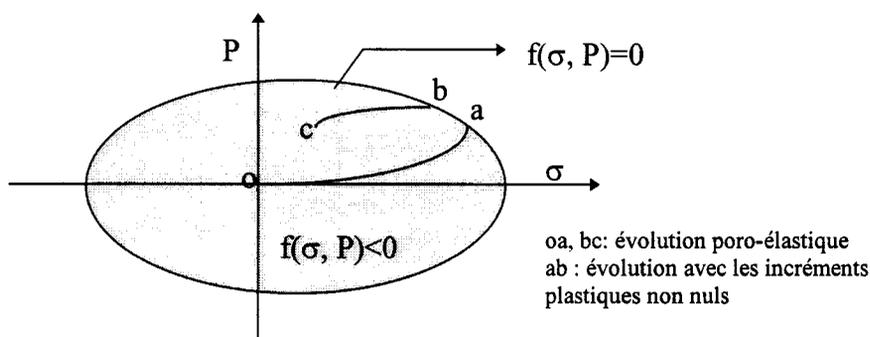


Figure I.2 : Surface de charge dans l'espace des contraintes pour un matériau poroélastoplastique parfait

<sup>1</sup> Dans le cas d'un matériau poroélastoplastique écouissable  $f$  est, en plus de  $\sigma$  et  $P$ , fonction des paramètres d'écrouissage  $V_x$

Lorsque les incréments plastiques  $d\epsilon^p$  et  $d\phi^p$  ne sont pas nuls, il existe alors la charge plastique. On définit :

$$(d\epsilon^p, d\phi^p) \in d\lambda\eta(\sigma, P) \quad \text{où} \quad d\lambda \geq 0$$

$$d\lambda \geq 0 \quad \text{si} \quad f=0 \quad \text{et} \quad df=0$$

$$d\lambda = 0 \quad \text{si} \quad f < 0 \quad \text{ou} \quad df < 0$$

où  $d\lambda$ , appelé multiplicateur plastique, est un scalaire non négatif indéterminé et  $\eta(\sigma, P)$  représente « l'ensemble des directions thermodynamiquement existantes du vecteur  $(d\epsilon^p, d\phi^p)$ , dans l'espace des points de  $(\sigma, P)$  », qui respectent la non négativité de la dissipation intrinsèque. Rappelons que dans ce cas (matériau parfaitement plastique, c'est à dire sans écrouissage), la dissipation intrinsèque est réduite à la dissipation plastique  $\Phi^p$ .

### 1.2.2.2 Comportement Poroélastoplastique Isotrope

Sous les hypothèses de perturbation infinitésimale et de condition isotherme ( $T=T_0$ ), l'équation (I.49), pour un matériau poroélastoplastique isotrope et en terme des constantes élastiques non drainées, est donnée comme la suivante :

$$\sigma_{ij} - \sigma_{o,ij} = \left(K - \frac{2G}{3}\right) \text{tr}(\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) \delta_{ij} + 2G(\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) - Mb\left(\frac{m}{\rho_0} - \phi^p\right) \delta_{ij} \quad (\text{I.52})$$

En terme de caractéristiques élastiques drainées, elle prend la forme :

$$\sigma_{ij} - \sigma_{o,ij} = \left(K_0 - \frac{2G_0}{3}\right) \text{tr}(\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) \delta_{ij} + 2G_0(\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) - b(P - P_0) \delta_{ij} \quad (\text{I.53})$$

Dans ce cas la variation de pression interstitielle est :

$$P - P_0 = M \left[ -b \text{tr}(\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) + \left(\frac{m}{\rho_0} - \phi^p\right) \right] \quad (\text{I.54})$$

### 1.2.3 Matériau Poreux avec Endommagement

Le processus de dégradation (perte de raideur) d'un matériau fragile, soumis à une sollicitation mécanique croissante, est traduit par l'endommagement. Cette dégradation a pour origine l'apparition, le développement et la coalescence des microfissures sous les effets des

actions mécaniques extérieures. Ce phénomène dans un matériau poreux fragile (comme la plupart des roches et des bétons), dont l'espace poreux est constitué de pores de différentes tailles et de différentes formes ainsi que de microfissures, influe sur le réseau des pores et modifie la structure de celui-ci. La modification de la porosité a pour conséquence le changement des différentes propriétés de matériau dont la perméabilité, les paramètres de l'interaction fluide-squelette, etc...

Le problème d'influence de la microfissuration sur le comportement hydromécanique des matériaux est un problème qui se pose plus souvent lors de développement des microfissures dans les barrages en béton. Il est donc plus étudié dans le but de surmonter les problèmes des barrages déjà fissurés en service.

La question a été abordée par différents auteurs et du différents points de vue. On peut citer les travaux de Reich [REIC. 1994] et Brühwiler [BRUH. 1993] qui, en utilisant les aspects généraux de la mécanique de la rupture, ont pris en compte les effets de la pression interstitielle sur l'évolution des paramètres de résistance à la rupture du matériau. Dormieux a donné une formulation du critère de rupture, sous la forme d'une fonction mathématique du tenseur des contraintes et de la pression interstitielle, pour un milieu saturé biphasique (squelette, fluide), ainsi que pour un matériau poreux non saturé en prenant en compte du phénomène de capillarité à l'échelle macroscopique [DORM. 1996].

Certains ont privilégié les concepts de la mécanique de l'endommagement pour constituer une théorie capable de reproduire les effets de la pression interstitielle sur le développement des microfissuration. Bourdarot [BOUR. 91, 92, 94 ], a pris en compte les effets de la pression interstitielle sur la croissance des microfissures de béton des barrage en introduisant un modèle élastique endommageable à une variable scalaire (cas isotrope) [MAZA. 1984] dans une formulation hydraulique - mécanique de type Biot (notion de la contrainte effective). Il a proposé une formulation adaptée dans laquelle le tenseur de perméabilité a une évolution isotrope en fonction de la variable scalaire d'endommagement de telle sorte que la perméabilité du matériau fissuré augmente avec la dégradation progressive de milieu. Néanmoins le coefficient de la contrainte effective de Biot reste inchangé avec le développement des microfissures.

L'étude menée par Bary [BARY 1996] est une étude plus récente et plus complète dans ce cadre. Il a pris en compte à la fois la diffusion de la masse du fluide interstitiel et les effets de la microfissuration induite sur le comportement mécanique du matériau. Dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles pour les milieux ouverts, il a basé son approche sur la mécanique des milieux poreux saturés couplée à la mécanique de l'endommagement. En utilisant un modèle d'endommagement anisotrope adapté au béton

avec une variable d'endommagement du type tensoriel [RAMT. 1990], il a aussi pris en compte les effets de la dégradation orientée de la matrice solide sur le couplage hydraulique - mécanique. Dans ce cas, le tenseur de couplage varie en fonction de la variable tensorielle d'endommagement. Il n'a cependant pas validé son modèle sur les chemins de sollicitation avec différentes pressions de confinement et surtout sur les chemins non conventionnels.

Fauchet [FAUC. 1994], toujours dans le but d'étudier le comportement des barrages en béton, a abordé la question à l'aide des outils de la mécanique des milieux poreux. Dans le cadre d'une approche poroplastique, deux variables distinctes, la déformation et la porosité plastique, modélisent la transformation irréversible du matériau (cf. §I.2.2.). A une échelle macroscopique, la porosité plastique modélise l'apparition de la microfissuration dont l'orientation est indiquée par les directions principales de la déformation plastique. Il a également proposé un modèle tenant compte des variations anisotropes de la perméabilité due à la fissuration (cf. §I.3)

Sur le plan expérimental, c'est Sibai [SIBA. 1990] le premier qui s'est intéressé aux effets de la microfissuration sur les paramètres de l'interaction fluide-squelette. Il a fait deux campagnes d'essais identiques sur un grès de Fontainebleau (de porosité 9%) avant et après l'avoir artificiellement fissuré et en avoir augmenté sa porosité par le chauffage à différentes températures (Figure I.2).

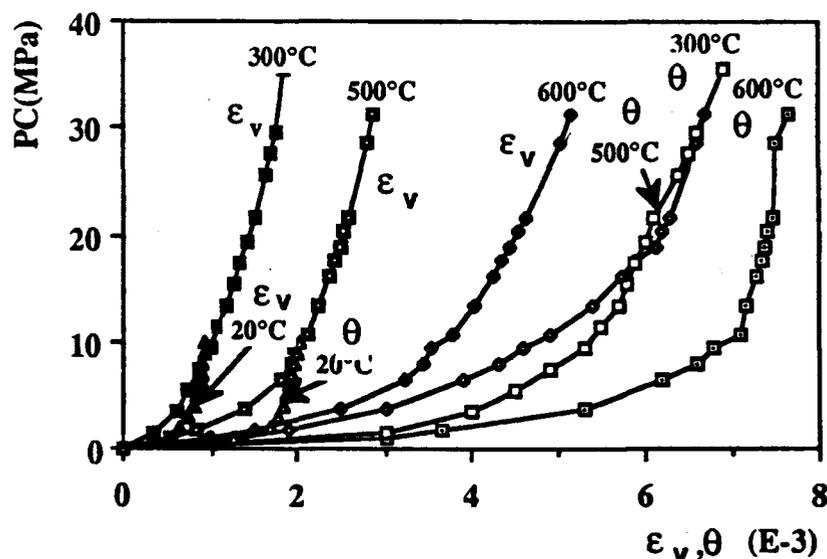


Figure I.2 : Essai hydrostatique drainé sur roches fissurées par différentes températures [SIBA. 1990]

Il en a conclu que « la valeur des différents coefficients élastiques est liée à l'état de la microfissuration naturelle, mais que le coefficient de la contrainte effective de Biot est quasi

indépendant de celle-ci », et que « le coefficient de Biot dépend seulement de la porosité et de la compressibilité globale de la roche ».

Par contre les résultats établis par Ortega [ORTE. 1994], issus d'une démarche expérimentale identique (chauffage jusqu'à 450 °C) à celle de Sibai, sur trois grès (un grès Fontainebleau et deux grès des Vosges, l'un jaune et l'autre rouge), montrent une influence énorme de la variation de porosité de microfissures sur la valeur du coefficient de Biot pour le premier grès, aucune pour le deuxième et une légère pour le troisième grès (Tableau I.1). De plus Ortega a conclu que « le traitement thermique a une très grande influence sur le module d'incompressibilité globale  $K_o$  et pratiquement pas d'influence sur le module d'incompressibilité de la phase solide  $K_s$  des grès testés ».

Tableau I.1 : Variation des valeurs du coefficient de Biot et de la porosité [ORTG.1994]

Roche	Porosité au mercure (%)		Coefficient de Biot	
	Avant trait.	Après trait.	Avant trait.	Après trait.
G. Font.	5,9	6,3	0,12	0,77
G. de V. J.	17,2	17,4	0,58	0,59
G. de V. R.	18,8	20,1	0,64	0,76

Malgré quelques ressemblances dans les résultats établis par ces deux auteurs, on peut remarquer une dispersion en ce qui concerne l'influence de la microfissuration sur le coefficient de Biot dans les différentes roches. Celle-ci peut être expliquée, à notre avis, par les comportements différents des grès testés vis à vis du traitement thermique. En d'autres termes, une structure peu stable devant le traitement thermique ou/et un caractère ouvert d'une porosité artificiellement engendrée, peut être à l'origine d'une variation considérable du coefficient de Biot. Par contre, la structure résistante d'une roche devant la variation de température peut empêcher toutes les conséquences due à la variation de la porosité sur le coefficient de la contrainte effective.

### I.3 Perméabilité

D'après la loi de Darcy, la perméabilité d'un matériau poreux, c'est à dire l'aptitude du milieu à se laisser traverser par un fluide, est caractérisée par un tenseur symétrique  $\tilde{k}$ . En fait, d'après cette loi, la vitesse moyenne d'écoulement d'un fluide  $\vec{v}$ , en phase liquide, à travers un milieu poreux, est reliée au gradient de la pression interstitielle  $\vec{\nabla}P$  par l'intermédiaire du tenseur  $\tilde{k}$ , comme étant une caractéristique intrinsèque du matériau, et de la viscosité dynamique du fluide  $\mu$ , par cette relation:

$$\vec{v} = -\frac{\tilde{k}}{\mu} \vec{\nabla}P \quad (I.55)$$

Le régime d'écoulement dans cette relation est supposé laminaire et la perméabilité  $\tilde{k}$  s'exprime en  $m^2$ .

En génie civil, en se basant sur cette formule, on définit l'aptitude du milieu à la percolation par un tenseur symétrique dit « tenseur de conductivité hydraulique », ou parfois « coefficient de perméabilité » dans le cas d'un matériau hydrauliquement isotrope, qui s'exprime comme suivant :

$$\tilde{K} = -\frac{\tilde{k}}{\mu} \gamma \quad (I.56)$$

en remplaçant la valeur de  $\tilde{k}$  par l'équation (I.55), on a :

$$\tilde{K} = \frac{\vec{v} \cdot \gamma}{\vec{\nabla}P} \quad (I.57)$$

où  $\gamma$  est la masse volumique du fluide traversant le milieu. Dans la suite de ce mémoire, le mot perméabilité sera utilisé pour toute la désignation de la conductivité hydraulique de matériau.

Les différentes caractéristiques de la structure du réseau de pores du matériau, à savoir la géométrie et la taille des pores, leur tortuosité et leurs interconnexions sont les facteurs influençant la perméabilité du matériau. En général, lorsque le matériau se fissure, la structure du réseau de pores se modifie et la perméabilité augmente. Fauchet a proposé un modèle qui décrit la variation de la perméabilité induite en tenant compte de l'anisotropie de celle-ci due à la fissuration du matériau, par l'intermédiaire de la variable de plasticité  $\varepsilon^p$  [FAUC. 1994]. Une autre proposition est de faire évoluer le tenseur de perméabilité en fonction de la variable tensorielle d'endommagement. Cela a pour conséquence la coaxialité des directions d'anisotropie du tenseur de perméabilité et de la variable tensorielle d'endommagement [BARY 1996].

### I.3.1 Détermination Expérimentale de la Perméabilité

Les principes de mesure de perméabilité reposent sur la relation (I.57). Soit un échantillon cylindrique de section  $s$  (en  $m^2$ ) et de hauteur  $l$  (en  $m$ ) le long duquel s'écoule un

fluide sous l'effet d'un gradient de pression  $\Delta P/\Delta x$  en Pa/m (cas d'écoulement unidimensionnel). Dans l'hypothèse de l'homogénéité de vitesse à travers la section d'éprouvette et tenant compte de la relation classique de la continuité  $Q = \bar{v} \cdot s$ , la relation (I.57) peut s'écrire:

$$K = \frac{Q \cdot \gamma}{\frac{\Delta P}{\Delta x} \cdot s} \quad \text{ou encore} \quad K = \frac{Q \cdot l}{\Delta h \cdot s} \quad (\text{I.58})$$

Q (en m<sup>3</sup>/sec) est le débit traversant la section s de l'échantillon et  $\Delta h$  (en m) désigne le gradient de la charge hydraulique entre deux sections d'intervalle l. L'une des procédures de mesure de la perméabilité en laboratoire consiste donc à provoquer une percolation sous l'effort d'une charge hydraulique exercée sur l'une des bases d'un échantillon de section s et de longueur l et, ensuite de mesurer le débit d'écoulement. C'est cette manière, très courante dans le laboratoire, qui sera utilisée dans notre étude expérimentale par la suite.

\* \* \*

Dans cette étude, essentiellement expérimentale, se basant sur la mécanique des milieux poreux saturés et ayant une vision macroscopique sur la question, nous nous plaçons dans le cadre des hypothèses suivantes :

- =>à une échelle macroscopique, le milieu est considéré comme un milieu poreux fragile, donc endommageable, et continu,
- =>le milieu est parfaitement saturé (avec un seul fluide), cela veut dire qu'on a seulement deux phases en interaction, structure et fluide, il n'y a aucune interaction avec le gaz (ou l'air) comme dans le cas d'un milieu non saturé,
- =>la condition des transformations est supposée d'être isotherme ou adiabatique
- =>on se place dans le cas des petites perturbations,
- =>on est dans le cas quasi statique.

La suite de ce mémoire se composera de la présentation du matériau utilisé, du dispositif expérimental, de la préparation et de la manipulation des échantillons, des techniques d'investigations et des différents chemins de sollicitation considérés.

# **CHAPITRE II**

## **PROGRAMME D'ESSAIS ET MODES OPERATOIRES**

## II.1 : Identification du matériau étudié

### II.1.1 Présentation générale

Le matériau choisi dans cette étude est un grès des Vosges de couleur beige - marron dont le poids volumique naturel est de  $2,06 \text{ g/cm}^3$  et qui, comme tous les grès, fait partie des roches d'origine détritique [MILN. 1940]. Du point de vue géotechnique avec une porosité totale ouverte d'environ 20% et une résistance mécanique à la compression uniaxiale ( $\sigma_c$ ) de 38 MPa, il s'agit d'un grès moyennement poreux (5-25%) et d'une roche de résistance mécanique modérée ( $20 < \sigma_c < 60$  MPa) [ORTG. 1994]. Cette roche de matrice quartzreuse et d'aspect très homogène présente un comportement fragile en compression uniaxiale.

Le choix de ce matériau se justifie par :

i) Sa porosité importante, qui permettra de déceler plus facilement les effets du fluide interstitiel dans les échantillons saturés soumis à différents chemins de sollicitations.

ii) Ses pores bien interconnectés, qui facilitera le processus de saturation de l'échantillon et diminuera la durée de celle-ci. Rappelons que la saturation a une importance capitale dans notre étude et c'est la réalisation parfaite et rigoureuse de celle-ci qui est l'une des principales conditions de la réussite de l'essai. De plus, cette interconnexion des pores permet la montée en pression interstitielle d'une façon uniforme au sein de l'échantillon.

iii) Sa grande susceptibilité à la fissuration sous chargement mécanique, due essentiellement à la présence du quartz.

### II.1.2 Porosité

La porosité est définie par le rapport du volume de l'espace poreux  $V_p$  sur le volume total initial apparent de l'échantillon  $V$ , soit :

$$\phi = \frac{V_p}{V} \quad (\text{II.1})$$

C'est une caractéristique intrinsèque importante du matériau qui influe considérablement sur les propriétés physiques et mécaniques des roches (vitesses d'onde,

déformabilité, résistance, etc..). La porosité est composée de la porosité des pores et la porosité des microfissures naturelles. Cette dernière, qui sera déterminée pour le matériau étudié par la suite, a en général une influence déterminante sur les propriétés hydrauliques et mécaniques du matériau.

La porosité ouverte totale de notre matériau a été mesurée à l'aide d'un porosimètre au mercure (porosimètre Carlo Erba 200 MPa). La valeur moyenne de la macroporosité, qui correspond au volume des pores de rayon supérieur à 75000 Å, mesurée sur deux échantillons est de l'ordre de 11,5%. La microporosité est égale à 9,2%. L'histogramme des rayons de pores et la courbe de porosité cumulée sont présentés sur les figures II.1 et II.2.

## II.2 Description du Dispositif Expérimental

### II.2.1 Dispositif Expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la préparation des échantillons et la réalisation des différents essais est composé des matériels suivants :

- un *carottier au diamant* pour carotter des échantillons de forme cylindrique dans les blocs de roches provenant de la carrière.
- une *rectifieuse de précision*, capable de rectifier les surfaces des échantillons de manière à avoir une tolérance d'imperfection sur le parallélisme des sections d'éprouvette inférieure à 10 µm.
- une *presse hydraulique* de modèle "8033 INSTORN" appartenant aux "Seris 8000 Servo-Hydraulic testing system" et de capacité maximale 500 KN. Son système de pilotage nous permet la réalisation d'essais en mode "Déplacement contrôlé" ou "Force contrôlée". Les variations de force et de déplacement axial, au cours de l'essai, sont visualisées à l'aide d'une table traçante connectée à la presse. Cela nous donne la possibilité de suivre l'évolution de la charge axiale et du déplacement du vérin et donc de nous assurer du bon déroulement de l'essai. Ce contrôle peut également être effectué par la lecture directe des valeurs de force et du déplacement sur l'écran de consol.
- une *cellule triaxiale* (Figure II.3) de capacité 100 MPa destinée à faire des essais mécaniques sur des échantillons cylindriques de diamètre 37,5 mm et d'élancement 2. Cette cellule se compose d'un plateau inférieur et d'un plateau supérieur muni d'un piston mobile,

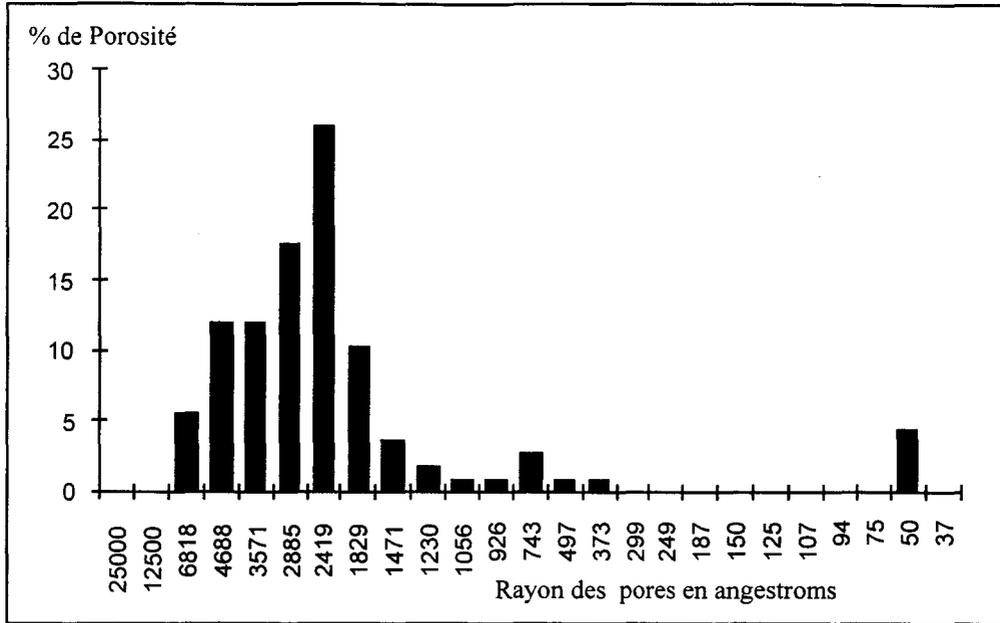


Figure II.1 : Histogramme de la répartition du pourcentage des rayons

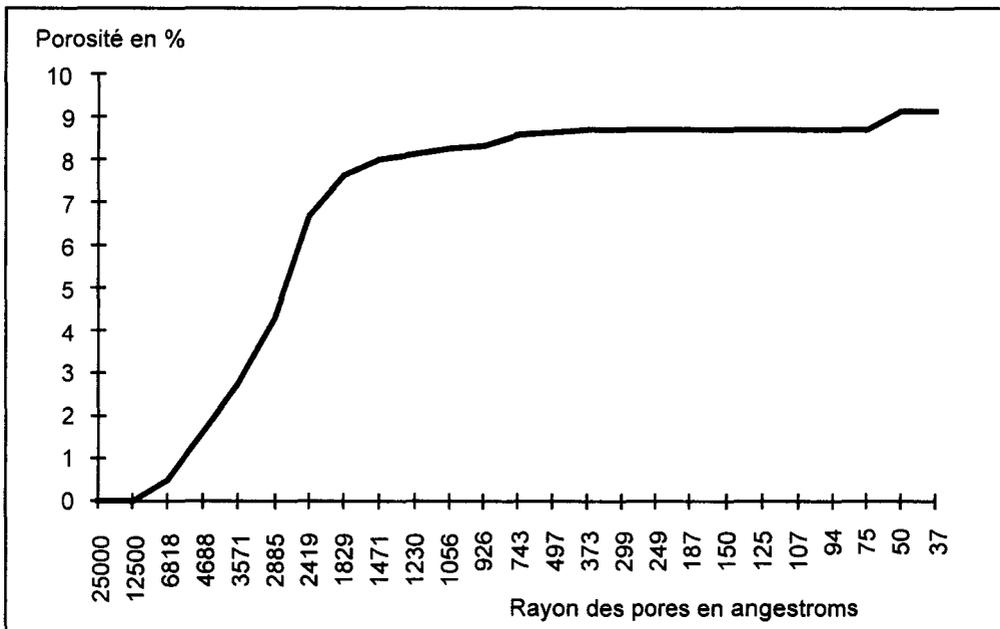


Figure II.2 : Courbe de la microporosité cumulée en fonction du rayon de pore

d'un corps cylindrique de diamètre interne 100 mm et de hauteur 130 mm et de six tiges pour fixer les plateaux et le corps cylindrique lors de montage. Le plateau inférieur comprend:

- i) l'entrée du circuit d'huile (pour varier la pression de confinement),
- ii) l'entrée et la sortie du fluide interstitiel, à partir desquelles s'effectuent le circuit de saturation, la montée en pression interstitielle et la mesure du volume du fluide injecté ou expulsé de l'échantillon,
- iii) les sorties des fils pour la liaison électrique entre les jauges et la chaîne d'acquisition.

- deux *pompes haute pression* de type "GILSON" et de capacité maximale 60 MPa. L'une est utilisée pour la saturation et l'injection du fluide à l'intérieur de l'échantillon, l'autre sert à appliquer la pression de confinement. Le fluide saturant l'échantillon est le Méthanol (caractéristiques données à l'annexe II). Le fluide utilisé pour l'application de la pression de confinement est de l'huile "haute pression" (huile Enerpac HF 95Y).

Les pompes peuvent fonctionner de façon continue et pendant une longue durée avec un débit prédéterminé. Elles sont en mesure de maintenir la pression constante lors d'une baisse de celle-ci. Elles ne sont cependant pas capables de récupérer le fluide dans le cas d'une surpression, comme cela arrive par exemple pour la pression de confinement lors de la pénétration progressive du piston dans la cellule au cours de chargement déviatorique. Le dépassement de la pression est alors réglé par l'intermédiaire de l'opérateur au moyen de la vanne de régulation (Figure II.3 vanne 5i).

- plusieurs *vannes* en acier et en plastique ainsi que de la *tuyauterie métallique* de diamètre 1 mm. Le jeu de vannes utilisées permet d'établir plusieurs types d'opérations répertoriées dans le tableau II.1.

- un dispositif comprenant une *pompe à vide*, une *cloche à vide* et un *moule* utilisé pour la fabrication de la *jaquette*. Celle-là assure l'étanchéité de l'échantillon vis-à-vis du fluide de confinement et assure la séparation des circuits intérieur et extérieur de l'échantillon.

- un dispositif servant à la préparation et à la protection des *matériels de mesure d'extensométrie* (jauges). Il se compose des éléments suivants:

- \* le ciment de sous-couche des jauges "Strain gage Ciment pc-12 KYOWA",
- \* le produit Vishy Catalyst-B,
- \* la colle M-Bond 200 Adhésive qui polymérise instantanément,
- \* le produit Vishy de protection M-Coat A,

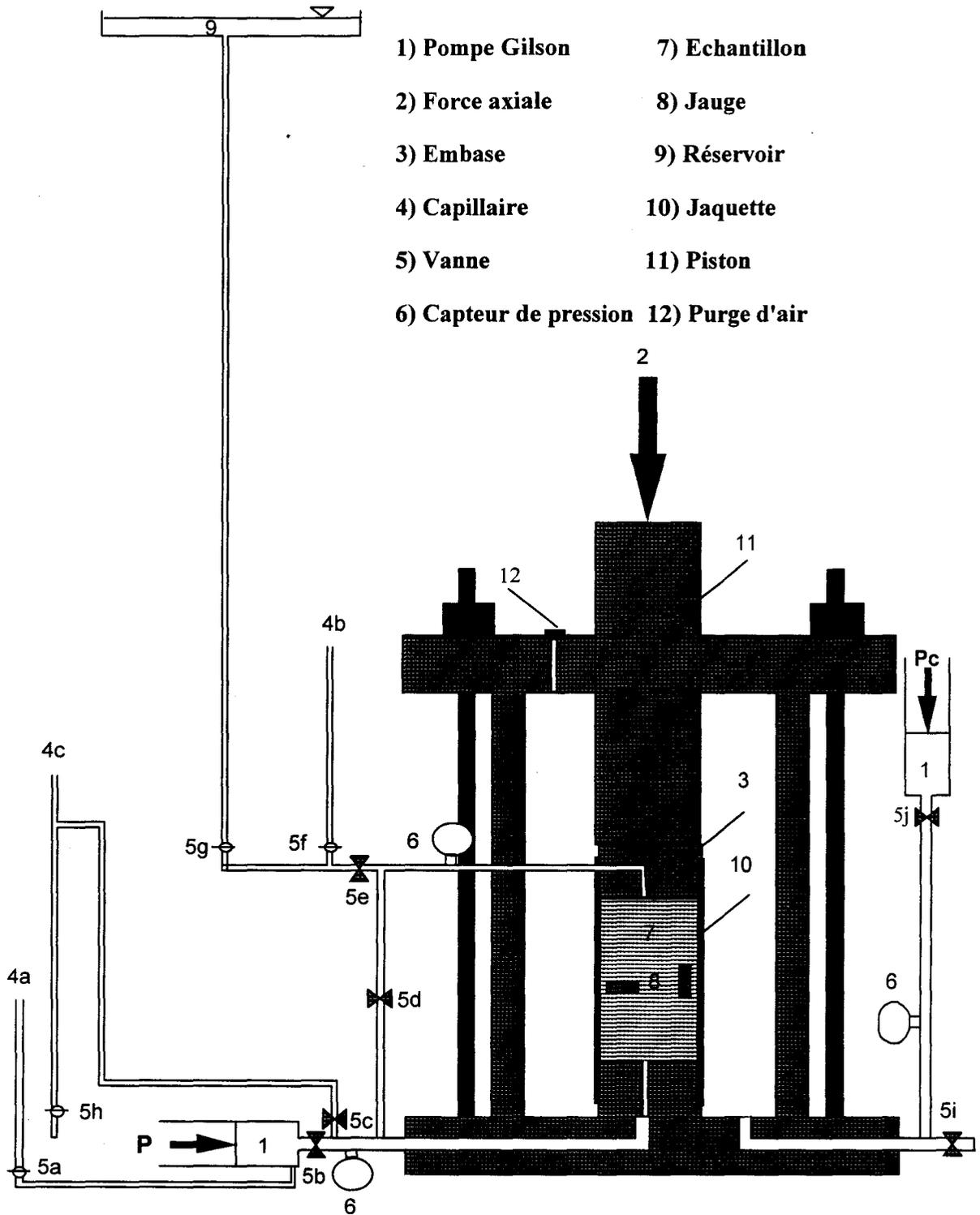


Figure II.3 : Illustration schématique de la cellule triaxiale

Tableau II.1 : Condition de circuit intérieur pour différentes opérations

Opération	Vanne fermée	Vanne ouverte
Saturation sous pression	5c, 5d, 5g	5a, 5b, 5e, 5f
Essai hydrostatique et déviatorique drainé	5a, 5b, 5c, 5g	5d, 5e 5f
Essai hydrostatique et déviatorique non drainé	Toutes les vannes sont fermées	--
Mesure de la perméabilité	5a, 5b, 5d, 5f	5g, 5e, 5c
Montée en P (injection)	5g, 5f, 5e, 5c	5a, 5b, 5d

\* le produit Vishy de protection M-Coat D,

\* les cosses relais et les fils de connexion de diamètre 2/100 mm,

## II.2.2 Dispositif de Mesure

Le dispositif de mesures comporte des éléments suivants :

### \* *Mesure des Déformations*

Les jauges extensométriques d'une longueur de 5 mm sont utilisées pour la mesure locale (à l'endroit où elles sont collées) de déformations. Diamétralement opposées deux à deux, elles sont installées à la mi-hauteur de l'éprouvette (Figure II.4).

Les jauges transversales sont au nombre de 4 et celles longitudinales sont de 2 à 4 par rapport à spécificité d'essai (la durée, cycles chargement-déchargement., etc..). La valeur finale de la déformation dans une direction donnée (notées  $\varepsilon_1$  pour la direction longitudinale et  $\varepsilon_3$  pour celle transversale) est la valeur moyenne obtenue par l'ensemble des jauges utilisées dans cette direction. La déformation volumique  $\varepsilon_v$ , dans tous nos essais, est calculée comme étant la somme de la déformation longitudinale et de la déformation transversale multipliée par 2.

### \* *Mesure des Pressions*

Cette mesure est effectuée par l'intermédiaire de trois capteurs de pression. L'un avec une précision de 0,5 bar est destiné au contrôle des variations de la pression de confinement

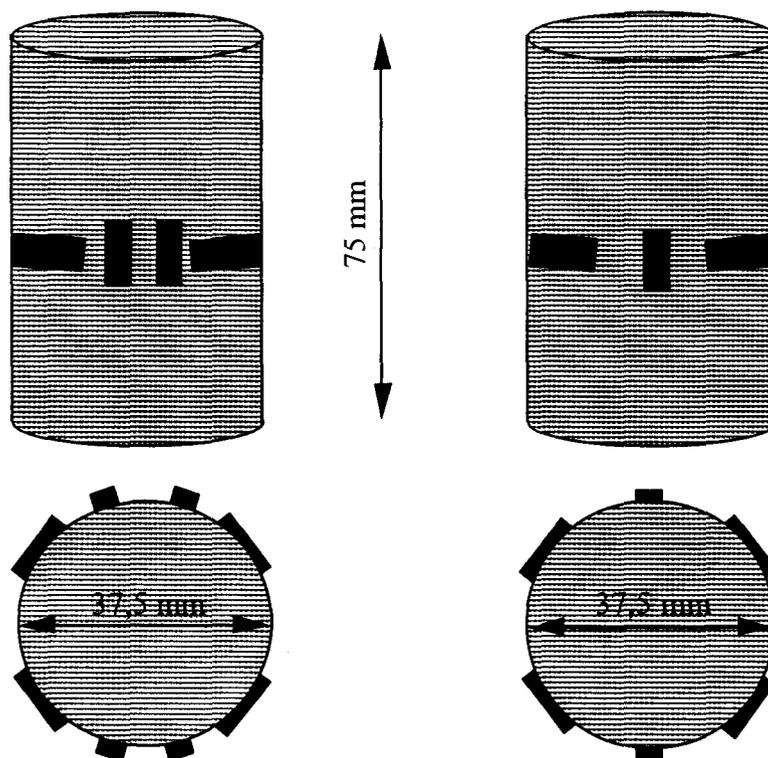


Figure II.4: Disposition des jauges extensométriques dans les cas de 6 et 8

$P_c$  (de 0 à 70 MPa). Les deux autres avec une précision de 0,1 bar sont utilisés pour mesurer la pression interstitielle  $P$  à chaque extrémité de l'échantillon.

**\* Mesure de variation de Volume Poreux**

Deux capillaires d'un diamètre de 3 mm (Figure II.3, 4a et 4b) servent à mesurer la variation de volume poreux de l'échantillon à partir du volume de fluide expulsé ou injecté. Le capillaire 4a donne le volume injecté dans l'échantillon et le 4b le volume expulsé.

**\* Détermination de la Perméabilité**

Compte tenu de la porosité relativement élevée du matériau choisi, de la simplicité de manipulation et de la bonne fiabilité des résultats, la perméabilité a été déterminée par la méthode des charges hydrauliques constantes imposées sur les deux bases de l'éprouvette (cf. §I.3.1). Un réservoir de fluide, installé à 2m au dessus de l'embase supérieure, nous fournit une charge hydraulique constante appliquée sur la section supérieure de l'éprouvette (Figure II.3).

Le volume de fluide traversant l'échantillon est donné par le capillaire 4c (Figure II.3). La tuyauterie du circuit du fluide interstitiel est embranchée à la partie supérieure de ce

capillaire. Cela assure l'existence d'une charge hydraulique constante sur la section inférieure de l'éprouvette. Cette charge donne la possibilité de préserver un état de saturation complète de l'éprouvette pendant toute la durée de l'essai.

Le fait que la charge exercée sur la base supérieure de l'éprouvette soit plus grande (7 fois environ) que celle sur la base inférieure engendrera un écoulement unidimensionnel de débit constant de haut en bas (ouverture de 5g, 5e, 5c et fermeture de toutes les autres). Après la stabilisation de l'écoulement, on mesure le volume du fluide traversant  $\Delta v$  pendant une période donnée  $\Delta t$ . Rappelons que les effets de la pression de confinement sur les surfaces latérales de l'échantillon empêchent toute percolation du fluide entre l'éprouvette et la membrane.

Dans le cas d'une roche de faible porosité, la détermination de la perméabilité peut être réalisée en appliquant une pression constante sur la section inférieure de l'échantillon (5c et 5d fermés) et en mesurant le volume de fluide à l'aide du capillaire 4b (5g fermé, 5e et 5f ouverts).

#### *\* Mesure de la Contrainte et du Déplacement Axiaux*

Un capteur de force et un autre de déplacement (L.V.D.T.), intégrés dans le corps de la presse, donnent la valeur de la force axiale exercée sur l'échantillon et celle du déplacement vertical du vérin de la presse.

Les jauges et les capteurs sont connectés à la chaîne d'acquisition de données "Système 4000 Vishy". Cette chaîne possède 40 voies extensométriques, c'est-à-dire des voies adaptées aux jauges ou aux capteurs fonctionnant comme une jauge, et 10 voies universelles (capteurs fonctionnant avec le voltage). La chaîne est reliée à un micro-ordinateur "PS2 38" muni d'un logiciel d'acquisition de données Vishy. Tous les signaux de mesure extensométriques sont automatiquement convertis en micro déformation, et ceux des capteurs de voltage en microvolts. Les valeurs mesurées sont contrôlées par la lecture directe sur l'écran pendant toute la durée d'essai. La saisie des données peut s'effectuer manuellement ou/et automatiquement sur une disquette. Les données brutes, stockées sur une disquette, seront transférées sur un tableur (Excel) à l'aide de l'une des options offertes par le logiciel d'acquisition.

### **II.3: Modes Opératoires**

A cette étape nous soulignons les principaux points à respecter afin de pouvoir obtenir des résultats expérimentaux fiables et d'éviter tout échec éventuel de l'essai :

- i) La bonne compréhension du fonctionnement des appareils utilisés, leur entretien régulier et la vérification de leur état avant de procéder à l'essai ;
- ii) Beaucoup de soin lors de la préparation et la manipulation des échantillons ;
- iii) La surveillance rigoureuse du déroulement d'essai.

### II.3.1 Carottage et Rectification

Les échantillons sont façonnés en cylindres de différentes longueurs tous dans la même direction (perpendiculaire au litage) sur les blocs disponibles. Ensuite, ils sont coupés à une longueur approximative de 77 mm. Les bases de ces éprouvettes sont rectifiées de façon à obtenir des sections bien parallèles et à avoir pratiquement les mêmes dimensions, soit 37,5 mm de diamètre et 75 mm de hauteur soit un élanement de 2. Néanmoins c'est la dimension réelle de chaque échantillon, mesurée à l'aide d'un pied à coulisse, qui sera utilisée dans le calcul du volume apparent initial avant chaque essai.

### II.3.2 Collage des Jauges

C'est une opération très délicate, et la réussite de l'essai est essentiellement liée à sa parfaite réalisation. La position prévue pour les jauges est déjà marquée à l'aide de traits très fins. Le collage des jauges doit être adapté aux types de rugosité de surface des roches. Compte tenu des difficultés rencontrées concernant notre matériau à ce niveau-ci, il est donc indispensable d'effectuer une préparation de la surface, c'est-à-dire un nettoyage soigné et l'application d'une sous couche de ciment (PC-12) en pellicule très fine servant de support pour l'aire de collage. Afin d'éviter toute perturbation dans la mesure des déformations, après séchage complet du ciment (environ une heure à l'air), il est nécessaire de procéder au polissage de la surface de sous couche à l'aide d'un papier abrasif jusqu'à l'apparition des grains de la roche. Ensuite, nous appliquons le produit Catalyst-B afin de nettoyer l'emplacement prévu pour les jauges de toutes les impuretés et graisses, et pour accélérer la polymérisation de la colle. Puis les jauges sont collées à l'aide de colle de sorte qu'il n'y ait aucun contact manuel et aucune bulle d'air coincée sous les jauges. Les fils de connexion et les pattes de sortie sont soudés sur une cosse relais, cette dernière est collée à coté des jauges. Enfin l'ensemble des jauges et des cosses relais est protégé du fluide interstitiel à l'aide de trois couches de produits de protection, à savoir:

- Deux couches de M-Cote A qui sèche après environ 30 minutes à l'air,
- Une couche de M-Cote D qui sèche après environ 20 minutes à l'air.

### II.3.3 Préparation de Membranes et Mise en Gaine de l'Eprouvette

L'utilisation d'une membrane cylindrique d'un diamètre intérieur de 37,5 mm, d'une épaisseur de 3 mm et d'une longueur de 120 mm en silastène permet d'empêcher la pénétration de l'huile de confinement dans l'échantillon et d'assurer la séparation des circuits intérieur et extérieur pendant l'essai. Les étapes de fabrication de cette membrane, élaborée à partir de quatre produits Rhône-Poulenc, consistent en:

- l'homogénéisation parfaite du mélange des produits,
- le dégazage sous cloche du mélange,
- le moulage sous vide de la membrane,
- le durcissement du produit dans une étuve à 80°C pendant 24 heures.

Deux trous diamétralement opposés sont percés à mi-hauteur de la jaquette afin d'assurer le passage des fils électriques. La longueur de membrane étant supérieure à celle de l'échantillon, nous pouvons couvrir les embases métalliques lors de la mise en place de l'échantillon. L'échantillon est placé dans la jaquette, les fils sont tirés au maximum. Nous rebouchons les trous à l'aide de Silicone qui séchera pendant au moins 12 heures.

### II.3.4 Mise en place de l'Echantillon

Il est nécessaire de mettre en route l'ensemble des appareils surtout la chaîne d'acquisition de données au moins une heure avant toute utilisation. Cela permet l'échauffement initial des appareils indispensable pour un bon fonctionnement. Dans le cas contraire les valeurs indiquées par les capteurs et les jauges peuvent être erronées et la presse peut être instable.

Par précaution tous les capteurs, les jauges, les capillaires et la tuyauterie, sont contrôlés et vérifiés. Deux filtres en papier, destinés à la protection du système de drainage, sont placés sur les bases de l'échantillon. Ensuite, il est placé entre l'embases métallique, inférieure solidaire de la cellule et l'embase supérieure, de sorte que les embases soient entièrement couvertes par la jaquette. Puis, deux cerflexes sont serrés au maximum autour des embases afin d'assurer l'étanchéité de l'éprouvette. Après remplissage de la cellule, les tuyauteries des circuits sont montées et nous procédons à la mise en contact de l'échantillon et du piston. L'air de la cellule est évacué, les jauges et le capteur sont initialisés. Ensuite, on sature l'échantillon.

### II.3.5 Saturation Sous Pression

Nous insistons sur l'importance de cette opération, toutes les failles à ce niveau peuvent aboutir à des résultats erronés. La procédure décrite ci-dessous est proprement adaptée à notre matériau. Pour les matériaux moins poreux, il faut prolonger le temps de certaines opérations ou bien procéder d'une manière différente (par exemple la saturation sous vide). L'opération commence à partir d'un état dans lequel l'échantillon sec se trouve dans un champ de contrainte isotrope égale à 2 MPa. L'opération est composée de différentes étapes.

1) La pompe P (Figure II.3), pré réglée sur le débit maximum et la pression 1,5 MPa, injecte le fluide continuellement dans l'échantillon à partir de la base inférieure (Figure II.3 5a, 5b, 5e, 5f ouverts et 5c, 5d, 5g fermés). Le sens du circuit entraînera un remplissage progressif des pores et l'évacuation de l'air vers la sortie supérieure. L'évacuation des bulles d'air, pendant ce temps, est surveillée visuellement par le tuyau transparent connecté au capillaire 4b. L'injection du fluide sera poursuivie jusqu'à l'obtention d'un écoulement continu et sans bulles d'air. Cette étape dure au moins 40 minutes.

2) On ferme la vanne 5e pour quelques minutes, cela entraînera une augmentation de la pression interstitielle de l'ordre de 1,5 MPa. L'application de cette pression nous permet de faire pénétrer le fluide dans les pores de petite taille et de chasser les petites bulles d'air vers le haut. On chute soudainement la pression interstitielle (ouverture de 5e), l'injection continue de méthanol sera tout de suite reprise, automatiquement par la pompe. Pendant quelques minutes, on frappe quelques légers coups, à l'aide d'une clé, sur la tuyauterie métallique afin de faire sortir les bulles d'air éventuellement coincées dans la tuyauterie. Cette opération est répétée, autant de fois que nécessaire, jusqu'à la disparition totale de toutes les bulles d'air dans le circuit du fluide.

3) On réalise maintenant l'étape la plus importante dans cette procédure, c'est-à-dire l'application d'une pression interstitielle de 1,5 MPa durant au moins trois heures, afin que le fluide puisse pénétrer dans les pores les plus petits.

4) Pour compléter la saturation on fait chuter la pression intérieure et on applique, à deux ou trois reprises, un chargement isotrope de l'ordre de 6 MPa en condition non drainée (5e fermé) sur échantillon. Puis, après quelques minutes, on fait chuter la pression interstitielle, déjà augmentée sous l'effet du confinement. Ensuite pendant l'injection continue du fluide, on décharge la pression de confinement, à l'aide de la vanne 5i, jusqu'à 2 MPa.

Avant de procéder à l'essai, l'état de saturation est vérifié par l'application d'un incrément de contrainte isotrope  $\Delta\sigma_m=1$  MPa en condition non drainée. On observe alors la réponse du matériau, c'est-à-dire la variation de la pression interstitielle  $\Delta P$  sous l'effet de  $\Delta\sigma_m$  (cf. §I.2.1.2 la relation I.29). Si le rapport  $\Delta P/\Delta\sigma_m$  est proche du coefficient de Skempton

(cf. I.2.1.2, cas non drainé), on considère que la saturation est pratiquement établie dans l'échantillon. Dans le cas contraire, on reprend l'opération 4.

**Remarque II.1:** La durée de saturation sous pression (3 heures) a été jugée comme suffisante pour le matériau choisi, car nous avons comparé les pentes des courbes  $P-\sigma_m$ , sous l'effet d'un chargement isotrope en régime non drainé, concernant un échantillon ayant été saturé sous pression pendant 3, 24 et 48 heures. Les résultats sont présentés sur la Figure II.5. Les trois courbes sont pratiquement identiques.

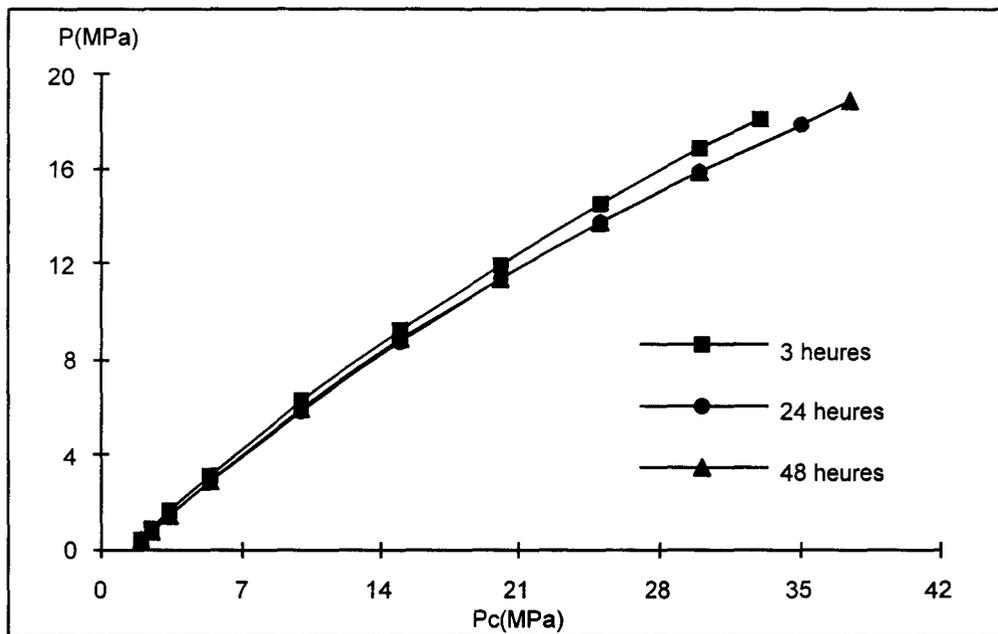


Figure II.5: Courbes obtenues pour trois durées de saturation

Après avoir achevé la saturation de l'échantillon, on procède à l'essai. La figure II.6 montre les différentes étapes du mode opératoire ainsi que les parcours effectués pour l'application des différents chemins de sollicitation.

#### II.4: Chemins de Chargements Effectués

Les objectifs de notre étude expérimentale nous conduisent à un large choix de chemins de sollicitation. Dans l'application de ceux-ci, adaptés à nos propres besoins, on s'est largement inspiré de nombreux travaux antérieurs au sein de notre laboratoire, plus particulièrement des travaux de Sibai [SIBA. 1990] et d'Ikogou [IKOG. 1990]

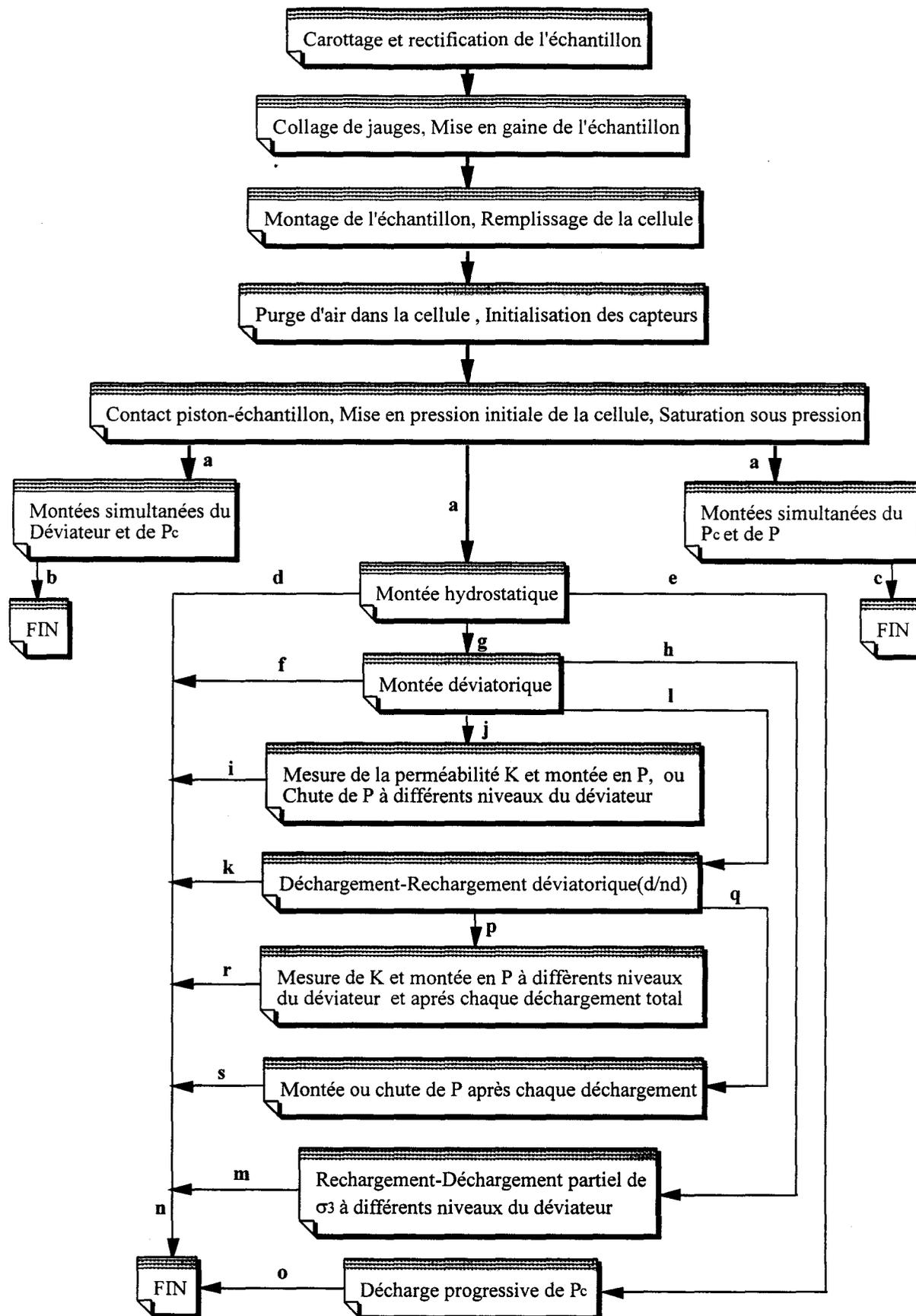
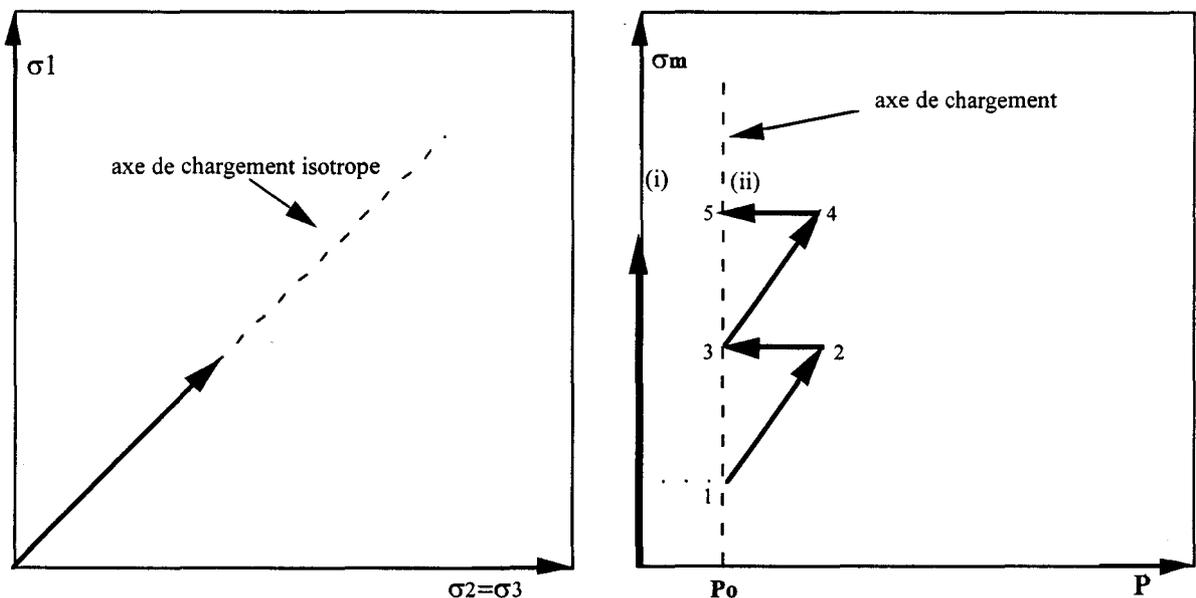


Figure II.6 : Méthode opératoire pour la réalisation de différents essais

### II.4.1 Chemin de Compression Hydrostatique

La procédure expérimentale consiste à mesurer l'évolution des déformations dans deux directions perpendiculaires ainsi que l'effet du fluide saturant (variation de  $P$  ou/et celle du volume de fluide échangé avec spécimen) sous l'application d'un champ de contrainte isotrope, c'est-à-dire  $\Delta\sigma_1=\Delta\sigma_2=\Delta\sigma_3=\Delta P_c$  (parcours a-d-n sur la figure II.6). La pression est appliquée à l'aide de la pompe Gilson (§ II.2.1) et l'essai a été conduit jusqu'à 60 MPa. Le chemin de chargement effectué dans l'espace des contraintes est présenté sur la figure II.7-a. Le chargement a été effectué par paliers et la saisie de données est faite quelques minutes après avoir atteint le niveau de chaque palier de telle sorte qu'on ait une vitesse moyenne du chargement d'environ 0,25 MPa par minute. Différentes conditions de sollicitations ont été utilisées.



a) Chemin Hydrostatique dans l'espace ( $\sigma_1$   $\sigma_2$   $\sigma_3$ )    b) Chemin en condition drainée sur le plan  $\sigma_m$ - $P$

Figure II.7 : Chemins de chargement hydrostatique dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ )

#### II.4.1.1 Chemin Drainé

Le mot drainé désigne en général les essais au cours desquels le fluide interstitiel, sous l'effet du chargement mécanique, peut sortir ou entrer dans l'espace poreux de l'échantillon. La pression interstitielle reste alors constante et le drainage peut s'effectuer par l'intermédiaire des deux embases. Le volume du fluide échangé avec l'extérieur, égal à la variation du volume poreux, est mesuré par le capillaire 4b (Figure II.3). Compte tenu de la capacité de notre matériel de mise en pression (cf. §II.2.1), et comme le montre la figure II.7-b dans le plan  $\sigma_m$ - $P$ , on peut envisager deux types de chargement :

\* Le chemin (i) dans lequel la pression interstitielle reste nulle au cours de l'essai (Figure II.1 5d, 5e et 5f ouverts, tous les autres fermés),

\* Le chemin (ii), souvent difficile à contrôler, pendant lequel la pression interstitielle est constante et égale à  $P_0$ . Ce type d'essai aurait pu être réalisé à l'aide d'un générateur de pression GDS "haute pression". Faute de ce matériel dans le laboratoire, l'essai a été effectué par la réalisation d'une étape supplémentaire. Le début d'essai correspond à un état dans lequel la pression interstitielle est égale à  $P_0$  et celle de confinement étant environ deux fois plus grande que  $P_0$  (point 1). On applique le premier palier de la contrainte hydrostatique  $\sigma_m$  en condition non drainé (5e fermé). Cette montée en  $\sigma_m$  entraîne une augmentation de  $P$  (point 2), qui sera très lentement diminuée, par l'intermédiaire de la vanne 5e, et ramenée à  $P_0$  (point 3). On répète de la même façon la phase suivante soit le parcours des points 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à 60 MPa.

Il est à noter que ce chemin par rapport au précédent est plus fiable car il permet, au cours de l'essai, de maintenir la saturation au sein de l'éprouvette.

Dans cet essai, d'après les relations (I.32) et (I.33), la pente de la partie linéaire des courbes  $\Delta\sigma_m - \Delta\varepsilon_v$  et  $\Delta\sigma_m - \Delta m / \rho_0^n$  donne respectivement le module d'incompressibilité drainé du matériau  $K_0$  et le module poroélastique  $H_0$  ( $H_0 = K_0/b$ ).

#### II.4.1.2 Chemin Non Drainé

La désignation non drainée définit des chemins de sollicitation au cours desquels il n'y a aucun échange de fluide avec l'extérieur. Après la saturation complète de l'échantillon, toutes les vannes seront fermées et l'application de contrainte de confinement est effectuée par paliers. La pression interstitielle est alors variable sous l'effet du chargement. Son uniformité au sein d'échantillon est contrôlée par la comparaison des pressions mesurées aux deux extrémités de l'éprouvette.

La figure III.8-a présente le chemin de chargement effectué dans le plan  $\sigma_m$ - $P$ . Le point de départ de l'essai correspond à un état de contrainte hydrostatique  $\sigma_m=2$  et  $P=2$  MPa. Les pentes des parties linéaires des courbes  $\Delta\sigma_m - \Delta\varepsilon_v$  et  $\Delta\sigma_m - \Delta P$  obtenues (cf. les relations I.28 et I.29) donnent respectivement le module d'incompressibilité non drainé  $K$  et le coefficient de Skempton  $B_s$ .

#### II.4.1.3 Chemin à Drainage Partiel

C'est en fait une combinaison des deux chemins précédents. L'essai commence à partir d'un état de contrainte hydrostatique  $\sigma_m^0$  et d'une pression interstitielle initiale  $P_0$ . Cette dernière assure la saturation initiale parfaite d'échantillon. L'essai consiste à monter, par paliers et d'une façon consécutive, d'abord la contrainte hydrostatique  $\sigma_m$  en gardant  $P$  constante, ensuite la pression interstitielle (d'une valeur égale à l'incrément de contrainte  $\sigma_m$ ) en gardant la contrainte  $\sigma_m$  constante. La figure II.8-b montre ce chemin dans le plan  $\sigma_m$ - $P$ .

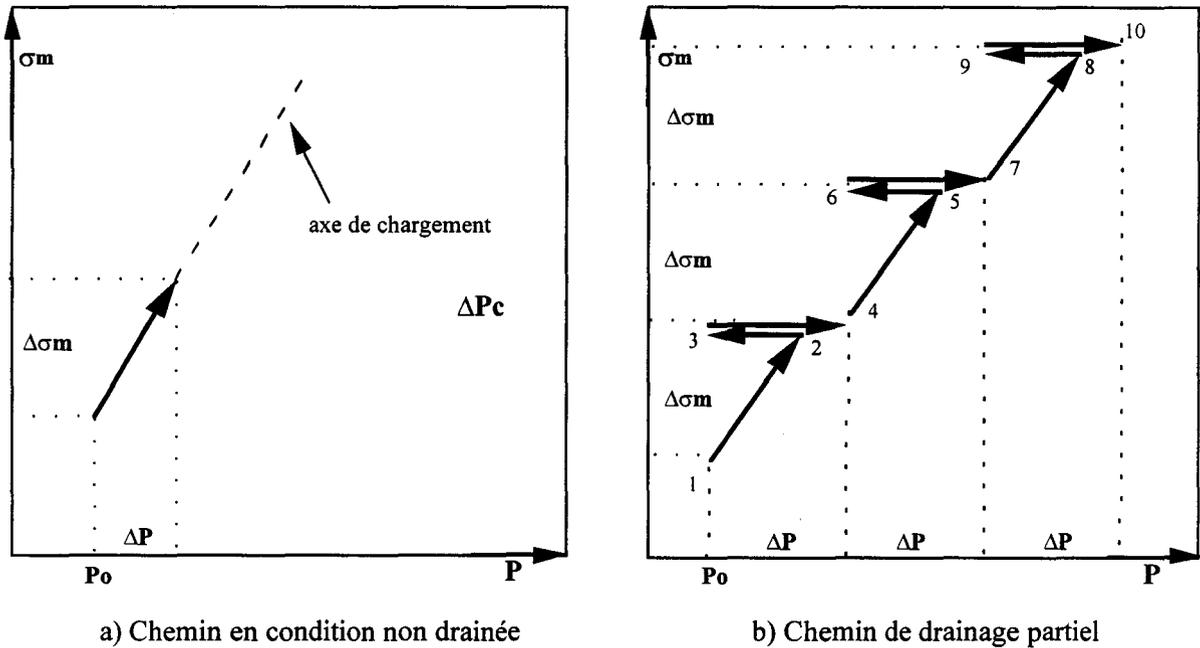


Figure II.8 : Chemins de chargement hydrostatique dans le plan  $\sigma_m$ - $P$

A partir du point 1 on augmente la contrainte  $\sigma_m$  en régime non drainé (vanne 5e fermée). La pression interstitielle augmente alors sous l'effet du chargement en contrainte (point 2). En ouvrant le vanne 5e, on ramène la pression  $P$  à sa valeur initiale  $P_0$  au point 3. On augmente cette fois-ci la pression interstitielle en gardant la pression de confinement constante jusqu'au point 4.

Les valeurs des jauges et la variation du volume du fluide (expulsé sur le point 3 et injecté sur le point 4) ont été saisies aux points 2, 3 et 4. On répète ces étapes à partir du point 4, soit le parcours 4, 5, 6 et 7 et ainsi de suite jusqu'à 60 MPa, limite de nos pompes. En effet entre les points 1-3, 4-6, 7-9, etc.. l'essai est mené à  $P$  constant et entre les points 3-4, 6-7, 9-10, etc., l'essai est fait à  $\sigma_m$  constante avec les paliers de pressions  $\Delta\sigma_m = \Delta P$

C'est à partir de ce chemin particulier qu'on peut déterminer directement la valeur du coefficient de Biot  $b$ , qui est égale au rapport de la déformation volumique due à l'évolution de  $P$  sur celle causée par la variation de  $\sigma_m$ . En effet, on a d'après la relation I.35 :

$$(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0} = \frac{\Delta\sigma_m}{K_o} \text{ où } \Delta\sigma_m \neq 0 \text{ et } \Delta P = 0 \text{ (entre les points 1-3, 4-6, 7-9,.....)}$$

$$(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0} = \frac{b}{K_o} \Delta P \text{ où } \Delta\sigma_m = 0 \text{ et } \Delta P \neq 0 \text{ (entre les points 3-4, 6-7, 9-10.....)}$$

En imposant  $\Delta\sigma_m = \Delta P$  on obtient alors :

$$b = \frac{(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0}}{(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0}}$$

Il est à noter que conformément au choix  $\sigma_m^0 < P_{cf}$ , ou  $\sigma_m^0 > P_{cf}$ , (cf. III.1.1.1), cet essai peut être effectué avant la fermeture des microfissures naturelles ou après la fermeture de celles-ci (c'est à dire dans la zone linéaire). Dans notre étude, comme on le verra par la suite, cet essai a été fait dans la zone de serrage pour les valeurs de  $\sigma_m^0 = 2$  MPa,  $P = 1$  MPa et les incréments  $\Delta\sigma_m = \Delta P = 3$  MPa.

#### II.4.1.4 Chemin à $\Delta\sigma_m = \Delta P$

Le but de cet essai est de solliciter uniquement la phase solide du matériau, et d'étudier le comportement mécanique de celle-ci sous chargement isotrope. L'application de ce chemin permet de mesurer le module d'incompressibilité de la matrice solide  $K_s$  qui est la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte moyenne  $\sigma_m$  - déformation volumique  $\varepsilon_v$  (cf. §I.2.1.1, la relation (I.36)).

Compte tenu des difficultés rencontrées lors de l'application de ce chemin sur un échantillon gainé, cet essai a été effectué par l'immersion d'un échantillon non gainé, préalablement saturé en huile, dans la cellule. La saturation, avec la même huile que celle utilisée pour le confinement, a été faite sous vide pendant trois heures, et ensuite l'éprouvette a été soumise à 3 cycles de chargement - déchargement isotrope de l'ordre de 7 MPa pour compléter la saturation. On n'avait donc qu'un seul circuit d'huile exerçant à la fois sur l'échantillon et dans les pores.

#### II.4.2 Chemin de Compression Triaxiale Monotone

L'essai triaxial consiste d'abord à soumettre un échantillon à une sollicitation hydrostatique ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$ ) puis, en maintenant la pression de confinement constante, à appliquer un chargement déviatorique par l'augmentation de la contrainte axiale, à l'aide de la

presse (Figure II.6 parcours a-g-f-n). Nous avons effectué un certain nombre d'essais triaxiaux monotones sous différentes conditions de drainage.

### II.4.2.1 Chemin Drainé

La figure II.9-a montre le trajet du chargement effectué dans l'espace des contraintes. L'application de ce chemin pour une série d'essais sur des échantillons non saturés (sec et drainé à l'air) a conduit à faire un essai de compression uniaxiale (pression du confinement égale à zéro). Dans ce cas on applique uniquement une contrainte de compression axiale sur l'éprouvette jusqu'à la rupture. Cet essai, en l'absence de la pression de confinement, peut être réalisé par l'installation directe d'un échantillon non gainé sur le plateau de la presse. Mais afin de garder les mêmes conditions que pour tous les autres essais, notamment au niveau du frottement des embases, celui-ci a été effectué dans la cellule (sans huile).

Ce chemin a été également appliqué pour une autre série d'essais sur des échantillons saturés avec la pression interstitielle égale à zéro (Vanne 5e ouvert). La quantité du fluide échangé a été mesurée par le capillaire. La saisie de celle-ci a été effectuée au même moment que l'enregistrement des valeurs des jauges d'extensométrie. Tous les essais ont été conduits jusqu'à la rupture.

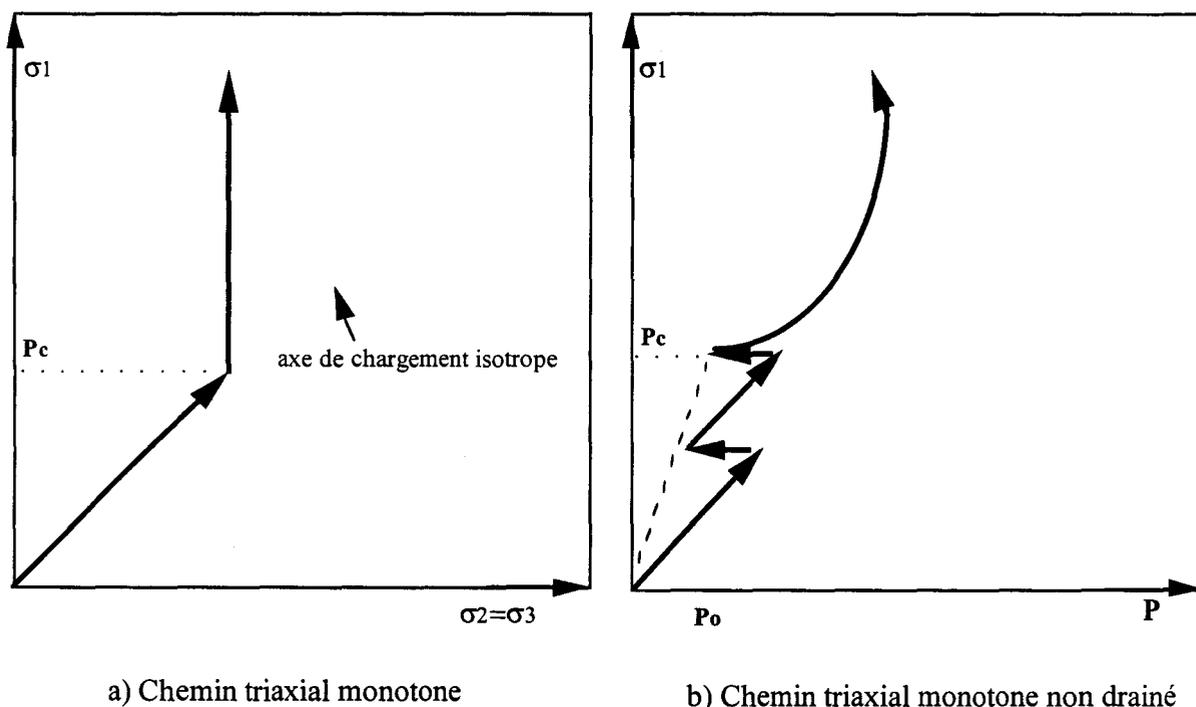


Figure II.9: Chemins de compression triaxiale dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, P$ ) et sur le plan ( $\sigma_1, P$ )

### II.4.2.2 Chemin Non Drainé

La figure II.9-b montre le chemin du chargement dans le plan  $\sigma_1$ - $P$ . L'application de la pression de confinement jusqu'au niveau désiré s'effectue de la même manière que pour un essai hydrostatique drainé à  $P$  égale à  $P_0$  (cf. §II.4.1 chemin ii). Cela nous permet de conserver l'état de saturation complète de l'échantillon lors de l'expulsion du fluide sous l'effet de la pression de confinement. Puis, toutes les vannes sont fermées et l'application de la contrainte axiale commence à partir d'un état de contrainte hydrostatique  $\sigma_m = P_c$  et d'une pression interstitielle  $P = P_0 = 1$  MPa. L'évolution de la pression est mesurée, rappelons-le, à chaque extrémité d'échantillon à l'aide de deux capteurs de pression.

### II.4.2.3 Chemin Drainé avec Montées en $P$ et Détermination de la Perméabilité

L'objectif de l'essai est d'étudier les réponses mécaniques du matériau, à différents niveaux de contrainte déviatorique, en faisant évoluer la pression interstitielle. Autrement dit, connaissant le caractère orienté de la microfissuration induite sous chargement déviatorique, on cherche à déceler l'impact de celle-ci sur l'interaction fluide-squelette d'une part, et sur l'évolution de la perméabilité d'autre part. La figure II.10 présente le chemin de sollicitation dans l'espace des contraintes.

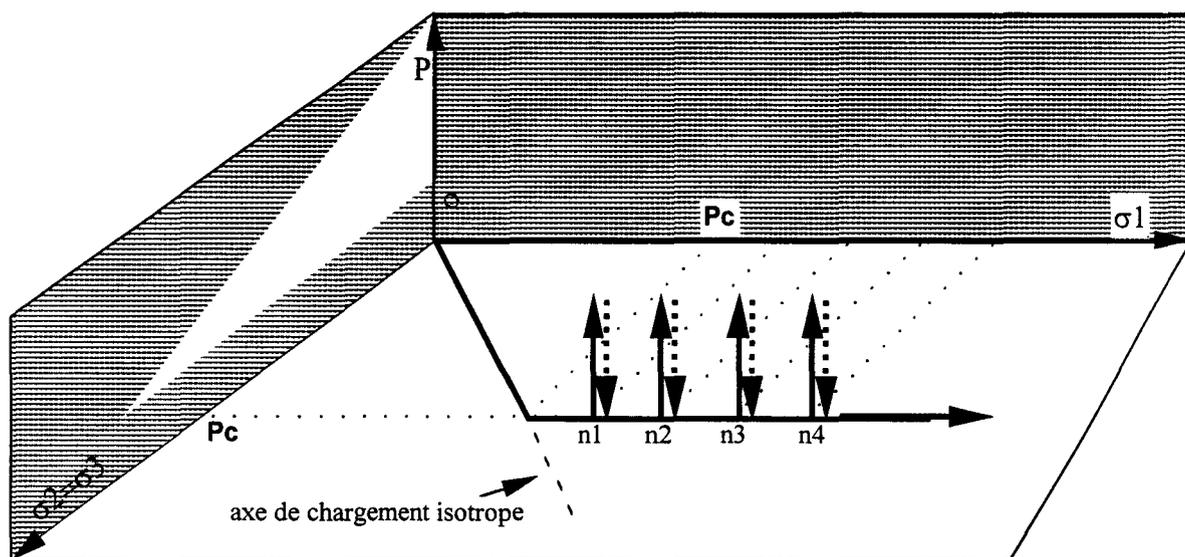


Figure II.10: Chemin de compression triaxiale drainée avec des montées en  $P$  dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, P$ )

Pour cela, comme le montre le trajet a-g-j-i-n sur la figure II.6, après la saturation complète de l'échantillon et l'application de  $P_c$  désirée, nous appliquons la contrainte déviatorique en régime drainé jusqu'à un niveau donné ( $n_1$  sur la figure II.10). Puis en maintenant les valeurs des contraintes constantes, nous déterminons la perméabilité (les vannes 5a, 5b, 5d, 5f

fermées et 5g, 5e, 5c ouvertes). La détermination de cette dernière est effectuée dans la direction de la contrainte principale majeure  $\sigma_1$ , en appliquant, rappelons-le, deux charges hydrauliques constantes sur les deux extrémités de l'échantillon (cf. §II.2.2).

Ensuite, on ferme le drainage (toutes les vannes fermées) et on injecte du fluide dans l'espace poreux de l'éprouvette jusqu'à un niveau donné de pression interstitielle P. Cette montée en P est effectuée de la même manière et avec la même vitesse que pour l'application de la contrainte lors d'un essai hydrostatique. En revanche, les déformations sont enregistrées quelques minutes après avoir atteint le niveau de chaque palier de pression interstitielle P. Le volume de fluide injecté est mesuré par le capillaire 4a (figure II.3) au même moment que la saisie des valeurs indiquées par les jauges. Après la réalisation de cette montée en P, on fait chuter la pression interstitielle à zéro pour revenir de nouveau au point n1. On augmente la contrainte axiale en condition drainée (P=0) au niveau donné suivant (n2), on détermine de nouveau la perméabilité et on refait la montée en P, et ainsi de suite.

Dans tous les essais de cette série, nous avons effectué cinq montées en P à différents niveaux de contrainte déviatorique répartis dans les différentes zones de la courbe contraintes déformations. Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

**Remarque II.2 :** La pression interstitielle maximale dans chaque essai est limitée à environ un tiers de la pression de confinement appliquée afin d'éviter tout dépassement de  $P_c$ , ce qui peut créer une instabilité, et une fracturation hydraulique.

#### II.4.2.4 Chemin Non Drainé avec Chutes de P

Ce chemin a été appliqué dans le but de déterminer les paramètres de(s) modèle(s) de poroendommagement(s). C'est un chemin réalisé pour la première fois dans l'étude expérimentale du couplage fluide-squelette. Le parcours a-g-j-i-n correspond à sa procédure expérimentale et la figure II.11 présente le chemin de sollicitation dans l'espace des contraintes. L'application de la pression de confinement  $P_c$  et de la charge axiale  $\sigma_1$  s'effectue de la même manière que pour un chemin de compression triaxiale monotone non drainé (cf. II.4.2.2).

A un niveau de la contrainte axiale prédéterminée (m1 sur la figure II.11), on garde celle-là constante. Après quelques minutes de relaxation, on procède à un déchargement par paliers de la pression interstitielle P, déjà augmentée sous les effets de la sollicitation axiale (à l'aide de la vanne 5e, figure II.3). La vitesse du déchargement et la saisie des valeurs des jauges et des capteurs de pression s'effectuent de même façon que dans les essais avec des montées en P (cf. II.4.2.3).

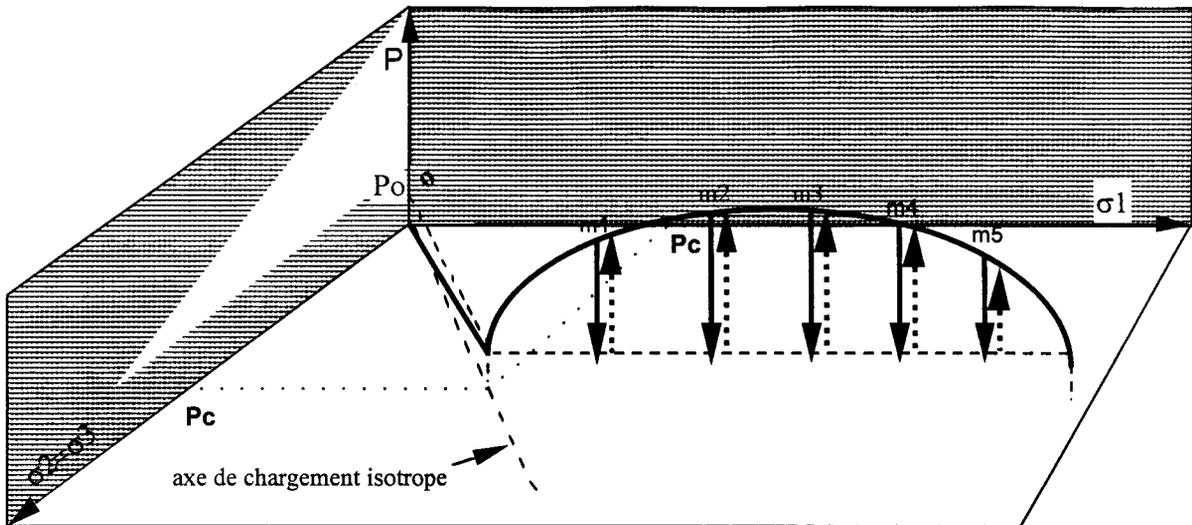


Figure II.11: Chemin de compression triaxiale non drainée avec des chutes de  $P$  dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, P$ )

La diminution de la pression interstitielle continue jusqu'à la valeur initiale de celle-ci, c'est-à-dire sa valeur avant l'application de la contrainte axiale. Ensuite, la pression interstitielle a été augmentée de façon continue, en injectant le fluide dans l'éprouvette, et réglée sur sa valeur précédente, c'est-à-dire où le déchargement a été débuté, ou bien revenir de nouveau au point  $m_1$ . Cela a pour conséquence un échange nul de fluide avec l'extérieur, et donc le respect de la condition non drainée. On continue le chargement axial de façon non drainée jusqu'au niveau prévu suivant ( $m_2$ ), on refait la même opération et ainsi de suite. La chute de la pression interstitielle a été effectuée sur cinq niveaux différents de la contrainte axiale répartis dans les différentes zones de la courbe contrainte déviatorique-déformations, dans tous les essais de cette série. Ensuite, les essais ont été menés jusqu'à la rupture.

#### II.4.3 Chemin de Compression Triaxiale avec Cycles de Déchargement - Rechargement Déviatorique

La procédure expérimentale de cet essai est similaire à celui décrit au § II.4.2. A différents niveaux de la contrainte déviatorique, préalablement choisis dans le but d'essai et d'après la réponse du matériau au chemin triaxial monotone, on procède à un déchargement déviatorique avec la même vitesse que pour le chargement (Figure II.12-a). Afin de réduire les boucles d'hystérésis et donc de faciliter la détermination des modules au déchargement (dans le cas drainé), chaque déchargement est précédé d'une phase de relaxation pendant une durée allant de 10 à 40 minutes. Après la réalisation des cycles de chargement - déchargement prévus, l'essai a été conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Plusieurs chemins ont été effectués :

### II.4.3.1 Chemin Drainé

C'est un essai qui sert, en général, à la caractérisation de l'endommagement à partir des variations des modules élastiques au déchargement. La procédure expérimentale est illustrée par le parcours a-g-l-k-n sur la figure II.6. Le déchargement est effectué soit jusqu'à l'état de contrainte hydrostatique ( $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$ ), soit jusqu'à un certain pourcentage (50% par exemple) de la valeur du déviateur atteinte. Chaque déchargement est précédé d'une phase de relaxation pendant une durée moyenne de 40 minutes.

### II.4.3.2 Chemin Non Drainé

Dans une expérience non drainée, en général, la pression interstitielle varie sous l'effet de la sollicitation extérieure. L'application des cycles déchargement - rechargement dans ce chemin nous permet d'explorer la variation de la pression interstitielle à la fois en fonction de la charge déviatorique (en chargement) et en fonction de l'état de la microfissuration induite (en déchargement). Le parcours a-g-l-q-s-n sur la figure II.6 illustre les différentes étapes nécessaires pour l'application de ce chemin. La figure II.12-b présente le chemin de sollicitation dans le plan  $\sigma_1$ -P.

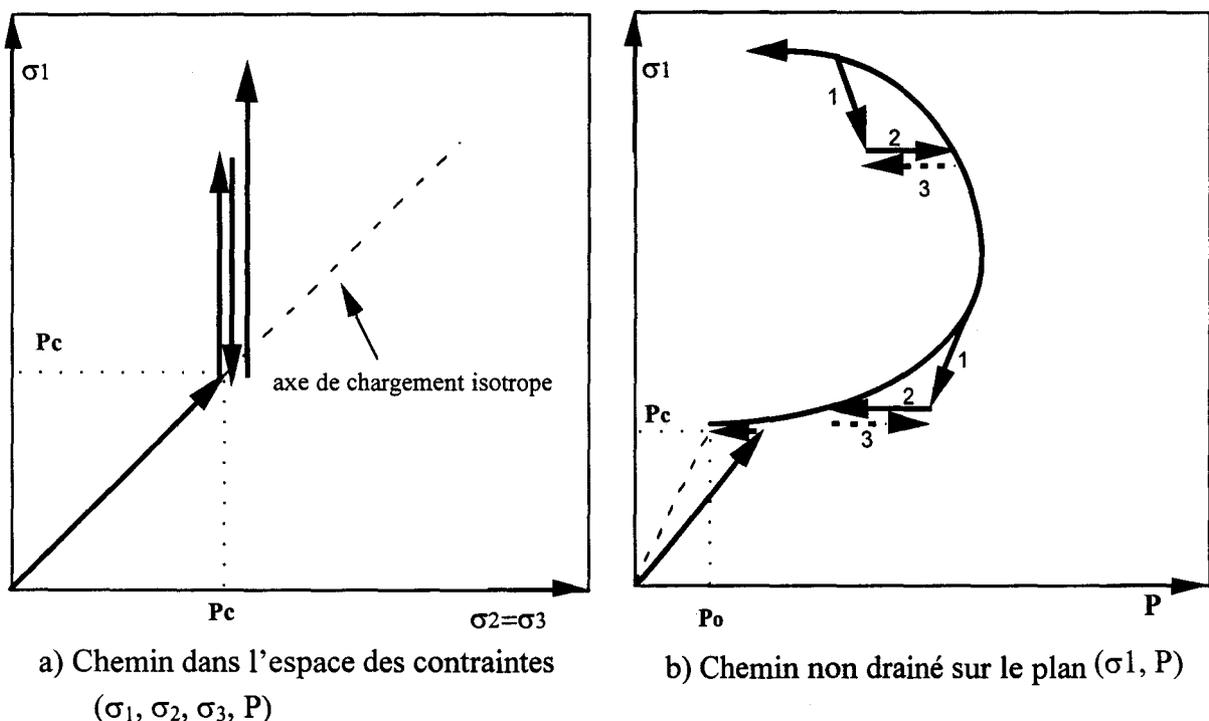


Figure II.12: Chemins de sollicitation avec cycles de déchargement - rechargement axial

L'application des pressions ( $P_c$  et  $P$ ) dans ce chemin est similaire à celle d'un chemin non drainé de compression triaxiale monotone (cf. II.4.2.2). Le déchargement axial, après une courte phase de relaxation (10 à 20 minutes), est de l'ordre de 17 à 18 MPa (phase 1 sur la

figure II.12-b). Ensuite, on diminue (par l'évacuation du fluide) ou on augmente (par l'injection) la pression interstitielle (phase 2) pour atteindre la même valeur que celle-ci lors du chargement. Le volume du fluide échangé est relevé. Puis on règle la pression interstitielle à sa valeur initiale (phase 3), d'où un échange nul de fluide avec le spécimen, et on procède à rechargement axial jusqu'au niveau suivant et ainsi de suite. Le déchargement a été effectué à quatre reprises dans les essais de cette série, deux cycles dans la zone contractante et deux autres dans la zone dilatante.

### II.4.3 3 Chemin Drainé avec Montées en P et détermination de la Perméabilité

Ce chemin, soit le parcours a-g-l-p-r-n sur la figure II.6, est en fait la combinaison des deux chemins décrits aux §II.4.2.3 et §II.4.3. Dans ce chemin, on détermine la perméabilité et on effectue la montée en pression interstitielle non seulement sur chaque niveau donné du déviateur, mais aussi après le déchargement déviatorique ( $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$ ) de l'éprouvette. C'est à partir de la réalisation de ce chemin particulier qu'on peut explorer l'effet de la microfissuration induite sur les paramètres du couplage et sur la perméabilité, non seulement aux différents niveaux de la contrainte déviatorique, mais aussi après l'annulation de celle-ci, c'est-à-dire dans une éprouvette soumise à un état de chargement hydrostatique mais présentant différents degrés de dégradation matérielle. C'est un chemin assez complexe et long qui exige une manipulation et une préparation rigoureuse de l'échantillon en utilisant un nombre maximum de jauges, afin que ces dernières puissent bien résister pendant une longue durée à la présence du fluide saturant sans perdre leur efficacité.

### II.4.4 Chemin Drainé de Compression Triaxiale avec Cycles de Chargement - Déchargement - Rechargement Latéral

Dans ce chemin, présenté comme le trajet a-g-h-m-n sur la figure II.6, l'échantillon est soumis à une sollicitation décrite au § II.4.2 en régime drainé à  $P=0$ . A un niveau donné du déviateur (n1 sur la figure II.13), on maintient la contrainte axiale constante et on augmente la pression de confinement à l'aide de la pompe jusqu'à une certaine valeur. Puis on décharge celle-ci par paliers à l'aide de la vanne 5i (figure II.3), jusqu'à une valeur inférieure à  $P_c$  initiale. L'enregistrement des jauges est effectué, en chargement comme en déchargement, quelques minutes après avoir atteint le niveau de chaque palier.

Ensuite, on augmente la valeur de  $P_c$  de façon continue jusqu'à sa valeur initiale pour revenir au point n1. Après stabilisation des jauges, on augmente la contrainte axiale jusqu'à une nouvelle valeur prévue (n2). On fixe de nouveau la contrainte axiale et on refait un autre cycle de chargement-déchargement latéral de la même façon que le précédent et ainsi de suite

jusqu'à la rupture. Dans notre étude, l'amplitude de la contrainte latérale appliquée est limitée au maximum à  $\pm 25\%$  de la  $P_c$  initiale.

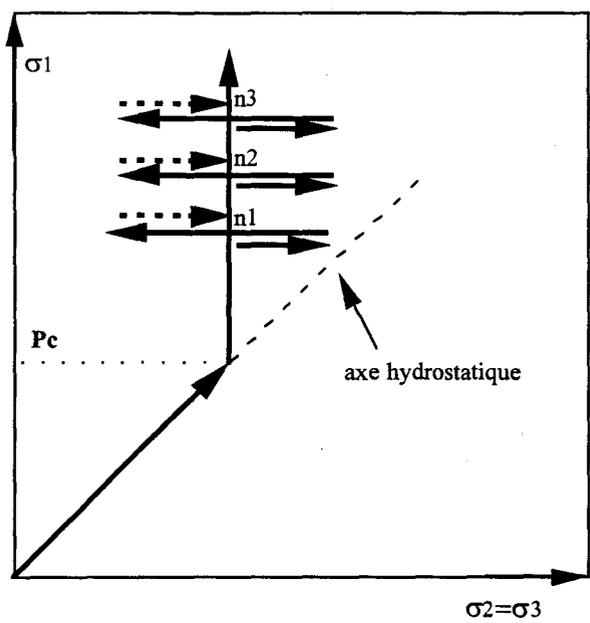


Figure II.13: Chemin de sollicitation triaxiale avec des cycles de chargement - déchargement latéral dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )

### II.4.5 Chemin d'Extension Latérale Non Drainée

Dans l'étude expérimentale de l'interaction fluide-squelette, c'est un chemin que nous effectuons pour la première fois dans le laboratoire. Ce chemin a pour but la vérification de la validité des modèles de comportement poromécanique. La figure II.14-a présente le chemin de sollicitation dans l'espace des contraintes, et le parcours a-e-o sur la figure II.6 correspond à sa procédure expérimentale.

En raison du caractère fortement dilatant du matériau sous ce chemin, et du fait de la nécessité de conserver la saturation parfaite de l'échantillon, l'essai commence à partir d'une pression de confinement de  $P_c=2$  MPa et d'une pression interstitielle de  $P=1$  MPa, toutes les vannes sont ensuite fermées. Nous procédons comme suit:

un chargement hydrostatique en condition non drainée est appliqué jusqu'à un niveau désiré nommé ici la "pression de confinement donnée". La pression interstitielle  $P$  est alors augmentée sous l'effet du couplage poromécanique. Puis, après la stabilisation complète des jauges et des capteurs et en maintenant la contrainte axiale constante, on procède à un déchargement progressif de la pression de confinement par paliers, à l'aide de la vanne 5i (figure II.3), jusqu'à la rupture ou bien jusqu'à la pression atmosphérique. La saisie des valeurs des jauges et de la pression interstitielle sur les deux extrémités de l'échantillon est

effectuée quelques minutes après la stabilisation des jauges de telle sorte qu'on ait la même vitesse de sollicitation pour le déchargement que pour le chargement dans un chemin de compression hydrostatique.

#### II.4.6 Chemin de Chargement Proportionnel Non Drainé

Comme le chemin précédent, celui-ci est effectué pour la première fois dans le laboratoire et servira également à la validation de modèles de comportement poromécanique. Ce chemin est présenté sur la figure II.14-b dans l'espace des contraintes.

La procédure expérimentale, correspondant au parcours a-b sur la figure II.6, consiste d'abord à appliquer un incrément de contrainte hydrostatique  $\sigma_m$  égal à une valeur donnée  $P_{co}$  en condition non drainée (la vanne 5e fermée), puis à régler la pression interstitielle  $P$ , augmentée sous l'effet du chargement hydrostatique, à une valeur initiale  $P_o$  de telle sorte qu'on ait  $P_{co}/2 \leq P_o < P_{co}$ . Ainsi, la saturation initiale de l'échantillon est assurée.

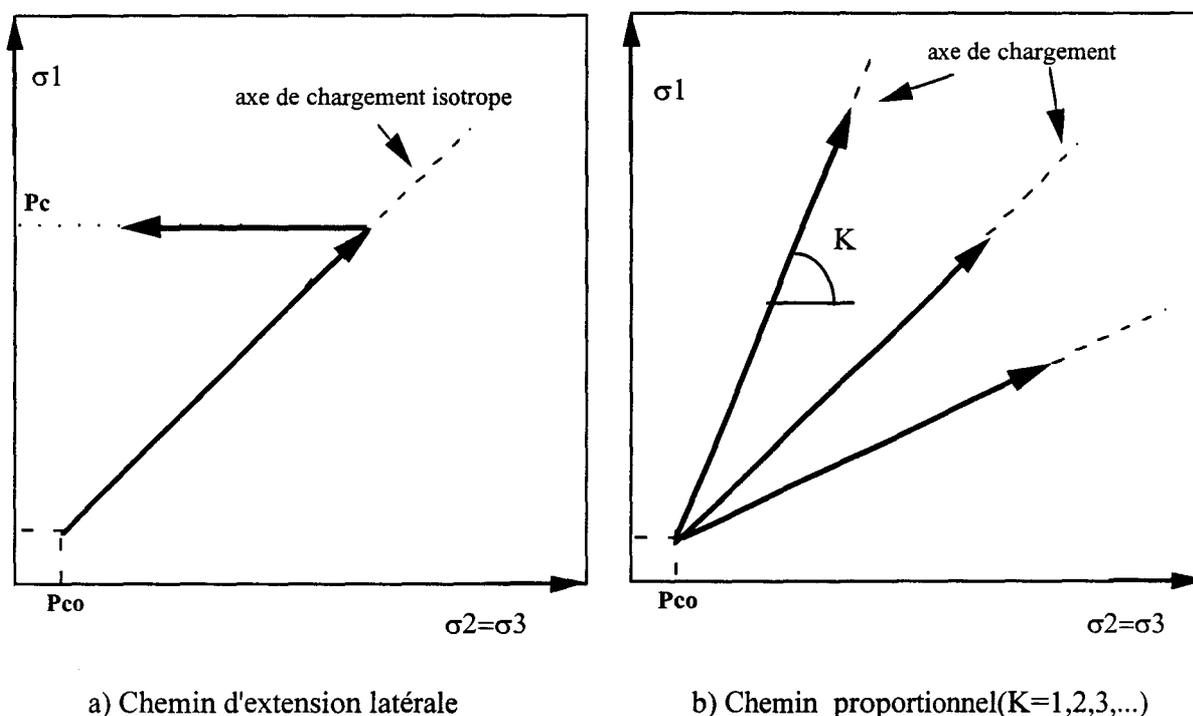


Figure II.14: Chemins de chargement dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )

On commence à appliquer la contrainte axiale  $\sigma_1$ . L'enregistrement des jauges et des capteurs de pressions ( $P$  et  $P_c$ ) est effectué lorsque la valeur de  $\sigma_1$  atteint une valeur prédéterminée telle qu'on aurait  $\sigma_1 = k P_{co}$ . L'opération continue de telle manière qu'on applique simultanément la charge axiale et la pression de confinement, sans toucher à la

pression interstitielle (elle est variable sous les effets de  $\sigma_3$  et  $\sigma_1$ ), tout en gardant le rapport  $\sigma_1/\sigma_3=k$  lors de l'enregistrement des valeurs des déformations et des pressions.

Il est à noter que dans ce chemin selon la valeur du rapport  $k$  utilisée, on peut arriver à la rupture ou non de l'éprouvette. Dans le dernier cas, la fin d'essai est la limite de notre matériel de la mise en pression, c'est-à-dire  $P_c$  égale à 60 MPa.

Le tableau II.2 résume tous les chemins de chargement appliqués dans notre étude.

**Remarque II.3 :** Toutes les étapes opératoires de nos essais ont été effectuées à température ambiante (soit  $20\pm 5^\circ\text{C}$ ). Il est à noter que la sensibilité du comportement mécanique du matériau étudié, vis à vis d'un traitement thermique inférieur à  $300^\circ\text{C}$ , est très faible [HOMA 1986].

Tableau II.2 Récapitulatif des chemins de chargement

Chemin	Parcours*	$P_c(\sigma_m)$	Force axiale	P	Grandeurs mesurées ou déterminées
Hydrostatique Drainé	a-d-n	Appliquée	-	Constante	$\epsilon_1, \epsilon_2, m/\rho(\text{sor})$
Hydrostatique Non Drainé	a-d-n	Appliquée	-	Variable	$\epsilon_1, \epsilon_2, P$
Hydrostatique Drainé avec $\Delta\sigma_m = \Delta P$	a-c	Appliquée	-	Appliquée	$\epsilon_1, \epsilon_2$
Hydrostatique à drainage partiel		Appliquée	-	Appliquée	$\epsilon_1, \epsilon_2, m/\rho(\text{sor}), m/\rho(\text{ent})$
Triaxial Monotone Drainé	a-g-f-n	Appliquée	Appliquée	Constante	$\epsilon_1, \epsilon_2, m/\rho(\text{sor})$
Triaxial Monotone Non Drainé	a-g-f-n	Appliquée	Appliquée	Variable	$\epsilon_1, \epsilon_2, P$
Triaxial Monotone Drainé avec détermination de K et Montées en Pression P	a-g-j-i-n	Appliquée	Appliquée	Appliquée	$\epsilon_1, \epsilon_2, P, K, m/\rho(\text{ent})$
Triaxial Monotone Non Drainé avec chutes de Pression P	a-g-j-i-n	Appliquée	Appliquée	Variable	$\epsilon_1, \epsilon_2, P, m/\rho(\text{ent}), m/\rho(\text{sor})$
Triaxial de Charg.-Décharg. Déviatorique Non Drainé	a-g-l-q-s-n	Appliqué	Appliquée Ch.-Déch.	Variable	$\epsilon_1, \epsilon_2, P, m/\rho(\text{ent}), m/\rho(\text{sor})$
Triaxial de Charg.-Décharg. Déviatorique Drainé	a-g-l-k-n	Appliquée	Appliquée Ch.-Déch.	Constante	$\epsilon_1, \epsilon_2$
Triax. de Ch.-Déch. Déviatorique Drainé avec détermination de K et Montées en Pression P	a-g-l-p-r-n	Appliquée	Appliquée Ch.-Déch.	Appliquée	$\epsilon_1, \epsilon_2, P, K, m/\rho(\text{ent})$
Triaxial de Charg.-Décharg. latéral Drainé	a-g-h-m-n	Appliquée Ch.-Déch.	Appliquée	Constante	$\epsilon_1, \epsilon_2$
Extension latérale Non Drainé	a-e-o	Appliquée Décharge progressive	Constante	Variable	$\epsilon_1, \epsilon_2, P$
Chargement Proportionnel Non Drainé	a-b	Appliquée	Appliquée	Variable	$\epsilon_1, \epsilon_2, P$

$m/\rho(\text{ent})$ : l'apport du volume de fluide entrant dans l'échantillon

$m/\rho(\text{sor})$ : l'apport du volume de fluide sortant de l'échantillon

\* Parcours effectué d'après la figure II.6

# **CHAPITRE III**

## **ETUDE EXPERIMENTALE**

L'objectif principal de notre étude est de caractériser l'effet de la microfissuration induite sur les paramètres du couplage hydromécanique. Autrement dit, on cherche à déceler, par la réalisation de différentes séries d'essais en laboratoire, l'évolution de divers paramètres du couplage en fonction de l'état d'endommagement. Par rapport à cet objectif, les différents types d'essais effectués dans la présente étude peuvent être classés en trois groupes :

- les essais en vue de caractériser l'endommagement mécanique,
- les essais de détermination des paramètres du couplage,
- les essais de validation pour des modèles poromécaniques.

Chaque groupe contient plusieurs séries d'essais. Nous allons présenter dans ce chapitre, les principaux acquis obtenus en illustrant quelques essais représentatifs de chaque série. L'ensemble des données expérimentales obtenues sont données dans l'annexe I.

### III.1 Caractérisation de l'endommagement sous charges mécaniques

Tout d'abord, nous avons effectué une série d'essais sur des éprouvettes non saturées (drainées à l'air). Cette série, étant la première partie de notre expérimentation, était réalisée afin de mieux connaître le comportement mécanique du matériau choisi.

#### III.1.1 Essai sur des Eprouvettes Non Saturées

##### III.1.1.1 Essai de Compression hydrostatique

La réponse du matériau, c'est à dire l'évolution des déformations longitudinale  $\varepsilon_1$ , transversale  $\varepsilon_2$  et volumique ( $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ ) en fonction de la contrainte hydrostatique  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = P_c$ , est présentée sur la figure III.1 ( $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_3$  ont le même signe). L'essai, comme le montre la figure, commence à partir d'un état dans lequel l'échantillon se trouve dans un champ de contrainte hydrostatique de l'ordre de 2 MPa. Cela nous donne la possibilité de comparer, plus aisément, les résultats obtenus avec les essais similaires sur les échantillons saturés. Signalons que, dans notre étude poroélastique, tous les essais hydrostatiques commencent à partir d'une charge hydrostatique égale à 2 MPa.

On voit que les réponses du matériau dans les deux directions perpendiculaires sont quasi identiques. Ces courbes montrent que sous sollicitation hydrostatique le comportement global du matériau est isotrope. La partie initiale incurvée de la courbe contrainte-déformation volumique caractérise la zone de la fermeture des microfissures naturelles.

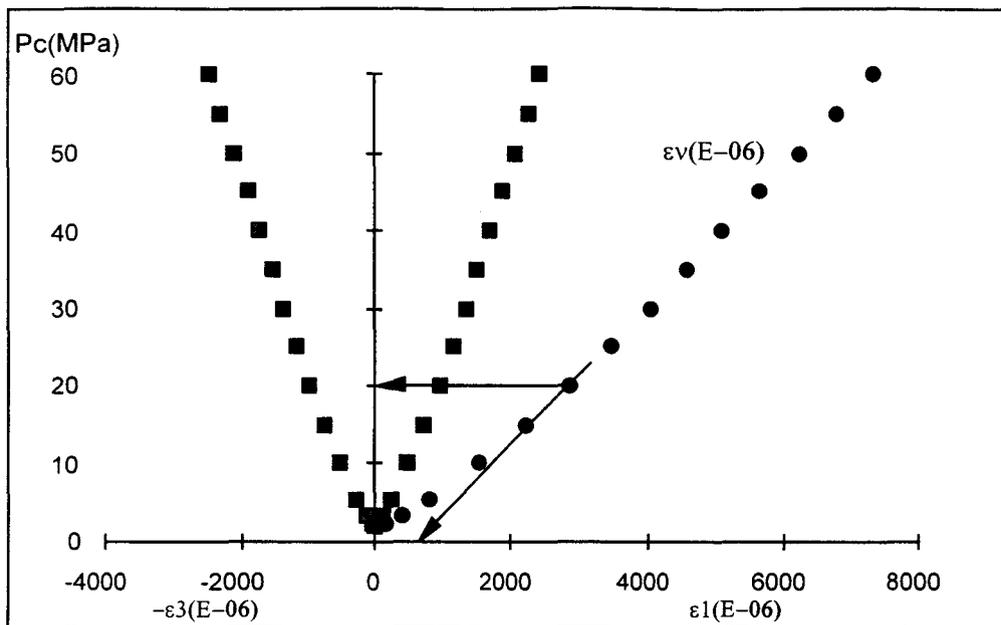
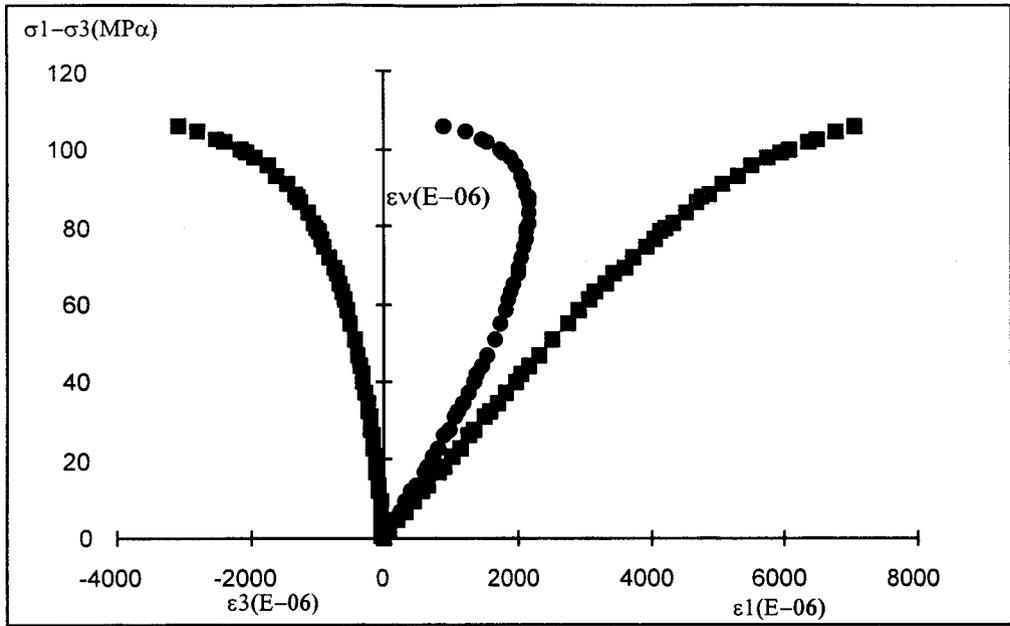


Figure III.1: Essai hydrostatique drainé sur l'échantillon non saturé

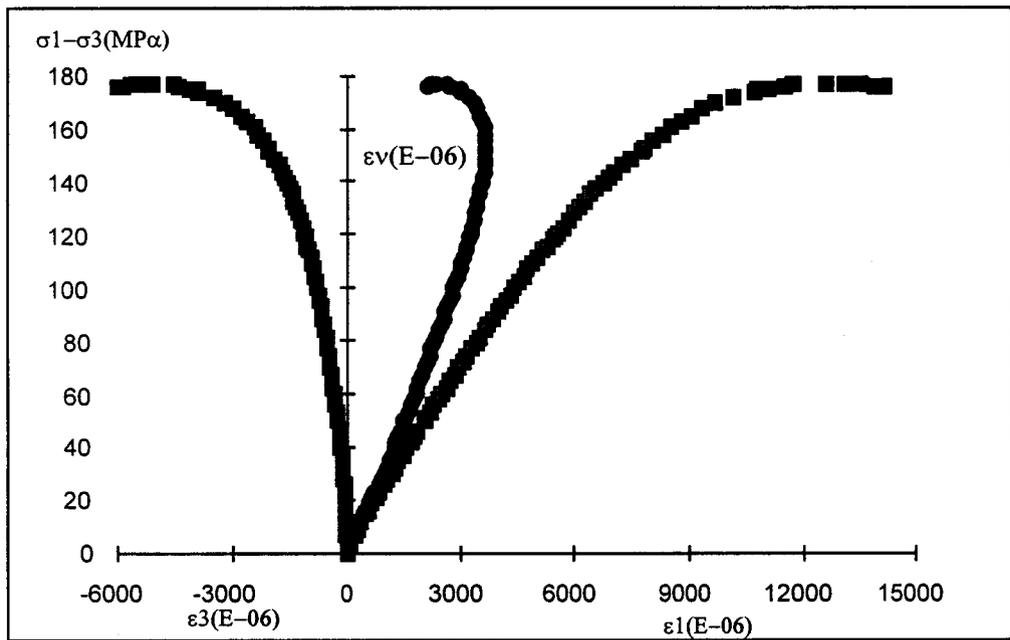
Comme le présente la figure III.1, l'intersection du prolongement de la partie linéaire de la courbe  $\sigma_m-\varepsilon_v$  avec l'axe horizontal donne la valeur de la porosité des microfissures naturelles  $\phi_f$ . L'ordonnée correspondant au point qui débute la linéarité de la courbe  $\sigma_m-\varepsilon_v$  est la pression caractéristique de la fermeture des microfissures naturelles  $P_{cf}$ . Pour le matériau testé, les valeurs de ces deux caractéristiques sont respectivement  $65 \times 10^{-5}$  et 20 MPa. Après la zone du serrage, les trois déformations montrent un comportement linéaire jusqu'à 60 MPa. Le module d'incompressibilité globale du matériau en état sec  $K^0$ , calculé sur la partie linéaire de la courbe contrainte déformation volumique, est égal à 8920 MPa.

### III.1.1.2 Essai de Compression Triaxiale Monotone

Les essais de compression triaxiale monotone sont au nombre de six, dont cinq avec les pressions de confinement de 5, 10, 20, 30, et 40 MPa, et un avec  $P_c=0$  soit un essai de compression uniaxiale. Tous les essais sont effectués sur des éprouvettes non saturées. Les essais ont été effectués en mode de "déplacement contrôlé" et, dans le respect d'un chargement quasi statique, avec la vitesse de déformation axiale de  $5,3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . La figure III.2 présente, pour les essais à  $P_c = 10$  et 40 MPa, les déformations axiale, transversale et volumique en fonction de la contrainte déviatorique  $\sigma_1-\sigma_3$ . L'origine 0 sur ces courbes correspond à l'état de contraintes avant le chargement déviatorique, c'est à dire sans aucune sollicitation pour l'essai uniaxial, et à l'état hydrostatique ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=P_c$ ) pour les essais avec pression de confinement.



$P_c = 10.0$  MPa



$P_c = 40.0$  MPa

Figure III.2 : Essai triaxiaux monotones sur échantillons non saturés

Les paramètres déduits de ces essais, notamment le module de Young initiale  $E_0$  et le coefficient de poisson  $\nu_0$ , calculés sur les parties linéaires des courbes, ainsi que la résistance au pic sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Valeurs déduites des essais monotones sur les échantillons non saturés

$P_c$ (MPa)	Pic (MPa)	$E_0$ (MPa)	$\nu_0$
0	38	15300	0,23
5	79	19600	0,16
10	106	20340	0,15
20	130	19340	0,14
30	154	20900	0,14
40	176	22650	0,15

A partir des résultats obtenus de ces essais, on peut dégager les points suivants:

i) Le matériau présente un comportement à la rupture de type fragile, marqué par un pic de contrainte assez net et une faible valeur des déformations à la rupture. Ceci est d'autant plus prononcé que la pression de confinement est faible. Par ailleurs ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par d'autres auteurs [KHAZ. 1995].

ii) Il existe une phase linéaire plus ou moins importante dans l'évolution des déformations transversale et longitudinale.

iii) La perte de linéarité de la déformation transversale est plus nette que celle de la déformation longitudinale. De plus cette non-linéarité apparaît plus tôt dans la déformation transversale que celle axiale. Compte tenu du chargement déviatorique appliqué dans ces essais, ce phénomène s'explique par le développement de microfissures dans le sens perpendiculaire de la contrainte principale mineure. Cela montre donc le caractère orienté de l'endommagement du matériau sous chargement déviatorique.

iv) La valeur de la contrainte au pic, qui caractérise la résistance du matériau sous compression triaxiale, augmente nettement avec la pression de confinement. Le pic de contrainte est précédé d'une forte dilatance qui diminue d'ailleurs faiblement avec la pression de confinement.

### III.1.1.3 Essai de Compression Triaxiale Drainée avec cycles de Chargement - Déchargement Déviatorique

A partir des essais monotones, on a mis en évidence le comportement fragile du matériau choisi et le caractère orienté de l'endommagement induit sous sollicitation déviatorique. L'étude expérimentale de la répercussion de la microfissuration sur les propriétés élastiques du matériau exige la réalisation d'essais complémentaires. C'est pour cette raison que nous avons effectué deux essais triaxiaux avec des cycles de chargement - déchargement déviatorique. Comme le montre la figure III.3, l'un a été réalisé avec une pression de confinement de 30 MPa et un déchargement complet pour chaque cycle, l'autre sans pression de confinement et un déchargement jusqu'à la moitié de la contrainte déviatorique appliquée lors du chargement afin de faciliter la détermination des pentes de déchargement.

Bien que la réalisation d'une courte phase de relaxation ait efficacement diminué la boucle d'hystérésis, on constate que dans le cas du déchargement déviatorique complet, celle-ci, comme le montre l'essai avec  $P_c=30$  MPa, s'amplifie avec le niveau du déviateur. La réalisation d'un cycle avec demi-déchargement, sur le cinquième cycle de cet essai, peut encore diminuer la boucle d'hystérésis et donc faciliter encore plus la détermination des modules élastiques sur chaque niveau du déviateur. Les modules longitudinaux  $E_l$  et transversaux  $E_t$ , calculés à partir de la droite sécante des courbes de déchargement, sont donnés dans les tableaux III.2 et III.3

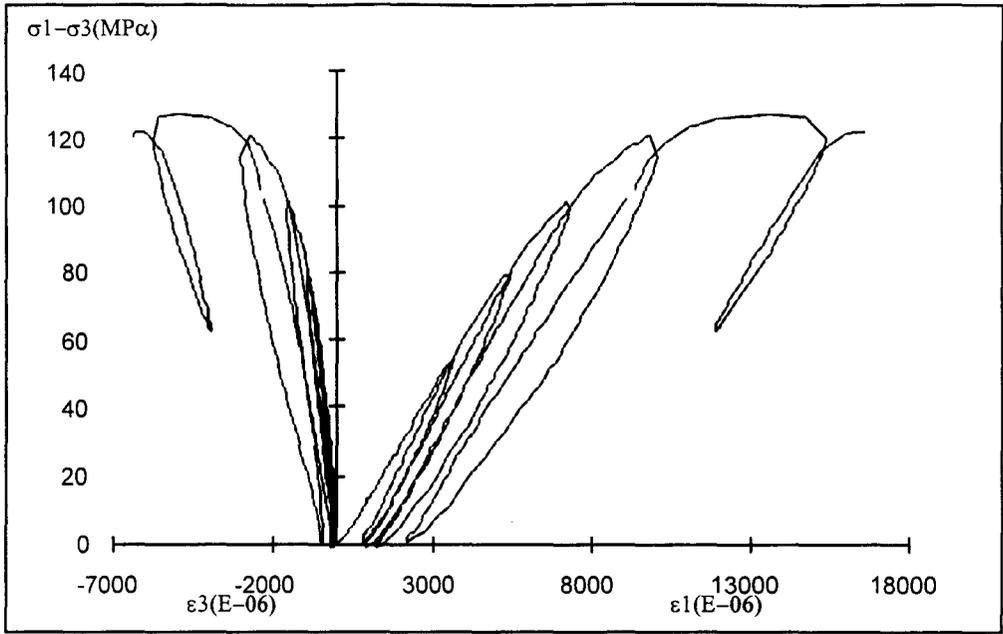
Tableau III.2: Modules déterminés d'après l'essai à  $P_c = 30$  MPa

$P_c=30,0$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$\nu_{12}=E_l / E_t$
1	55	19348	106950	0,181
2	79	18350	87382	0,210
3	99	16972	66529	0,255
4	115	14653	40802	0,235
5	121	15721	32159	0,427

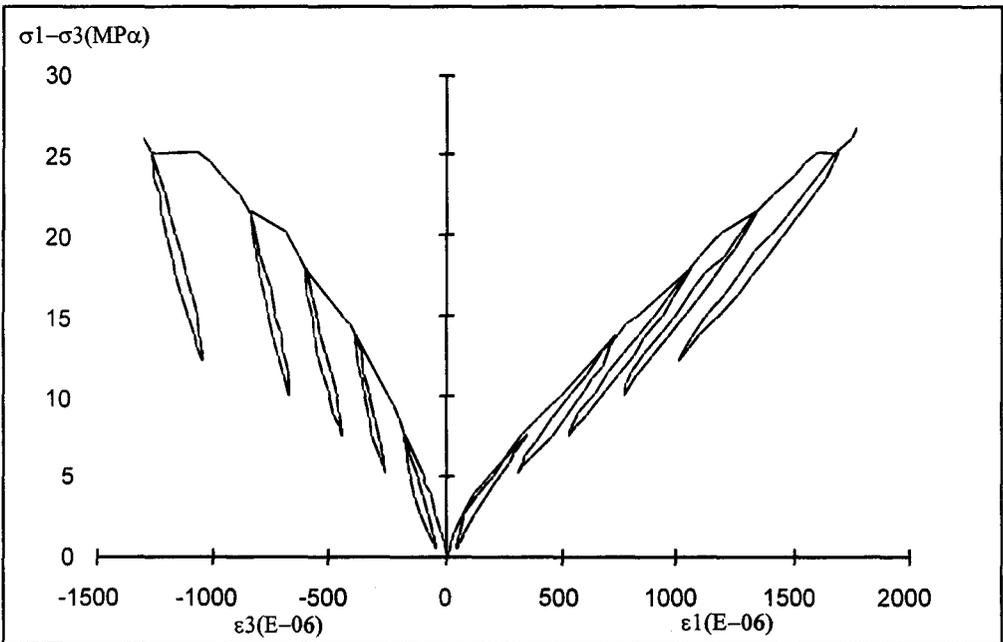
Tableau III.3: Modules déterminés d'après l'essai à  $P_c = 0,0$  MPa

$P_c=0,0$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$\nu_{12}=E_l / E_t$
1	7,7	22984	79300	0,290
2	13,8	21052	76655	0,275
3	18	19773	70600	0,280
4	21,3	19415	64745	0,300
5	25	18294	57180	0,320

L'observation la plus évidente est la déformation résiduelle après le déchargement. On voit une déformation résiduelle transversale plus importante que longitudinale pour l'essai à  $P_c=0$  MPa. Par contre, avec l'augmentation de la pression de confinement  $P_c$ , on observe une



$P_c=30,0$  MPa



$P_c=00,0$  MPa

Figure III.3 : Essais avec cycles de chargement-déchargement déviatorique sur échantillons non saturés

déformation résiduelle longitudinale qui est aussi importante que celle transversale. Cette constatation accompagnée de la diminution progressive des modules élastiques tend à montrer que le grès étudié se présente plutôt comme un matériau élastoplastique endommageable que élastoendommageable. Mais, cette dénomination n'exige pas forcément l'existence d'une déformation provenant du glissement intercrystalins (comme il existe dans le cas du matériau élastoplastique). Dans ce cas, le mécanisme principal de cette déformation résiduelle peut être expliqué par l'ouverture résiduelle de certaines microfissures après le déchargement déviatorique.

### *conclusion*

Les essais effectués, jusqu'ici, ont mis en évidence les constatations suivantes:

- le matériau est initialement isotrope avec une porosité de microfissuration naturelle de l'ordre de  $65 \times 10^{-5}$ .
- le comportement est fragile, le mécanisme principal de la déformation irréversible est donc le développement de microfissures.
- la microfissuration induite sous sollicitation déviatorique est bien orientée. Ainsi, il existe un comportement endommageable anisotrope.
- le matériau a un caractère dilatant dû à l'ouverture de microfissures.
- le matériau présente une partie de déformation résiduelle après le déchargement déviatorique complet.

Ces constatations préliminaires justifient le choix pertinent du matériau pour notre étude. Connaissant ces faits, la suite de ce chapitre se consacrera à l'étude expérimentale sur des échantillons saturés en condition drainée ou non drainée ( cas isotherme).

### **III.1.2 Essais sur des Eprovettes Saturées**

La réponse du fluide saturant les pores c'est-à-dire, soit la variation de la pression interstitielle (condition non drainée) soit la variation du volume du fluide (condition drainée), dépend sensiblement de la vitesse de sollicitation. Les essais préliminaires sur des échantillons saturés (les résultats ne sont pas présentés ici) ont fait apparaître que la vitesse de déformation axiale  $5,3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , est rapide. Elle ne laisse pas suffisamment de temps au fluide pour s'échapper de l'échantillon. La question est alors de faire un choix raisonnable de vitesse entre une condition de chargement quasi statique et une durée raisonnable d'essai. C'est la raison pour laquelle la vitesse du chargement axial choisie est de l'ordre de 4,5 KN/sec (soit 0,25 MPa/Min) en mode "force contrôlée" et de  $1,3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  en mode "déplacement contrôlé". Signalons que ces vitesses seront retenues pour tous les essais dans la suite de notre étude.

### III.1.2.1 Essai de Compression Triaxiale Monotone Drainée

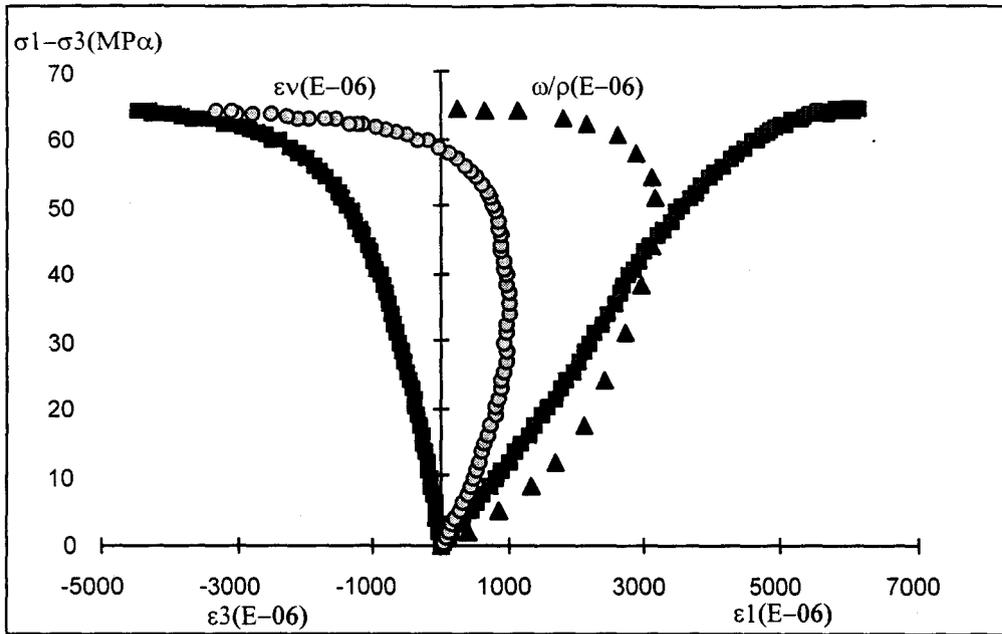
Bien que les essais triaxiaux effectués sur des éprouvettes non saturées nous aient donnés des informations utiles, mais étant donnée la diminution importante de la vitesse du chargement axial et dans le souci de respecter les mêmes conditions tant pour les essais de caractérisation de l'endommagement que pour ceux du couplage, une série d'essais triaxiaux monotones sur des échantillons saturés a été effectuée. Ils sont au nombre de six avec la pression du confinement de 5, 10, 20, 30, 40 et 60 MPa. La technique expérimentale est la même que celle décrite au § II.4.2. Compte tenu de la capacité de notre matériel de mise en pression, ces essais ont été réalisés avec une pression interstitielle égale à zéro. La variation du volume des pores, rappelons-le, est mesurée par un capillaire.

La figure III.4 montre les résultats obtenus pour les essais avec 5 et 30 MPa de pression de confinement. Cette figure présente, en outre les variations des déformations, l'évolution de l'espace poreux ramené au volume total initial  $m/\rho_o^fl$ , en fonction du déviateur de contrainte. Ces résultats confirment les constatations précédentes obtenues à partir des essais triaxiaux sur les éprouvettes non saturées. On constate que la courbe de la déformation volumique totale dans ses différentes phases (contractante et dilatante) est tout à fait suivie par la courbe de la variation de l'espace poreux de l'échantillon. La diminution de la dilatation avant le pic avec la pression de confinement est plus marquée dans la variation de l'espace poreux que dans la variation volumique totale. Le tableau III.4 montre les valeurs des caractéristiques déduites de ces essais, notamment la résistance au pic, le module de Young initial drainé  $E_o$  et le coefficient de Poisson initial drainé  $\nu_o$ . Le module de compressibilité drainée  $K_o$  est également calculé.

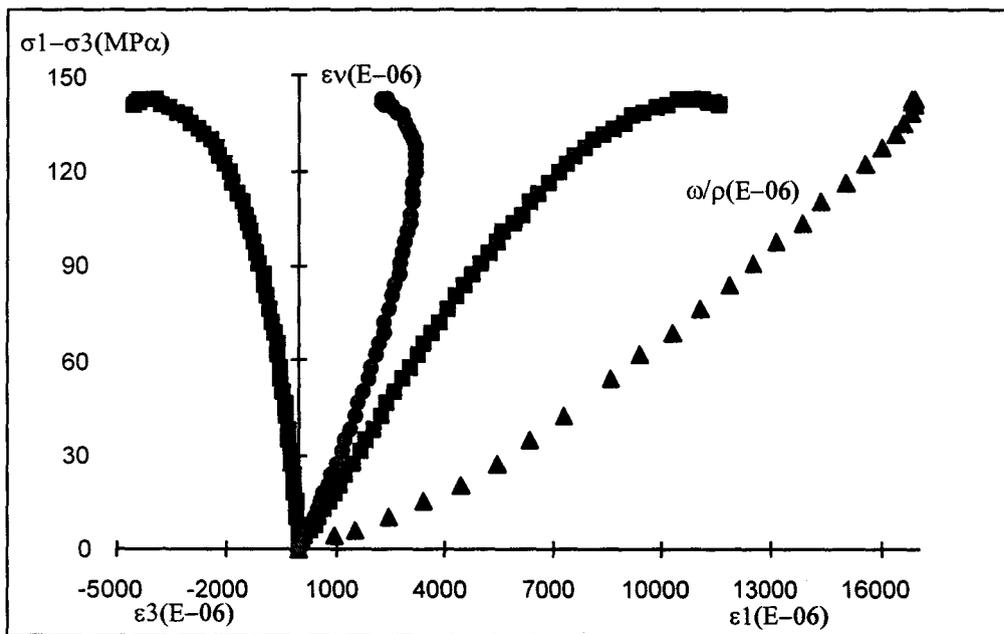
Tableau III.4: Principales caractéristiques déduites des essais monotones drainés sur des échantillons saturés

$P_c$ (MPa)	Pic (MPa)	$E_o$ (MPa)	$\nu_o$	$K_o$ (MPa)
5	65	13160	0,219	7805
10	92	16260	0,168	8160
20	115	17560	0,183	9230
30	142	18750	0,180	9765
40	154	19050	0,176	9800
60	180	19400	0,199	10740

On observe une légère diminution de la résistance au pic (moyennement 10%) par rapport aux essais triaxiaux monotones effectués sur des échantillons non saturés. Cela est sans doute lié à la diminution de la vitesse du chargement axial.



$P_c = 5,0$  MPa



$P_c = 30,0$  MPa

Figure III.4 : Essais de compression triaxiale monotone drainés sur échantillons saturés

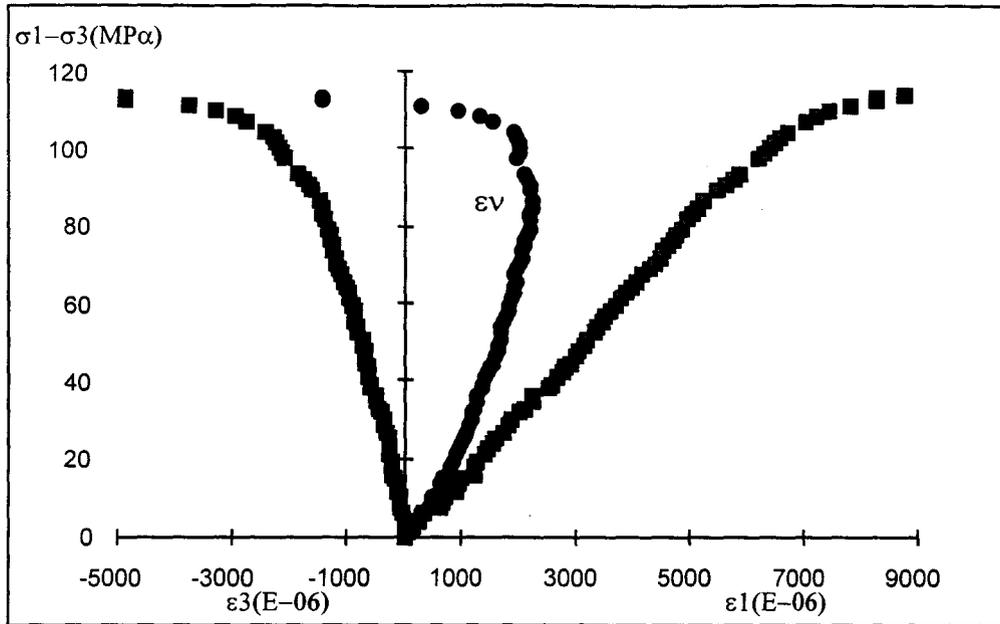
On remarque que contrairement à ce que l'on attendait, la variation du volume du fluide sortant, qui est en fait la variation de l'espace poreux de l'échantillon, est plus importante que la variation volumique totale (mesurée par les jauges). L'écart entre ces deux courbes s'accroît avec la pression de confinement jusqu'à 40 MPa, et ensuite commence à diminuer. Il convient d'être prudent dans l'interprétation de cette différence. Celle-ci pourrait être liée à la cinétique (ouverture et fermeture) de la porosité (au sens large) fermée et à l'hétérogénéité du matériau. Il faut préciser que la déformation volumique totale est une mesure locale des jauges tandis que le volume du fluide échangé est une mesure globale.

### III.1.2.2 Essai de Compression Triaxiale Drainée avec Cycles de Chargement - Déchargement Latéral

C'est un essai qui sert, comme l'essai triaxial avec les cycles de chargement - déchargement déviatorique, à émettre ou vérifier des hypothèses à retenir dans le développement d'un modèle de comportement et à calculer des paramètres associés. C'est à partir de cet essai, drainé à  $P=0$ , que l'on peut étudier par exemple, l'évolution du module d'élasticité transversal  $E_3$  au cours du chargement axial. Son déroulement est décrit au § II.4.5.

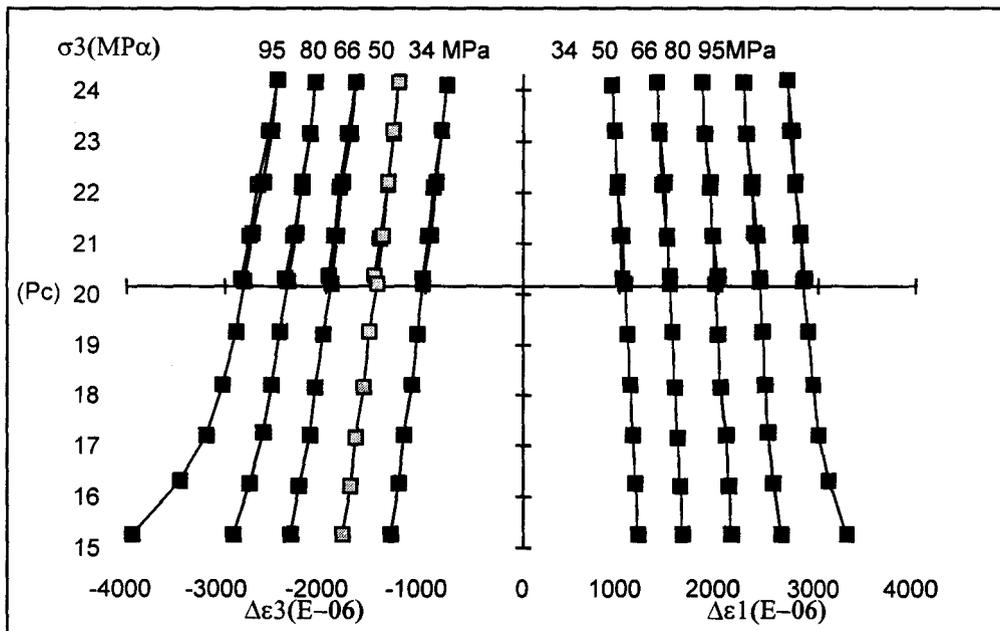
Au cours d'un essai de compression triaxiale, les microfissures se développent perpendiculairement à l'axe de la contrainte principale mineure. L'essai consiste donc à refermer les microfissures par chargement latéral et ensuite les réouvrir par déchargement, sur cinq niveaux différents de la contrainte déviatorique. Ces niveaux sont choisis dans les différentes phases de la courbe contrainte déformation. Nous avons effectué ce type d'essai en mode "force contrôlé" pour les pressions de confinement de 10, 20, 30 et 40 MPa.

La figure III.5 présente les résultats obtenus pour l'essai à  $P_c=20$  MPa. En outre les courbes lissées (les pointes enregistrés dus à la variation de  $\sigma_{33}$  ont été enlevés sur ces courbes) des déformations en fonction de la contrainte déviatorique, les courbes (b) sur cette figure illustrent la variation des déformations  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_3$  en fonction de la contrainte latérale (pression de confinement) en chargement (augmentation) ainsi qu'en déchargement (diminution). Les différentes valeurs indiquées sur les courbes représentent celles de la contrainte déviatorique, à laquelle le chargement - déchargement est effectué. En revanche, les courbes (c) et (d) montrent les variations des déformations longitudinale  $\varepsilon_1$ , transversale  $\varepsilon_3$  et volumique  $\varepsilon_v$  en fonction de la contrainte latérale lors de la phase de déchargement (diminution). On observe une variation de la déformation transversale plus importante que celle de la déformation longitudinale, accompagnée d'une forte dilatance. Celle-ci est d'autant plus marquée que la valeur du déviateur de contrainte est élevée. Cela est dû à l'anisotropie du comportement induit dans le matériau sous ce type de sollicitation.



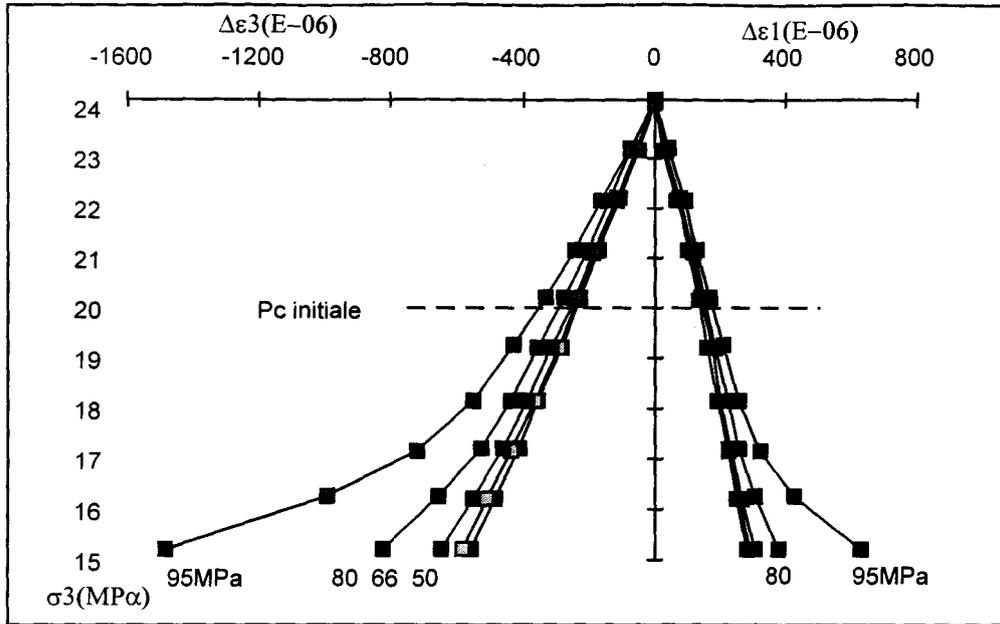
a) Courbe lissées de contrainte déviatorique - déformations ( $P_c=20$  MPa)

Figure III.5 : essai avec cycles de chargement - déchargement latéral drainé ( $P_c=20$  MPa)



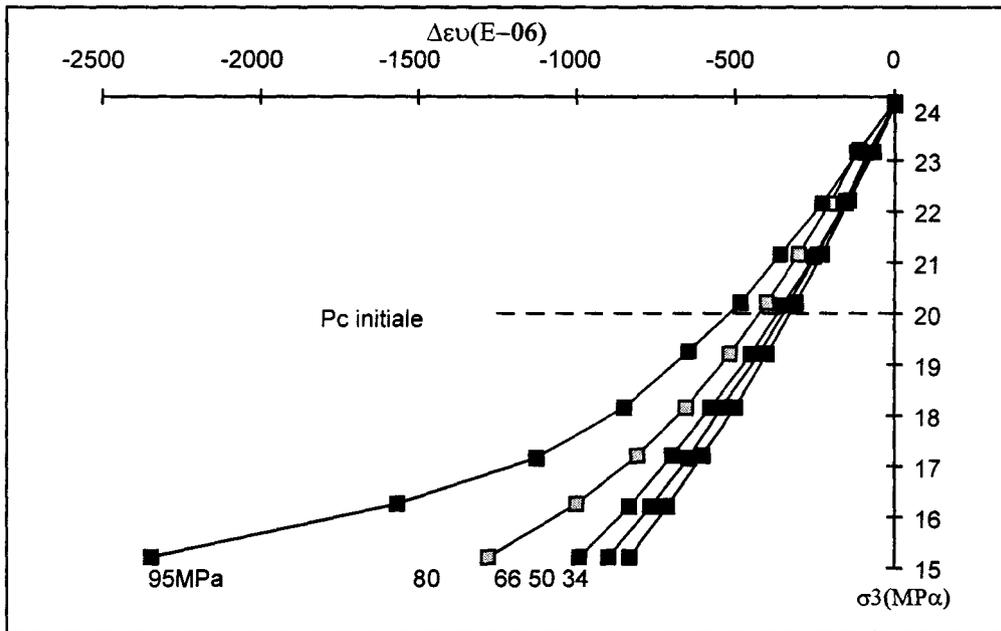
b) Chargement - déchargement latéral et déformation ( $P_c=20$  MPa)

Figure III.5 : Suite



c) Déchargement latéral et déformations ( $P_c=20$  MPa)

Figure III.5 : Suite



d) Déchargement latéral et variation volumique ( $P_c=20$  MPa)

Figure III.5 : Suite

Par ailleurs, pour un état de microfissuration donnée, les réponses du matériau pendant l'augmentation de la pression de confinement sont quasi linéaires. En effet, durant cette phase, il n'y a pas d'évolution d'endommagement. On récupère ainsi les modules sécants effectifs du matériau. Par contre, quand la pression diminue, les réponses en déformation sont clairement non linéaires car les microfissures continuent à se propager.

Il est à noter que les amplitudes des variations de la pression sont petites, insuffisantes pour refermer les microfissures. Il est donc difficile de montrer les effets unilatéraux avec les résultats obtenus. Toutefois, les courbes de déformation durant l'augmentation de la pression  $P_c$  (de 20 à 24 MPa) et celles durant la diminution (de 24 à 20 MPa) ne sont pas complètement confondues. On voit donc un léger effet de la fermeture partielle de microfissures.

Pour chaque cycle, on peut définir trois modules différents respectivement dans les directions longitudinale et transversale ainsi que pour la variation volumique, comme schématisés par figure III.6. Les valeurs de ces différents modules calculés aux différentes valeurs du déviateur de contraintes, pour chaque pression de confinement choisie, sont données dans les tableaux III.5 - III.8.

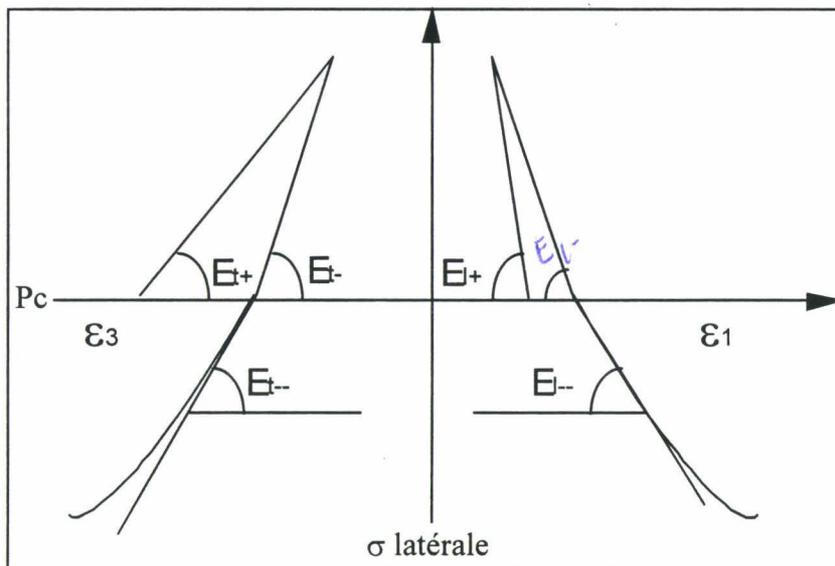


Figure III.6: Définition des différents modules calculés

On voit que toutes les valeurs des  $E_l$  et  $E_t$ , en chargement et en déchargement diminuent avec le déviateur, ceci est une conséquence directe de la dégradation progressive du matériau sous sollicitation déviatorique. Dans la zone supérieure à  $P_c$  initiale, les valeurs de  $E_t$  en déchargement sont supérieures à celles de chargement quelque soit la contrainte déviatorique et la pression de confinement appliquées.

Tableau III.5: Valeurs déduites d'essai monotone avec cycles de chargement-déchargement latéral ( $P_c=10$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	15 MPa	30	45	60	75
% du Pic	16%	33%	49%	65%	81%
$E_{l+}$	-47610	-34420	-33880	-40560	-26855
$E_{l-}$	-40610	-36590	-56845	-35740	-57065
$E_{l--}$	-28380	-23000	-22175	-16070	-13675
$E_{t+}$	16300	15460	14450	12450	10210
$E_{t-}$	17150	16150	15965	14285	12930
$E_{t--}$	13020	11045	10880	8935	7175
$(\sigma_3-\varepsilon_v)--$	8430	7195	6490	5525	3190

Tableau III.6: Valeurs déduites d'essai monotone avec cycles de chargement-déchargement latéral ( $P_c=20$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	34 MPa	50	66	80	95
% du Pic	27%	39%	52%	63%	74%
$E_{l+}$	-29947	-28789	-24852	-23353	-21744
$E_{l-}$	-27879	-30222	-27484	-25576	-23489
$E_{l--}$	-34969	-34348	-32044	-28638	-23393
$E_{t+}$	15870	15501	13845	12688	10377
$E_{t-}$	17329	16966	16050	14262	11948
$E_{t--}$	15381	14590	13130	11792	9164
$(\sigma_3-\varepsilon_v)--$	10150	9790	8920	7420	5690

Tableau III.7: Valeurs déduites d'essai monotone avec cycles de chargement-déchargement latéral ( $P_c=30$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	46 MPa	69	89	112	121
% du Pic	32%	48%	62%	78%	85%
$E_{l+}$	-28790	-30325	-39640	-47256	-32480
$E_{l-}$	-52300	-26610	-33740	-39225	-29395
$E_{l--}$	-31785	-31640	-28055	-20750	-18830
$E_{t+}$	21160	20550	20000	18000	14560
$E_{t-}$	25040	21325	21800	18060	16935
$E_{t--}$	18780	17110	14175	10405	9580
$(\sigma_3-\varepsilon_v)--$	12540	11485	9470	6950	6370

Tableau III.8: Valeurs déduites d'essai monotone avec cycles de chargement-déchargement latéral ( $P_c = 40$  MPa)

$\sigma_1 - \sigma_3$	42 MPa	61	81	99	118
% du Pic	27%	39%	52%	64%	76%
$E_{i+}$	-73301	-62241	-56371	-65761	-56918
$E_{i-}$	-38761	-35410	-34530	-32653	-27548
$E_{i..}$	-31456	-27665	-24149	-20870	-14447
$E_{t+}$	21711	21619	22217	19325	18419
$E_{t-}$	23057	22459	22158	19782	18594
$E_{t..}$	18671	17405	16307	14441	11455
$(\sigma_3 - \varepsilon_v)_{..}$	13900	13330	12270	11300	9480

## III.2 Essais de Caractérisation et de Détermination des coefficients de Couplage

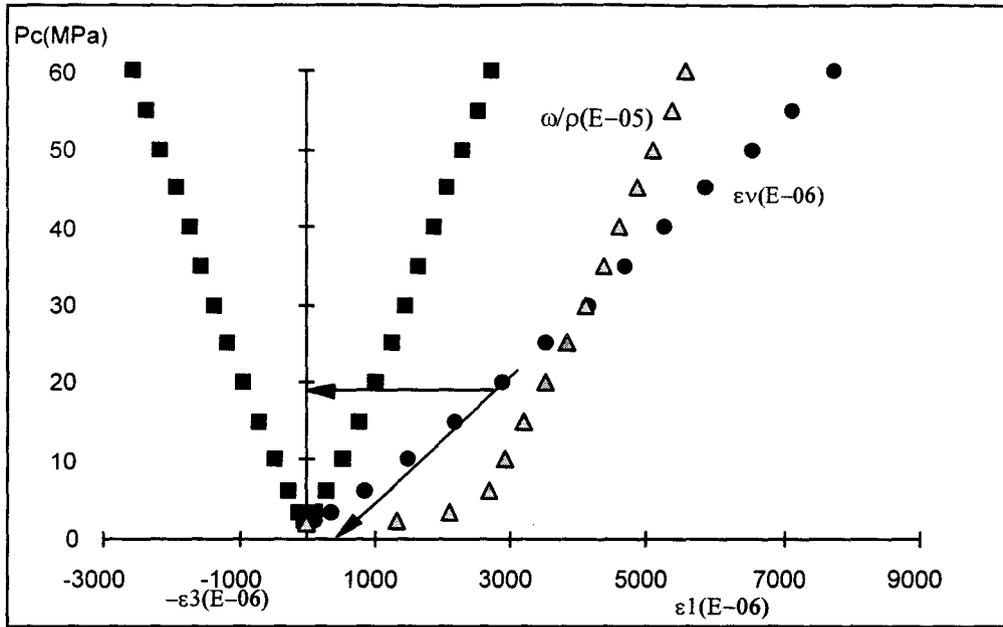
### III.2.1 Essai de Compression hydrostatique

Ces essais ont été faits dans le but d'étudier le comportement poroélastique de notre matériau, car ils permettent une bonne approche des paramètres poroélastiques des roches poreuses soumises à des petites déformations. Ils débutent à partir d'une pression hydrostatique de 2 MPa. L'application de celle-ci est indispensable afin d'expulser le fluide piégé entre la membrane et l'échantillon et entre les embases et l'échantillon.

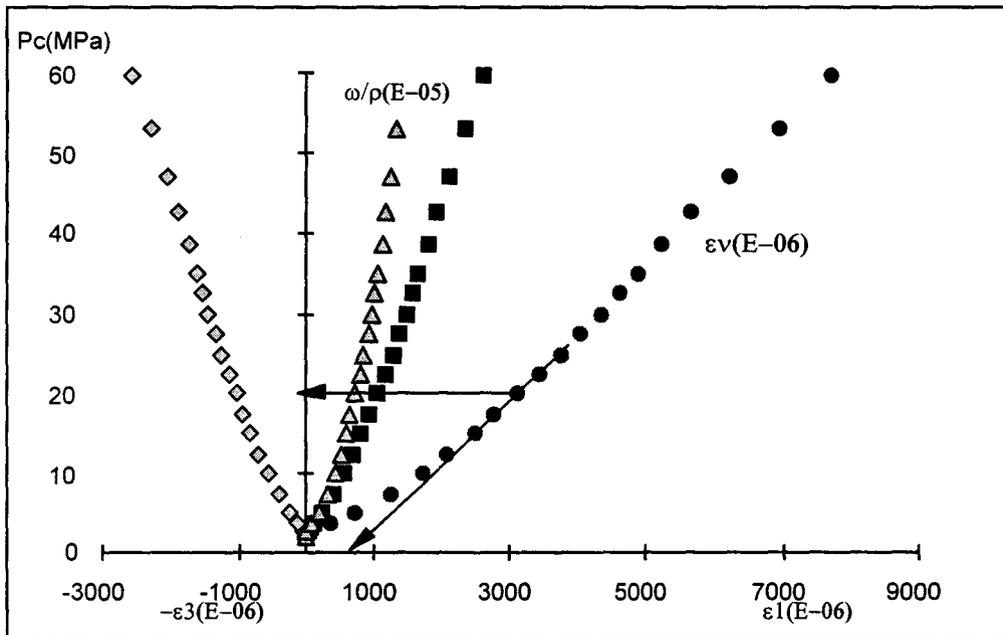
#### III.2.1.1 Essai Hydrostatique Drainé

Les figures III.7 montrent les résultats obtenus pour deux essais réalisés. La figure III.7-a correspond à l'application du chemin (i) et la figure III.7-b est la réponse du matériau sous l'application du chemin (ii) avec une contre pression interstitielle constante  $P_o = 1$  MPa (cf. §II.4.1). On constate, une fois de plus, que le matériau testé est initialement isotrope.

Les valeurs des différentes caractéristiques déduites de ces deux essais ainsi que de l'essai hydrostatique sur l'éprouvette non saturée sont répertoriées dans le tableau III.9. Les caractéristiques  $P_{cf}$ ,  $\phi_f$ , ont les mêmes significations que celles définies au §III.1.1. Les coefficients poroélastiques,  $K_o$  et  $H_o$ , sont respectivement le module d'incompressibilité drainé, et la pente de la courbe  $\sigma_m - m / \rho_o^{fl}$  (cf. §I.2.1.2). La porosité des microfissures naturelles reste très faible par rapport à la porosité totale initiale  $\phi$  du matériau, et les valeurs de la pression de la fermeture de microfissures naturelles, obtenues à partir des trois essais, sont presque identiques.



a) Essai drainé à  $P_o = 0,0$  MPa



b) essai drainé à  $P_o = 10,0$  MPa

Figure III.7 : Essai de compression hydrostatique drainée

Tableau III.9: Caractéristiques déduites des essais hydrostatiques drainés

Essai	$P_{cf}$ (MPa)	$\phi_f$	$\phi_f / \phi$ en %	$K_o$ (MPa)	$H_o$ (MPa)
Drainé(éch. non saturé)	20	$6,5 \cdot 10^{-4}$	0,33%	8920	-
Drainé à P=0 MPa	19	$5 \cdot 10^{-4}$	0,25%	8280	1900
Drainé à P=1 MPa	20,5	$7 \cdot 10^{-4}$	0,40%	8740	4880

La comparaison de l'évolution des trois courbes contrainte-déformation volumique est représentée sur la figure III.8. Les trois courbes sont pratiquement confondues : ceci prouve d'une part, que la porosité du matériau est assez élevée, que le fluide a le temps de s'échapper de l'échantillon et, d'autre part que, le fluide saturant n'a pas d'effet chimique sur le grès testé (dissolution,.....).

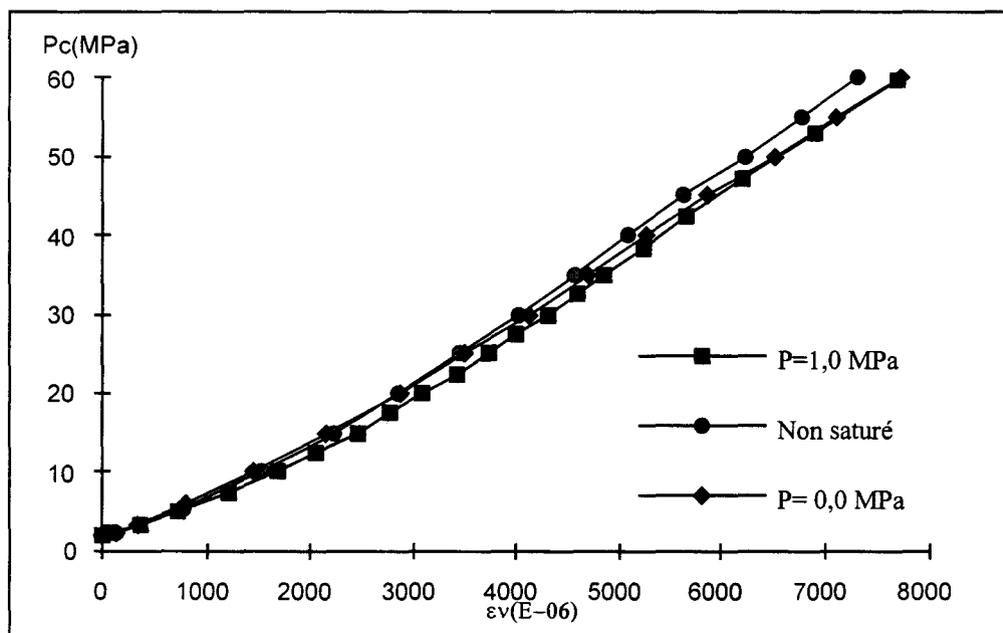


Figure III.8: Comparaison des déformations volumiques obtenues des trois essais drainés

En ce qui concerne la variation du volume poreux, on voit qu'il y a une grande différence entre les valeurs de  $H_o$  déduites des deux essais saturés. La valeur obtenue de l'essai avec une contre pression de  $P=1,0$  MPa est nettement plus élevée que celle obtenue de l'essai sans contre pression ( $P=0$ ). Compte tenu de la valeur du module de l'incompressibilité du fluide (825 MPa à 20°C) et des variations volumiques quasiment identiques dans les deux essais, cette différence ne peut pas être due à l'application de la contre pression interstitielle

constante. En revanche, elle peut éventuellement être liée au problème de la saturation initiale imparfaite de l'éprouvette dans l'essai avec  $P=1$  MPa.

De plus, dans les deux essais drainés on remarque que la variation de la masse fluide expulsée  $m / \rho_o^{fl}$ , comme dans le cas des essais triaxiaux drainés, est supérieure à la variation volumique globale. Cet écart provient à priori du fait que le circuit du fluide interstitiel à l'intérieur de la cellule a également subi la compression et ceci fait expulser une quantité de fluide qui se cumule avec le fluide expulsé des pores.

### III.2.1.2 Essai Hydrostatique Non Drainé

Rappelons que dans une expérience non drainée c'est l'ensemble du matériau et du fluide saturant qui subit la contrainte. La figure III.9 montre la réponse du matériau à l'application d'un chemin de sollicitation hydrostatique non drainé. On constate que les réponses en déformation ont la même allure que celles obtenues d'un essai drainé. Mais il semble que la phase de fermeture des fissures initiales est plus importante (correspond à  $\sigma_m=37$  MPa) par rapport à un essai drainé. Cela met en évidence l'influence de la pression interstitielle.

Quant à la réponse en pression interstitielle  $P-\sigma_m$ , on observe une légère courbure qui peut être due à une légère destruction partielle du réseau poreux d'échantillon ou la connexion de porosité occluse, sous l'effet du chargement mécanique.

### III.2.1.3 Essai Hydrostatique à $\Delta\sigma_m=\Delta P$

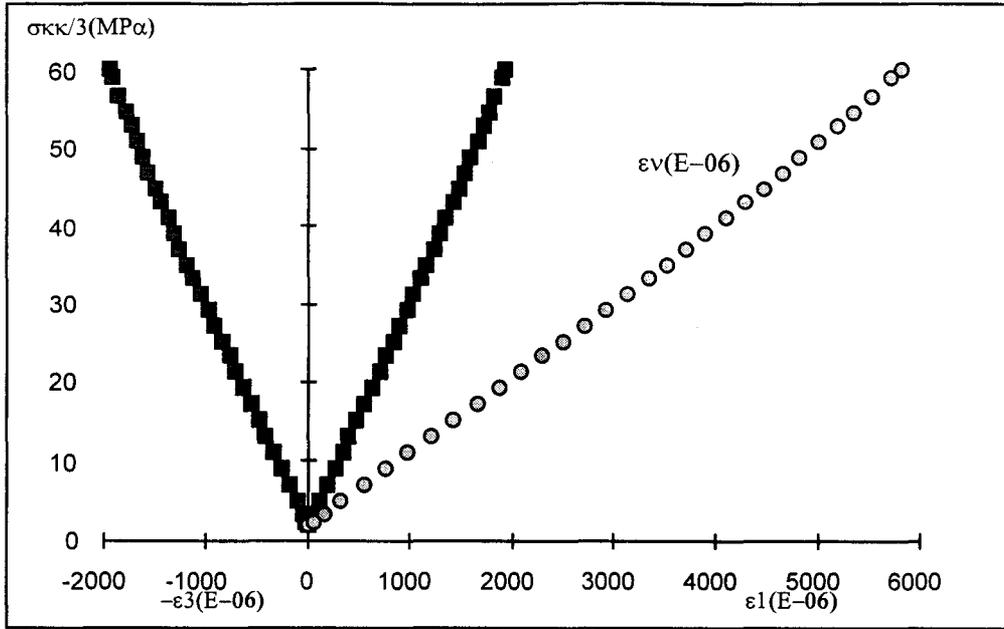
Dans le cas d'un essai drainé à  $\Delta\sigma_m=\Delta P$ , c'est uniquement la matrice solide du matériau qui subit la contrainte. La figure III.10 donne les résultats obtenus pour cet essai.

On observe que les déformations axiale et transversale sont identiques. Ceci montre que le comportement de la matrice solide du grès testé est isotrope, sous sollicitation hydrostatique.

Les valeurs des modules de l'incompressibilité non drainé  $K$ , de l'incompressibilité de la matrice  $K_s$ , et du coefficient de Skempton  $B_s$ , sont données dans le tableau III.10.

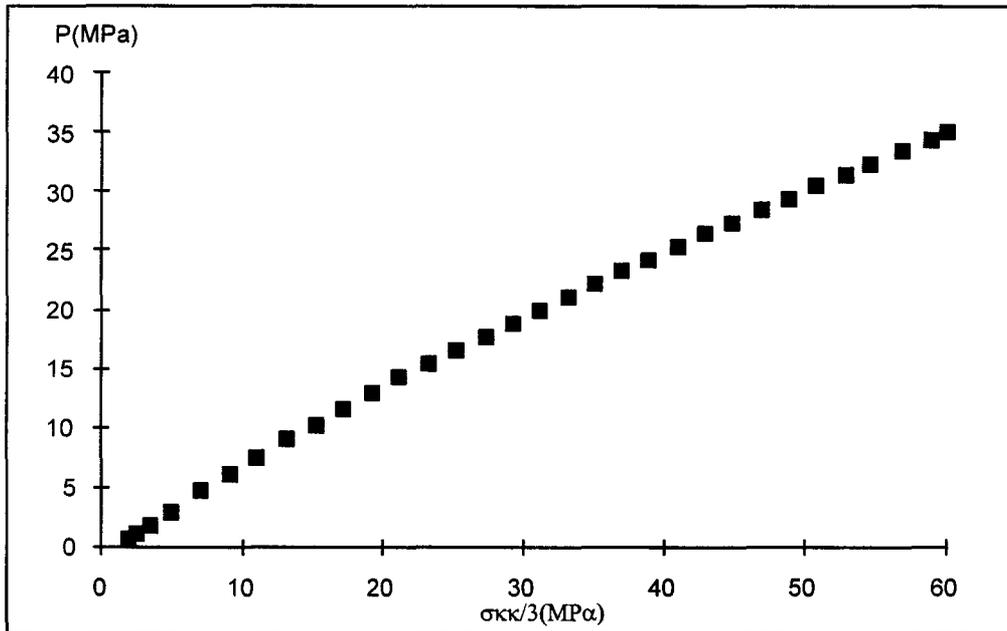
Tableau III.10: Valeurs déduites des essais hydrostatiques

Essai	K (MPa)	$K_s$ (MPa)	$B_s$
Non drainé	11040	-	0,52
Drainé à $\Delta\sigma_m=\Delta P$	-	42960	-



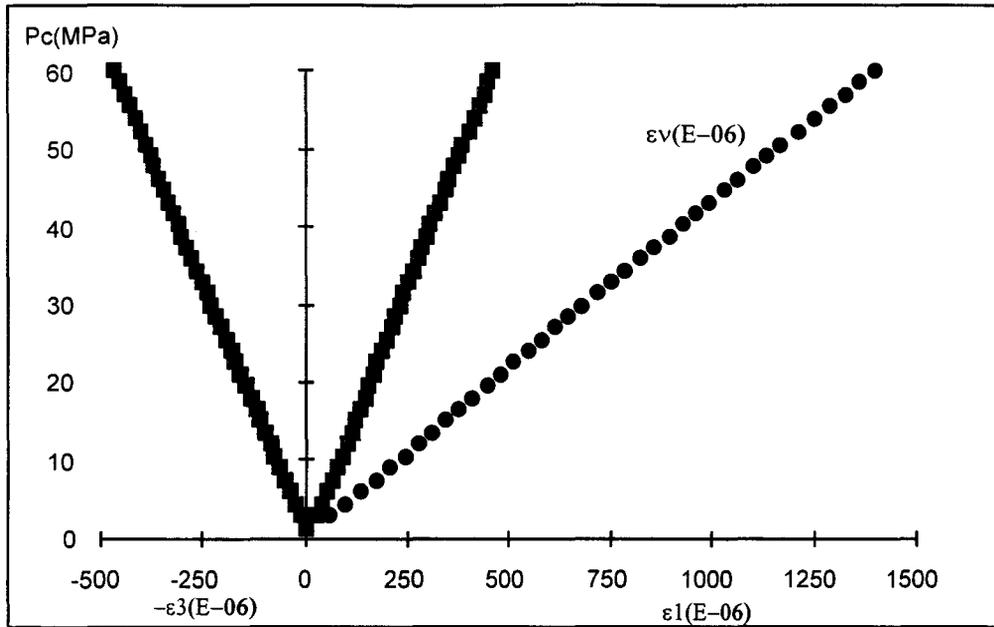
a) Courbe de contrainte - déformations

Figure III.9 : Essai de compression hydrostatique non drainée (conditions initiales  $P_c = 2,0$  et  $P_o = 1,0$  MPa)



b) Variation de la pression interstitielle en fonction de la contrainte hydrostatique  $P_c$

Figure III.9 : Suite

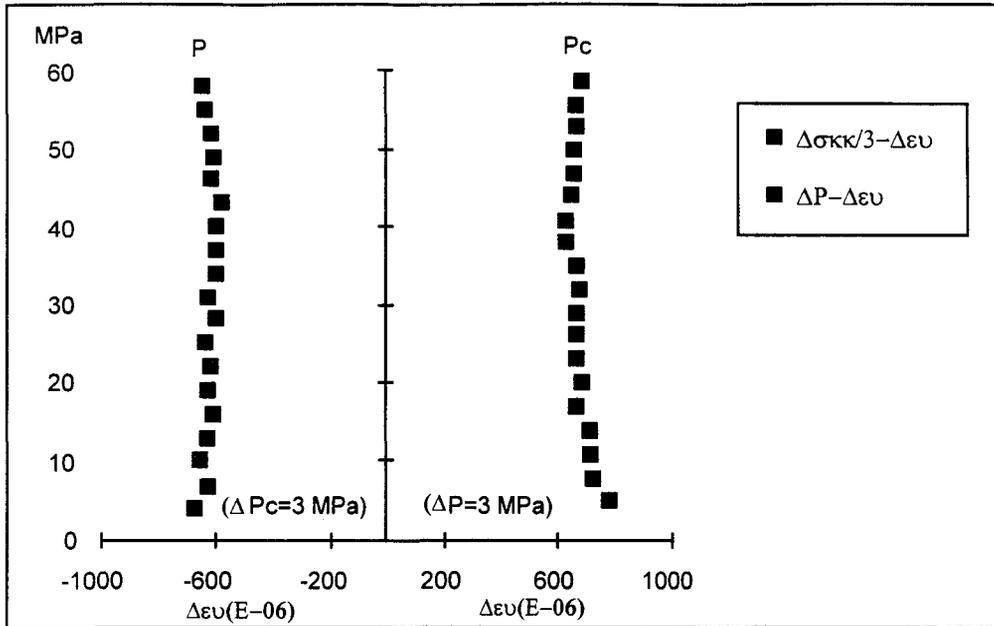
Figure III.10: Essai de compression hydrostatique drainée à  $\Delta\sigma_m=\Delta P$ ,

#### III.2.1.4 Essai Hydrostatique à Drainage Partiel

Cet essai est réalisé dans le but d'une mesure directe du coefficient de Biot  $b$ . Nous verrons par la suite que le calcul de  $b$ , dans le cas des essais hydrostatiques classiques, exige la réalisation d'au moins deux essais. L'avantage de cet essai est de pouvoir déterminer ce coefficient à partir d'un seul essai. Cela évite le cumul des incertitudes expérimentales. La manipulation relative à cet essai est décrite au §II.4.1. Nous avons effectué 19 paliers de montée en pression de confinement et en pression interstitielle, de façon alternée.

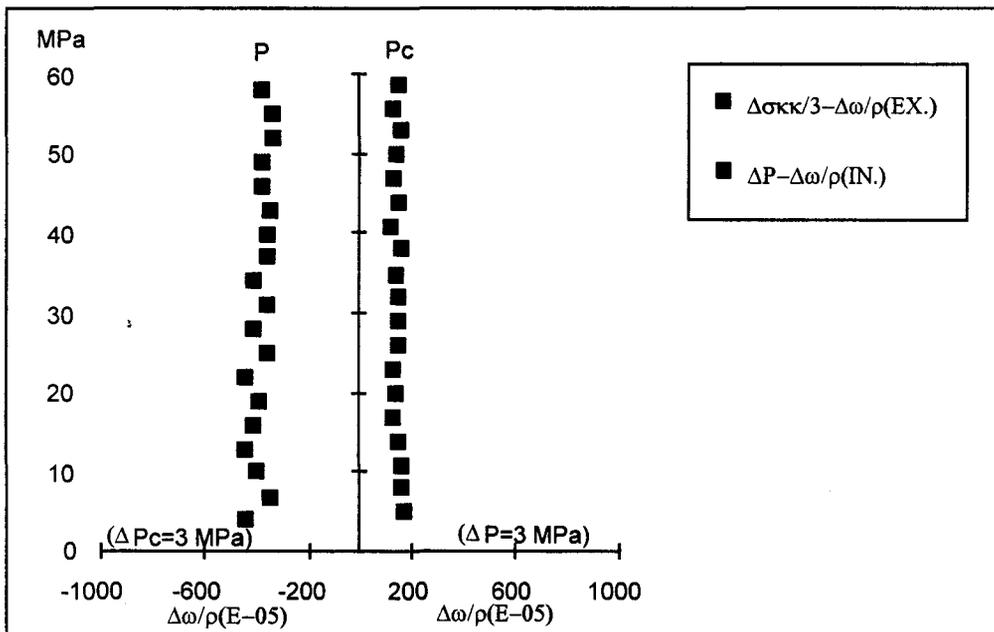
La figure III.11 montre les résultats issus de cet essai. Les variations de  $\varepsilon_v$ , à  $\Delta P=0$ , entre les points 1-3, 4-6, 7-9 etc.. (cf. figure II.8-b) dues à l'évolution de la contrainte isotrope  $\sigma_m$ , ainsi que les variations de  $\varepsilon_v$ , à  $\Delta\sigma_m=0$ , entre les points 3-4, 6-7, 9-10 etc.. en fonction de la pression interstitielle ont été calculées et présentées sur la courbe III.11-a. Il est à noter que la première valeur de  $\Delta\varepsilon_v$  en fonction de  $\sigma_m$  est mesurée en  $\Delta P=0$  (mais pour une valeur de  $P$  constante égale à 1 MPa), la 2<sup>ème</sup> valeur de  $\Delta\varepsilon_v$  pour  $P=4$  MPa, la 3<sup>ème</sup> valeur pour  $P=7$  MPa etc.. De la même façon pour les valeurs similaires de  $\Delta\varepsilon_v$  en fonction de la pression interstitielle, la 1<sup>ère</sup> valeur de  $\Delta\varepsilon_v$  à  $\Delta\sigma_m=0$  (mais pour une  $\sigma_m=5$  MPa), la 2<sup>ème</sup> valeur de  $\Delta\varepsilon_v$  à  $\sigma_m=8$  MPa, la 3<sup>ème</sup> valeur à  $\sigma_m=11$  MPa etc..

De la même manière la figure III.11-b présente les valeurs  $\Delta m/\rho_o^{fl}$  expulsées (à  $\Delta P=0$ ) entre les points 1-3, 4-6, 7-9, etc.. en fonction de la contrainte isotrope  $\sigma_m$  et les



a) Variation volumique en fonction de la contrainte hydrostatique et de la pression interstitielle

Figure III.11 : Essai hydrostatique à drainage partiel



b) Variation du volume poreux en fonction de la contrainte hydrostatique et de la pression interstitielle

Figure III.11 : Suite

valeurs  $\Delta m / \rho_o^{fl}$  injectées (à  $\Delta\sigma_m=0$ ) entre les points 3-4, 6-7, 9-10 etc.. par rapport à l'évolution de la pression de pore.

On observe que les incréments de déformation volumique  $\Delta\varepsilon_v$  et de masse fluide expulsée  $\Delta m / \rho_o^{fl}$  pour tous les paliers de montée en contrainte hydrostatique, sont quasiment constantes, quel que soit la valeur actuelle de la pression interstitielle P. Les incréments de  $\Delta\varepsilon_v$  et  $\Delta m / \rho_o^{fl}$  injectés en fonction de la pression interstitielle P, sont également identiques quelle que soit la valeur de la contrainte  $\sigma_m$  appliquée.

A partir de deux paliers de chargement consécutif en  $\sigma_m$  et P, on peut déterminer une valeur du coefficient de Biot. Les 19 valeurs obtenues se situent dans une fourchette de 0,854 à 0,941 avec une valeur moyenne de 0,908.

### III.2.2 Essais de Compression triaxiale

#### III.2.2.1 Essai drainé avec Montées en P et Détermination de la Perméabilité

Ces essais ont été réalisés dans le but d'étudier l'effet de l'anisotropie induite sur les paramètres de l'interaction fluide-squelette. Cinq essais à différentes pressions de confinement, à savoir 10, 20, 30, 40 et 50 MPa, ont été effectués. La procédure expérimentale est décrite au §II.4.2.3. Tous les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des éprouvettes, après avoir réalisé la montée en pression interstitielle et la mesure de la perméabilité K en cinq niveaux différents de la contrainte déviatorique. Signalons que pour les essais à  $P_c=10, 20, 30$  et  $40$  MPa de confinement, les niveaux de la contrainte déviatorique choisis pour mesurer la perméabilité sont les mêmes que ceux retenus lors des essais triaxiaux pour effectuer des cycles de déchargement latéral. Les résultats obtenus sont présentés, pour l'essai à  $P_c=40$  MPa, sur la figure III.12. Les autres résultats sont donnés en annexe AI.

Pour chaque essai, nous obtenons les résultats suivants:

(a) les courbes classiques de la variation des déformations longitudinale  $\varepsilon_1$ , transversale  $\varepsilon_2$  et volumique  $\varepsilon_v$  avec la contrainte déviatorique ( $\sigma_1-\sigma_3$ ). Les points enregistrés dus à la montée en pression interstitielle P ont été enlevés sur ces courbes.

(b) la variation des déformations  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  en fonction de la pression interstitielle P, sur différents niveaux de la contrainte déviatorique.

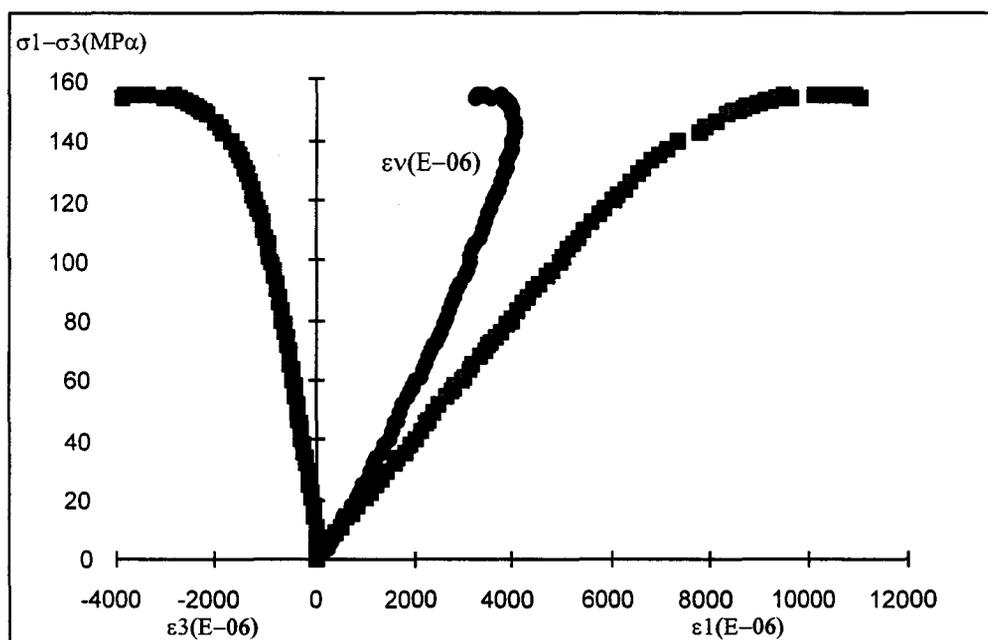
(c) la variation de la déformation volumique total  $\varepsilon_v$  et celle du volume poreux  $m / \rho_o^{fl}$  en fonction de la pression interstitielle P, à différentes valeurs de la contrainte déviatorique.

(d) la variation de la perméabilité  $K$  en fonction du déviateur de la contrainte. Le début de cette courbe est la perméabilité du matériau déterminée à l'état hydrostatique  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$ . Rappelons que la mesure de la perméabilité a été effectuée dans la direction de la contrainte principale majeure.

(e): la superposition des trois courbes, à savoir l'évolution de la déformation volumique, la variation de la perméabilité  $K$  ( en cm/sec) et la variation cumulée du volume poreux pour chaque cycle d'injection, toutes en fonction de la contrainte déviatorique

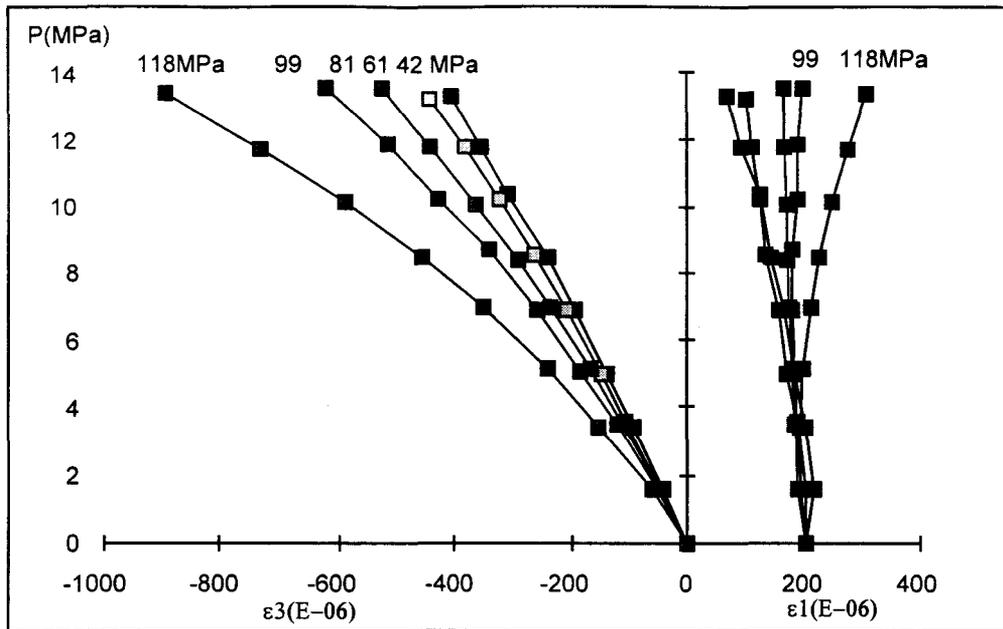
A partir des courbes de contrainte déviatorique - déformations, on voit une diminution de la résistance au pic, pour l'essai à  $P_c = 10$  MPa, par rapport à celle obtenue lors de l'essai triaxial monotone avec la même  $P_c$ . Cette diminution pourrait provenir d'une rupture par fracturation hydraulique lors de l'injection du fluide. C'est peut être la raison pour laquelle on observe une variation de la déformation latérale plus importante dans cet essai par rapport à celles obtenues dans d'autres essais. On a donc refait cet essai avec une pression interstitielle d'injection moins élevée, soit égale au tiers de la pression de confinement appliquée. Cette règle a ensuite été respectée pour tous les essais de cette série.

On constate que, pour tous les essais et pour tous les niveaux de la contrainte déviatorique, la variation de la déformation transversale  $\varepsilon_3$  en fonction de la pression interstitielle  $P$  est beaucoup plus importante que celle de la déformation longitudinale  $\varepsilon_1$ . Cela montre d'une manière évidente l'anisotropie induite du comportement pomécanique du matériau.

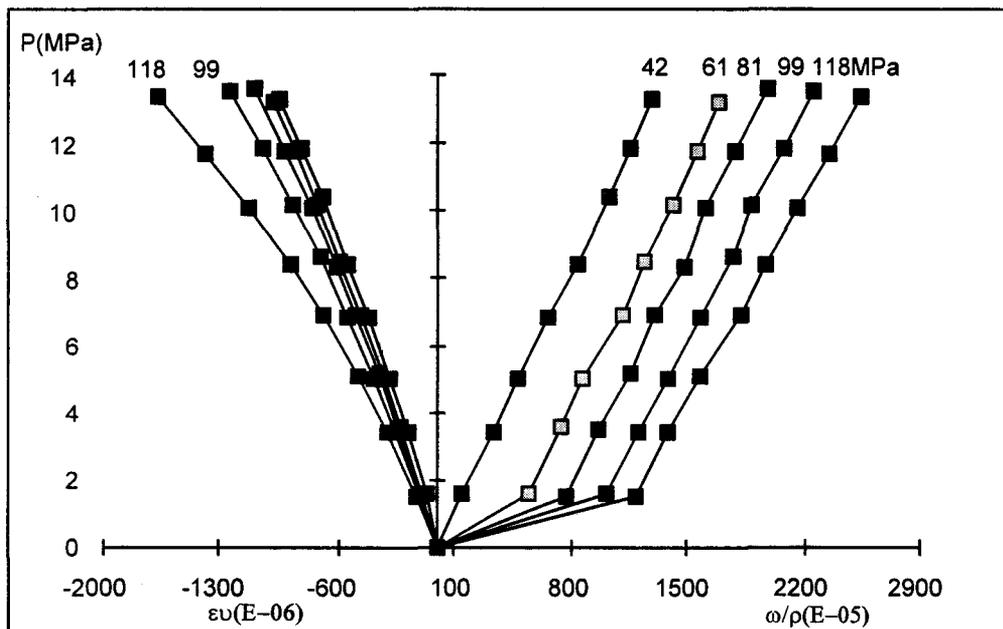


a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique - déformations

Figure III.12: Essai triaxial drainé avec montées en  $P$  ( $P_c = 40$  MPa)

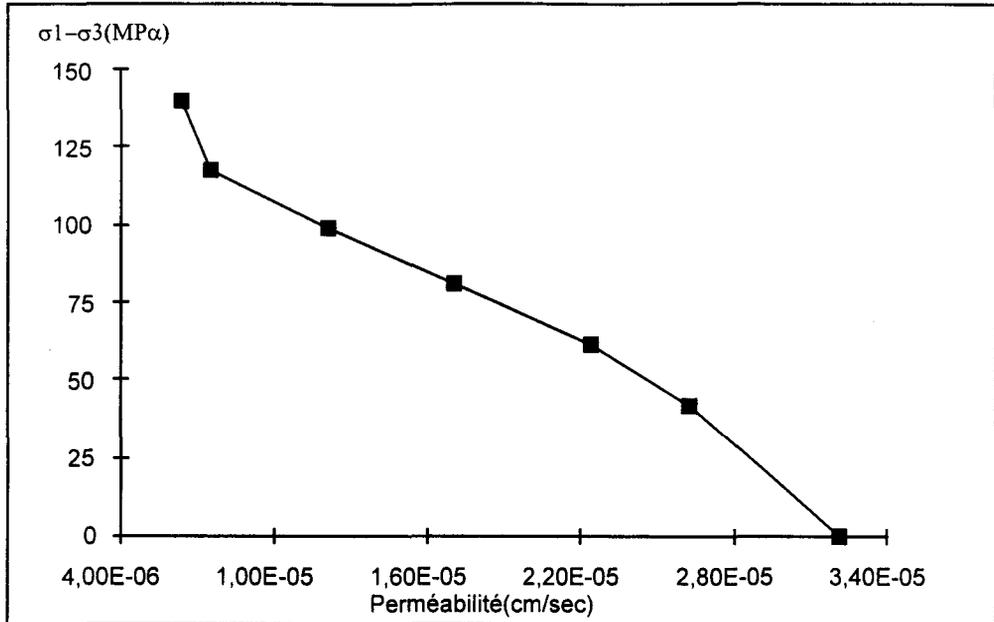


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=40$  MPa)

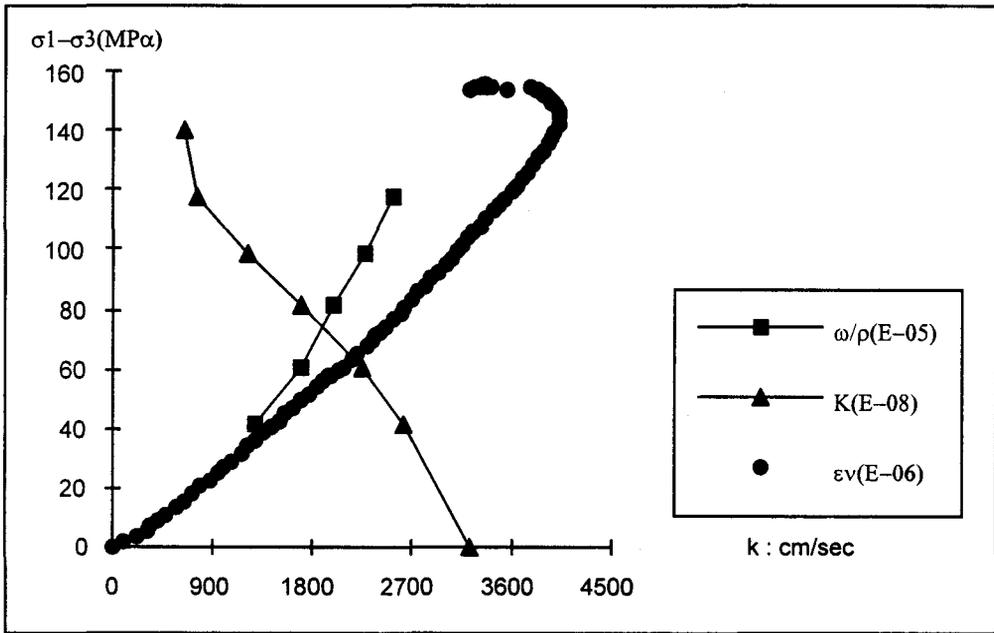


c) Variation du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=40$  MPa)

Figure III.12 : Suite



d) Variation de la perméabilité en fonction du déviateur ( $P_c=40$  MPa)



e) Evolutions de la déformation volumique totale, du volume poreux cumulé et de la perméabilité en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=40$  MPa)

Figure III.12 : Suite

De façon générale, cette anisotropie du comportement est d'autant plus importante que l'état de microfissuration est important, soit le niveau du déviateur de contrainte est élevé.

On observe que les déformations latérales sont globalement non linéaires. La non-linéarité s'accroît quand la valeur de la contrainte déviatorique augmente.

Quant à la variation de la déformation longitudinale, on voit que pour les valeurs modérées du déviateur (notamment les valeurs en dessous de la limite de perte de linéarité sur la courbe  $\sigma_1-\sigma_3, \varepsilon_v$ ), il y a une légère diminution de celle-ci. Cela peut être due dans cette zone aux actions de la pression interstitielle qui soulage la déformation  $\varepsilon_1$ , vis-à-vis de la contrainte axiale. Mais pour les valeurs élevées du déviateur on remarque une croissance de la déformation axiale avec la pression interstitielle et l'apparition d'une légère non linéarité.

A partir des pentes initiales des courbes de variations des déformations en fonction de la pression interstitielle, les modules poroélastiques 'tangents' ont été déterminés. Les valeurs obtenues des essais avec  $P_c=10, 20, 30$  et  $40$  MPa sont présentées dans le tableau III.11. Les significations physiques de ces modules seront données au chapitre suivant.

La déformation volumique  $\varepsilon_v$  en fonction de la pression interstitielle  $P$ , pour tous les essais effectués et pour toutes les valeurs de la contrainte déviatorique, montre une évolution dilatante de l'éprouvette. De plus, sa non linéarité est de plus en plus marquante au fur et à mesure que le déviateur augmente. Les variations de l'apport de volume du fluide  $m/\rho_o^{fl}$  (ou du volume poreux si le fluide est supposé incompressible) en fonction de la pression  $P$  sont globalement linéaires, et de surcroît pour chaque essai, à l'exception du premier essai avec  $P_c=10$  MPa, les courbes présentent pratiquement la même pente.

La figure III.11 (e) donne la courbe cumulée de l'apport de masse fluide pendant les cycles d'injection, en comparaison avec la déformation volumique et la perméabilité. On voit que l'apport de volume du fluide cumulé est positif (injection). Ceci met en évidence la croissance du volume poreux grâce à la croissance de microfissures dans le matériau.

Tableau III.11: Modules poroélastiques tangents à différents niveaux du déviateur ( $P_c=10$ MPa)

$P_c=10$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	$P-\varepsilon_1(H_1)$	$P-\varepsilon_2(H_2)$	$P-\varepsilon_v(H_v)$	$P-m/\rho_o^{fl}$
1	15	-60100	27040	11040	860
2	30	-84570	21460	9535	915
3	45	-116870	16250	7590	795
4	60	43510	7400	4100	650
5	75	43000	2690	1480	600

Tableau III.12: Modules poroélastiques tangents à différents niveaux du déviateur ( $P_c=20\text{MPa}$ )

$P_c=20\text{ MPa}$	$\sigma_1-\sigma_3(\text{MPa})$	$P-\varepsilon_1(H_1)$	$P-\varepsilon_2(H_2)$	$P-\varepsilon_v(H_v)$	$P-m/\rho_o^{fl}$
1	34	-163100	28230	12790	805
2	50	-329400	27282	12515	827
3	66	-330160	24142	11321	835
4	80	186550	19029	9379	793
5	95	163610	13220	7170	799

Tableau III.13: Modules poroélastiques tangents à différents niveaux du déviateur ( $P_c=30\text{MPa}$ )

$P_c=30\text{ MPa}$	$\sigma_1-\sigma_3(\text{MPa})$	$P-\varepsilon_1(H_1)$	$P-\varepsilon_2(H_2)$	$P-\varepsilon_v(H_v)$	$P-m/\rho_o^{fl}$
1	46	-185570	34030	15420	1010
2	66	-261240	30520	13970	795
3	89	-272850	25285	12330	845
4	112	212540	17150	8960	795
5	121	188710	15740	7870	810

Tableau III.14: Modules poroélastiques tangents à différents niveaux du déviateur ( $P_c=40\text{MPa}$ )

$P_c=40\text{ MPa}$	$\sigma_1-\sigma_3(\text{MPa})$	$P-\varepsilon_1(H_1)$	$P-\varepsilon_2(H_2)$	$P-\varepsilon_v(H_v)$	$P-m/\rho_o^{fl}$
1	42	-86790	36529	16817	1020
2	61	-118050	33714	16085	1003
3	81	-353420	31826	14805	1007
4	99	-376400	28733	13628	966
5	118	147010	22776	11122	868

On observe également, que même dans le cas d'injection du fluide, la variation du volume des pores est remarquablement plus importante que la variation volumique totale en fonction de la pression interstitielle. Dans ce cas particulier, on peut citer les éléments suivants auxquels le problème peut être lié :

- une perte éventuelle de la saturation initiale d'échantillon lors de l'application de la contrainte déviatorique en régime drainé à  $P=0$ . La récupération du fluide par l'éprouvette lors de la montée en  $P$ , peut entraîner un excès du volume de fluide pour arriver à la pression interstitielle prévue dans chaque palier.

- le module de l'incompressibilité du fluide injecté est 825 MPa, cela est dix fois moins que le module de l'incompressibilité global drainé du grès testé (cf. §III.2.1.1). Or, une partie très importante de l'écart observée entre la variation volumique totale et la variation de l'espace poreux peut être liée à la contractance très importante du méthanol. Rappelons que la mesure par capillaire est effectuée à la pression atmosphérique

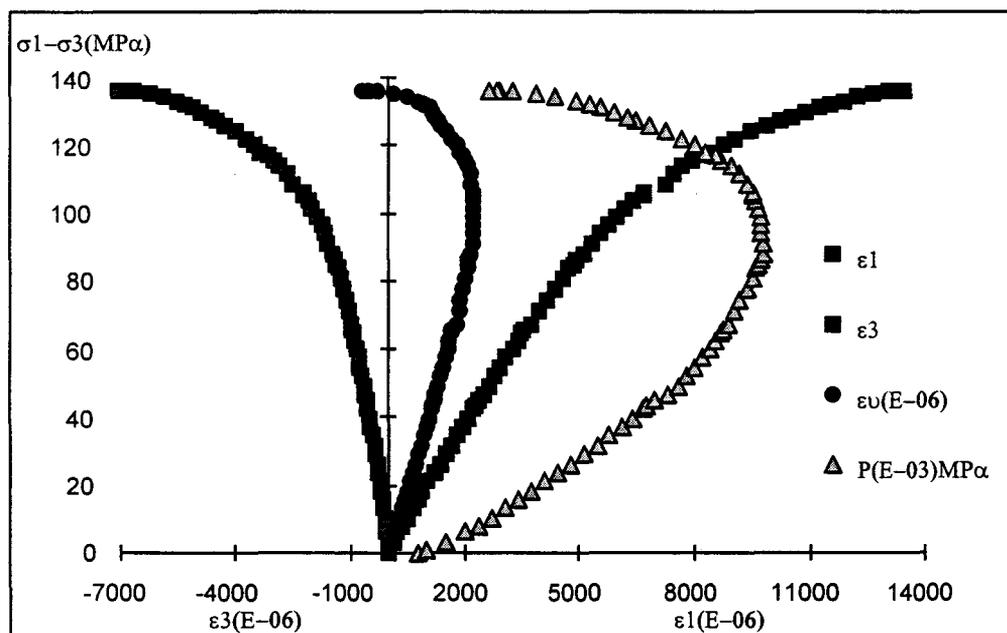
Quant à la perméabilité, elle diminue légèrement avec le déviateur. Sa variation, quoique faible, suit parfaitement la déformation volumique totale d'échantillon.

### III.2.2.2 Essai Non Drainé avec Chutes de P

Ce sont des essais que l'on a effectués dans le même but que les essais de la série précédente. Au nombre de trois, ils ont été réalisés à la pression de confinement 5, 10 et 30 MPa. La manipulation est décrite au §II.4.2.4 et la figure III.13 présente les résultats obtenus pour l'essai à  $P_c=30$  MPa. Nous avons présenté chaque essai comme suit :

a) les courbes contrainte déviatorique ( $\sigma_1-\sigma_3$ ), déformations ( $\epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_v$ ) classiques ainsi que la variation de la pression interstitielle P en fonction de la contrainte déviatorique. Les points enregistrés dus à la chute de la pression interstitielle P ont été enlevés sur ces courbes.

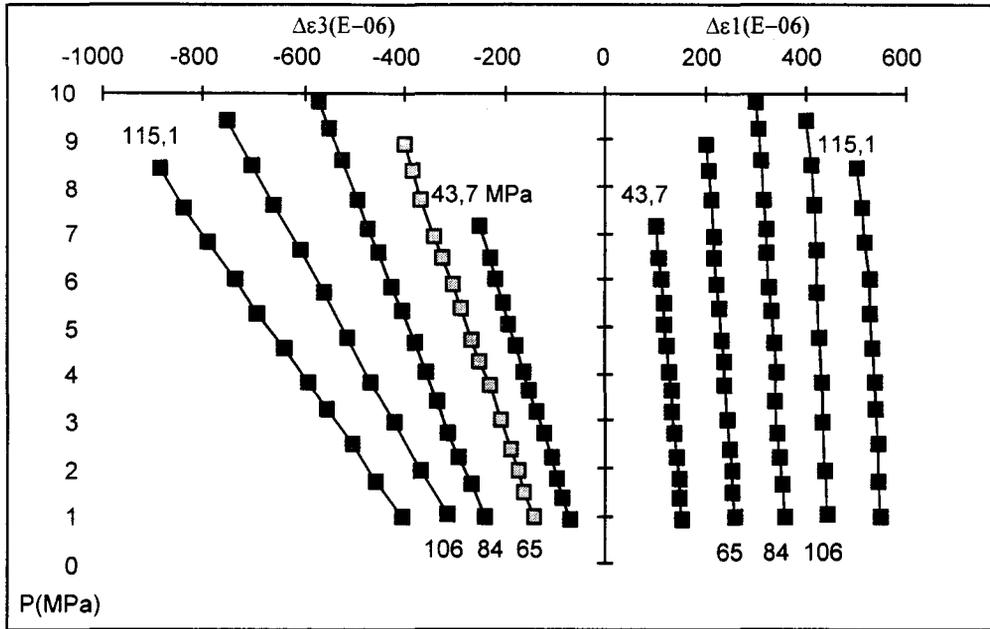
b) l'évolution des déformations longitudinale  $\epsilon_1$  et transversale  $\epsilon_3$  sous l'effet de la diminution de la pression intérieure à différent niveau de la charge déviatorique.



a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations

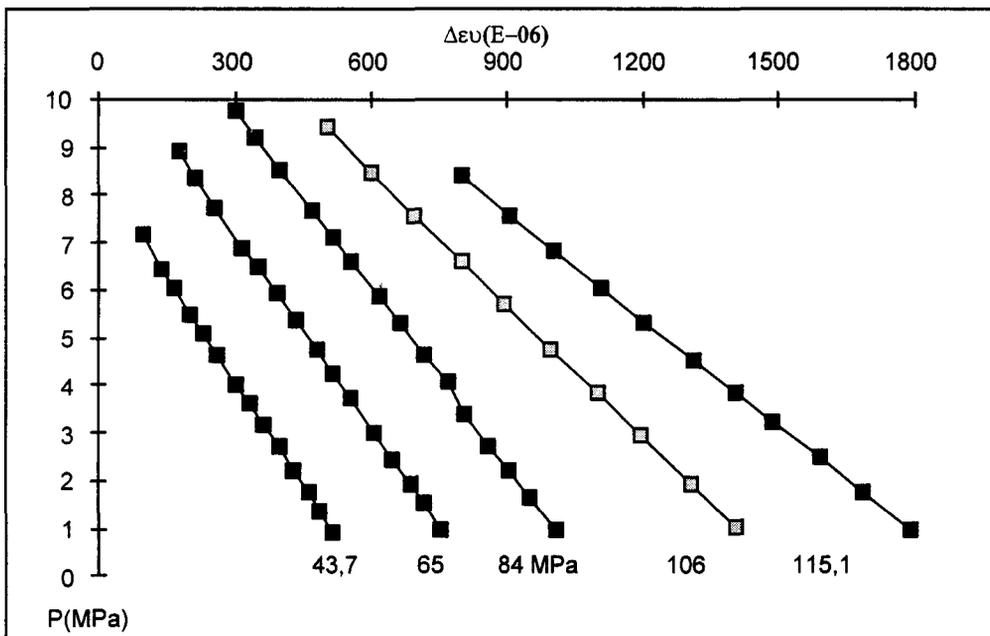
Figure III.13: Essai triaxial monotone non drainé avec chutes de pression inte-

-rstitielle P ( $P_c=30$  MPa)



b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=30$  MPa)

Figure III.13: Suite



c) Variation de la Déformation volumique totale en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=30$  MPa)

Figure III.13: Suite

c) La variation volumique totale d'échantillon  $\varepsilon_v$  en fonction de l'évolution de P. Le chiffre figurant sur chaque courbe, dans les figures (b) et (c), indique la charge déviatorique imposée sur laquelle la chute de la pression P a été effectuée.

On observe que la réponse du matériau, pour toutes les pressions de confinement  $P_c$  et pour toutes les valeurs de la contrainte déviatorique imposées, dans les deux sens (axial et latéral) est linéaire. Comme les essais précédents (monotones avec des montées en P), à travers tous les essais de cette série, on constate que le comportement mécanique du matériau en fonction de la pression interstitielle P est anisotrope. Cette anisotropie, traduite par une évolution beaucoup plus marquée de déformation transversale  $\varepsilon_3$  par rapport à celle longitudinale  $\varepsilon_1$ , conformément au développement de la microfissuration induite, s'accroît avec la contrainte déviatorique et ce, dans tous les essais effectués.

En ce qui concerne l'évolution de la déformation longitudinale en fonction de la diminution de la pression interstitielle (courbe P- $\varepsilon_1$ ), on voit que dans l'essai à  $P_c=5$  MPa, elle est décroissante pour la contrainte déviatorique modérée et qu'elle devient croissante lorsque le déviateur augmente. Par contre pour les deux autres essais ( $P_c=10$  et 30 MPa), l'évolution de courbe P- $\varepsilon_1$ , quelle que soit la charge axiale imposée, est croissante. Sa croissance diminue avec la contrainte déviatorique. Cela peut s'expliquer par la fermeture progressive des microfissures sous l'effet de la contrainte axiale dans le sens 1. Par conséquent pour la valeur élevée du déviateur, l'évacuation du fluide ne peut entraîner que très peu de variation de déformation dans ce sens.

Quant à la variation volumique d'échantillon, on constate qu'elle se manifeste contractante avec la chute de la pression interstitielle P quelle que soit la pression de confinement  $P_c$  et la valeur de la charge déviatorique imposée. Son évolution en fonction de la pression P, dans chaque essai, augmente avec la contrainte déviatorique.

Les tableaux III.15 à III.17 donnent les modules déduits de ces essais exprimés en MPa. Ces modules ont été calculés sur toute la longueur des courbes.

Tableau III.15: Pentés des différentes courbes lors d'un essai avec chutes de P

$P_c=5$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	P- $\varepsilon_1$	P- $\varepsilon_2$	P- $\varepsilon_v$
1	13,5	61760	-15420	-8475
2	24,6	228920	-12590	-6460
3	35,6	62320	-11980	-5930
4	45,1	-61560	-9970	-4940
5	52,6	-82050	-8200	-3990

Tableau III.16: Pentas des différentes courbes lors d'un essai avec chutes de P

$P_c=10$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	P- $\varepsilon_1$	P- $\varepsilon_2$	P- $\varepsilon_v$
1	14,5	-150410	-23625	-11315
2	29	-230370	-17915	-9755
3	45	-247450	-13635	-6650
4	59	-272810	-10310	-5120
5	74,2	-277750	-7955	-4030

Tableau III.17: Pentas des différentes courbes lors d'un essai avec chutes de P

$P_c=30$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	P- $\varepsilon_1$	P- $\varepsilon_2$	P- $\varepsilon_v$
1	43,7	-119710	-33780	-14810
2	65	-134680	-30280	-13610
3	84	-162940	-26980	12465
4	106	-220850	-19270	-9245
5	115,1	-164690	-15515	-7430

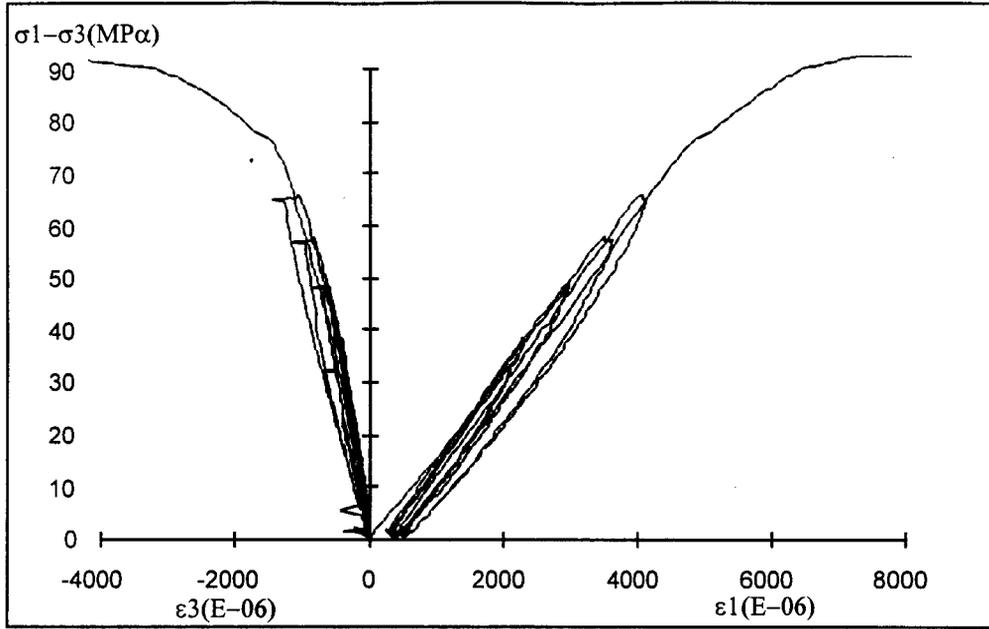
La comparaison des résultats de cette série d'essais avec ceux obtenus à partir des «essais monotones avec des montées en P» surtout pour les valeurs élevées de la contrainte déviatorique, montre une parfaite linéarité des déformations en fonction de l'évolution de la pression interstitielle P dans le cas des essais avec la chute de la P.

### III.2.3 Essai de Compression Triaxiale avec Cycles du Chargement - Déchargement Déviatorique

#### III.2.3.1 Essai Drainé avec Montées en P et détermination de la Perméabilité

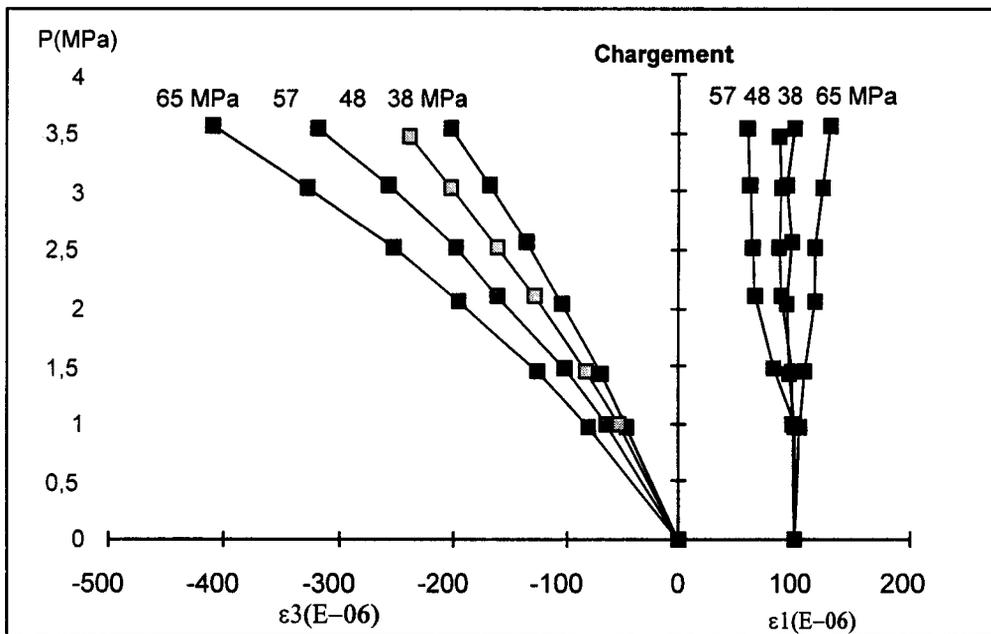
Ces essais ont également été effectués dans l'objectif d'étudier l'interaction fluide-squelette du matériau ayant subi différents degrés de dégradation sous la sollicitation déviatorique. Ce sont des essais assez longs et compliqués qui demande un soin rigoureux lors de la réalisation. Le mode opératoire a été décrit au §II.4.4. Nous avons effectué deux essais. L'un à une pression du confinement de  $P_c=10$  MPa avec détermination de la perméabilité, l'autre à  $P_c=30$  MPa sans détermination de la perméabilité. La figure III.14 présente les résultats du premier essai.

Sur cette figure, mise à part les courbes contrainte déviatorique-déformations (courbes a), sont présentées les variations des déformations  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_v$  et  $m/\rho_o^{fl}$  en fonction de la pression interstitielle P, non seulement pour les différentes valeurs de la charge déviatorique appliquée (courbes b et c) mais aussi pour les états après chaque déchargement complet de la contrainte déviatorique (courbes d et e).



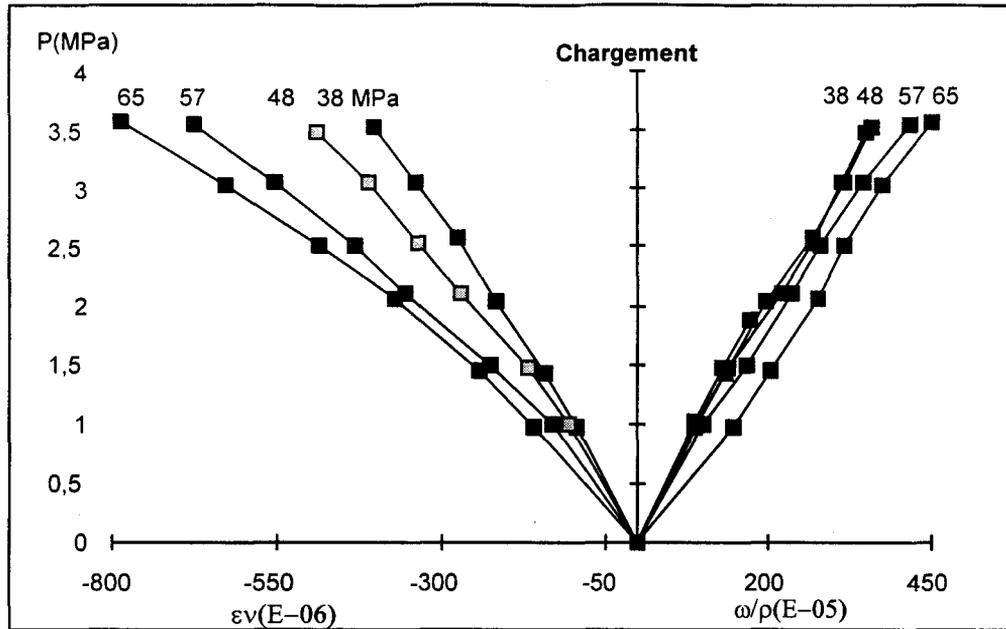
a) Variation des déformations en fonction du déviateur

Figure III.14 : Essai de chargement - déchargement déviatorique avec montées en pression interstitielle et détermination de la perméabilité ( $P_c=10$  MPa)



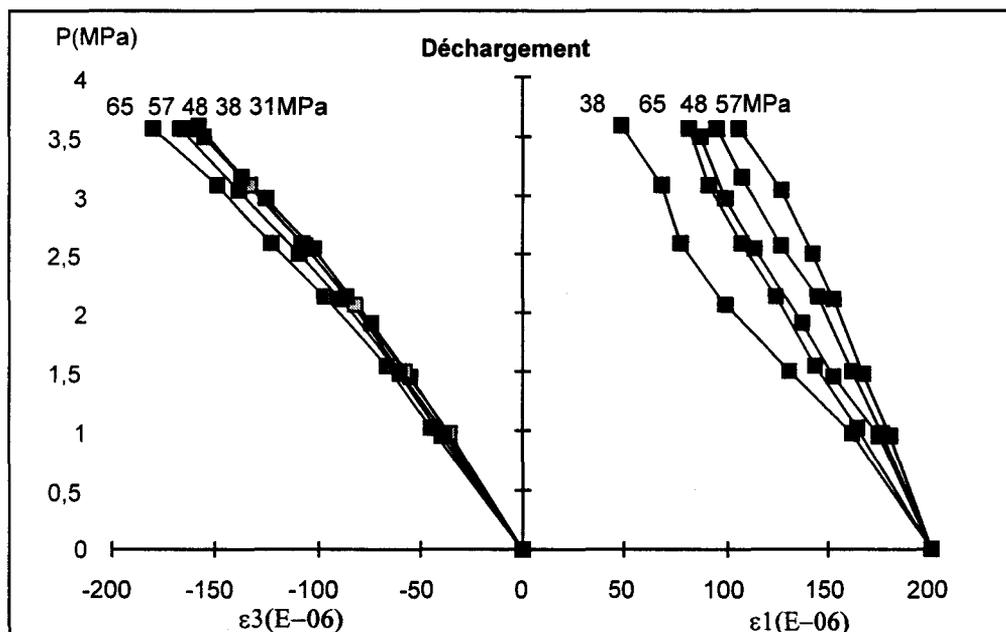
b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle à différents niveaux de la contrainte déviatorique ( $P_c=10$  MPa)

Figure III.14 : Suite



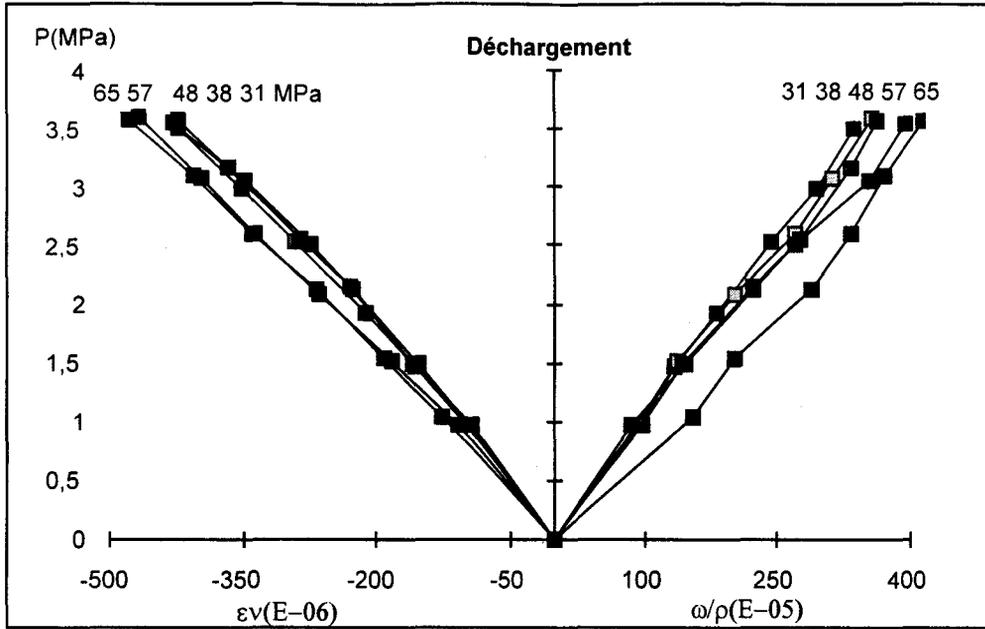
c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle à différents niveaux de la contrainte déviatorique ( $P_c=10$  MPa)

Figure III.14 : Suite



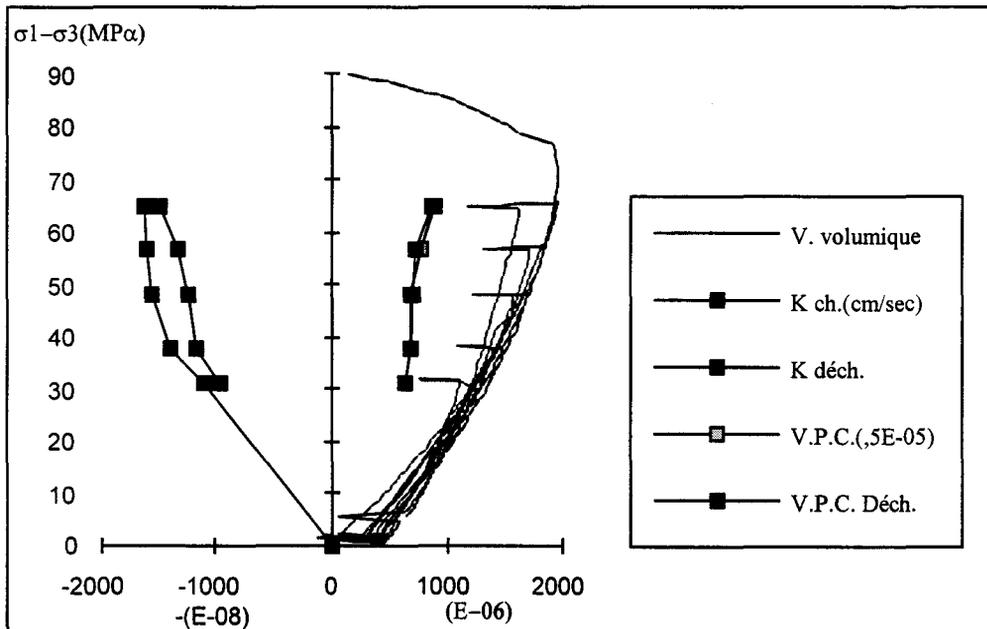
d) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle après chaque déchargement déviatorique complet ( $P_c=10$  MPa)

Figure III.14 : Suite



e) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle après chaque déchargement déviatorique complet ( $P_c=10$  MPa)

Figure III.14 : Suite



f) Variations de la perméabilité et de volume poreux cumulé (v.p.c.) en fonction de la pression interstitielle à différents niveaux de du déviateur et après le déchargement déviatorique complet, comparées avec la variation de volume total ( $P_c=10$  MPa)

Figure III.14 : Suite

Les courbes (f) présentent l'évolution de la déformation volumique, de l'apport de masse fluide cumulé et de la perméabilité. Ces deux dernières ont été déterminées avant et après chaque cycle du chargement déviatorique. Les valeurs de la perméabilité ont été soustraites à la valeur initiale correspondant à l'état hydrostatique  $\sigma_m=10$  MPa avant l'application de déviateur (soit  $K=4,685 \times 10^{-5}$  cm/s).

Concernant l'évolution des déformations  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_v$  et  $m/\rho_o^{\text{fl}}$  en fonction de la pression interstitielle P, en présence de la contrainte déviatorique appliquée (en état de chargement déviatorique), on constate le même type de réponse que celui obtenu des essais précédents (monotones). En revanche, après le déchargement complet de la contrainte déviatorique, les variations des déformations montrent un comportement quasi isotrope. En effet, les pentes des courbes P- $\varepsilon_1$  et P- $\varepsilon_3$ , pour le niveau de l'endommagement, ne sont pas très différents. Ceci montre qu'il y a une restitution des propriétés mécaniques du matériau après la refermeture de microfissures.

Les variations volumiques  $\varepsilon_v$  en fonction de la pression interstitielle, après le déchargement total (figure e), présentent une indépendance vis à vis des niveaux du déviateur de contrainte préalablement appliqués. C'est également le cas pour les variations de l'apport de masse fluide. Ces résultats confirment les effets unilatéraux grâce à la fermeture de microfissures. Les tableaux III.18 et III.19 présentent les valeurs des modules poroélastiques tangents « initiaux » pour l'essai à  $P_c=10$  MPa.

Tableau III.18: Modules poroélastiques à l'état de chargement lors d'un essai avec des cycles chargement - déchargement déviatorique et avec des montées en P ( $P_c=10$  MPa)

Charge	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	P- $\varepsilon_2$ (H <sub>o2</sub> )	P- $\varepsilon_v$ (H <sub>ov</sub> )	P- $m/\rho_o^{\text{fl}}$
1	31	-	-	1011
2	38	20651	9978	951
3	48	17823	8701	951
4	57	14483	6644	849
5	65	11673	6014	816

Tableau III.19: Modules poroélastiques à l'état déchargé lors d'un essai avec des cycles chargement - déchargement déviatorique et avec des montées en P ( $P_c=10$  MPa)

Décharge	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	P- $\varepsilon_1$ (H <sub>o1</sub> )	P- $\varepsilon_2$ (H <sub>o2</sub> )	P- $\varepsilon_v$ (H <sub>ov</sub> )	P- $m/\rho_o^{\text{fl}}$
1	31	-29434	26624	9302	1034
2	38	-25846	26334	8230	981
3	48	-33134	24474	9265	956
4	57	-37647	24402	9619	868
5	65	-27449	22858	8071	858

En ce qui concerne la perméabilité, on constate que la valeur déterminée après chaque déchargement déviatorique complet est très proche (légèrement plus grande) de celle déterminée avant le déchargement. Cette petite différence montre que la valeur de la perméabilité n'est pas reconstituée après le déchargement, contrairement aux modules de couplage poromécanique.

### III.2.3.2 : Essai Non Drainé

C'est un essai que l'on a effectué dans le but d'étudier le comportement non drainé du matériau sous l'application des cycles chargement-déchargement déviatorique et plus particulièrement la variation de la pression interstitielle et son impact avec différent état de la microfissuration induite d'échantillon. La manipulation de cet essai a été donnée au §II.4.3.2.

Nous avons réalisé deux essais, l'un à la pression de confinement  $P_c=10$  et l'autre à la  $P_c=20$  MPa. La figure III.16 donne le résultat obtenu du dernier essai. Pour chaque essai, nous avons présenté la variation des déformations  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_3$  (figure III.16-a), ainsi que  $\varepsilon_v$  et la pression interstitielle  $P$  (figure III.16-b), en fonction de la contrainte déviatorique  $\sigma_1-\sigma_3$ . Les tableaux III.20 et III.21 présentent les valeurs déduites des essais notamment :

$\sigma_1-\sigma_3$  : le niveau de la contrainte déviatorique sur lequel un déchargement de l'ordre de 17 à 18 MPa a été effectué

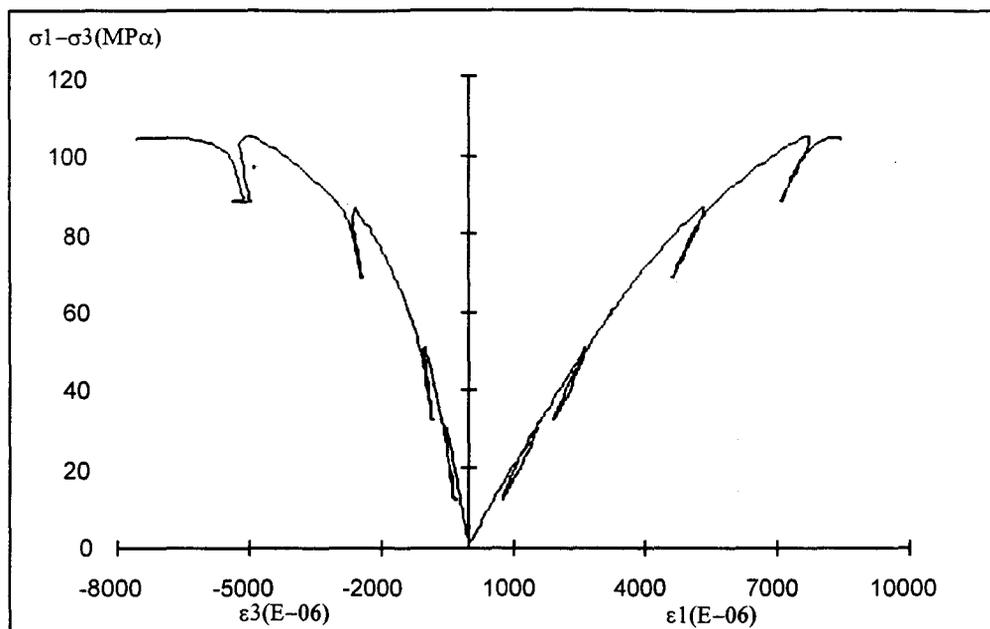
$\Delta P$  : la variation de la pression interstitielle après déchargement axial, c'est à dire suite à la réalisation de la phase 1 (cf. figure II.12-b)

$\Delta m/\rho_o^fl$  : le volume du fluide expulsé ou injecté pour atteindre la même pression lors de chargement, c'est à dire la conséquence de l'application de la phase 2 (cf. même figure)

$\Delta \varepsilon_v$  : la variation volumique totale (contraction ou dilatation d'échantillon) dû à l'échange du fluide avec l'échantillon (application de la phase 2).

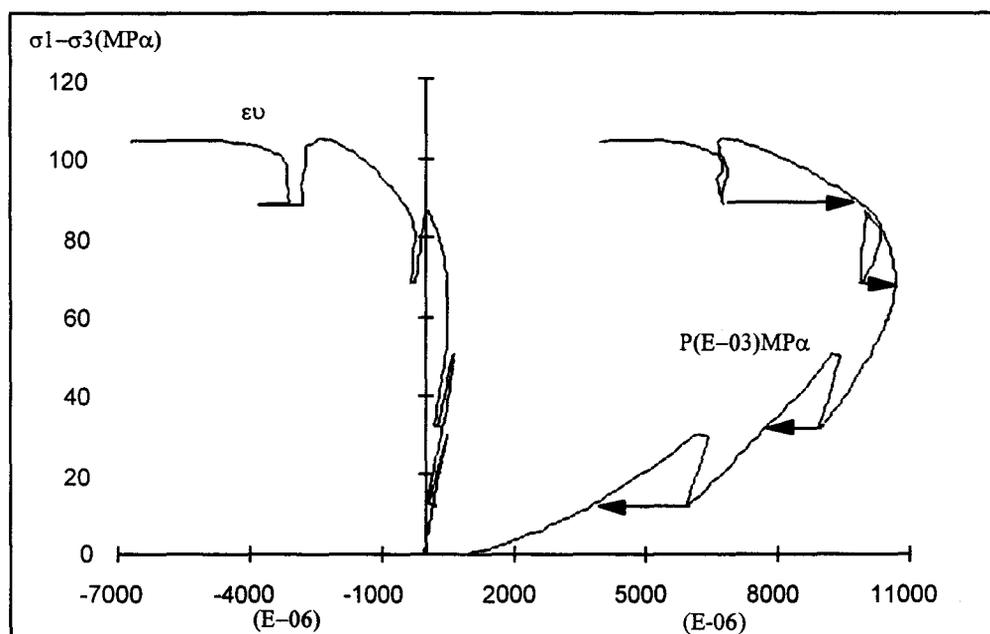
Tableau III.20: Différentes mesures obtenues de l'essai non drainé avec des cycles de chargement - déchargement déviatorique

$P_c=10$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	$\Delta P$ (MPa)	$\Delta m/\rho_o^fl$ (E-6)	$\Delta \varepsilon_v$ (E-06)
1	21,1	2,81	1689	280
2	36,8	0,43	438	63
3	62,7	-0,93	-666	-146
4	76,9	-1,80	-1141	-436



a) Courbe de la contrainte déviatorique-déformations

Figure III.15 : Essai de compression triaxiale non drainée avec cycles de chargement - déchargement déviatorique ( $P_c=10$  MPa)



b) Variation volumique totale et évolution de la pression interstitielle en fonction de la contrainte déviatorique

Figure III.15 Suite

Tableau III.21: Différentes mesures obtenues de l'essai non drainé avec des cycles de chargement - déchargement déviatorique

$P_c=20$ MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	$\Delta P$ (MPa)	$\Delta m/\rho_0^n$ (E-6)	$\Delta \varepsilon_v$ (E-06)
1	30,5	2,23	1040	180
2	50,6	1,34	615	124
3	86,6	-0,76	-344	-109
4	105,4	-3,16	-1626	-1019

On observe que le comportement non drainé du matériau sous l'effet des cycles chargement-déchargement déviatorique est similaire à celui dans le cas drainé (cf. §III.1.1.3). On remarque, ici aussi, une dégradation progressive du matériau à travers la diminution graduelle des modules sécants sur les boucles de la courbe contrainte déviatorique ( $\sigma_1-\sigma_3$ ) déformations  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3$ . Bien que le déchargement n'ait pas été effectué jusqu'à l'élimination totale de la contrainte déviatorique (l'état de contrainte isotrope), mais on peut observer également une déformation résiduelle  $\varepsilon_1$  qui augmente (en comparaison avec la déformation  $\varepsilon_3$ ) lorsque la pression de confinement augmente.

La variation de la pression interstitielle en fonction de la contrainte déviatorique est tout à fait significative, car elle suit parfaitement la variation volumique totale d'échantillon.

On constate que la variation de la pression interstitielle de l'échantillon après le déchargement, positive dans la zone contractante due à la déformation résiduelle, est plus importante lorsque le cycle effectué est plus proche du domaine linéaire initiale du comportement. Par contre, dans la zone dilatante, celle-ci négative due essentiellement au développement des microfissures, est beaucoup plus considérable lorsque le déchargement s'est effectué près de la rupture. Cela met en évidence l'effet déterminant de la microfissuration induite sur la pression interstitielle.

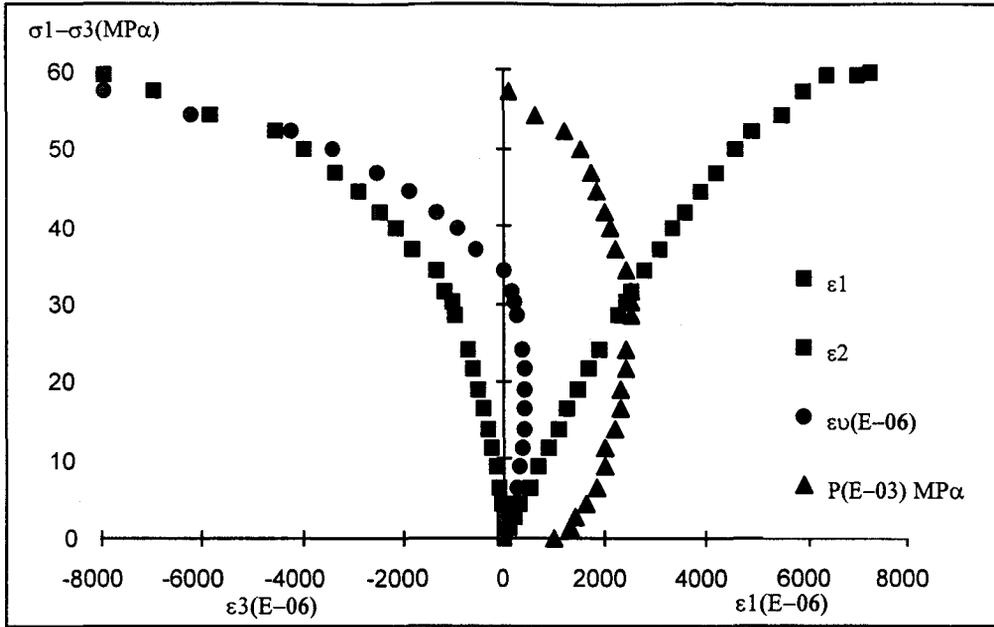
### III.3 Essais Triaxiaux de Validation

Ce sont des essais effectués dans le but de valider des modèles de comportement poromécanique. Trois séries d'essais ont été effectuées.

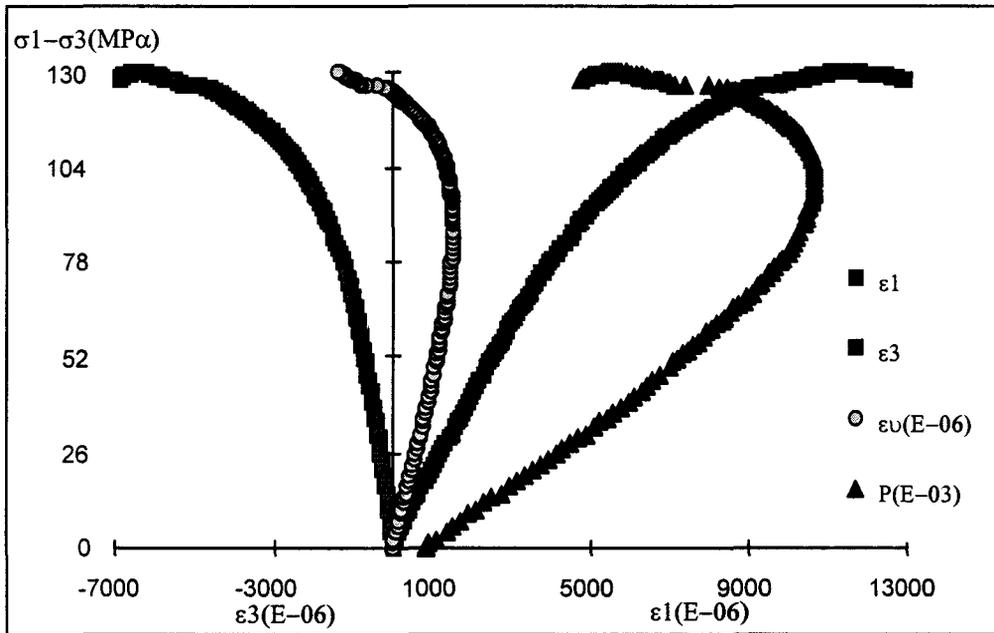
#### III.3.1 Essai Monotone Non Drainé

Le mode opératoire de l'essai est présenté au §II.4.2.2. Nous avons réalisé quatre essais avec les pressions du confinement de 5, 10, 30 et 50 MPa. L'application de la charge axiale commence à partir d'un état hydrostatique  $P_c$  et d'une contre pression interstitielle  $P=1$  MPa. La figure III.16 donne les résultats obtenus pour les essais à  $P_c=5$  et 30 MPa.





$P_c = 5,0$  MPa



$P_c = 30,0$  MPa

Figure III.16 : Essais de compression triaxiale monotone non drainé

Sur cette figure, les variations des déformations et de la pression interstitielle sont présentées en fonction de la contrainte déviatorique.

On constate que la déformation volumique est en parfait accord avec la variation de la pression interstitielle dans les quatre essais, c'est-à-dire que la dilatance est accompagnée d'une diminution de la pression interstitielle. Le tableau III.22 donne les modules élastiques non drainés déterminés à partir de ces essais, sur les parties linéaires initiales des courbes de contraintes déformations. On obtient des variations irrégulières de ces modules en fonction de la pression de confinement. Il semble difficile de dégager une tendance nette.

Tableau III.22: Coefficients poroélastiques déduits des essais triaxiaux monotones non drainés

$P_c(\text{MPa})$	$P_{ic}(\text{MPa})$	$E(\text{MPa})$	$\nu$	$K$
5	59,7	13200	0,281	10045
10	92,0	20910	0,302	17600
30	130,5	20420	0,260	14180
50	149,5	19110	0,213	11100

### III.3.2 Essai d'Extension latérale Non Drainé

L'asservissement dans cet essai est en mode "force contrôlée". La manipulation a été précisée au §II.4.5. Nous avons effectué trois essais, avec les pressions du confinement initiales de 20, 30 et 40 MPa. La figure III.17 montre les réponses du matériau en fonction de la diminution de la contrainte latérale à partir d'une valeur initiale de 40 MPa

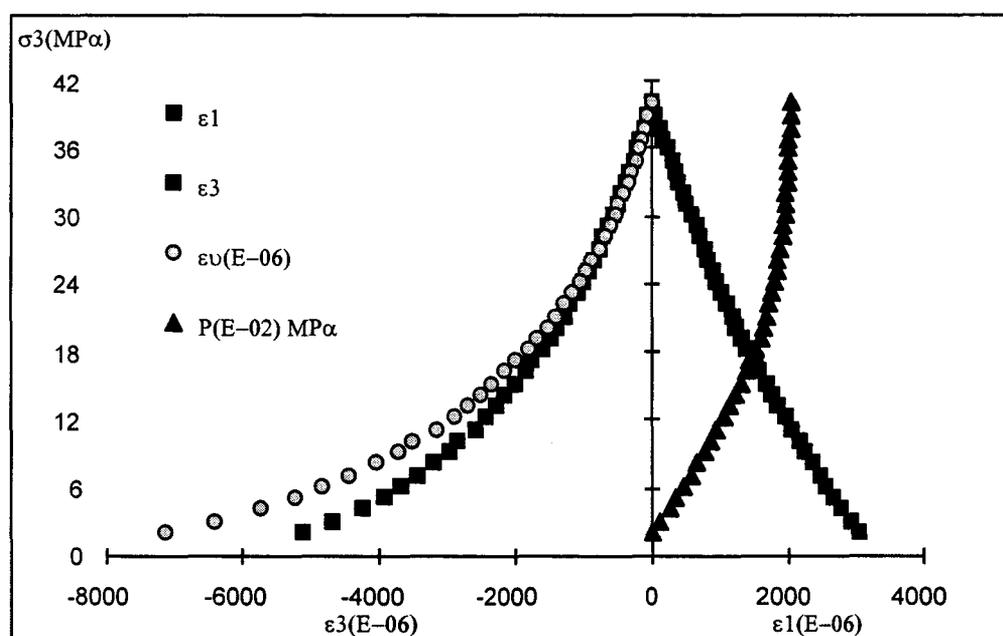


Figure III.17 : Essai d'extension latérale non drainé ( $P_c=40$  MPa)

On peut constater que la non linéarité des réponses apparaît quand la contrainte latérale devient inférieure à un certain seuil, accompagnée d'une intensification de la dilatance volumique et de la diminution de la pression interstitielle. Une rupture brutale de l'éprouvette est obtenue dans cet essai. Par contre, dans l'essai avec une pression de confinement initiale de 20 MPa, la rupture macroscopique de l'éprouvette n'a pas été obtenue jusqu'au relâchement total de la contrainte latérale ( $\sigma_3=0$ ), en raison du faible niveau d'endommagement.

### III.3.3 Essai de Chargement Proportionnel Non Drainé

La procédure expérimentale est décrite au §II.4.6. L'essai a été conduit en mode "déplacement contrôlé". Ces essais ainsi que les essais d'extension latérale non drainée ont été effectués pour la première fois dans notre laboratoire. Il est à noter que les réponses du matériau dans ce type d'essai dépendent fortement de la valeur du rapport de contraintes  $k=\sigma_1/\sigma_3$ .

Nous avons effectué trois essais avec les valeurs respectives de  $k=2, 5$  et  $10$ . Pour l'essai à  $k=2$ , le pic de contrainte n'a pas été atteint dans la limite de la capacité de charge de notre machine. Les réponses du matériau obtenus pour l'essai à  $k=5$  sont présentées sur la figure III.18.

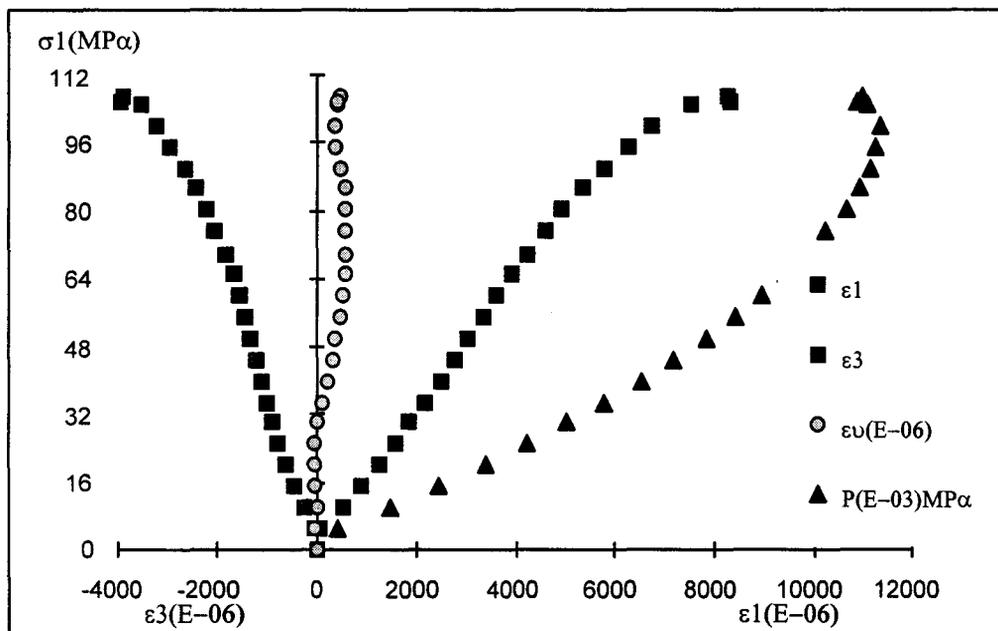


Figure III.18 : Essai de chargement proportionnel non drainé ( $k=5$ )

Pour les essais à  $k=5$  et  $10$ , on constate une similitude avec le comportement général du matériau obtenu lors d'un essai triaxial non drainé. En revanche, la dilatance volumique du

matériau et la diminution de la pression interstitielle sont nettement plus faibles que celles observées des essais triaxiaux. Ceci est dû sans doute à l'effet de l'augmentation continue de la pression de confinement qui ralentit la progression de microfissures.

### III.4 Conclusion

A partir des résultats obtenus des différents chemins de sollicitations présentés dans ce chapitre, quelques remarques importantes peuvent être formulées.

- \* Le grès étudié est un matériau initialement isotrope. La porosité initiale de microfissures est inférieure à 1% de la porosité totale du matériau. La contrainte moyenne de fermeture de ces microfissures est de l'ordre de 20 MPa.
- \* Le matériau présente un comportement fragile dont le mécanisme principal des déformations irréversibles est le développement de la microfissuration, cette dernière est orientée sous la sollicitation déviatorique.
- \* Le matériau présente une certaine déformation résiduelle après le déchargement complet du déviateur de contrainte.
- \* La résistance au pic, le seuil de la non linéarité et la dilatance volumique sont fonction de la pression de confinement.
- \* La variation du volume de l'espace poreux  $\Delta m / \rho_o^{fl}$  dans les essais triaxiaux drainés est en accord avec la variation volumique globale d'échantillon
- \* Les comportements poroélastiques du matériau dans les chemins drainés et non drainés ainsi que le comportement mécanique de la matrice solide sont initialement isotropes et linéaires, jusqu'à au moins une contrainte hydrostatique de 60 MPa.
- \* L'étude de l'influence de l'endommagement sur le comportement poroélastique à travers « des essais monotones drainés avec des montées en pression des pores P », met en évidence une anisotropie de l'interaction fluide squelette dans le matériau due à la propagation des microfissures. Les valeurs des coefficients poroélastiques varient en fonction de l'évolution des microfissures.
- \* La variation de la perméabilité varie également avec la contrainte déviatorique.
- \* Les résultats issus « des essais monotones non drainés avec des chutes de la pression des pores P », confirment les mêmes constatations que dans les « essais monotones drainés avec des montées en pression des pores P » à savoir l'anisotropie du couplage hydraulique mécanique, et l'évolution des coefficients poromécaniques en fonction de

la dégradation orientée du matériau. La linéarité des courbes pression interstitielle - déformations dans ces essais est plus prononcée par rapport aux « essais monotones avec des montées en pression des pores  $P$  ». Pour les pressions de confinement  $P_c=10$  et  $30$  MPa, les pentes des courbes  $P-\varepsilon_3$  et  $P-\varepsilon_v$ , sont comparables dans les deux types d'essai.

\* Il y a une restitution des modules élastiques et poroélastiques après le déchargement complet du déviateur de contrainte, due à l'effet de refermeture de microfissures. En revanche, une telle restitution n'est pas obtenue pour la perméabilité.

\*La pression de pore après le déchargement déviatorique par rapport à sa valeur initiale lors du chargement en régime non drainé, augmente dans la zone contractante due à la déformation résiduelle, et elle diminue dans la zone dilatante due au développement des microfissures.

\* La dilatance volumique est accompagnée d'une diminution de la pression interstitielle dans tous les chemins de compression non drainés.

# **CHAPITRE IV**

## **EXPLOITATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX**

## IV.1 Essais Hydrostatiques : Détermination des Paramètres Poroélastiques du Matériau Non Endommagé

### IV.1.1 Calcul du Coefficient de Biot $b$

D'après les résultats obtenus au chapitre précédent, le matériau étudié présente un comportement poromécanique initial isotrope. Dans le cadre de la poroélasticité linéaire des milieux poreux homogènes et isotropes, le coefficient de la contrainte effective de Biot,  $b$ , peut être déterminé par les différentes méthodes présentées au §I.2.1.1. Ces méthodes sont basées sur les relations suivantes :

$$b = 1 - \frac{K_o}{K_s} \quad (IV.1)$$

$$b = \frac{1}{B_s} \left(1 - \frac{K_o}{K}\right) \quad (IV.2)$$

$$b = \frac{(\Delta \varepsilon_v)_{P \neq 0}}{(\Delta \varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0}} \quad (IV.3)$$

#### Estimation d'erreur

Les paramètres intervenant dans ces trois relations sont  $K_o$ ,  $K_s$ ,  $K$ ,  $B_s$  et  $\varepsilon_v$ . Ces derniers ont eux mêmes été calculés à partir de valeurs directement mesurables lors des essais, à savoir les déformations ( $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_3$ ) et les contraintes ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  et  $P$ ). L'erreur relative moyenne de la mesure des déformations ( $\frac{d\varepsilon_1}{\varepsilon_1}$ ,  $\frac{d\varepsilon_3}{\varepsilon_3}$ ) (due au problème du parallélisme d'échantillon, à la présence de la sous-couche des jauges, à la variation de la température, etc.), est estimée à 2%, celle sur la mesure des contraintes ( $\frac{d\sigma_1}{\sigma_1}$ ,  $\frac{d\sigma_3}{\sigma_3}$ ) et de la pression ( $\frac{dP}{P}$ ) à 1%<sup>1</sup>. L'erreur relative sur la valeur calculée de  $K_o$  peut donc être estimée à partir de la relation (I.32), soit:

$$K_o = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_v} \quad \text{et} \quad dK_o = \frac{d\sigma_m \varepsilon_v - d\varepsilon_v \sigma_m}{\varepsilon_v^2}$$

<sup>1</sup> Les valeurs données par le fabricant sont 1/600 bar et 0,5% (sur 50 tonnes) respectivement pour la pompe Gilson et la presse hydraulique (cf. également II.2.2).

Comme  $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ , on a.  $\frac{d\varepsilon_v}{\varepsilon_v} = 6\%$  On obtient alors :

$$\frac{dK_o}{K_o} = \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} + \frac{d\varepsilon_v}{\varepsilon_v} = 7\% \quad (IV.4)$$

De façon similaire, les erreurs relatives des paramètres  $K_s$ ,  $K$  et  $B_s$  peuvent être estimées :

$$\frac{dK_s}{K_s} = \frac{dK}{K} = 7\% \quad \text{et} \quad \frac{dB_s}{B_s} = 2\% \quad (IV.5)$$

En calculant les différentielles totales de  $b$  dans les relations (IV.1) à (IV.3), on peut donc estimer l'erreur relative (ou le pourcentage d'imprécision) dans la détermination du coefficient de Biot  $b$  par les différentes méthodes :

$$\frac{db}{b} = \frac{K_o}{K_s - K_o} \left( \frac{dK_o}{K_o} + \frac{dK_s}{K_s} \right) \quad (IV.6)$$

$$\frac{db}{b} = \frac{dB_s}{B_s} + \frac{K_o}{K - K_o} \left( \frac{dK_o}{K_o} + \frac{dK}{K} \right) \quad (IV.7)$$

$$\frac{db}{b} = \frac{d(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0}}{(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0}} + \frac{d(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0}}{(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0}} \quad (IV.8)$$

En utilisant les valeurs des paramètres poroélastiques obtenues au chapitre précédent (cf. tableaux III.7 et III.8), on obtient donc les valeurs du coefficient de Biot  $b$  ainsi que leur erreurs relatives commises sur les différentes méthodes de détermination. L'ensemble de ces valeurs sont répertoriées dans le tableau (IV.1).

Tableau IV.1: Valeurs du coefficient de Biot

Relation	Essai	b	db/b
$b = 1 - \frac{K_o}{K_s}$	drainé à P=0	0,81±0,027	3,3%
	à P=1 MPa	0,80±0,029	3,6%
$b = \frac{1}{B_s} \left( 1 - \frac{K_o}{K} \right)$	drainé à P=0	0,48±0,21	44%
	à P=1 MPa	0,40±0,22	55%
$b = \frac{(\Delta\varepsilon_v)_{P \neq 0}}{(\Delta\varepsilon_v)_{\sigma_m \neq 0}}$	à drainage dartiel	0,908±0,109	12%

Il est à noter que la valeur déduite de l'essai à drainage partiel est une valeur moyenne, calculée à partir de 19 valeurs distinctes déterminées en 19 paliers de chargement appliqués.

On ne voit pas de différence significative entre les valeurs obtenues des essais drainés effectués respectivement sans contre-pression ( $P=0$ ) et avec une contre-pression ( $P=1$  MPa.).

On remarque que les valeurs données par la première et la troisième méthode (relations IV.1 et IV.3) sont assez proches, et que les erreurs relatives sont faibles. Par contre la valeur donnée par la deuxième méthode (relation IV.2) est très éloignée de celles données par les deux autres précédentes, avec de plus une erreur relative nettement plus importante.

Il est à noter que des résultats similaires ont été obtenus par Sibai [SIBA. 1990] sur un grès dont le comportement est proche de celui étudié. La valeur du coefficient de Biot variait de  $b=0,77$  à  $0,86$  selon la méthode de détermination utilisée.

De plus les valeurs données par les relations (IV.1) et (IV.3) sont tout à fait comparables avec celle calculée à partir de la relation proposée par J. Gustkiewiez [GUST, 1988]. Cette relation est en fait une loi exponentielle ajustée sur les résultats issus de douze roches gréseuses (de porosité comprise entre 2 et 12 %), liant le rapport  $K_o/K_s$  et la porosité totale  $\phi$  des roches, soit (figure IV.1):

$$K_o / K_s = e^{-5,5 \text{tg}(\frac{\phi}{2})}$$

D'après cette formule la valeur du coefficient de Biot pour le grès testé avec une porosité totale ouverte de 20,7% (cf. §II.1.1) est de 0,84.

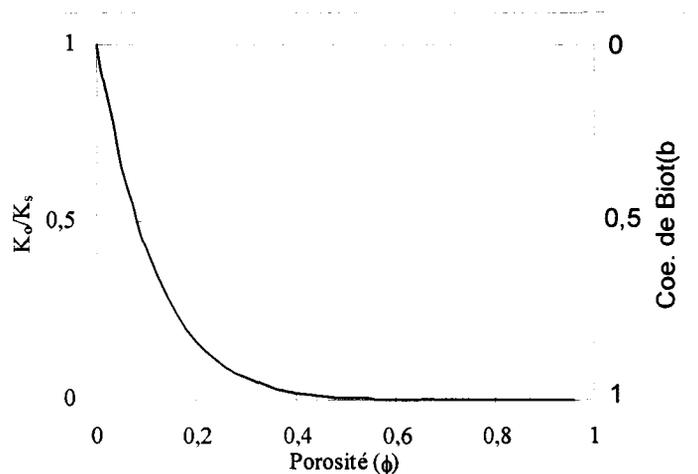


Figure IV.1 : Evolution du rapport  $K_o/K_s$  et dus coefficient de Biot avec la porosité sur douze roches gréseuses [J. Gustkiewiez, 1988]

## IV.2 Essais Triaxiaux : Evolution des Paramètres Poroélastiques en Fonction de l'Endommagement

Au chapitre précédent, nous avons mis en évidence, à travers différents chemins de sollicitations triaxiales, une anisotropie induite du comportement mécanique et poromécanique du matériau due au développement de microfissures orientées. Les paramètres mécaniques (les modules effectifs) et poroélastiques (coefficient de Biot, module de Biot) évoluent en fonction du niveau de l'endommagement.

Par la suite, on tentera de déterminer ces évolutions. L'objectif de l'analyse n'est pas de formuler une loi de comportement générale pour un milieu poreux avec l'endommagement anisotrope induit. On se limite donc au cas de sollicitations triaxiales de révolution ( $\sigma_2 = \sigma_3$  et  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ). Dans ce cas, le comportement du matériau endommagé est de type isotrope transverse et les directions principale des contraintes et des déformations coïncident avec les axes des symétries matérielles. Le tenseur des coefficients de Biot dans le repère principal est de la forme :

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \quad \text{avec } b_2 = b_3$$

### IV.2.1 Loi Incrémentale Tangente de la Poroélasticité Anisotrope

La théorie générale de la poroélasticité linéaire anisotrope a été proposée par Biot [BIOT. 1955] et étendue par d'autres chercheurs [CARR. 1979, par exemple]. Dans notre étude, comme les paramètres élastiques et poroélastiques effectifs du matériau dépendent de l'endommagement, la loi de comportement poromécanique du matériau sera donc non linéaire et anisotrope. Dans le cas d'un matériau endommageable, un développement théorique d'une loi poroélastique pour un milieu poreux avec endommagement induit a été proposé par Shao (SHAO 1998). Pour les matériaux plastiques, une formulation générale de la poroplasticité a été proposée par Coussy [COUS. 1991]. Nous ne donnons ici pas le détails de ces théories, nous nous proposons simplement d'appliquer les résultats issus de ces modèles.

Dans le cas d'un comportement non linéaire, il est préférable (et en général toujours possible) d'exprimer les équations d'état sous forme incrémentale. Par la suite, on s'intéressera uniquement au cas de chargement (avec évolution de l'endommagement ou de la plasticité), donc au comportement tangent du matériau. Tous les modules utilisés seront donc des modules tangents. L'hypothèse de petites perturbations est retenue. Dans une

transformation isotherme, la loi de comportement poroélastique incrémentale anisotrope s'écrit :

$$d\tilde{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{R}}_o : d\tilde{\sigma} + \tilde{\mathbf{H}} dP \quad (\text{IV.9})$$

$$\frac{dm}{\rho_o^{fl}} = \tilde{\mathbf{H}}^* : d\tilde{\sigma} + \frac{dP}{L} \quad (\text{IV.10})$$

Dans ces deux équations, nous avons noté :

$\tilde{\varepsilon}$  : le tenseur de déformation,

$\tilde{\sigma}$  : le tenseur de contrainte,

$\tilde{\mathbf{R}}_o$  : le tenseur d'ordre 4 des compliances élastiques tangentes du matériau endommagé en condition drainée,

$\tilde{\mathbf{H}}$  : un tenseur « tangent » d'ordre 2 du couplage dont les composantes dépendent des modules tangents et des coefficients de Biot du matériau endommagé,

$\tilde{\mathbf{H}}^*$  : un tenseur « tangent » d'ordre 2 du couplage dont les composantes dépendent des modules tangents et des coefficients de Biot du matériau endommagé,

L : un coefficient scalaire de couplage poroélastique dont la valeur dépend des modules tangents et des coefficients de Biot du matériau endommagé.

Sous l'hypothèse d'un matériau orthotrope le tenseur de compliances tangent drainé  $\tilde{\mathbf{R}}_o$ , dans le repère principal de la structure, est donné sous la forme suivante:

$$\tilde{\mathbf{R}}_o = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{o1}} & -\frac{\nu_{o21}}{E_{o2}} & -\frac{\nu_{o31}}{E_{o3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{o12}}{E_{o1}} & \frac{1}{E_{o2}} & -\frac{\nu_{o23}}{E_{o3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{o13}}{E_{o1}} & -\frac{\nu_{o23}}{E_{o2}} & \frac{1}{E_{o3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Le tenseur de couplage poroélastique  $\tilde{\mathbf{H}}$  s'écrit dans le repère principal structural :

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{H_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{H_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{H_3} \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

Dans le cas de sollicitations triaxiales cylindriques, le comportement est isotrope transverse, les formes précédentes se simplifient avec les égalités suivantes (cf. le repère de la figure IV.2) :

$$E_{02} = E_{03} \quad \nu_{012} = \nu_{013} \quad \nu_{021} = \nu_{031} \quad G_{12} = G_{13} \quad H_2 = H_3 \quad (IV.13)$$

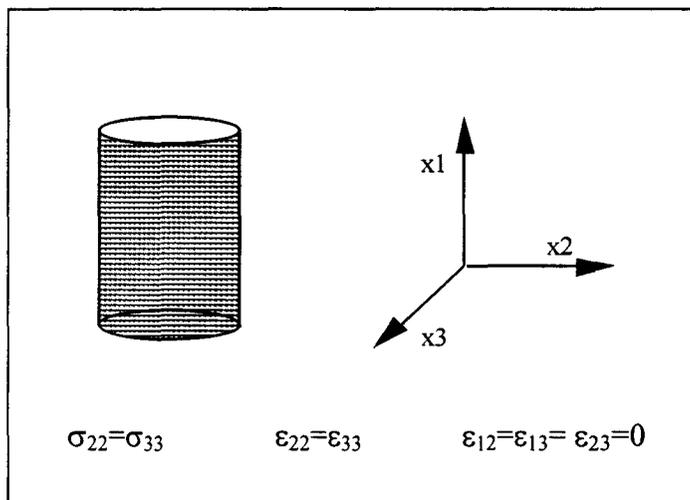


Figure IV.2 : Echantillon cylindrique et les directions principales

En utilisant la formule de Saint-Venant, le module de cisaillement tangent  $G_{23}$  peut être exprimé en fonction du module élastique et du coefficient de Poisson dans le plan de symétrie, soit :

$$2G_{23} = \frac{E_{02}}{1 + \nu_{023}}$$

On a alors huit composantes indépendantes ( $E_{01}$ ,  $E_{02}$ ,  $\nu_{012}$ ,  $\nu_{013}$ ,  $G_{12}$ ,  $H_1$ ,  $H_3$  et  $L$ ) qui déterminent le comportement poroélastique tangent du milieu poreux saturé. Il est essentiel de rappeler que ces composantes évoluent toutes en fonction de l'endommagement induit dans le matériau. Dans les paragraphes suivants, nous allons déterminer les valeurs expérimentales de ces composantes à partir des différents essais présentés au chapitre précédent.

#### IV.2.2 Application de la Loi

En utilisant les lois de comportement précédentes, appliquées au cas de sollicitation triaxiale de révolution, on obtient les relations suivantes :

$$d\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{o1}} d\sigma_{11} - \frac{2\nu_{o21}}{E_{o2}} d\sigma_{22} + \frac{1}{H_1} dP \quad (IV.14)$$

$$d\varepsilon_{22} = -\frac{\nu_{o12}}{E_{o1}} d\sigma_{11} + \left( \frac{1 - \nu_{o23}}{E_{o2}} \right) d\sigma_{22} + \frac{1}{H_2} dP \quad (IV.15)$$

$$\frac{dm}{\rho_o^n} = \frac{1}{H_1^*} d\sigma_{11} + \frac{2}{H_2^*} d\sigma_{22} + \frac{1}{L} dP \quad (IV.16)$$

La relation (IV.14) peut être inversée pour obtenir les relations contrainte - déformation :

$$d\sigma_{11} = d\varepsilon_{11} E_{o1} + 2\nu_{o21} \frac{E_{o1}}{E_{o2}} d\sigma_{22} - E_{o1} \frac{dP}{H_1} \quad (IV.17)$$

En reportant (IV.17) dans (IV.15), on obtient l'expression de la relation "contrainte - déformation" dans la direction  $x_2$  :

$$d\sigma_{22} = \left( \frac{E_{o2}}{1 - 2\nu_{o21} \cdot \nu_{o12} - \nu_{o23}} \right) (d\varepsilon_{22} + \nu_{o21} d\varepsilon_{11}) - b_2 dP \quad (IV.18)$$

où  $b_2$  est le coefficient de Biot dans cette direction et vaut :

$$b_2 = \left( \frac{E_{o2}}{1 - 2\nu_{o21} \cdot \nu_{o12} - \nu_{o23}} \right) \left( \frac{\nu_{o12}}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \quad (IV.19)$$

Prenons maintenant la relation (IV.14) et remplaçons la valeur de l'incrément de la contrainte  $d\sigma_{22}$  donnée par la relation (IV.18). Cela nous amène, après simplification, à la relation "contrainte - déformation" dans la direction  $x_1$  :

$$d\sigma_{11} = \left( E_{o1} + \frac{2\nu_{o21} \cdot \nu_{o12} E_{o1}}{1 - 2\nu_{o21} \cdot \nu_{o12} - \nu_{o23}} \right) d\varepsilon_{11} + \left( \frac{2\nu_{o21} E_{o1}}{1 - 2\nu_{o21} \cdot \nu_{o12} - \nu_{o23}} \right) d\varepsilon_{22} - b_1 dP \quad (IV.20)$$

avec :

$$b_1 = \left( \frac{E_{o1}}{1 - 2v_{o21} \cdot v_{o12} - v_{o23}} \right) \left( \frac{1 - v_{o23}}{H_1} + \frac{2v_{o21}}{H_2} \right) \quad (IV.21)$$

On voit que les valeurs « tangentes » de  $b_1$  et  $b_2$  peuvent être déterminées à partir de celles des coefficients indépendants, à savoir  $E_{o1}$ ,  $E_{o2}$ ,  $v_{o12}$ ,  $v_{o21}$ ,  $v_{o23}$ ,  $H_1$  et  $H_2$ .

### Estimation d'erreur

Nous allons calculer, tout d'abord, l'erreur relative sur l'évaluation de la valeur de  $b_2$ . Pour cela utilisons la relation (IV.19) et posons:

$$U = \frac{E_{o2}}{1 - 2v_{o21} \cdot v_{o12} - v_{o23}} \quad \text{et} \quad V = \frac{v_{o12}}{H_1} + \frac{1}{H_2} \quad (IV.22)$$

On a alors :

$$b_2 = U \cdot V \quad \text{et} \quad db_2 = V dU + U dV$$

Dans ce cas l'erreur relative commise sur l'évaluation de  $b_2$  est égale à:

$$\frac{db_2}{b_2} = \frac{dU}{U} + \frac{dV}{V} \quad (IV.23)$$

Les différentielles de  $U$  et  $V$  sont facilement calculées à partir de leur expression respective (IV.22), après simplification on a :

$$\frac{dU}{U} = \frac{dE_{o2}}{E_{o2}} + \frac{2v_{o21} \cdot v_{o12} \left( \frac{dv_{o21}}{v_{o21}} + \frac{dv_{o12}}{v_{o12}} \right) + v_{o23} \frac{dv_{o23}}{v_{o23}}}{1 - 2v_{o21} \cdot v_{o12} - v_{o23}} \quad (IV.24)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{v_{o12} H_2 \left( \frac{dH_2}{H_2} + \frac{dv_{o12}}{v_{o12}} \right) + H_1 \left( \frac{dH_1}{H_1} \right)}{v_{o12} \cdot H_2 + H_1} \quad (IV.25)$$

De la même manière, on peut estimer l'erreur relative de  $b_1$ . Prenons la relation (IV.21) et posons:

$$Z = \frac{E_{o1}}{1 - 2v_{o21} \cdot v_{o12} - v_{o23}} \quad W = \frac{1 - v_{o23}}{H_1} + \frac{2v_{o21}}{H_2} \quad (IV.26)$$

Nous avons alors :

$$b_1 = Z \cdot W, \quad db_1 = dZW + ZdW$$

et

$$\frac{db_1}{b_1} = \frac{dZ}{Z} + \frac{dW}{W} \quad (IV.27)$$

Les différentielles de Z et W sont données par :

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{dE_{o1}}{E_{o1}} + \frac{2v_{o21} \cdot v_{o12} \left( \frac{dv_{o21}}{v_{o21}} + \frac{dv_{o12}}{v_{o12}} \right) + v_{o23} \frac{dv_{o23}}{v_{o23}}}{1 - 2v_{o21} \cdot v_{o12} - v_{o23}} \quad (IV.28)$$

$$\frac{dW}{W} = \frac{H_2 \cdot v_{o23} \frac{dv_{o23}}{v_{o23}} + (H_2(1 - v_{o23})) \frac{dH_1}{H_1} + 2H_1 \cdot v_{o21} \left( \frac{dv_{o21}}{v_{o21}} + \frac{dH_2}{H_2} \right)}{H_2(1 - v_{o23}) + 2H_1 \cdot v_{o21}} \quad (IV.29)$$

L'erreur relative commise sur la détermination de chaque coefficient indépendant intervenant dans l'évaluation de  $b_1$  et  $b_2$ , est calculée de la même manière que pour les paramètres utilisés dans la détermination du coefficient de Biot initial  $b$  sous sollicitations hydrostatiques (cf. §IV.1). Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau (IV.2).

Tableau IV.2: Valeurs des erreurs relatives des différents coefficients indépendants

$\frac{dE_{o1}}{E_{o1}}$	$\frac{dE_{o2}}{E_{o2}}$	$\frac{dH_1}{H_1}$	$\frac{dH_2}{H_2}$	$\frac{dv_{o12}}{v_{o12}}$	$\frac{dv_{o21}}{v_{o21}}$	$\frac{dv_{o23}}{v_{o23}}$
3%	3%	3%	3%	4%	4%	4%

### IV.2.3 Calcul des Coefficients de Biot

Les coefficients indépendants intervenant dans l'estimation des coefficients de Biot pour un matériau endommagé, peuvent être déterminés à partir des paramètres obtenus par les différents essais. Le tableau (IV.3) résume les chemins de sollicitation utilisés et les coefficients concernés.

Tableau IV.3: Loi de comportement pour différents chemins de sollicitations

Essai triaxial	Condition du chargement	Relations	Module déterminés
monotone drainé	$d\sigma_{22} = 0$ $dP = 0$ $d\sigma_{11} \neq 0$	$d\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{o1}} d\sigma_{11}$ $d\varepsilon_{22} = -\frac{\nu_{o12}}{E_{o1}} d\sigma_{11}$ $\frac{dm}{\rho_o^{fl}} = \frac{1}{H_1^*} d\sigma_{11}$	$\frac{\nu_{o21}}{E_{o2}}$ $E_{o1}, \nu_{o12}$ $H_1^*$
monotone drainé avec char.-déchar. en $\sigma_{33}$	$d\sigma_{11} = 0$ $dP = 0$ $d\sigma_{22} \neq 0$	$d\varepsilon_{11} = -\frac{2\nu_{o21}}{E_{o2}} d\sigma_{22}$ $d\varepsilon_{22} = \left(\frac{1-\nu_{o23}}{E_{o2}}\right) d\sigma_{22}$ $\frac{dm}{\rho_o^{fl}} = \frac{2}{H_2^*} d\sigma_{22}$	$\frac{1-\nu_{o23}}{E_{o2}}$ $\frac{\nu_{o12}}{E_{o1}}, H_2^*$ $\sigma_{22} - \varepsilon_v$
monotone drainé avec des montées en pression P	$d\sigma_{11} = 0$ $d\sigma_{22} = 0$ $dP \neq 0$	$d\varepsilon_{11} = \frac{1}{H_1} dP$ $d\varepsilon_{22} = \frac{1}{H_2} dP$ $\frac{dm}{\rho_o^{fl}} = \frac{1}{L} dP$	$H_1, H_2$ $L$ $P - \varepsilon_v$

Nous rappelons que pour les pressions de confinement de 10, 20, 30 et 40 MPa, nous avons effectué les trois types d'essais mentionnés dans le tableau (IV.3). Les niveaux de la contrainte déviatorique choisis pour la réalisation "des montées de P" et "des cycles de chargement - déchargement en contrainte latérale  $\sigma_{22}$ " sont identiques (cf. les tableaux III.5 à III.9 et III.11 à III.14).

Dans chaque essai pour une pression de confinement donnée, nous nous plaçons alors sur un point précis de la courbe de contrainte déviatorique - déformation, et nous y déterminons les coefficients désignés dans le tableau (IV.3). Les tableaux (IV.4) à (IV.7) présentent, pour quatre pressions de confinement de 10, 20, 30 et 40 MPa, les valeurs des paramètres destinés à l'évaluation des coefficients de Biot.

Tableau IV.4: Valeurs des différents coefficients poroélastiques ( $P_c=10$  MPa)

$\sigma_1 - \sigma_3$	16% du pic	33%	49%	65%	81%
$H_1$	-60100	-84570	-116870	43510	43000
$H_2$	27040	21460	16250	7400	2690
$E_{o1}$	16700	16640	16480	15530	12415
$E_{o2}$	10025	8504	8378	6880	5525
$\nu_{o12}$	0,152	0,210	0,245	0,279	0,330
$\nu_{o21}$	0,177	0,185	0,189	0,214	0,202

Tableau IV.5: Valeurs des différents coefficients poroélastiques ( $P_c=20$  MPa)

$\sigma_1 - \sigma_3$	27% du pic	39%	52%	63%	74%
$H_1$	-163100	-329400	-330160	186550	163610
$H_2$	28230	27280	24140	19030	13220
$E_{o1}$	18400	18100	16190	16250	11420
$E_{o2}$	11845	11235	10110	9080	7060
$\nu_{o12}$	0,183	0,197	0,215	0,258	0,311
$\nu_{o21}$	0,169	0,164	0,158	0,159	0,151

Tableau IV.6: Valeurs des différents coefficients poroélastiques ( $P_c=30$  MPa)

$\sigma_1 - \sigma_3$	32% du pic	48%	62%	78%	85%
$H_1$	-185570	-261240	-272850	212540	188710
$H_2$	34040	30515	25285	17150	15740
$E_{o1}$	17950	16470	15790	12360	9930
$E_{o2}$	14460	13174	10915	8012	7377
$\nu_{o12}$	0,180	0,206	0,227	0,275	0,296
$\nu_{o21}$	0,227	0,208	0,195	0,193	0,196

Tableau IV.7: Valeurs des différents coefficients poroélastiques ( $P_c=40$  MPa)

$\sigma_1 - \sigma_3$	27% du pic	39%	52%	64%	76%
$H_1$	-86790	-118050	-353420	-376400	147010
$H_2$	36529	33714	31826	28733	22776
$E_{o1}$	20230	19960	20320	17410	15890
$E_{o2}$	14380	13400	12560	11120	8820
$\nu_{o12}$	0,177	0,196	0,214	0,230	0,246
$\nu_{o21}$	0,229	0,242	0,260	0,240	0,305

**Remarque IV.1:** Faute de pouvoir déterminer la valeur du coefficient de Poisson  $\nu_{23}$  dans les chemins triaxiaux de révolution, celle-ci est supposée égale à sa valeur initiale pour une

pression de confinement nulle, soit  $v_{23}=0,23$ . Par conséquent, la quantité  $dv_{23} / v_{23}$  est prise égale à zéro dans le calcul de l'erreur relative des coefficients  $b_1$  et  $b_2$ .

**Remarque IV.2:** Les valeurs présentées dans les tableaux ci-dessus ont toutes été calculées à partir des variations des déformations, en fonction de la contrainte ou de la pression de pore, mesurées par les jauges.

En utilisant les valeurs données par les tableaux (IV.4) à (IV.7), les valeurs des coefficients  $b_1$  et  $b_2$  ainsi que les erreurs relatives ont donc été calculées et sont présentées dans les tableaux IV.8 et IV.11 pour les pressions de confinement de 10, 20, 30 et 40 MPa.

Tableau IV.8: Evolution de  $b_1$  et  $b_2$  en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=10$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	16% du pic	33%	49%	65%	81%
$b_1$	0,006±,013	0,195±,030	0,405±,051	1,804±,190	3,278±,369
$db_1/b_1$	21,3%	15,4%	12,7%	10,5%	11,2%
$b_2$	0,482±,03	0,542±,036	0,735±,051	1,497±,115	3,292±,255
$db_2/b_2$	6,3%	6,7%	7,0%	7,7%	7,8%

Tableau IV.9: Evolution de  $b_1$  et  $b_2$  en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=20$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	27% du pic	39%	52%	63%	74%
$b_1$	0,189±,025	0,248±,029	0,248±,029	0,491±,050	0,465±,048
$db_1/b_1$	13,3%	11,7%	11,6%	10,2%	10,4%
$b_2$	0,574±,037	0,574±,038	0,587±,039	0,712±,050	0,809±,058
$db_2/b_2$	6,6%	6,7%	6,7%	7,0%	7,2%

Tableau IV.10: Evolution de  $b_1$  et  $b_2$  en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=30$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	32% du pic	48%	62%	78%	85%
$b_1$	0,240±,025	0,257±,029	0,291±,029	0,487±,050	0,440±,048
$db_1/b_1$	13,2%	11,7%	11,6%	10,2%	10,42%
$b_2$	0,597±,038	0,616±,038	0,620±,039	0,719±,050	0,734±,058
$db_2/b_2$	6,6%	6,7%	6,7%	7,1%	7,2%

Tableau IV.11: Evolution de  $b_1$  et  $b_2$  en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=40$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	27% du pic	39%	52%	64%	76%
$b_1$	0,107±,025	0,232±,029	0,415±,029	0,444±,050	0,822±,048
$db_1/b_1$	13,3%	11,7%	11,6%	10,2%	10,4%
$b_2$	0,529±,038	0,556±,038	0,587±,039	0,587±,050	0,649±,058
$db_2/b_2$	6,6%	6,7%	6,7%	7,1%	7,2%

### Interprétation

On constate que pour une pression de confinement donnée et à un niveau de contrainte déviatorique donné, les valeurs de  $b_1$  et  $b_2$  ne sont pas identiques. Compte tenu du caractère initialement isotrope du matériau, cela met clairement en évidence une anisotropie induite du couplage poroélastique par le développement de microfissures orientées sous l'effet du chargement déviatorique. On constate également que la valeur de  $b_1$  dans une direction donnée, pour tous les essais, évolue avec la contrainte déviatorique. Cela confirme l'évolution du coefficient  $b_i$  en fonction de l'évolution de l'endommagement. Conformément au mécanisme de propagation des microfissures (essentiellement dans la direction perpendiculaire à la contrainte principale mineure), la valeur de  $b_2$ , est plus importante que celle de  $b_1$ .

On observe que pour la pression de confinement de 10 MPa, les valeurs de  $b_1$  et  $b_2$  à 65% et 81% du pic sont à prendre avec beaucoup de précaution. En effet, la comparaison des courbes contrainte - déformation des trois essais utilisés pour les calculs (les essais mentionnés dans le tableau IV.3, à  $P_c = 10$  MPa), montre que l'essai monotone avec montée en  $P$  donne une résistance au pic moins importante que celles données par les deux autres essais. Cela peut provenir d'une anomalie quelconque dans le déroulement de l'essai, qui peut conduire à des valeurs anormales de  $b_1$  et  $b_2$  sur les deux derniers paliers.

Sans prendre en compte les valeurs suspectes de  $b_1$  et  $b_2$  pour la pression de confinement de 10 MPa, nous constatons que l'amplitude de variation de  $b_2$ , en fonction de la contrainte déviatorique, diminue avec la pression de confinement. Par contre celle de  $b_1$  augmente très nettement avec la pression de confinement jusqu'au quatrième palier de contrainte déviatorique. Sur les derniers paliers, on remarque une légère diminution de  $b_1$  avec le déviateur pour les pressions de confinement de 20 et 30 MPa ainsi qu'une augmentation très importante pour  $P_c = 40$  MPa.

Il est important de noter que l'amplitude de variation de  $b_2$  avec la contrainte déviatorique n'est pas uniforme. Les valeurs de  $b_2$  dans la zone contractante ont une variation, bien que croissante, assez faible (pratiquement jusqu'au troisième palier). Par contre, à partir de ce palier, qui se trouve dans la zone dilatante, cette variation devient de plus en plus forte. Cela est tout à fait en accord avec le mécanisme de propagation de microfissures sous l'effet du chargement déviatorique.

**Remarque IV.3 :** Pour les différents essais utilisés (notamment les essais monotones avec des cycles de chargement - déchargement en contrainte latérale  $\sigma_{33}$  et ceux avec des montées en pression interstitielle  $P$  à pressions de confinement de 10, 20, 30 et 40 MPa), nous avons

calculé les pentes initiales des courbes de déformation volumique en fonction de la contrainte latérale ( $\sigma_3-\varepsilon_v$ ), et de la pression interstitielle ( $P-\varepsilon_v$ ), (cf. les tableaux III.5 à III.9 et III.11 à III.14). La figure IV.3 donne la variation de ces pentes en fonction de la contrainte déviatorique.

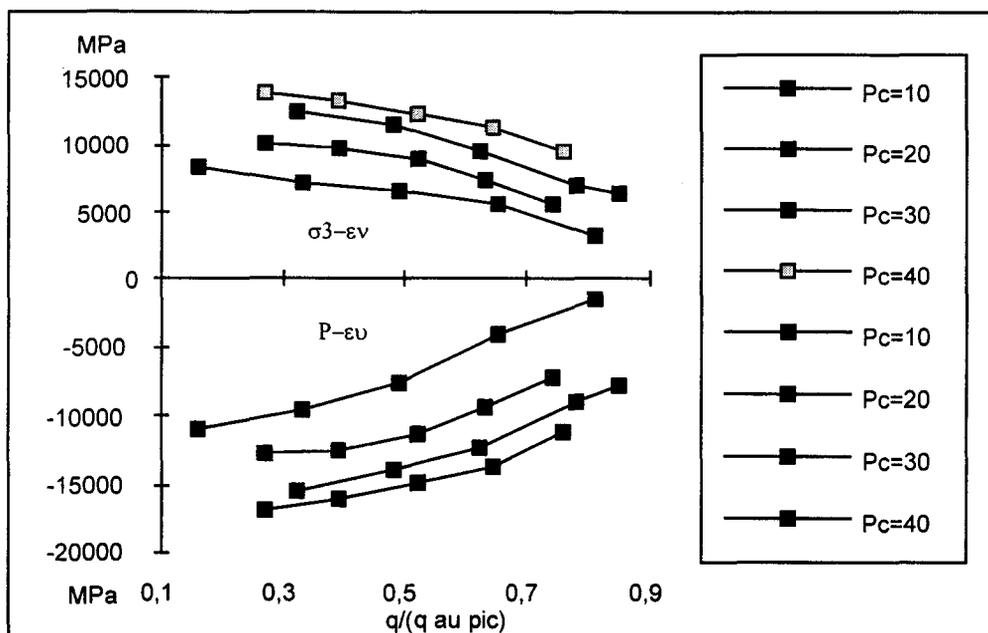


Figure IV.3 : Variation des modules volumiques en fonction de la contrainte déviatorique pour différentes pression de confinement ( $P_c$  en MPa)

On observe que, pour une pression de confinement donnée, malgré la diminution de ces pentes avec le déviateur de contrainte, les rapports entre les valeurs de ces différentes pentes restent à peu près constants (tableaux IV.12 à IV.15).

Tableau IV.12: Rapports des modules volumiques ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma_3$ ) et ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta P$ ) en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=10$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	16% du pic	33%	49%	65%	81%
$\sigma_3-\varepsilon_v(r)$	8430	7195	6490	5525	3190
$P-\varepsilon_v(s)$	11040	9535	7590	4100	1480
(r)/(s)	0,76	0,75	0,85	1,34	2,15

Tableau IV.13: Rapports des modules volumiques ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma_3$ ) et ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta P$ ) en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=20$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	27% du pic	39%	52%	63%	74%
$\sigma_3-\varepsilon_v(r)$	10150	9790	8920	7420	5690
$P-\varepsilon_v(s)$	12790	12515	11320	9380	7170
(r)/(s)	0,79	0,78	0,79	0,79	0,79

Tableau IV.14: Rapports des modules volumiques ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma_3$ ) et ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta P$ ) en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=30$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	32% du pic	48%	62%	78%	85%
$\sigma_3-\varepsilon_v(r)$	12540	11485	9470	6950	6370
$P-\varepsilon_v(s)$	15420	13965	12330	8960	7870
(r)/(s)	0,81	0,82	0,77	0,78	0,81

Tableau IV.9: Rapports des modules volumiques ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma_3$ ) et ( $\Delta\varepsilon_v/\Delta P$ ) en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=40$  MPa)

$\sigma_1-\sigma_3$	27% du pic	39%	52%	64%	76%
$\sigma_3-\varepsilon_v(r)$	13900	13330	12270	11300	9480
$P-\varepsilon_v(s)$	16820	16085	14805	13630	11120
(r)/(s)	0,83	0,83	0,83	0,83	0,85

Ces rapports, mis à part les deux derniers paliers pour  $P_c=10$  MPa, se situent dans une fourchette de 0,75 à 0,85. La valeur moyenne de ces rapports est très proche de la valeur initiale du coefficient de la contrainte effective de Biot  $b$ .

\* \* \*

### IV.3 Conclusion

\* Dans l'exploitation des résultats expérimentaux destinés à évaluer les différents paramètres mécaniques et poromécaniques, on a utilisé uniquement les résultats issus des mesures de déformations, car ils sont plus fiables par rapport aux mesures du fluide échangé.

\* La valeur initiale du coefficient de la contrainte effective de Biot  $b$ , déterminée à partir des essais de drainage partiel et des essais drainés est assez proche de celle déterminée à partir des essais non drainés. La valeur moyenne retenue est de  $b=0,85$ .

\* En se basant toujours sur les mesures de déformations, les différents paramètres mécaniques et poromécaniques ont été déterminés afin de calculer les composantes du tenseur Biot  $\tilde{B}$  « tangent » pour un matériau poroélastique avec l'endommagement anisotrope induit. On a constaté une évolution quantitative en fonction du déviateur de contrainte, en accord avec le mode de propagation des microfissures orientées.

**CONCLUSION  
GENERALE**

Les résultats issus des essais monotones avec cycles de chargement - déchargement latéral montrent clairement que l'anisotropie du comportement mécanique du grès, due essentiellement au développement des microfissures, se situe dans la direction perpendiculaire à la contrainte principale mineure et s'accroît au fur et à mesure que la contrainte déviatorique augmente.

L'étude poroélastique nous a montré que non seulement le comportement global drainé mais également le comportement global non drainé et celui de la matrice solide du matériau choisi, sont initialement isotropes et linéaires sous sollicitation hydrostatique jusqu'à 60 MPa. Elle nous a aussi donné les différents paramètres poroélastiques concernant ces comportements.

L'anisotropie du couplage poromécanique due à la dégradation orientée du matériau a été clairement mise en évidence par les essais monotones drainés avec montées en pression interstitielle  $P$  ainsi que par les essais monotones non drainés avec chutes de la pression interstitielle  $P$ . On y voit l'évolution des paramètres du couplage poromécanique en fonction de la contrainte déviatorique et donc avec la croissance des microfissures.

La variation de la perméabilité se révèle en totale concordance avec la variation volumique totale de l'échantillon malgré une évolution peu sensible en fonction de la variation de contrainte déviatorique. Compte tenu du caractère orienté des microfissures dans le sens perpendiculaire à la direction de la contrainte principale mineure, il aurait été plus intéressant de mesurer la variation de la perméabilité dans la direction de cette contrainte. Ceci n'était pas faisable dans le cas du dispositif utilisé dans cette étude. Toutefois, une telle mesure peut apporter plus de lumière à l'égard de l'influence des microfissures sur la perméabilité.

L'interaction fluide - squelette après le déchargement déviatorique total se montre quasi isotrope pour le grès testé, mais elle dépend vraisemblablement de la pression de confinement, autrement dit l'anisotropie du couplage dans ce cas est liée à la pression de confinement et augmente avec celle-ci.

Malgré une bonne saturation des échantillons grâce à la mise au point d'une procédure adaptée au matériau, la mesure des variations de l'espace poreux, à partir de la mesure du fluide injecté ou expulsé par l'intermédiaire du capillaire, donne des valeurs considérablement plus grandes par rapport aux variations volumiques totales des échantillons ce qui n'est évidemment pas normal. Pour surmonter ce problème il faudrait que les essais drainés soient réalisés dans certaines conditions particulières :

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire était l'étude expérimentale du comportement poromécanique d'une roche endommageable explorant plus particulièrement les effets de la microfissuration induite sur les paramètres du couplage fluide squelette, et de créer une banque de données expérimentales.

Un grès de Vosges de porosité totale égale à 20,7% a été choisi pour cette étude. Les principales raisons de ce choix ont été tout d'abord l'aspect très homogène de ce grès à l'échelle des échantillons retenus, sa porosité suffisamment élevée pour une saturation rapide et la détection aisée des effets du fluide saturant, enfin un comportement fragile dû à la présence dominante du quartz.

Un dispositif expérimental, adapté aux objectifs de notre étude, a été mis au point pour la réalisation des différents chemins de sollicitation :

- le chemin isotrope comprenant des essais en régime drainé (sur des échantillons secs et saturés), non drainé, à drainage partiel et à  $\Delta\sigma_m = \Delta P$ ,
- le chemin déviatorique monotone (sur des échantillons secs et saturés) ou avec cycles de chargement - déchargement axial et latéral, en cas drainé et aux différentes pressions de confinement,
- le chemin déviatorique monotone ou avec cycles de chargement - déchargement axial en cas drainé avec des montées en pression interstitielle  $P$  et détermination de la perméabilité, ainsi qu'en cas non drainé avec chutes de la pression interstitielle  $P$ , aux différentes pressions de confinement,
- les chemins de chargement proportionnel, d'extension latérale, de compression triaxiale monotone ou avec cycles de chargement - déchargement axial en régime non drainé.

Il convient alors de résumer les grandes lignes des résultats obtenus à travers les essais effectués:

Les différents essais effectués sur les échantillons non saturés nous montrent que le grès testé est initialement isotrope avec une porosité de microfissuration naturelle inférieure à 0,5% de la porosité totale et qu'il possède un comportement fragile. L'origine de la déformation anélastique de ce grès est donc le développement de microfissures. Cette microfissuration est orientée et affecte le comportement mécanique du matériau. Le matériau, a un caractère dilatant et présente une légère part de déformation axiale résiduelle après le déchargement axial total. La résistance au pic, le seuil d'apparition de non linéarité (en fait d'apparition de microfissures) et la dilatance dépendent de la contrainte latérale appliquée ( $P_c$ ). La méthodologie utilisée a suivi une procédure expérimentale simple utilisant les chemins de sollicitation classiques dans le laboratoire.

-à une pression interstitielle supérieure à zéro. Dans ce cas, la saturation initiale serait mieux conservée au sein de l'échantillon. Le fluide saturant pourrait pénétrer plus facilement dans l'espace poreux engendré, soit sous la forme de microfissures soit par interconnexion de porosité occluse,

-à l'aide d'un générateur de pression capable de récupérer ou d'injecter du fluide afin de maintenir la pression des pores constante, quelle que soit la valeur de celle-ci,

-avec une mesure automatique, à l'aide du générateur de pression, du volume du fluide échangé à la pression constante appliquée et non à la pression atmosphérique,

-et enfin, effectuer tous les étalonnages nécessaires pour éliminer les problèmes liés aux gonflements de la cellule et des tuyauteries du circuit du fluide.

Quant aux chemins non drainés, nous avons pour la première fois effectué des essais avec une sollicitation proportionnelle et d'extension latérale en régime non drainé. Les résultats issus de ces essais ainsi que des essais triaxiaux monotones non drainés confirment l'anisotropie du comportement mécanique du grès et montrent une parfaite concordance entre les variations de la pression interstitielle et du volume total d'échantillon en fonction de la contrainte déviatorique. Les variations significatives de la pression interstitielle  $P$  lors de l'application des cycles déchargement - rechargement axial en régime non drainé mettent bien en évidence l'effet indiscutable du développement des microfissures sur la pression interstitielle  $P$ .

Nous avons déterminé le coefficient de la contrainte effective de Biot à l'état non endommagé à partir de trois méthodes d'expérimentation différentes. Les valeurs données dans le cas d'essais drainés et à drainage partiel sont tout à fait comparables.

En utilisant une forme incrémentale de la loi poroélastique, nous avons évalué les valeurs des composantes du tenseur de Biot  $\tilde{B}$  en fonction de la contrainte déviatorique pour quatre pressions de confinement. Les valeurs obtenues mettent en évidence, d'une façon quantitative, l'anisotropie de l'interaction fluide-squelette due essentiellement à la dégradation orientée du matériau.

En perspective, un modèle de comportement poromécanique tenant compte de l'effet de la microfissuration induite pourra être développé à partir des observations obtenues lors de la présente étude. La calibration et la validation du modèle pourront être effectuées en utilisant divers de la base de données expérimentales présentée.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

[ARUS. 1985] ARUSO L., SIMMON G., WILKENS R. : “*The physical properties of a set of standstones part I The samples*”, Int. J. Rock Mechanic Min. Sci. & Geomech. Abstrac, vol. 22 N° 6, pp. 381-392

[BARY. 1996] BARY B. : “*Etude du couplage hydraulique mécanique dans le béton endommagé*”, Thèse de doctorat, E.N.S. de Cachan, Université Paris VI

[BIOT. 1941] BIOT M.A. : “*General theory of three dimentional consolidation*”. J. Appl. phys., Vol. 12, P. 155-164

[BIOT. 1955] BIOT M.A. : “*Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid*”. J. Appl. phys., Vol. 26, n° 25, February, P. 182-185

[BIOT. 1956a] BIOT M.A. : “*General solution of the equations of elasticity and consolidation for porous material*”. J. Appl. Mech., March, P. 91-96

[BIOT. 1956b] BIOT M.A. : “*Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid*”, J. Appl. Phys., Vol. 27, p 459-467

[BIOT. 1957] BIOT M.A. WILLIS D. G. : “*The elastic coefficients of the theory of consolidation*”, J. Appl. Mech., Vol. 28, P. 594-601

[BIOT. 1961] BIOT M.A. : “*Incrimental elastic coeffieints of an isotropic medium in finite strain*”, J. of all. sci. Res., Section A Vol. 12, p. 151-167

[BIOT. 1965] BIOT M.A. : “*Mechanics of incremental deformation*”, John Wiley, New York

[BIOT. 1972] BIOT M.A. : “*Theory of finite deformation of porous solids*”, J. Ind. Univ. Math., Vol. 21, p. 597-620

[BIOT. 1973] BIOT M.A. : “*Non linear and semilinear rheology of porous solids*”, J. of Geophy. Res., Vol. 78, n° 23, Aug., p. 4924-4937

[BOUR. 1986] BOURBIE T., COUSSY O., ZINSZNER B. : “*Acoustique des milieux poreux*”, publication de l'IFP, N° 27 Editions Technip, Paris

[BOUR. 1991] BOURDAROT E.: “*Application of porodamage model to analysis of concrete dam*”, EDF/CNEH 1991

[BOUR. 1992] BOURDAROT E.: “*Study of pore pressures in the foundations of arch dam*”, Int. Symposiun on Arch Dams 1992

[BOUR. 1994] BOURDAROT E, BARY B.: “*Effects of temperature and pore pressure in the non linear analysis of arch dam*”, Dam Fracture and Damage, E. Bourdarot et al., Editors, pp 187-194, Chambéry, France march 1994

- [BOUT. 1994] BOUTECA M., SARDA J.P. : “*éléments de thermoporoélasticité*”, Ecole de Mécanique des milieux poreux, Aussois, 30 mai- 4 juin
- [BOUT. 1994] BOUTECA M., SARDA J.P. : “*Mesure expérimentale des coefficients thermoporoélastique*”, Ecole de Mécanique des milieux poreux, Aussois, 30 mai- 4 juin
- [BRUH. 1993] BRÜHWILER E., SAOUMA V. : “*Water fracture interaction in cracked concrete dams*”, Dam Fracture, Proc. from the int. Con., Boulder, Colorado pp 553-568, 1993
- [CHAR. 1989] CHARLEZ PH. : “*Le problème du puits en thermoporoélasticité plane*”, Total Compagnie Française des pétroles, Centre de recherche de Beauplan, N° 1153
- [CHAR. 1990] CHARLEZ PH. : “*Couplage*”, Cours de DEA Génie Civil, Ecole Universitaire d’ingénieur de Lille (EUDIL), USTL
- [CHAR. 1991] CHARLEZ PH. : “*Rock Mechanics, theoretical fundamentals*”, Vol 1, Editions Technip., Paris
- [CARR. 1979] CARROL M. M. : “*An effective stress law for anisotropic elastic déformation*”. J. Geophy. Res., Vol 84, n° B13, Decembre, P; 7 510-7 512
- [CARR. 1980] CARROL M. M. : “*Mechanical response of saturated porous materials*”, Int. Cong. Theo. & appl. Mech., Toronto, Aug. p. 251-262
- [CORM. 1994] CORMERY F. : “*Contribution à la modélisation de l’endommagement par mésosfissuration et du phénomène de localisation associe*”, Thèse de doctorat, université de Poitiers
- [COUS. 1989] COUSSY O. (1989): “*A general theory of thermoporoelastoplasticity for saturated porous materials*”, Transport in porous media, 4, p. 281-293
- [COUS. 1991] COUSSY O. : “*Mécanique des milieux poreux*”, Editions Technip., paris
- [COUS. 1994a] COUSSY O., DANGLA P. : “*Thermomécanique des milieux poreux en tant que milieux continus ouverts*”, Ecole de Mécanique des milieux poreux, Aussois, 30 mai- 4 juin
- [COUS. 1994b] COUSSY O., DANGLA P. : “*le comportement poroplastique*”, Ecole de Mécanique des milieux poreux, Aussois, 30 mai- 4 juin
- [DORM. 1996] DORMIEUX L. : “*Etude de la prise en compte du couplage fluide-squelette en mécanique des milieux poreux : Formulation du critère de rupture et de la loi de comportement*”, Mémoire d’habilitation, Université Pierre et Marie Curie
- [FAUC. 1991] FAUCHET B. : “*Analyse poroplastique des barrages en béton et de leur fondation, Rôle de la pression interstitielle*”, Thèse de Doctorat, Ecole National des Ponts & Chaussées
- [GEER. 1957a] GEERTSMA J. A. : “*A remar on analogy between thermoelasticity and the elasticity of saturated porous media*”, J. Mech. Phys. solide, 6, p. 13-16

- [GEER. 1957b] GEERTSMA J. A. : “*The effect of fluid pressure decline on volumetric change of porous rocks*”, A.I.M.E. Trans 210, 331
- [GIRA. 1993] GIRAUD A. : “*Couplage thermo-hydro-mécaniques dans les milieux poreux peu perméable, Application aux argiles profondes*”, Thèse de Doctorat, Ecole National des Ponts & Chaussées
- [GREC. 1995a] GRECO GÉOMATÉRIAUX ): “*Les géomatériaux, Théories expériences et modèles*”, premier volume, Edition Hermès, Paris
- [GREC. 1995b] GRECO GÉOMATÉRIAUX : “*Mécanique des géomatériaux*”, deuxième volume, Edition Hermès, Paris
- [HAID. 1995] HAIED A. : “*Etude expérimentale de la rupture en mode localisé dans un grès*”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille
- [HOMA. 1986] HOMAND F. : “*Comportement mécanique des roches en fonction de la température*”, mémoire sciences de la terre, septembre, Editions de F.S. de le Géo l. et de la sciences appliqué
- [IKOG. 1990] IKOGOU S. : “*Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un grès*”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille
- [KARA. 1993] KARAMI M.H. : “*Interaction du gaz-milieu granulaire*”, mémoire de DEA, Ecole centrale de Lille, USTL, Etude menée en collaboration contractuelle avec IFP
- [KARA. 1997] KARAMI M.H., SIBAI M., SHAO J.F. : “*Etude expérimentale et la modélisation du comportement poromécanique d'une roche endommageable*”, 13ème Congrès Français de Mécanique, Poitier, Futuroscope, 1-5 septembre
- [KAZA. 1995] KHAZRAIE R. : “*Etude expérimentale et modélisation de l'endommagement anisotrope des roches fragiles*”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille
- [KHER. 1994] KHERBOUCHE R. : “*Etude expérimentale du comportement poroélastoplastique de la craie*”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille
- [LEMA. 1988] LEMAITRE J. & CHABOCHE J. L. : “*Mécanique des matériaux solides*” deuxième Edition Dunod
- [MAC. 1986] MAC TIGUE D. F. : “*Thermoelastic response of fluid saturated porous rocks*” J. of Geophysical Research, Vol. 91, N° B9, p 9533-9542
- [MAZA. 1984] MAZARS J. : “*Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structures*”, Thèse d'état, Université Paris VI
- [MILN. 1940] MILNER H. : “*Sedimentary petrography*”, London, Thomas murby & Co.

[NIAN. 1994] NIANDOU H. : “*Etude du comportement rhéologique et modélisation de l'argilite de Tournemire. Application à la stabilité d'ouvrages souterrains*”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille

[ORTE. 1994] ORTEGA B. DE G. : “*Développement d'une cellule triaxiale haute pression pour essais sur roches poreuses saturés. Application aux grès*”, thèse de doctorat, université Joseph Fourier-grenoble I

[PANE. 1979] PANET M. : “*La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil*”, A.A.I.A.E de l'Ecole National des Ponts & Chaussées

[PHAM. 1992] PHAM D. V. : “*Modélisation de l'endommagement par microfissuration induisant un comportement anisotrope*”, Compte rendu de la 1<sup>er</sup> partie d'étude dans le cadre de collaboration entre LMPM-ENSMA, IFP et TOTAL, Mars

[RAMT. 1990] Ramtani S. : “*Contribution à la modélisation du comportement multiaxial du béton endommagé avec description du caractère unilatéral*”, Thèse de Doctorat, E.N.S. de Cachan, Université Paris VI

[REIC. 1994] REICH R.W., BRUHWILER E., SLOWIK V., SAOUMA V.E. : “*Experimental and computational aspects of a water/fracture interaction*” Dam Fracture and Damage, E. Bourdarot et al., Editors, pp 177-183, Chambéry, France march 1994

[REUS. 1990] REUSCHIL T. : “*Mesures thermoporoélastiques*”, Total Compagnie Française des pétroles, Centre de recherche de Beauplan, rapport N° 1177

[RICE. 1975] RICE J. R., RUDNICKI J. W. : “*Condition for the localization of deformation in pressure sensitive dilatant materials*”, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 23, p 371-394

[RICE. 1976] RICE J. R., CLEARY M, P. : “*Some basic stress diffusion solution for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents*”, Reviews of geophysic & space 14, 227-241

[RUDN. 1985] RUDNICKI J. W. : “*Effect of pore fluid diffusion on deformation and failure of rock*”, Mechanic of geomaterials, Edited by Bazant Z., John Wiley & Sons ltd, p 315-347

[SHAO 1998] SHAO J. f., SIBAI M., KARAMI M. H. : “*Theoretical and experimental investigation of poroelasticity in porous materials*”, Biot Conference on poromechanics, Université catholique de Louvain, Louvain-la-neuve, Belgium, Septembre 14-16, 1998

[SIBA. 1990] SIBAI M. : “*Etude de l'interaction fluide-squelette dans les roches méthodes expérimentales et modélisation*”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille

[SKOC. 1996] SKOCZYLAS F. : “*Écoulement et couplage fluide-squelette dans les milieux poreux*”, Mémoire d'habilitation, LML, Ecole centrale de Lille

[TERZ. 1925] TERZAGHI K. : “*Principles of soil mechanics*”, New York, McGraw-Hill

[THOM. 1979] THOMAS L.B. : "*Deformation of chalk under confining and por pressure*" , European offshore petroleum conference and exhibition, London, 27 Oct. p; 327-336

[VAN. 1959] VAN DER KNAAP W. : "*Non linear of elastique porous media*" , Petroleum transaction A.I.M.E., Vol. 216, p. 179-187

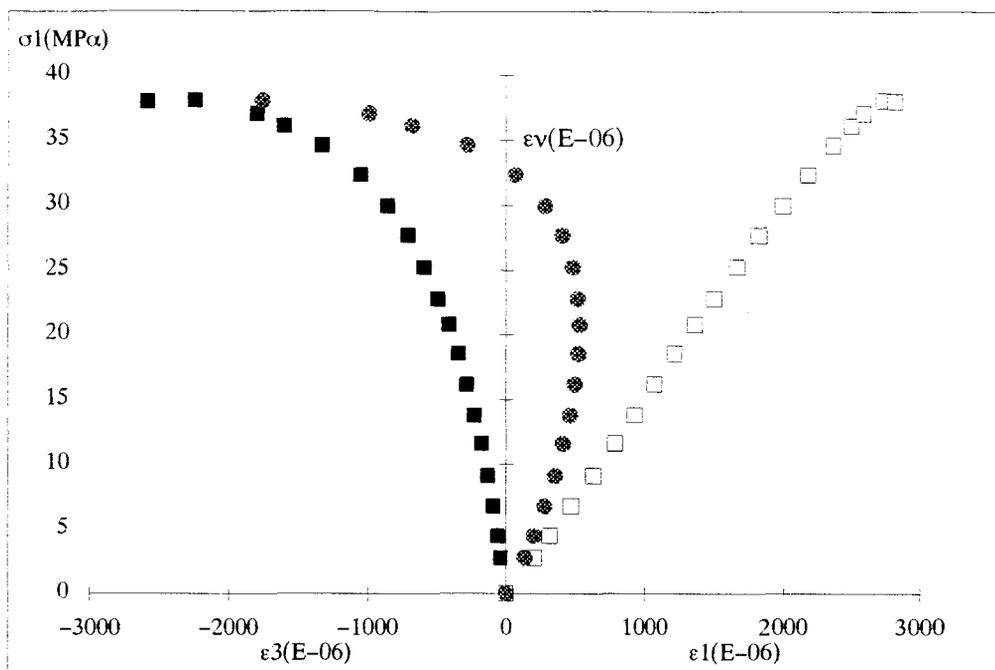
[YAMA. 1981] YAMADA S.E., SCHATZ J. F., ABOU SAYED A., JONES A.H. : "*Elasto-plastic behavior of porous rock under undrained condition*" , Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., V. 18, p. 177-179

[ZIMM. 1986] ZIMMERMAN R. W., SOMERTON W.H., KING M. S. : "*Compressibility of porous rocks*", J. Geophysical Reserch, Vol. 91 N°B12, p 12,765-12,777

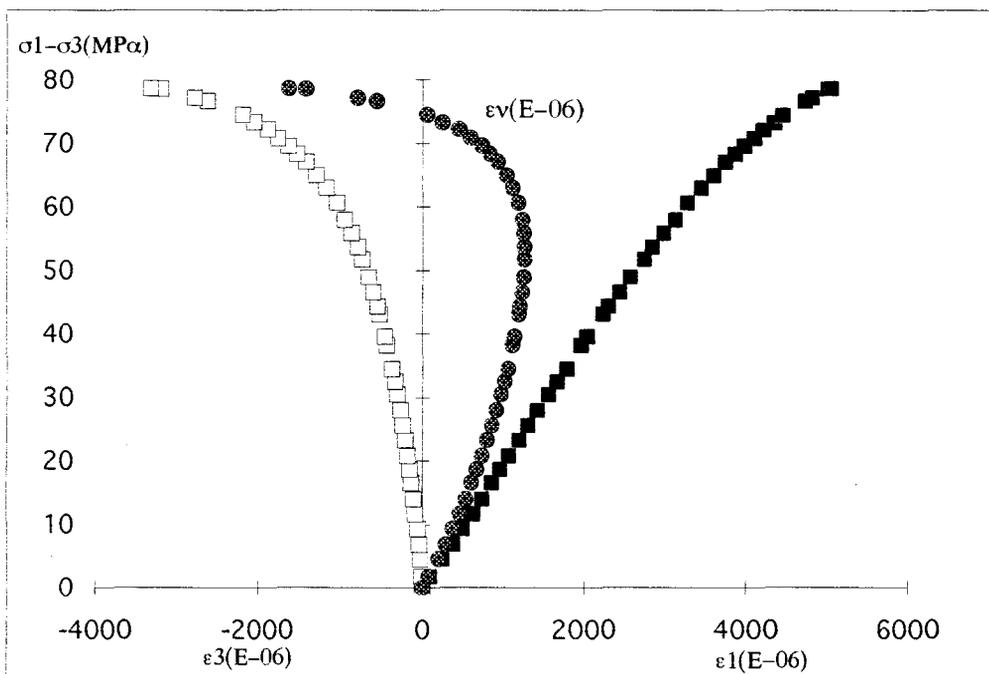
[ZIMM. 1991] ZIMMERMAN R. W. : "*Compressibility of Sandstones*", University of California, Berkeley, CA 94720, USA

# **ANNEXE I**

## **RESULTATS DES ESSAIS EFFECTUES**

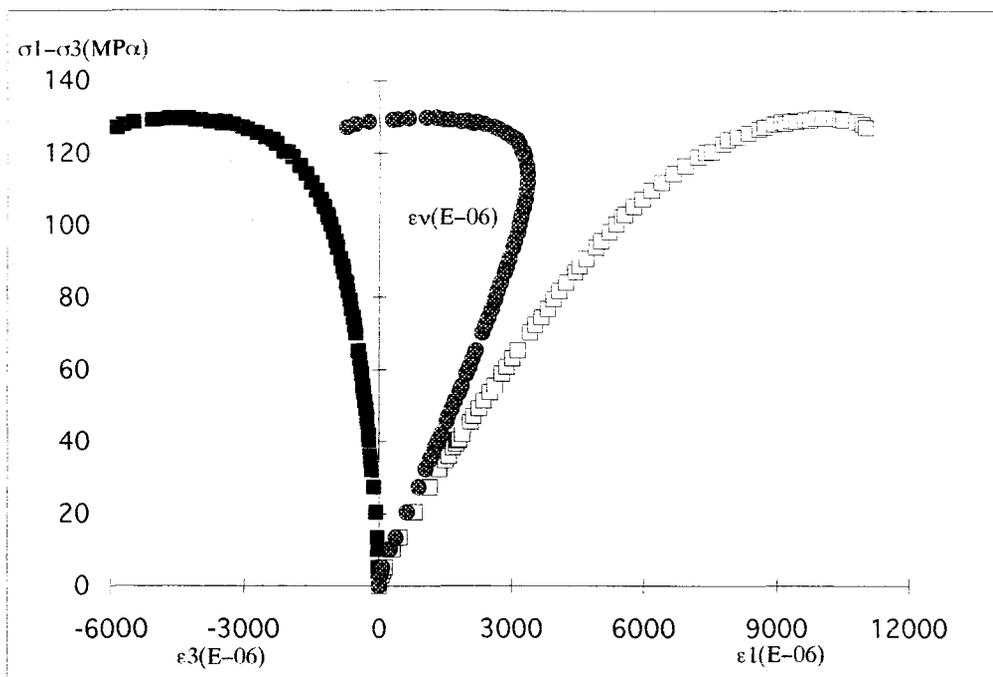


$P_c=0,0$  MPa

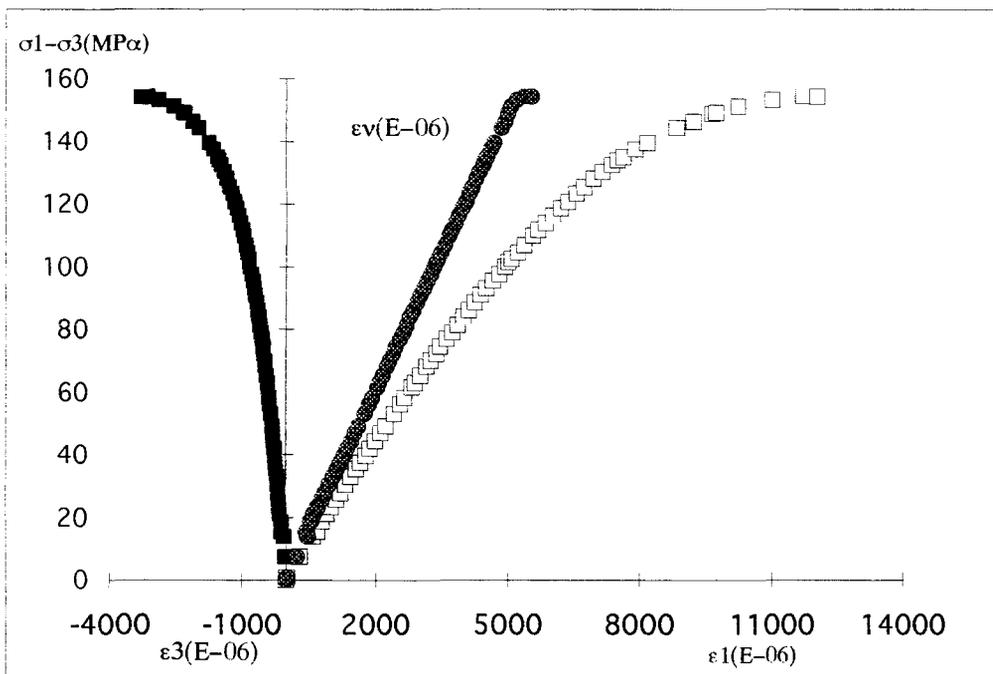


$P_c=5,0$  MPa

Figure AI.1: Essais triaxiaux monotones sur échantillons non saturés

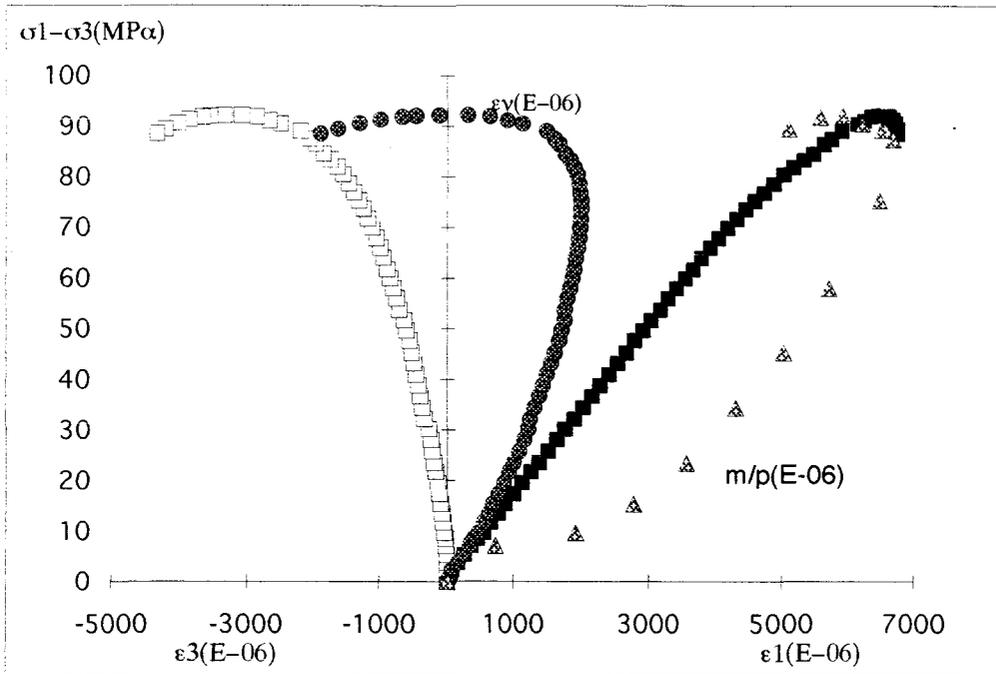


Pc=20 MPa

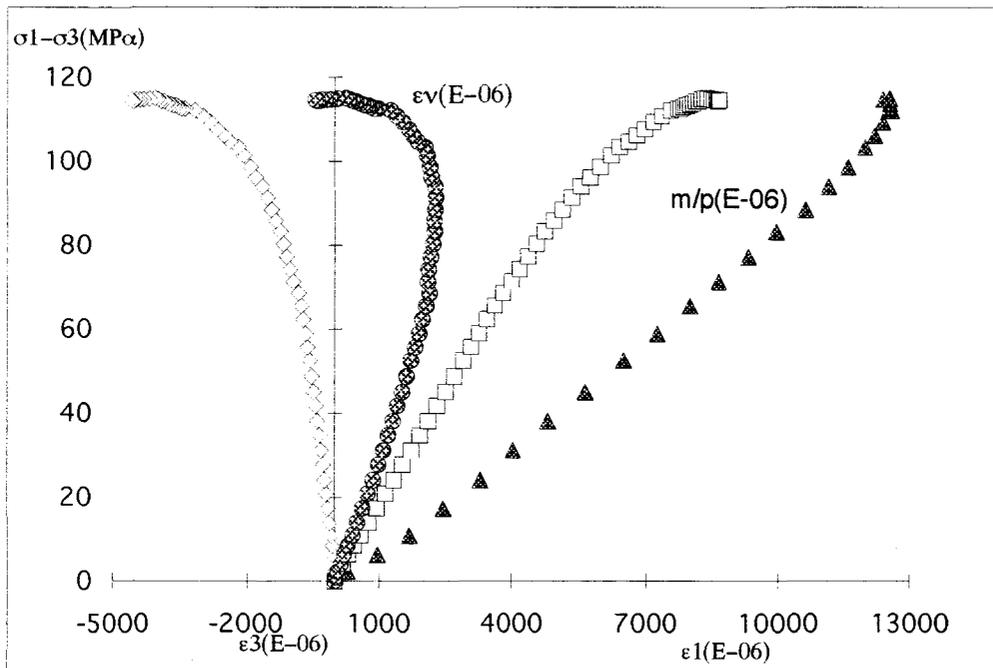


Pc=30,0 MPa

Figure AI.1: Suite

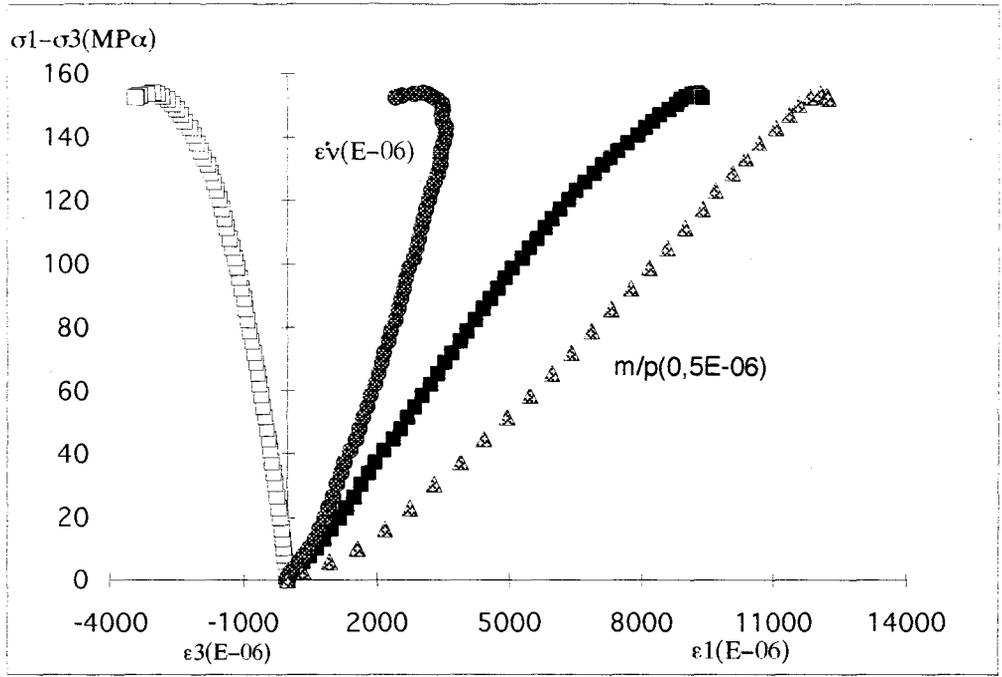


$P_c = 10,0$  MPa

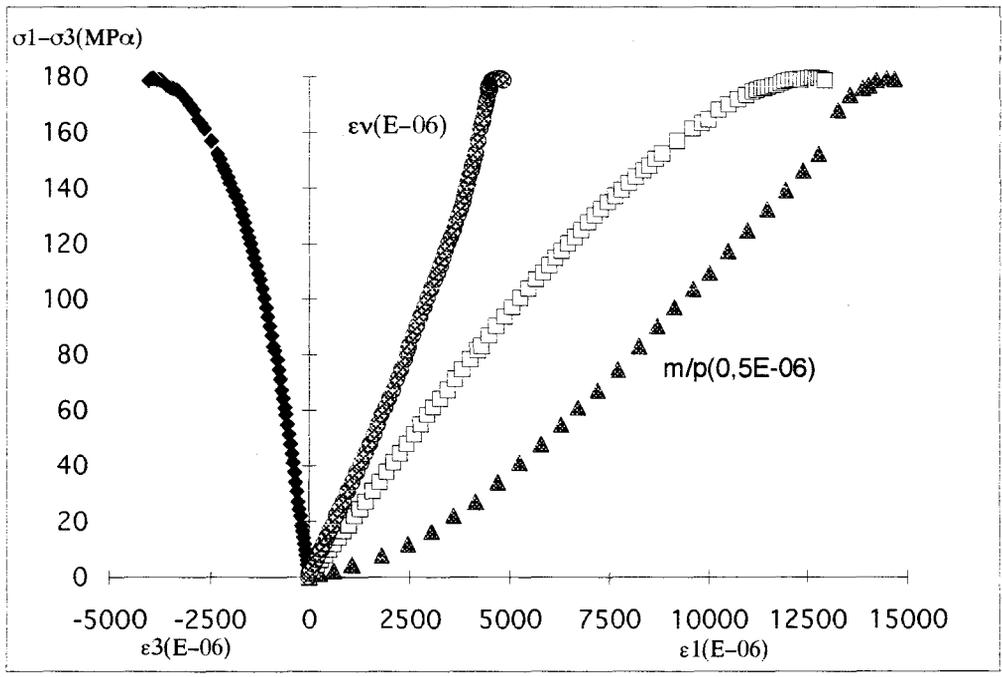


$P_c = 20,0$  MPa

Figure AI.2: Essais de compressions triaxiale monotone drainée sur échantillons saturés

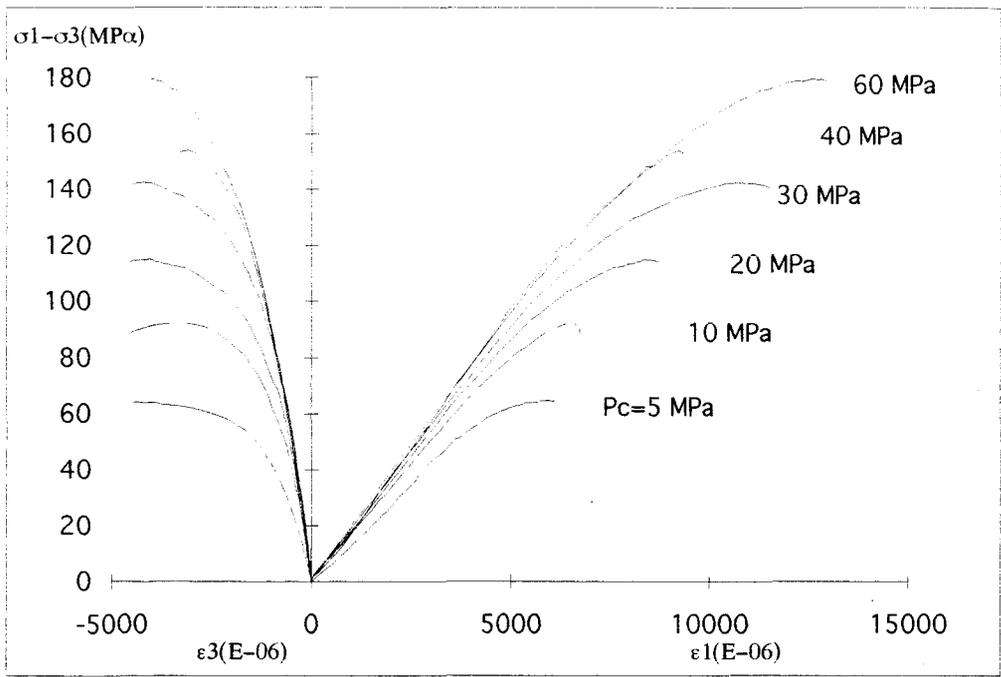


$P_c = 40,0$  MPa

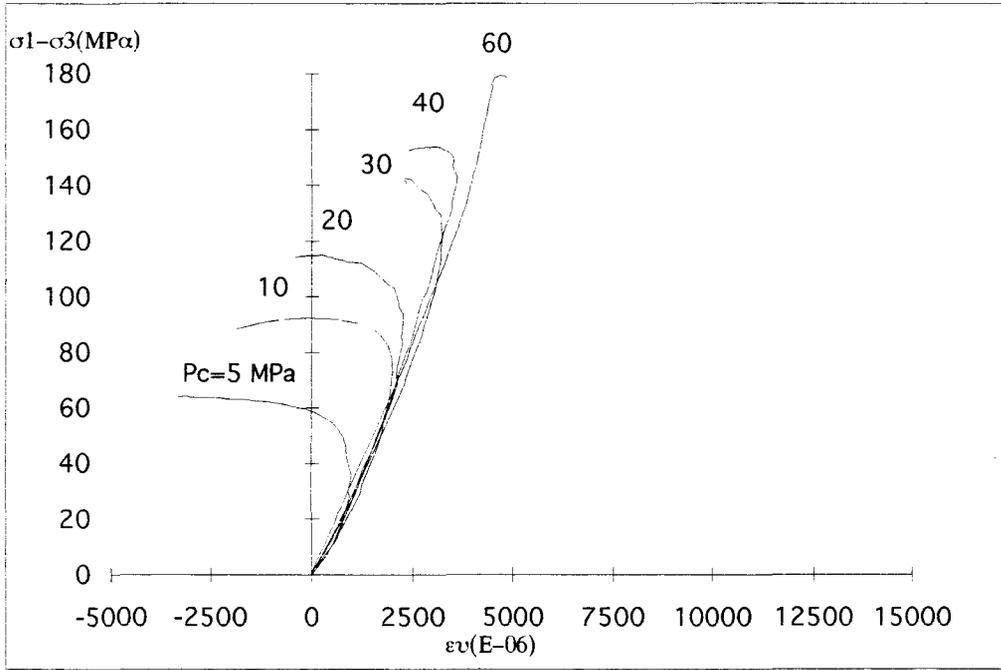


$P_c = 60,0$  MPa

Figure AI.2: Suite

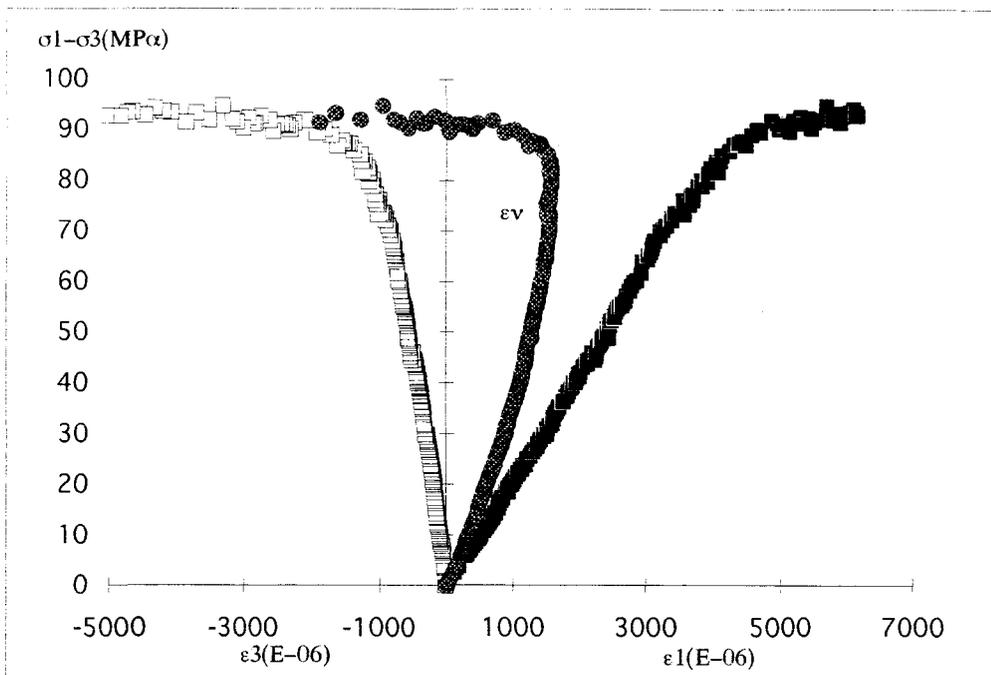


Superposition des variations des déformations

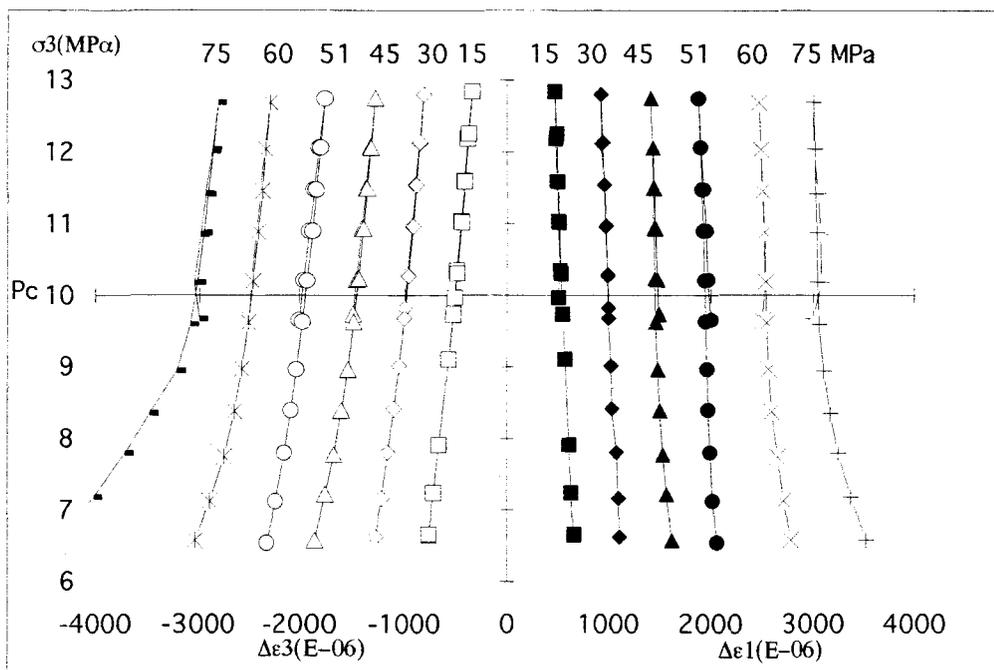


Superposition de la variation volumique

Figure AI.2: Suite

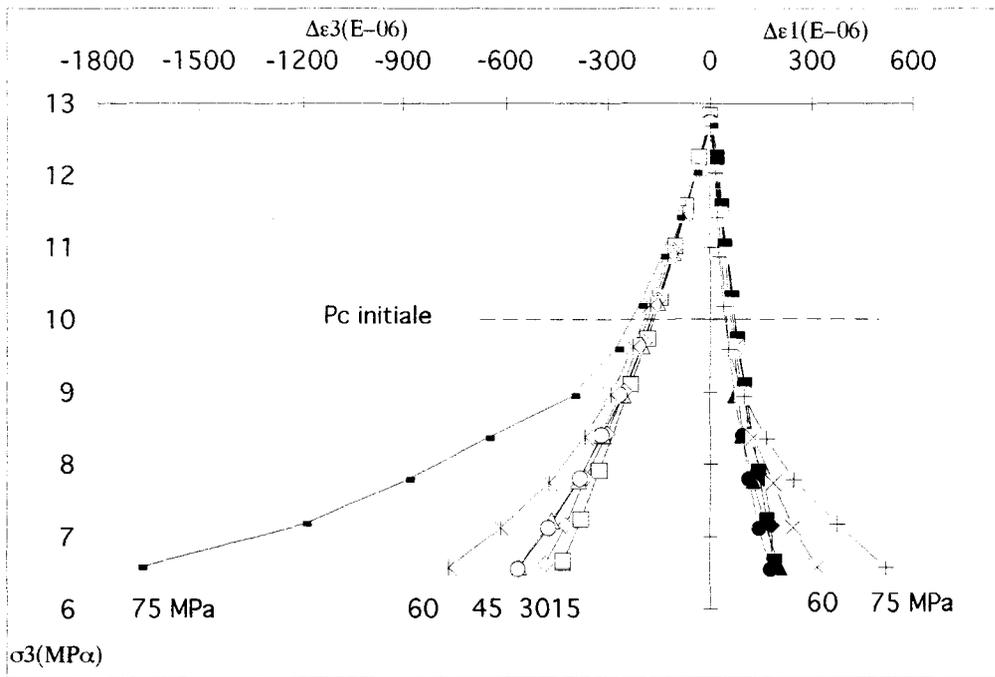


a) Courbes lissées de contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=10$  MPa)

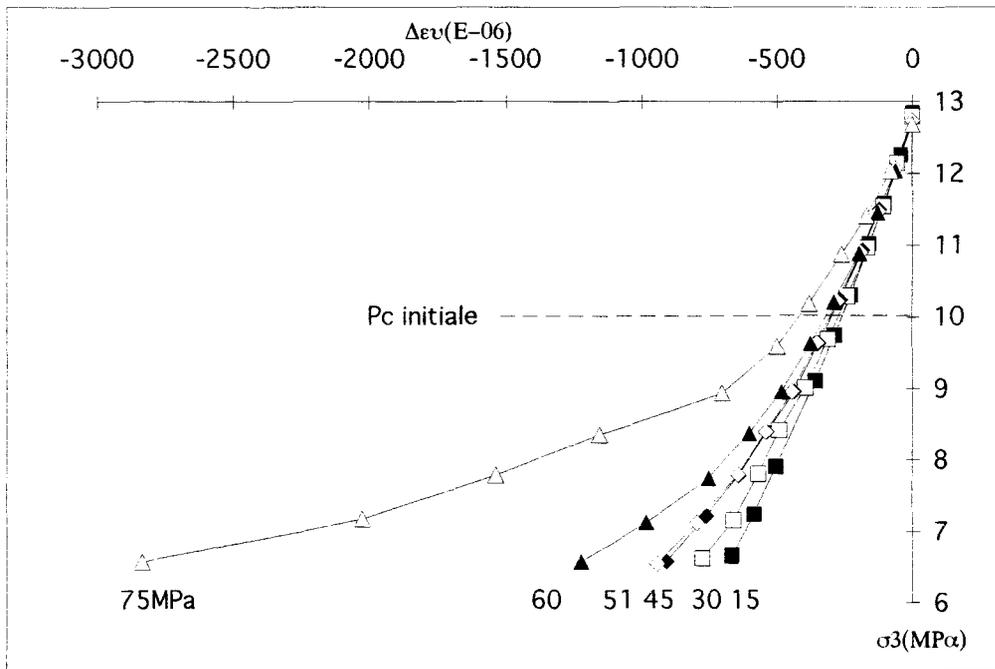


b) Chargement-déchargement latéral et déformations ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.3: Essai avec cycles de chargement-déchargement latéral drainé ( $P_c=10$  MPa)

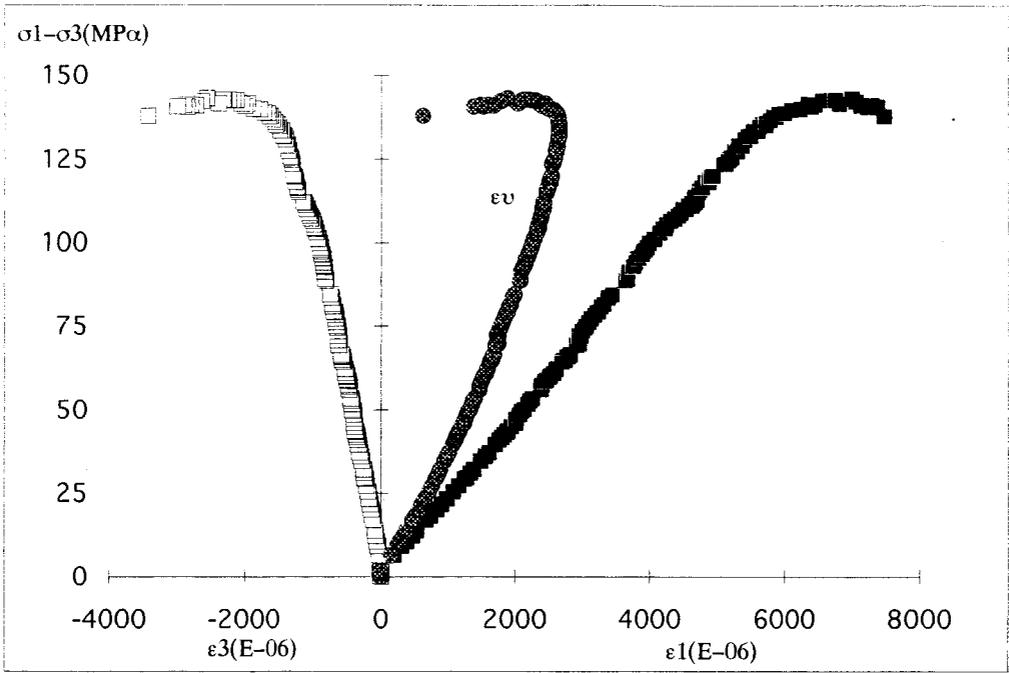


c) Déchargement latérale et déformations ( $P_c=10$  MPa)

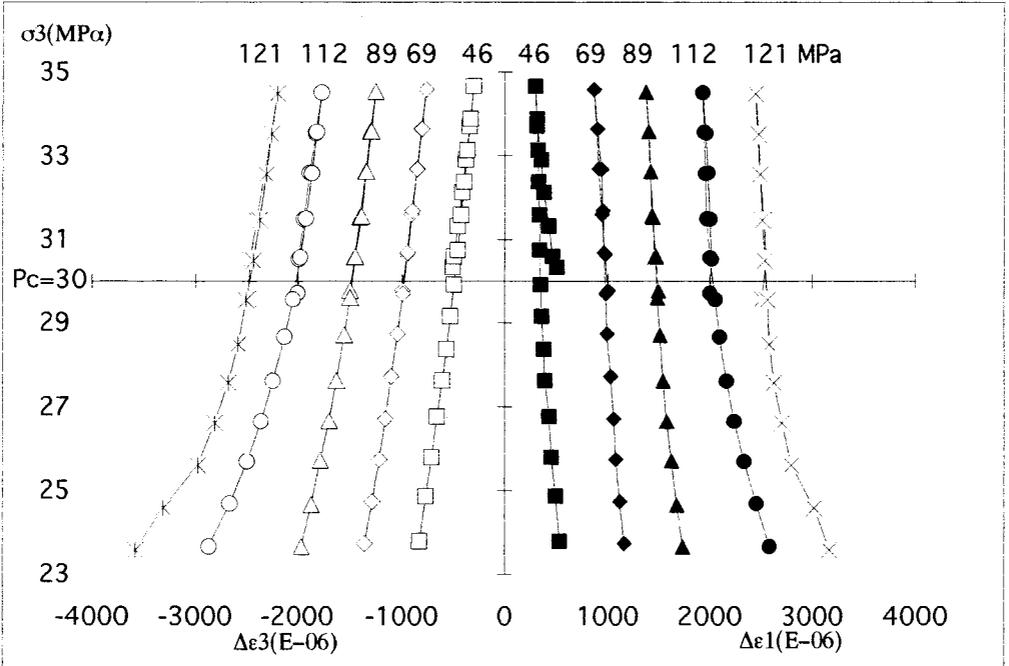


d) Déchargement latéral et variation volumique ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.3: Suite

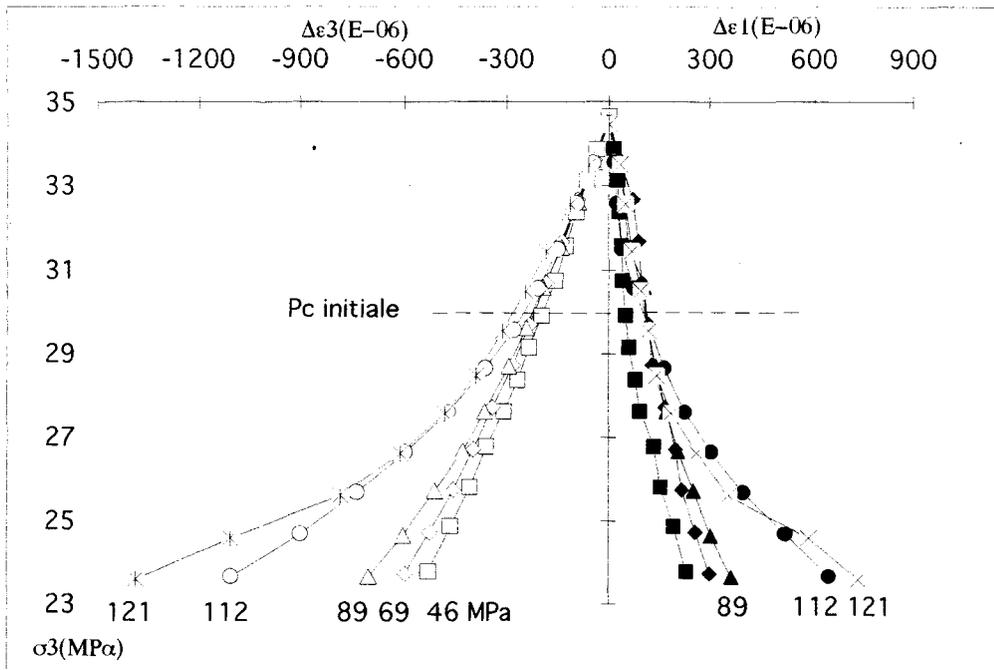


a) Courbes lissées de contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=30$  MPa)

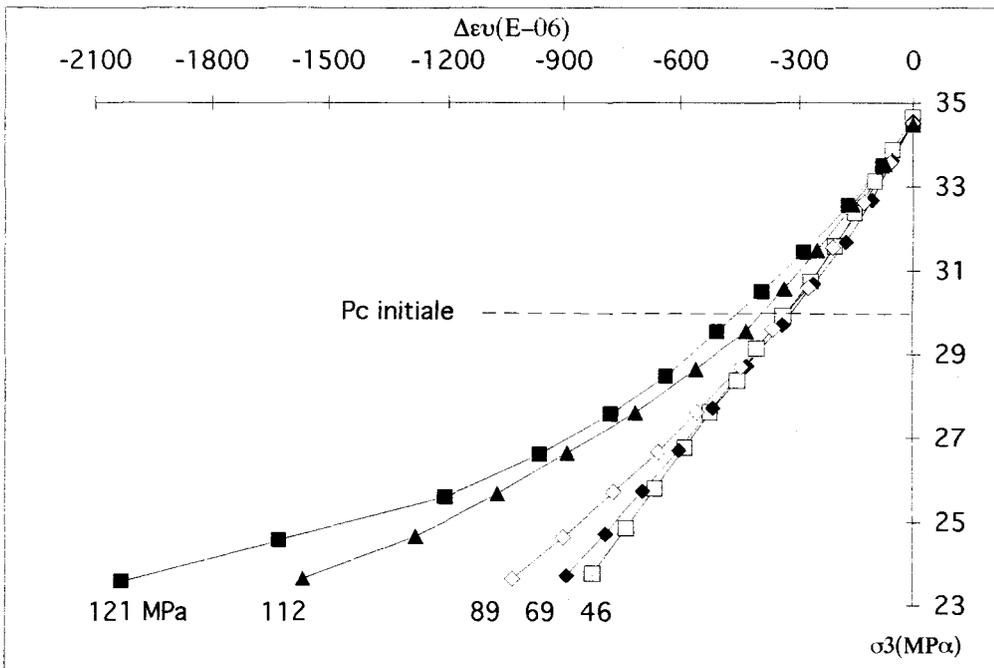


b) Chargement-déchargement latéral et déformations ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.4: Essai avec cycles de chargement-déchargement latéral drainé ( $P_c=30$  MPa)

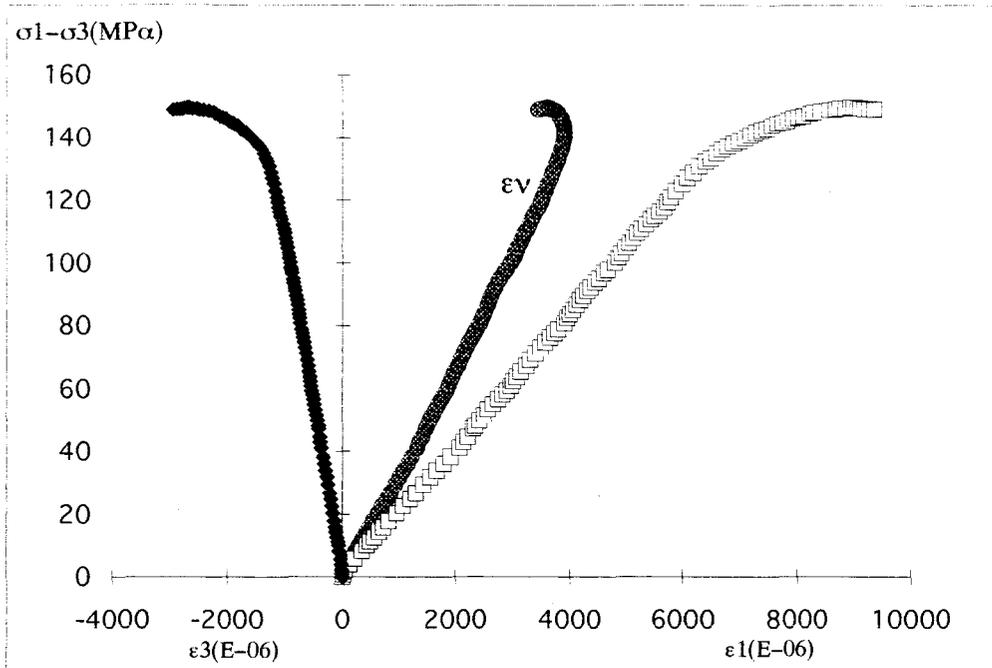


c) Déchargement latéral et déformations ( $P_c=30$  MPa)

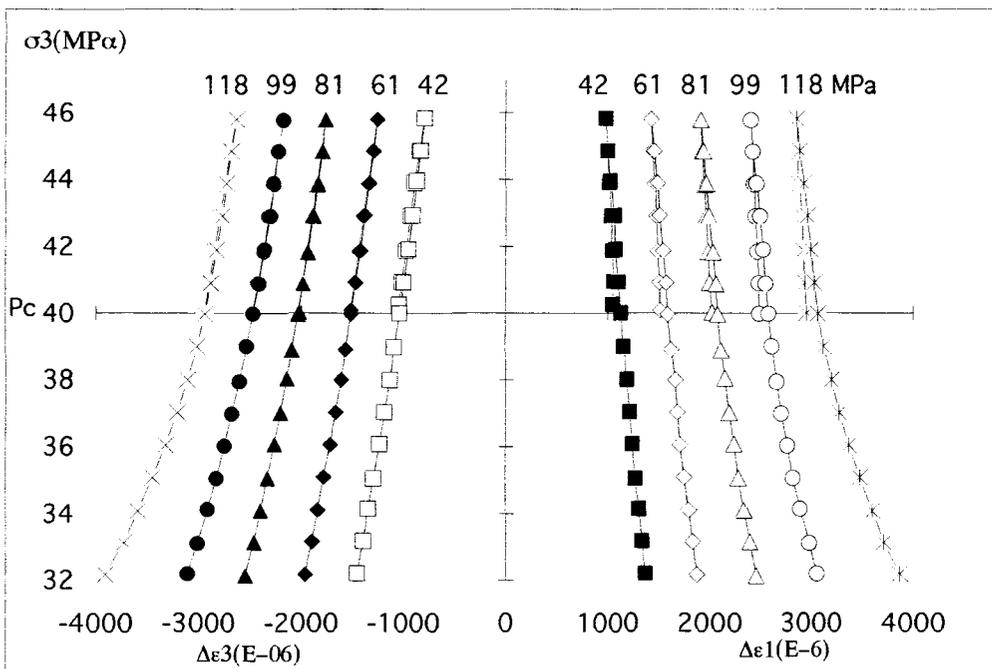


d) Déchargement latéral et variation volumique ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.4: Suite

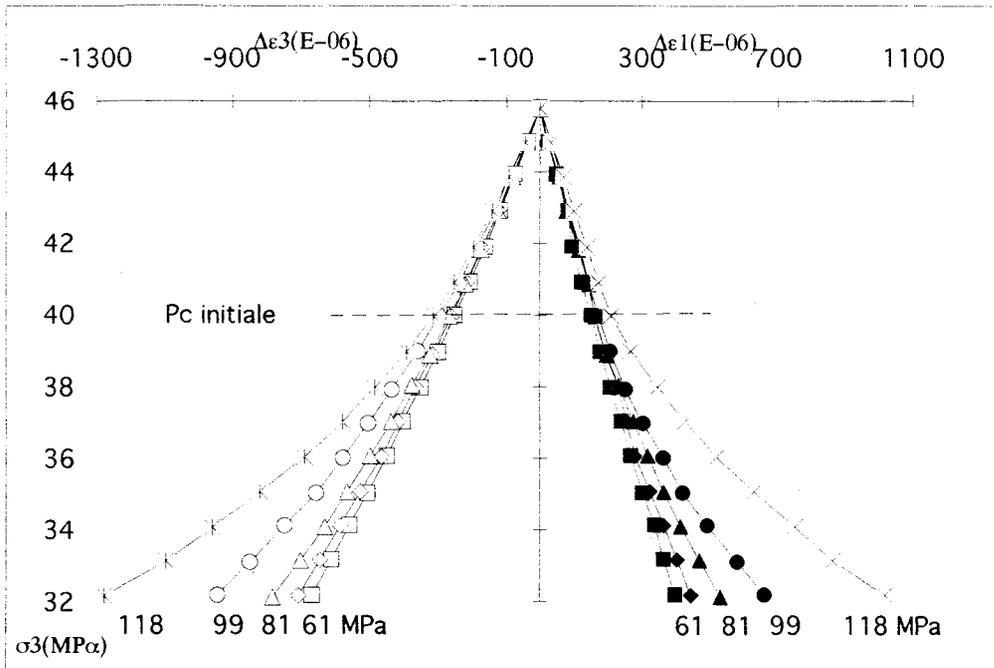


a) Courbes lissées de contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=40$  MPa)

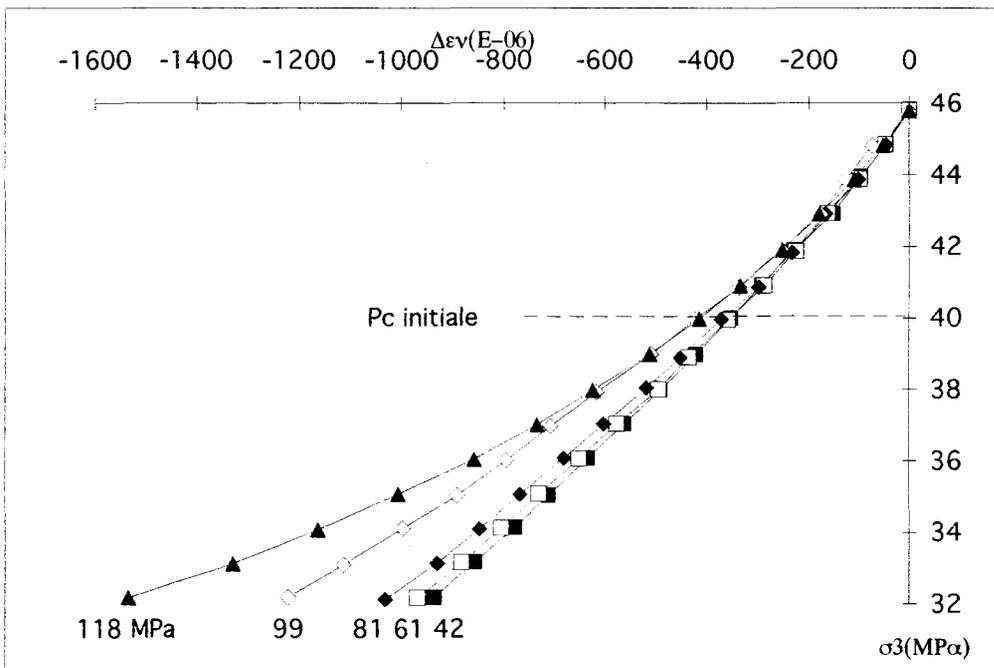


b) Chargement-déchargement latéral et déformations ( $P_c=40$  MPa)

Figure AI.5: Essai avec cycles de chargement-déchargement latéral drainé ( $P_c=40$  MPa)

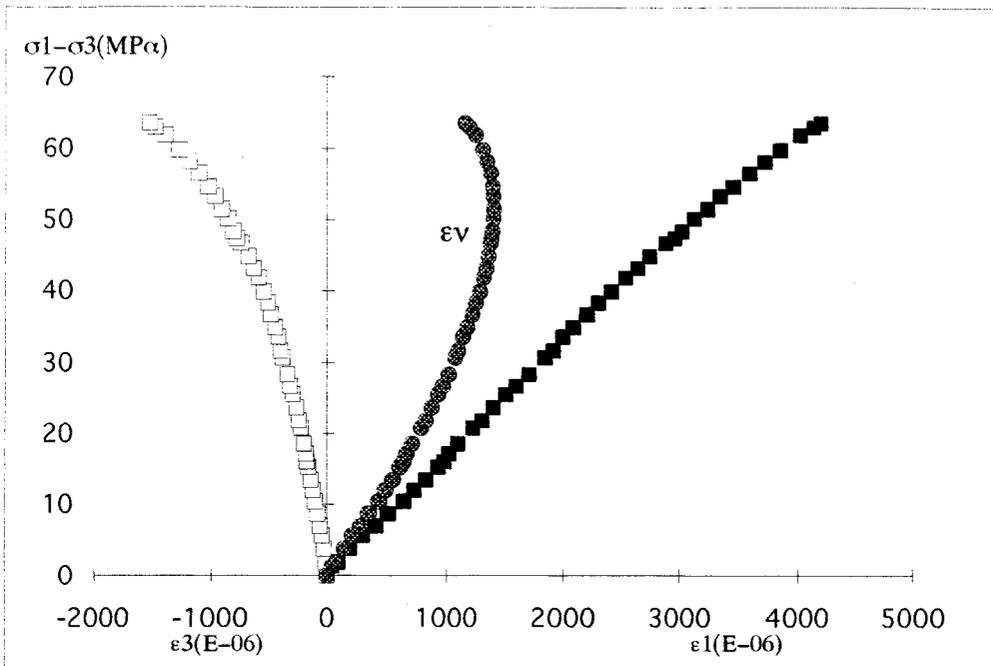


c) Déchargement latéral et déformations ( $P_c=40$  MPa)

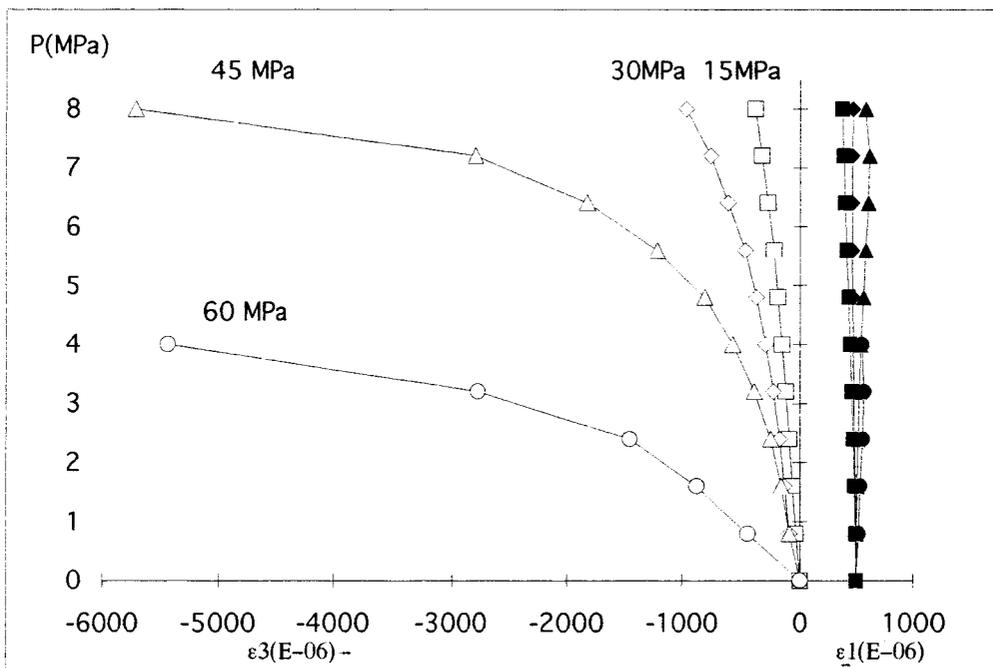


d) Déchargement latéral et variation volumique ( $P_c=40$  MPa)

Figure AI.5: Suite

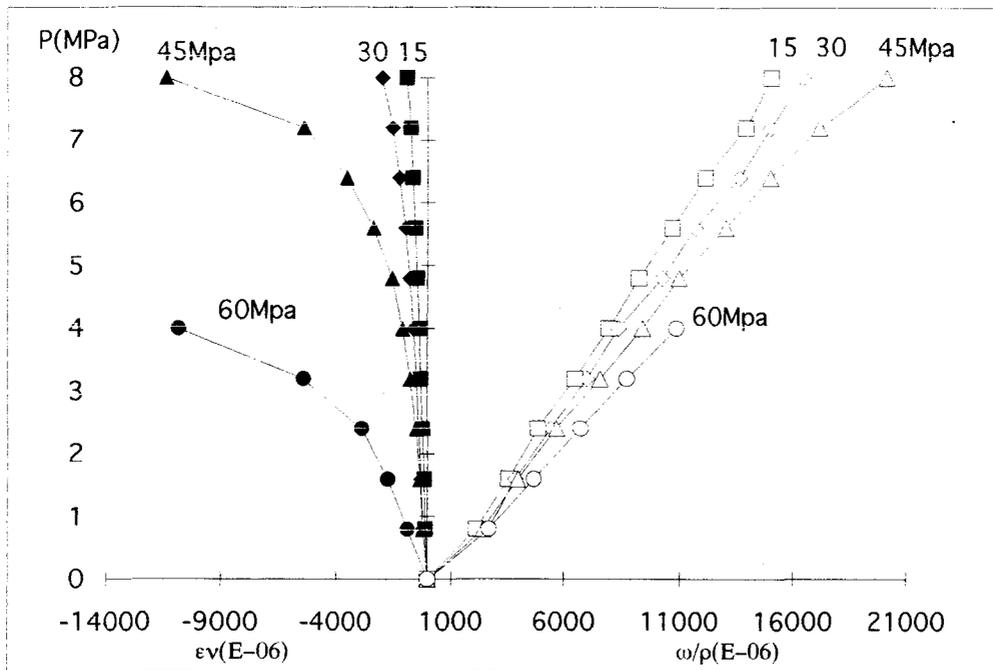


a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=10$  MPa)

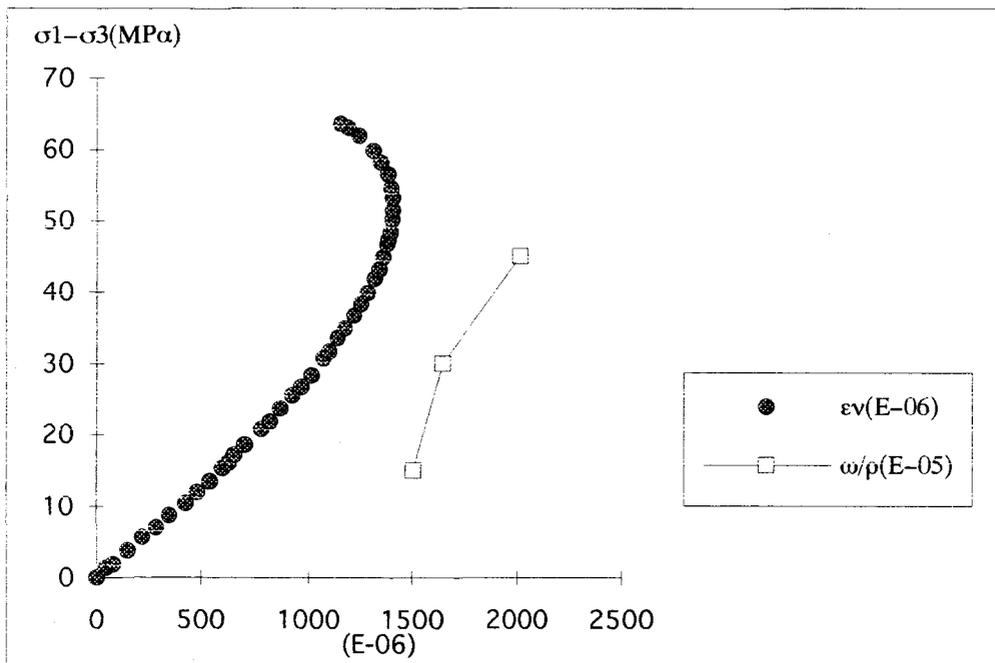


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.6: Essai triaxial drainé avec montées en pression  $P$  ( $P_c=10$  MPa)

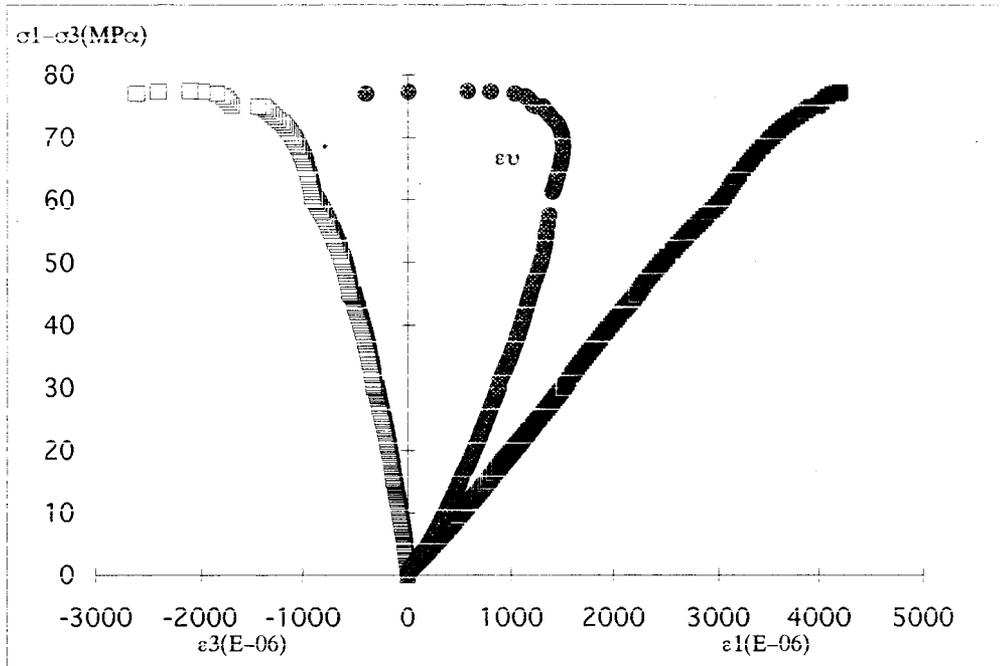


c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=10$  MPa)

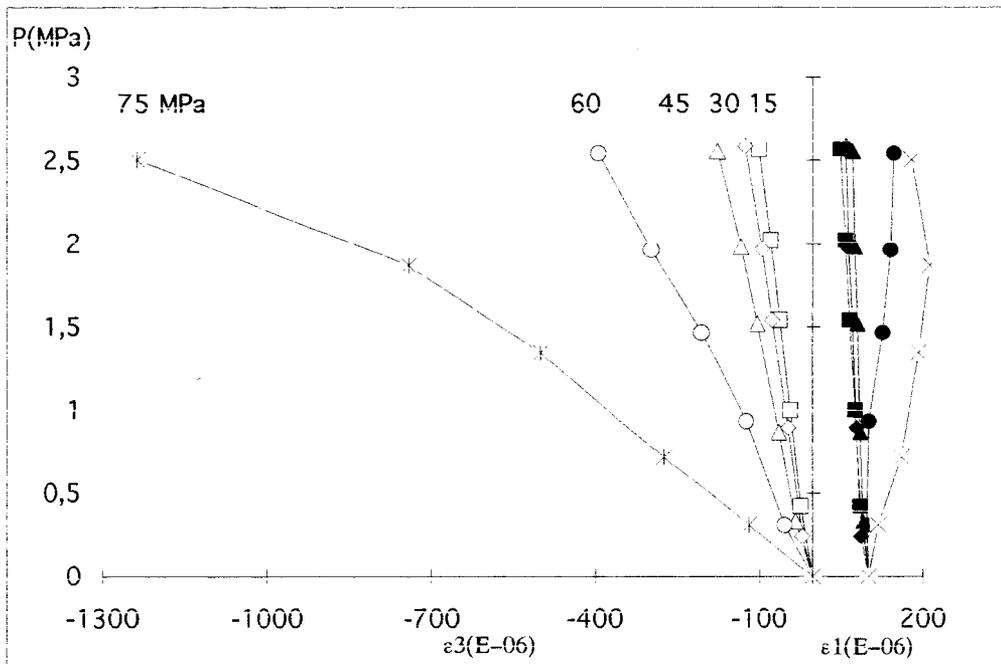


d) Evolutions de la déformation volumique totale et du volume poreux cumulé en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.6 Suite

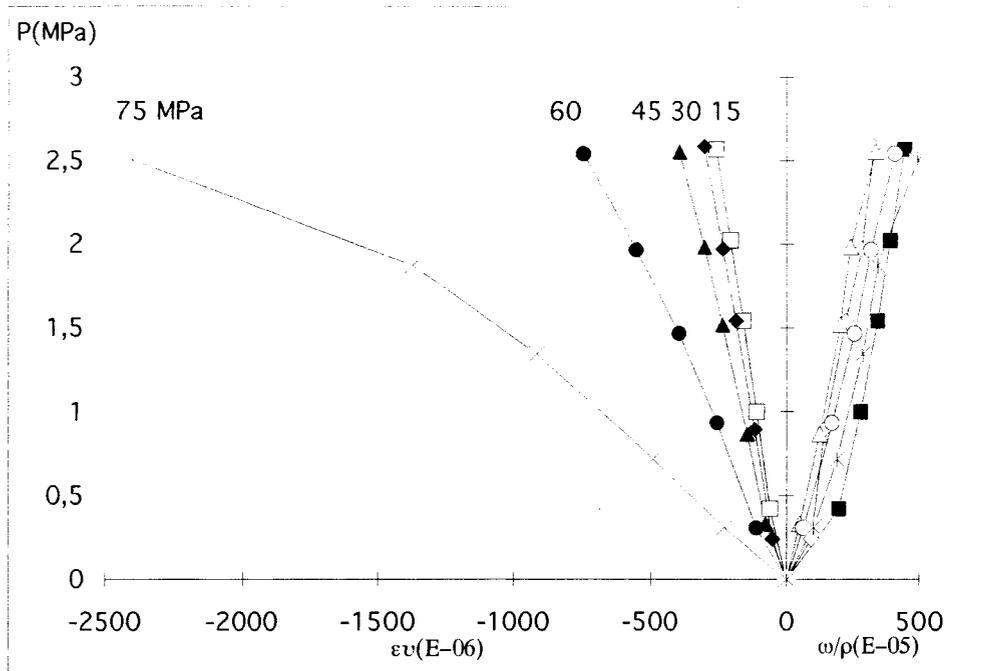


a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=10$  MPa)

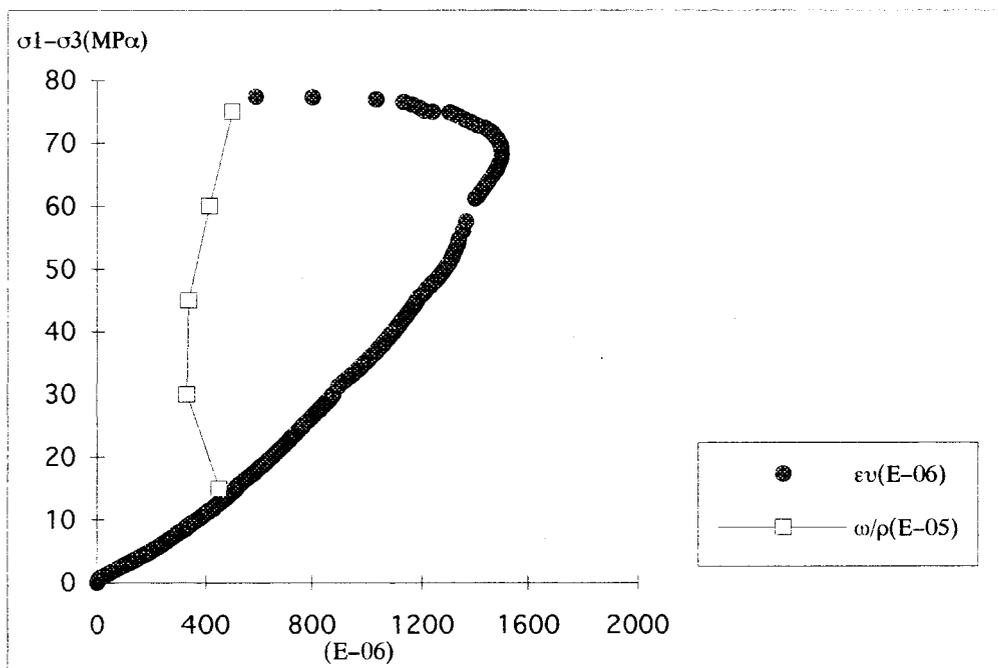


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.7: Essai triaxial drainé avec montées en P ( $P_c=10$  MPa)

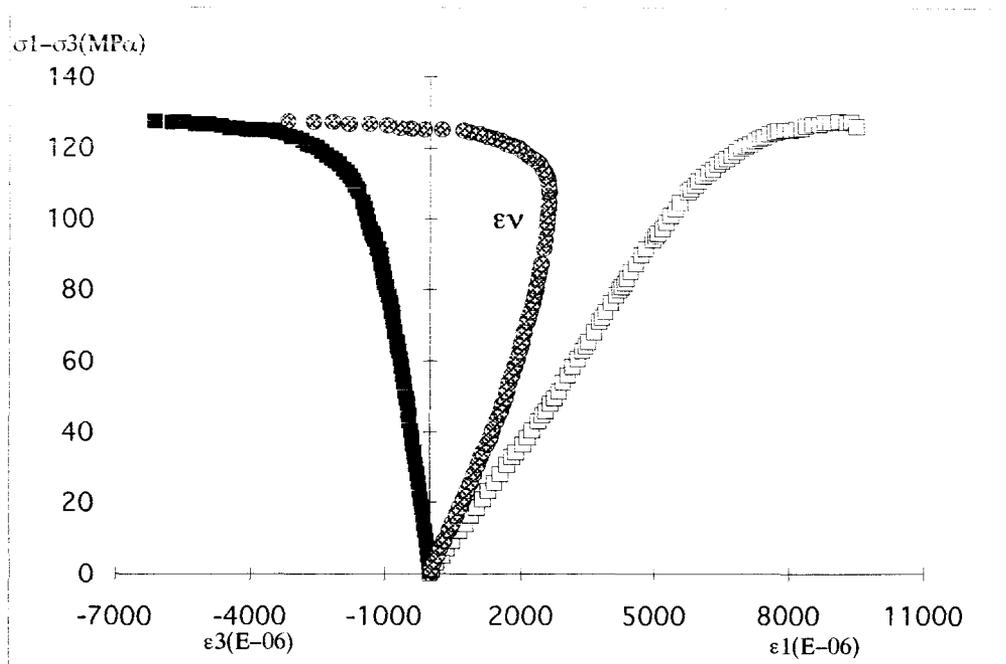


c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=10$  MPa)

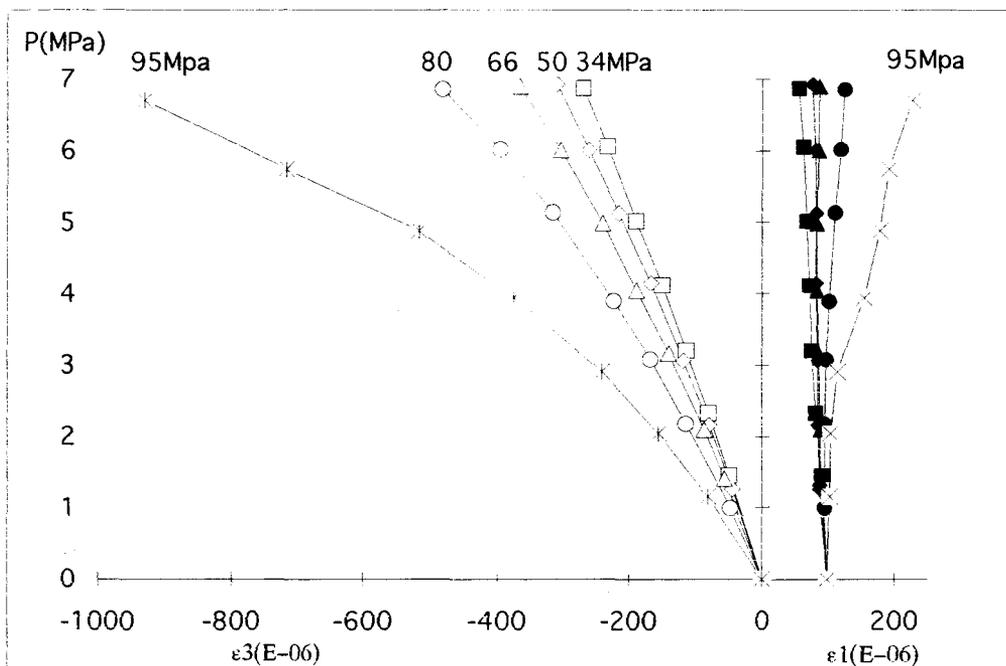


d) Evolutions de la déformation volumique totale et du volume poreux cumulé en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.7 Suite

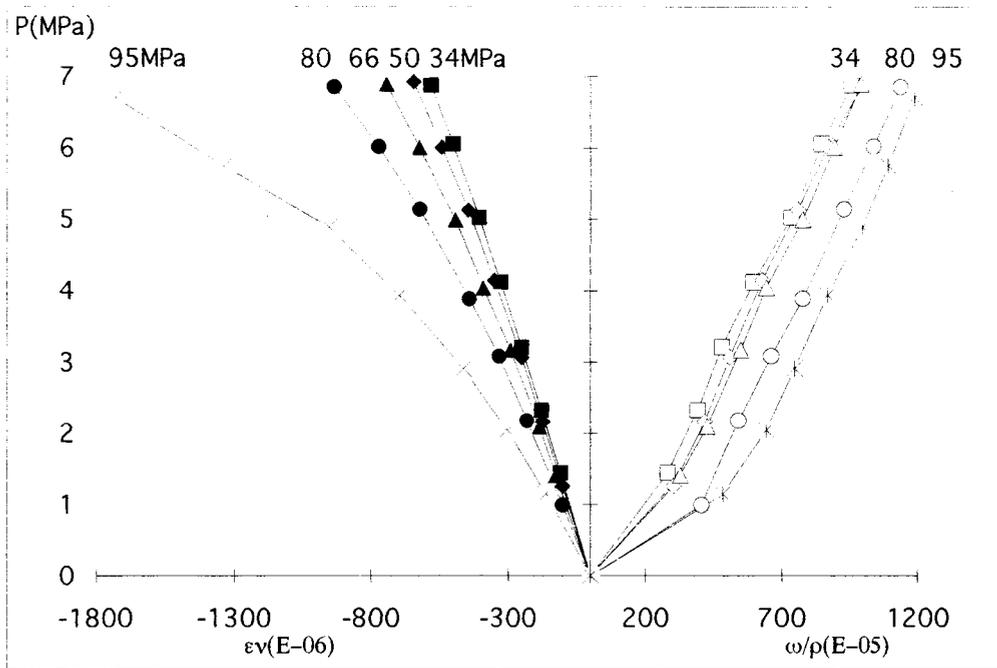


a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=20$  MPa)

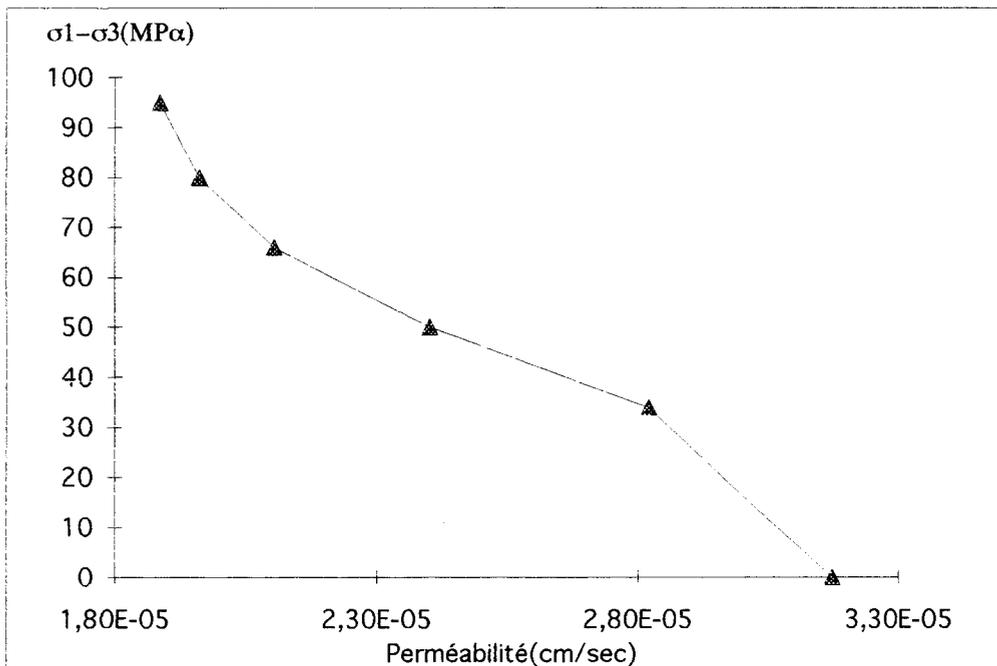


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=20$  MPa)

Figure AI.8: Essai triaxial drainé avec montées en  $P$  ( $P_c=20$  MPa)

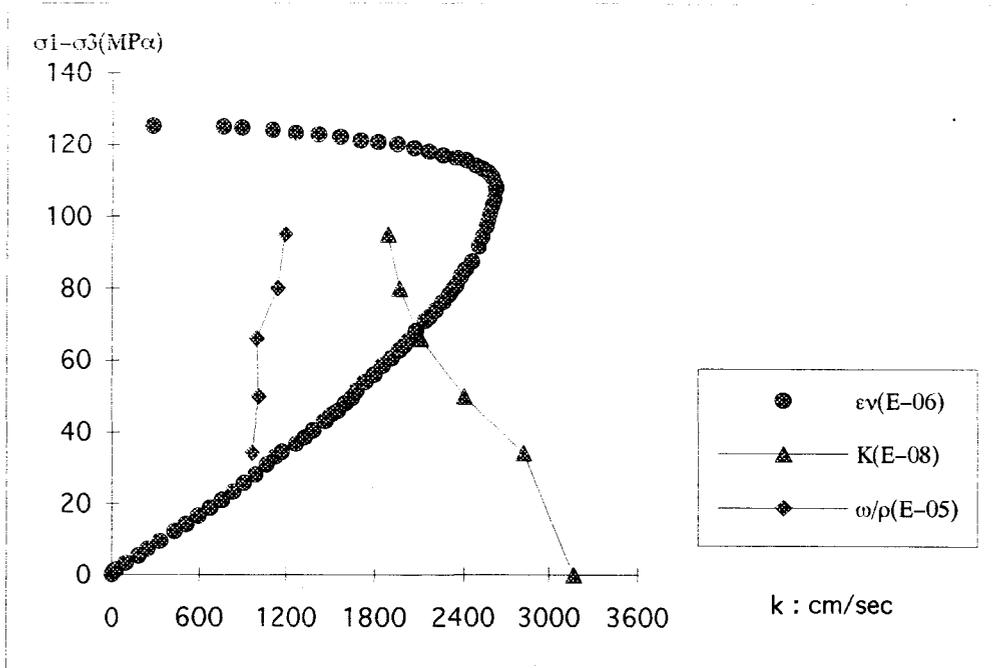


c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=20$  MPa)

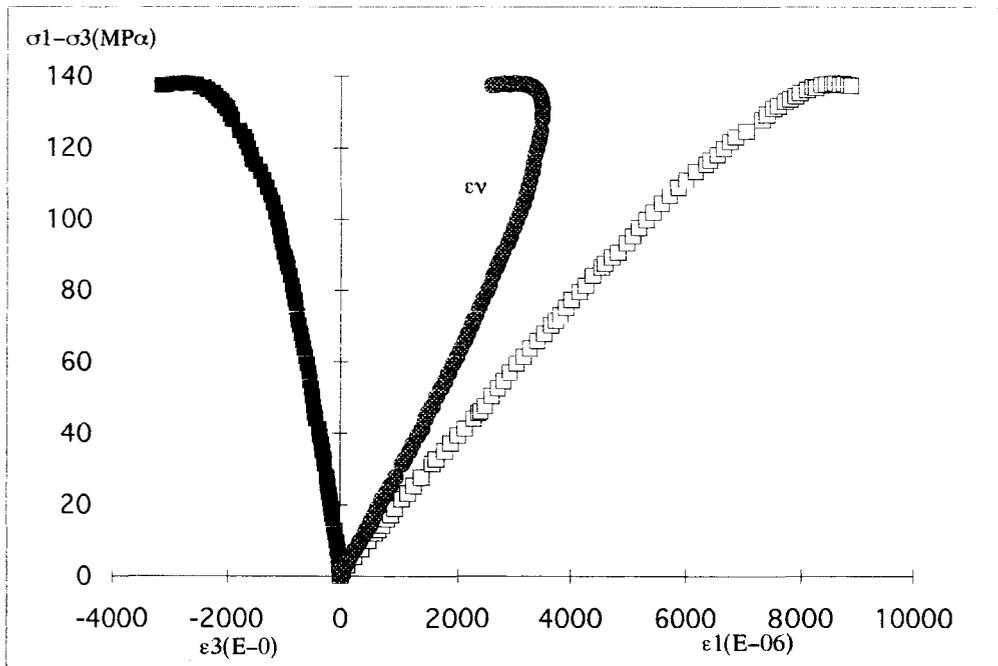


d) Variation de la perméabilité en fonction du déviateur ( $P_c=20$  MPa)

Figure AI.8: Suite

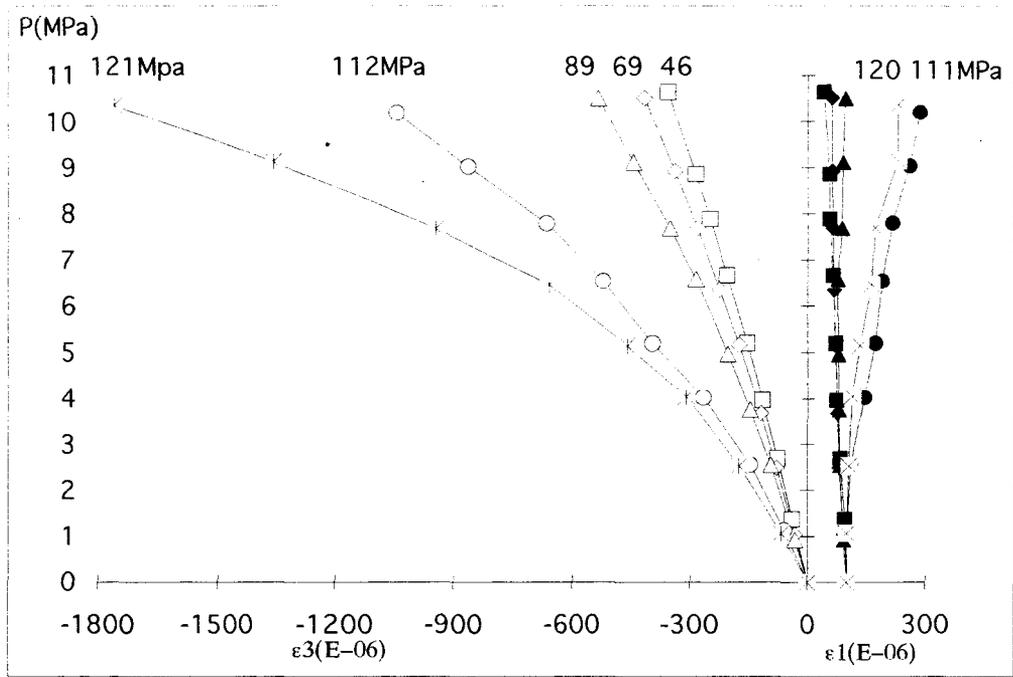


e) Evolutions de la déformation volumique totale, du volume poreux cumulé et de la perméabilité en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=20$  MPa)  
Figure AI.8: Suite

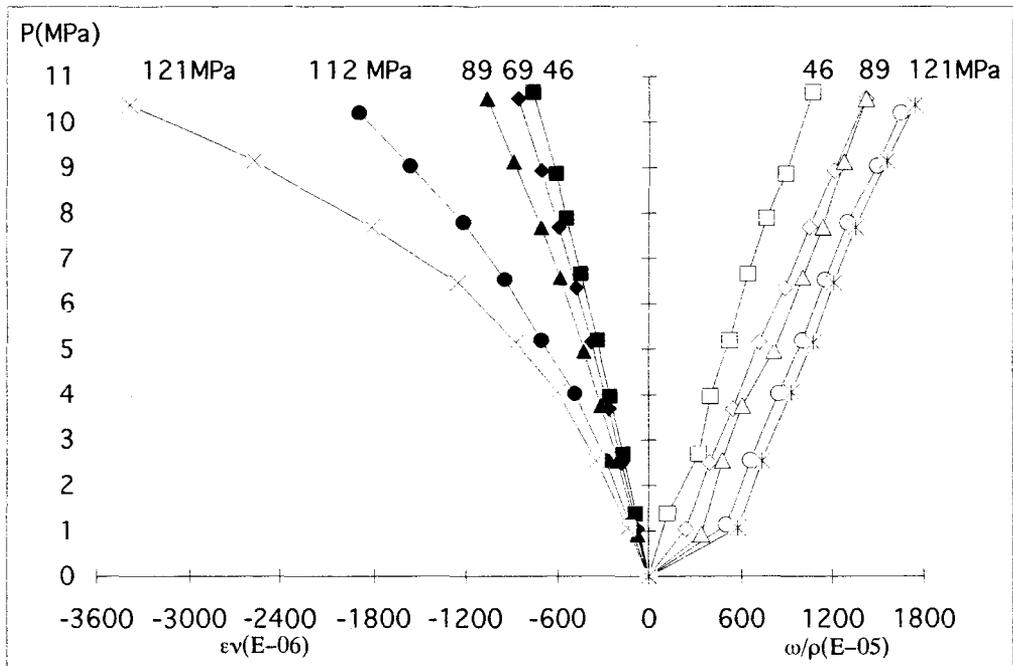


a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.9: Essai triaxial drainé avec montées en P ( $P_c=30$  MPa)

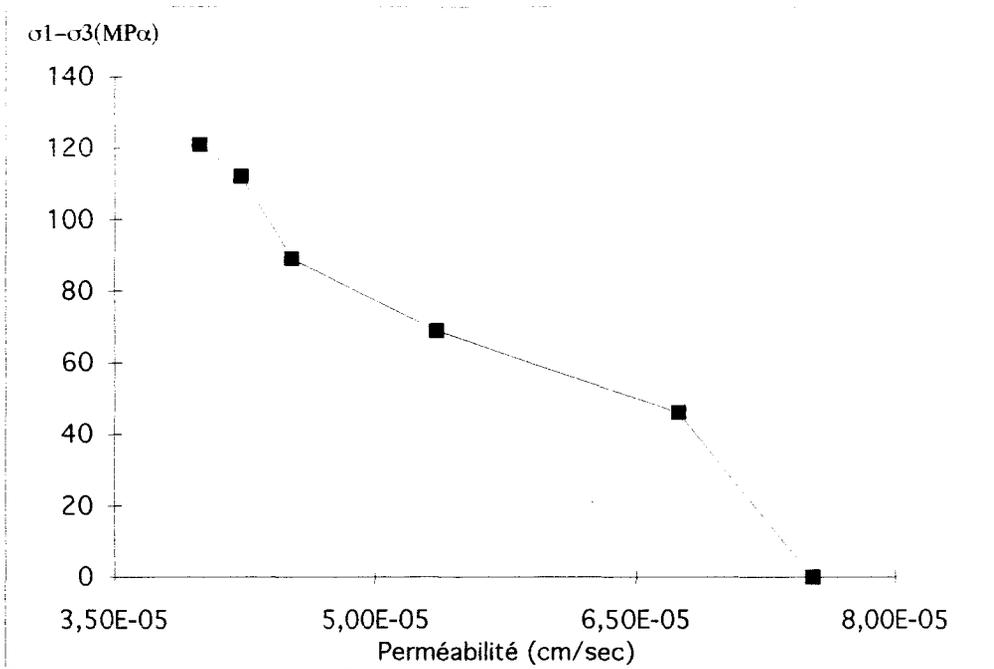


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=30$  MPa)

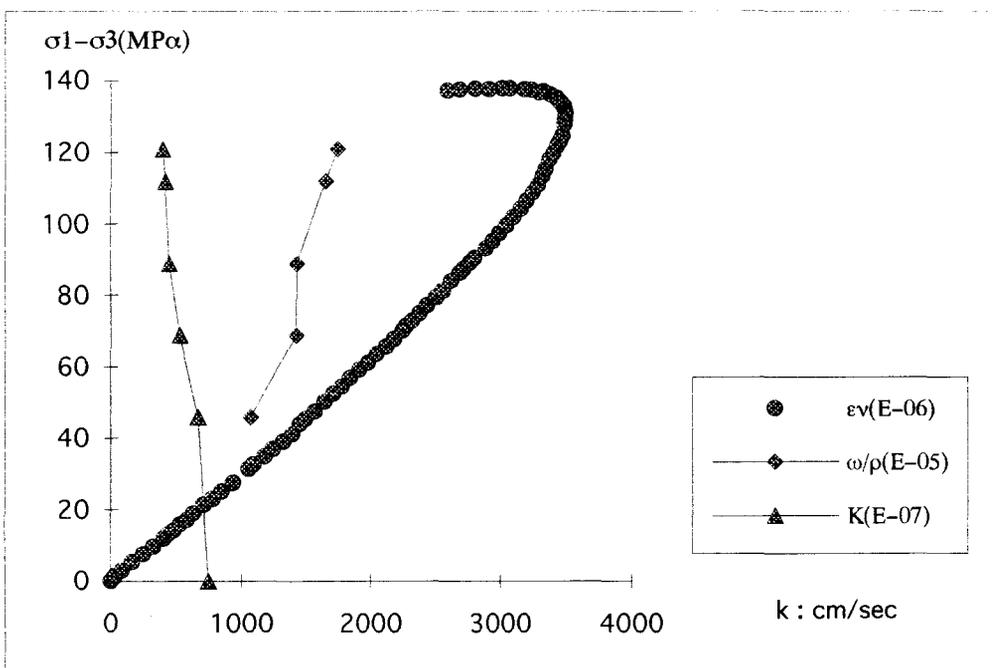


c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.9: Suite

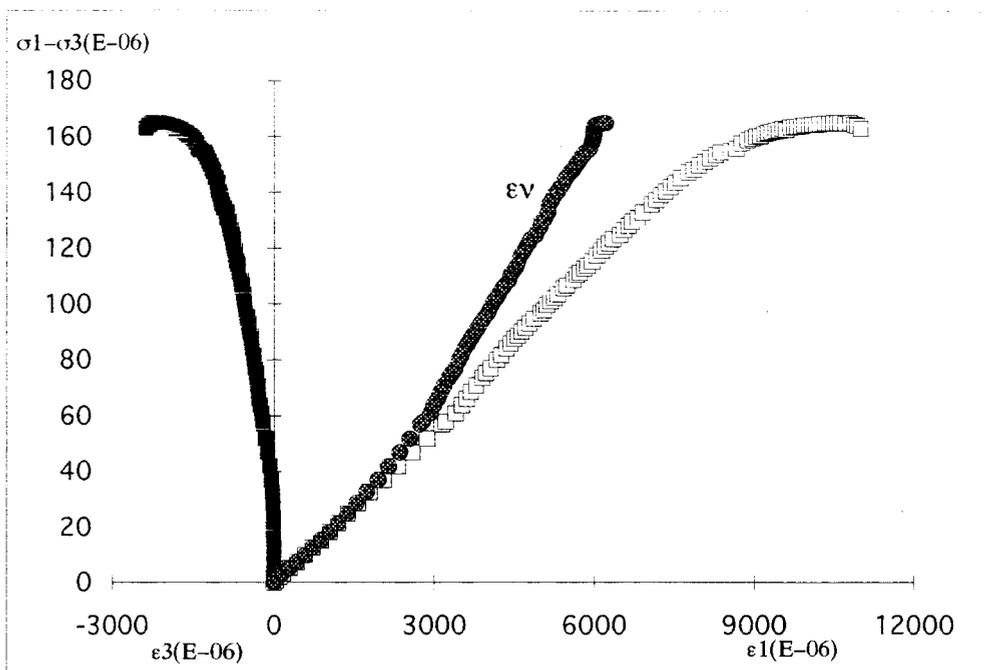


d) Variation de la perméabilité en fonction du déviateur ( $P_c=30$  MPa)

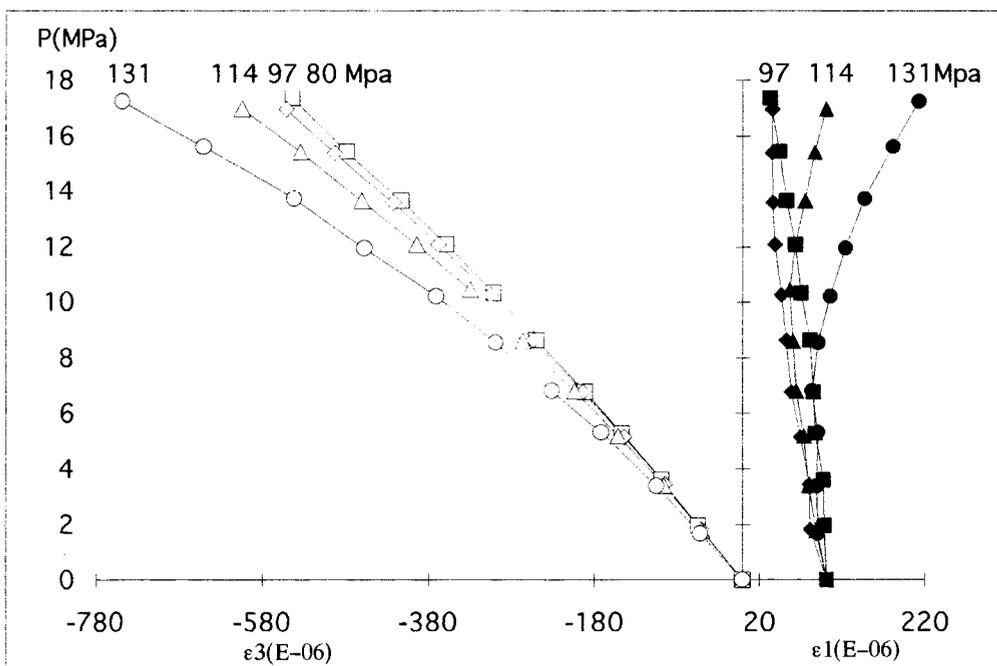


e) Evolutions de la déformation volumique totale, du volume poreux cumulé et de la perméabilité en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.9: Suite

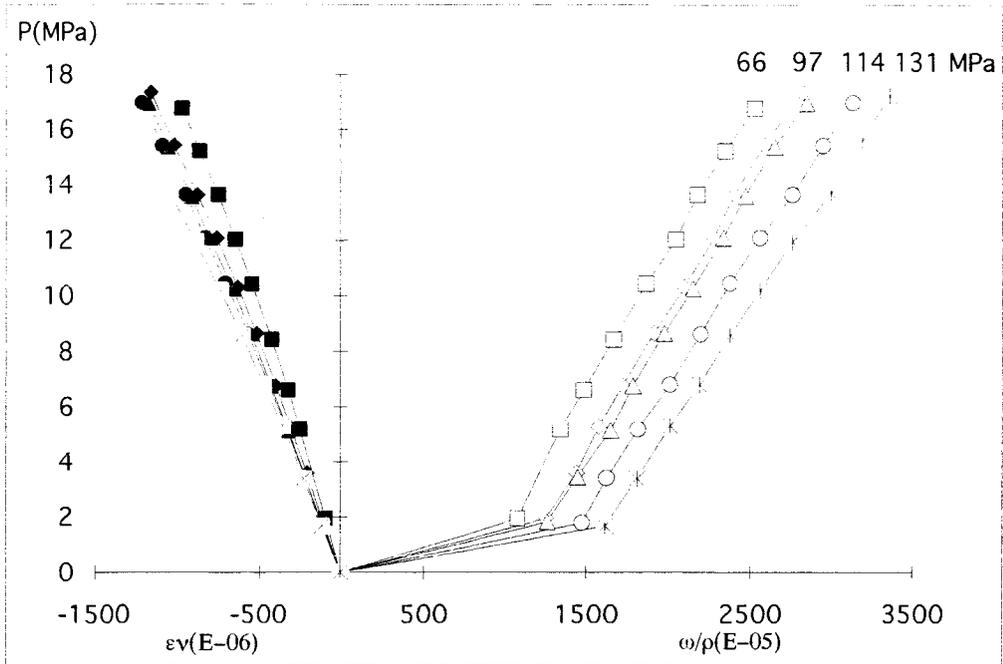


a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=50$  MPa)

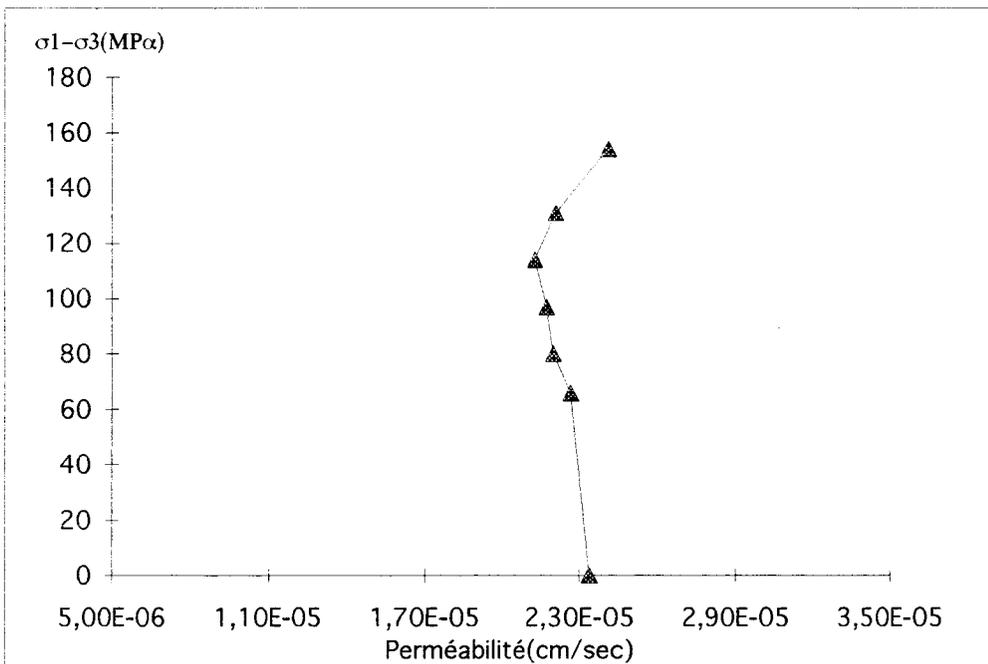


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=50$  MPa)

Figure AI.10: Essai triaxial drainé avec des montées en P ( $P_c=50$  MPa)

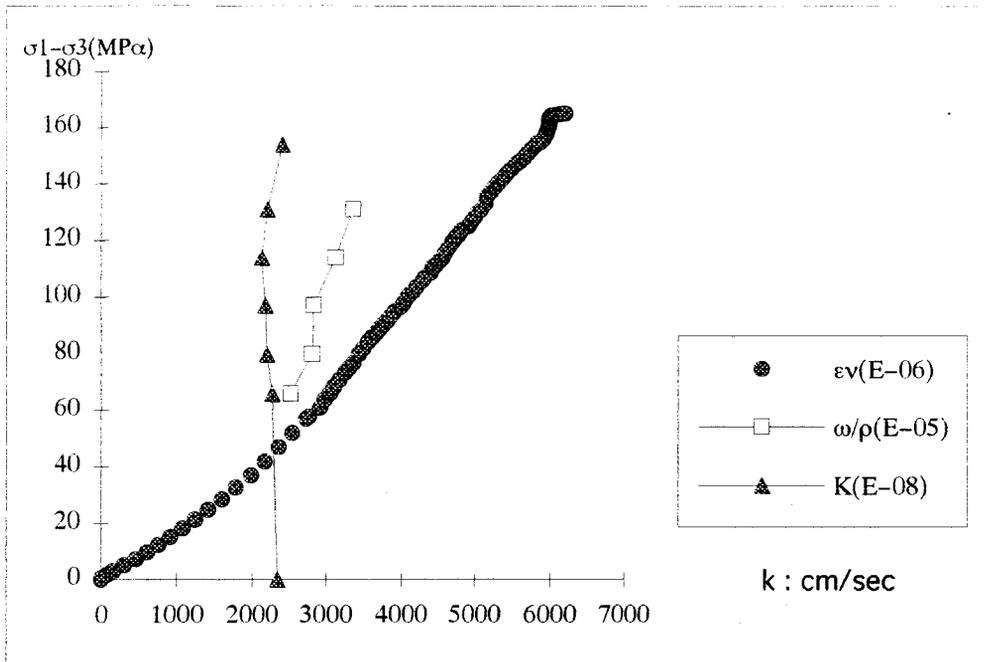


c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression Interstitielle ( $P_c=50$  MPa)

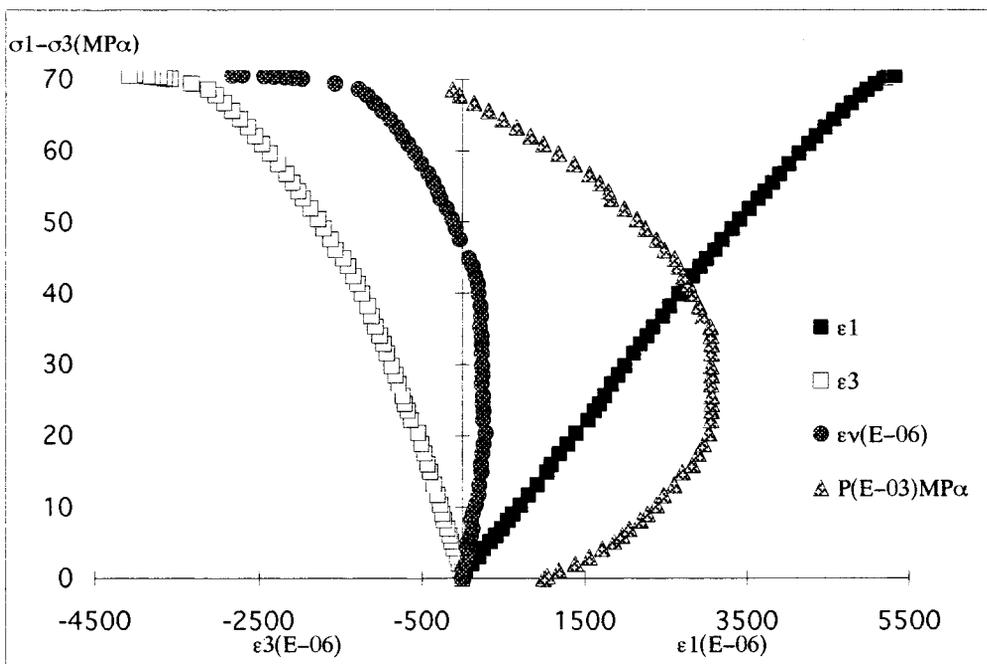


d) Variation de la perméabilité en fonction du déviateur ( $P_c=50$  MPa)

Figure AI.10: Suite

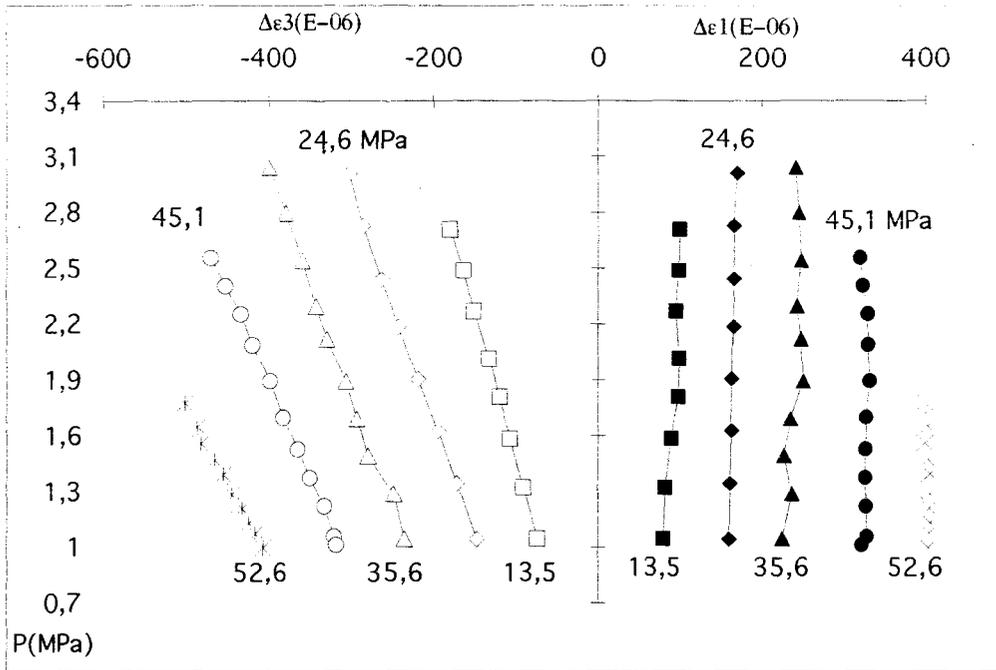


e) Evolutions de la déformation volumique totale, du volume poreux cumulé et de la perméabilité en fonction de la contrainte déviatorique ( $P_c=50$  MPa)  
Figure AI.10: Suite



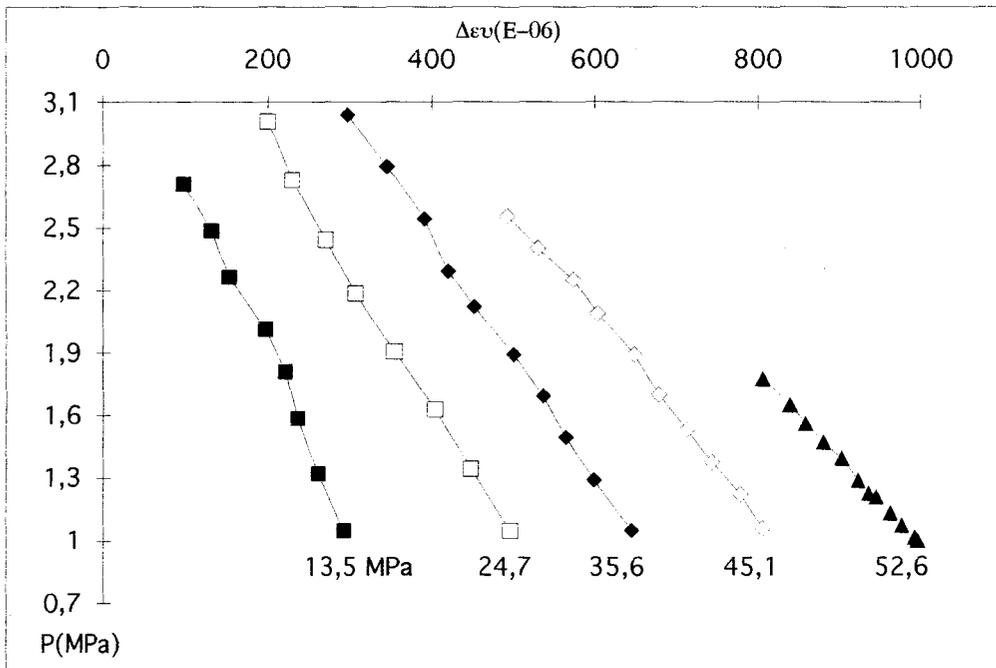
a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=5$  MPa)

Figure AI.11: Essai de compression triaxiale monotone non drainé avec chutes de  $P$  ( $P_c=5$  MPa)



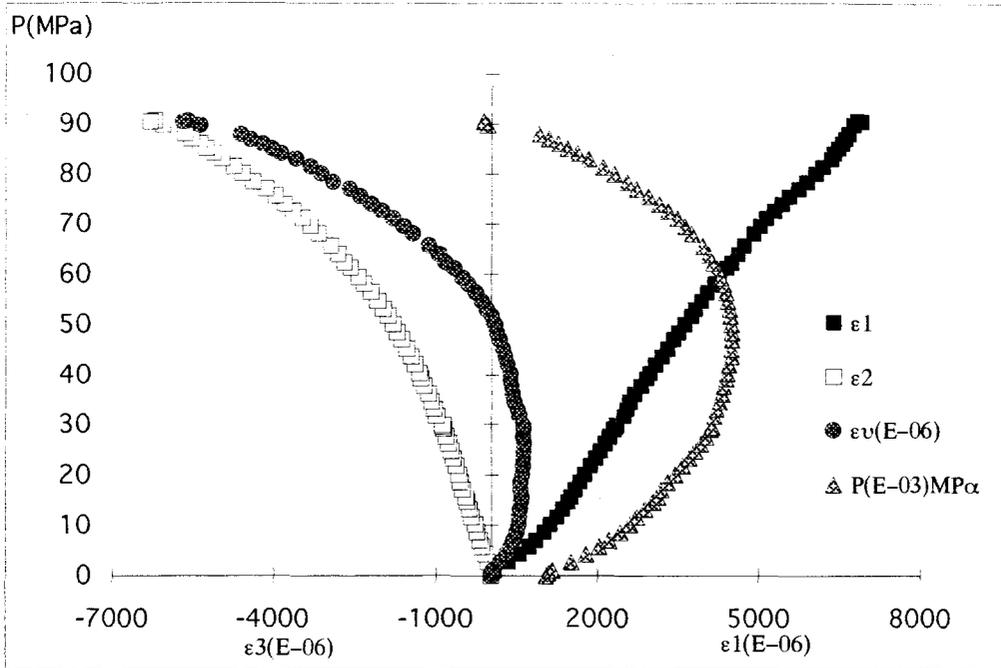
b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=5$  MPa)

Figure AI.11: Suite



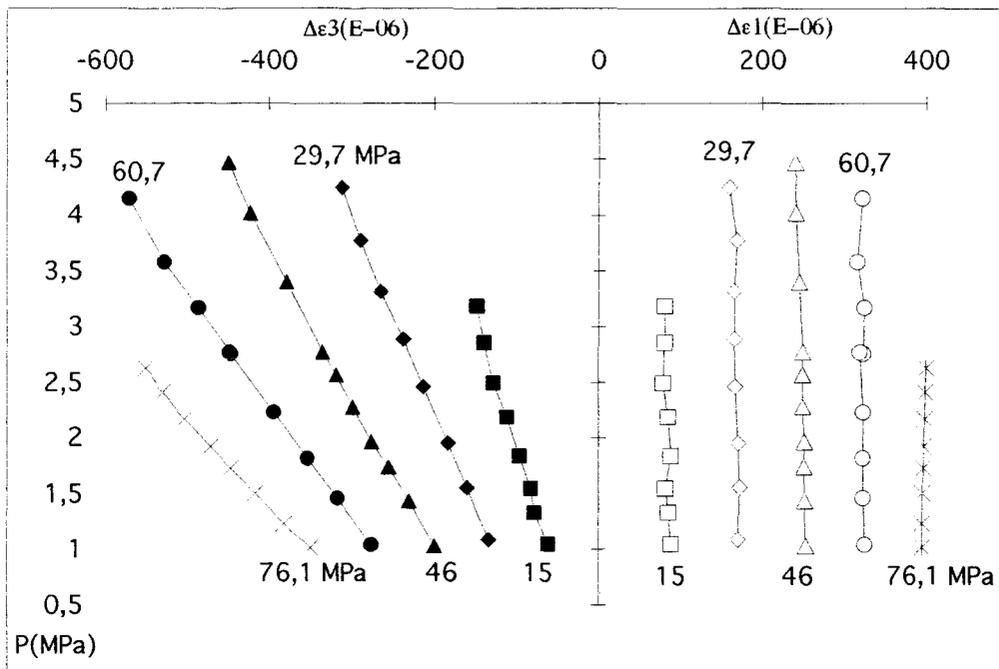
c) Variation de la déformation volumique totale en fonction de la pression interstitielle  $P$  ( $P_c=5$  MPa)

Figure AI.11: Suite



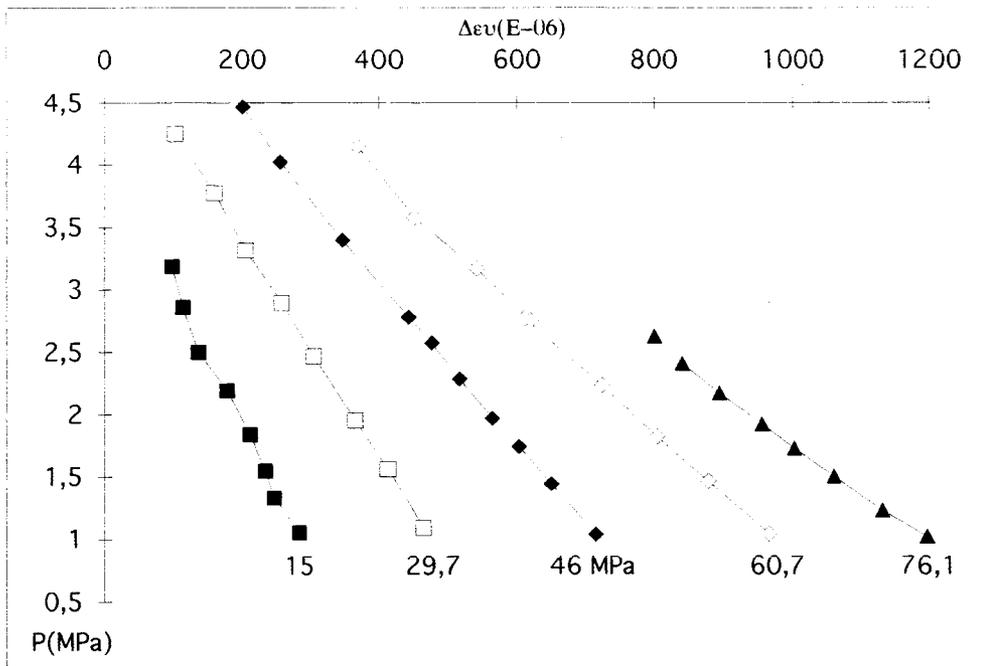
a) Courbes lissées de la contrainte déviatorique-déformations ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.12: Essai de compression triaxiale monotone non drainé avec chutes de  $P$  ( $P_c=10$  MPa)

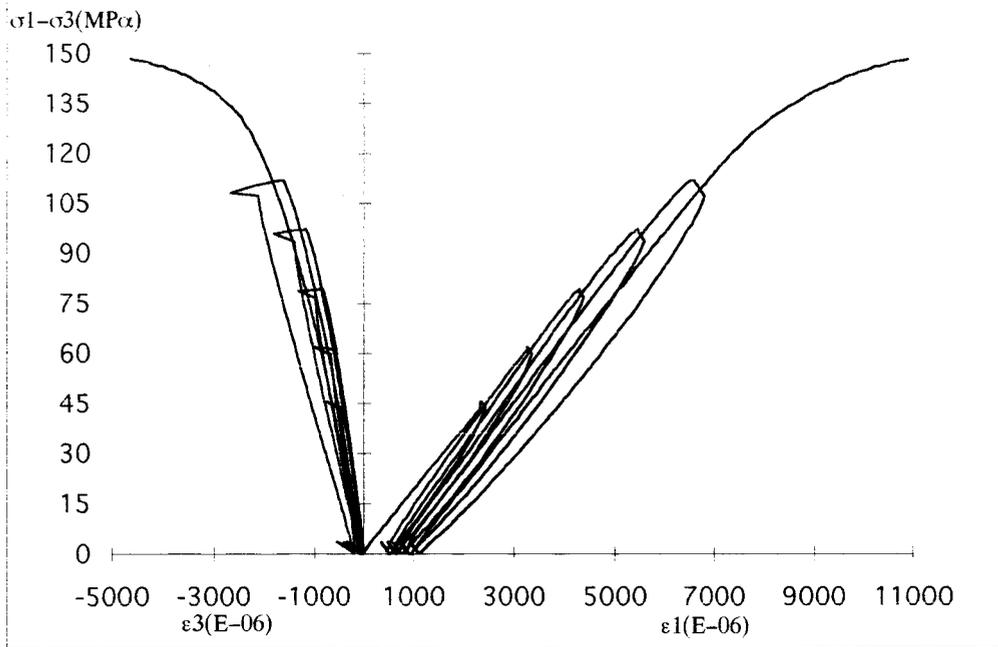


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=10$  MPa)

Figure AI.12: Suite

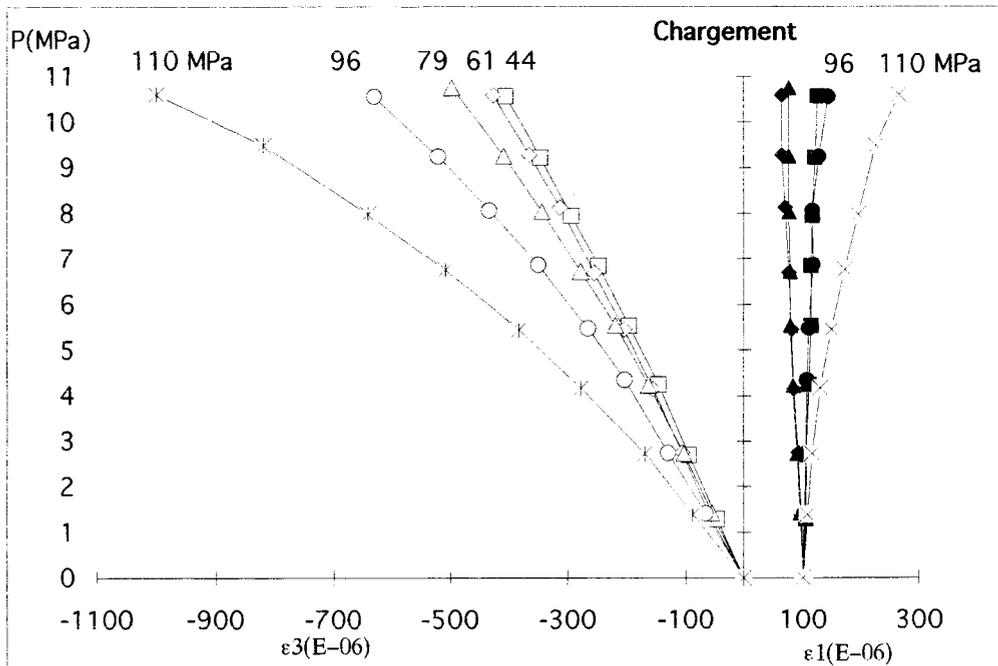


c) Variation de la déformation volumique totale en fonction de la pression interstitielle P ( $P_c=10$  MPa)  
 Figure AI.12: Suite



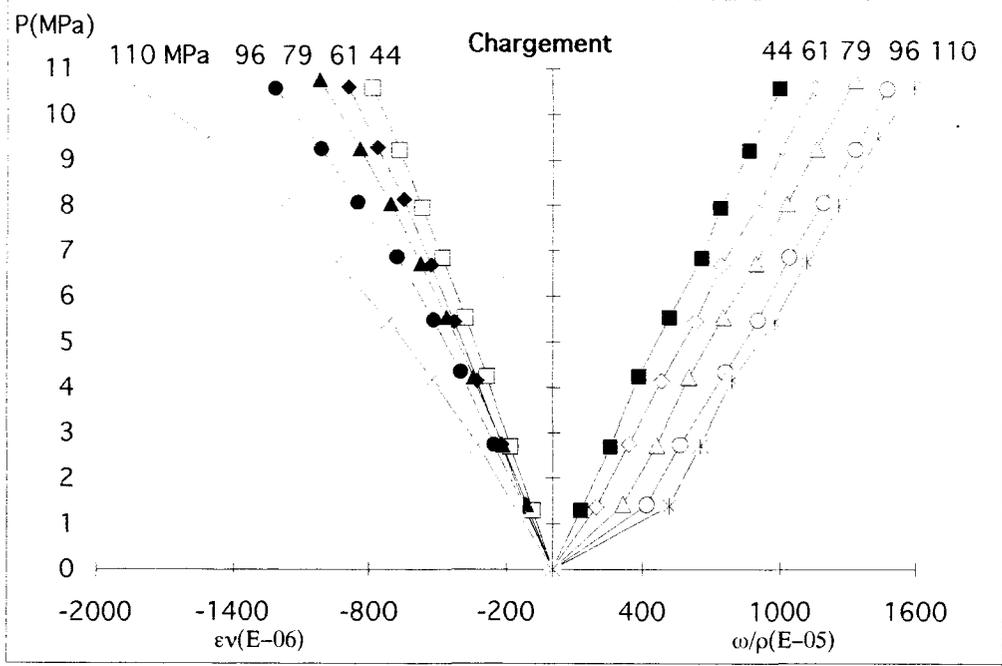
a) Variation des déformations en fonction du déviateur ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.13: Essai de chargement-déchargement déviatorique avec montées en pression interstitielle et mesure de la perméabilité ( $P_c=30$  MPa)

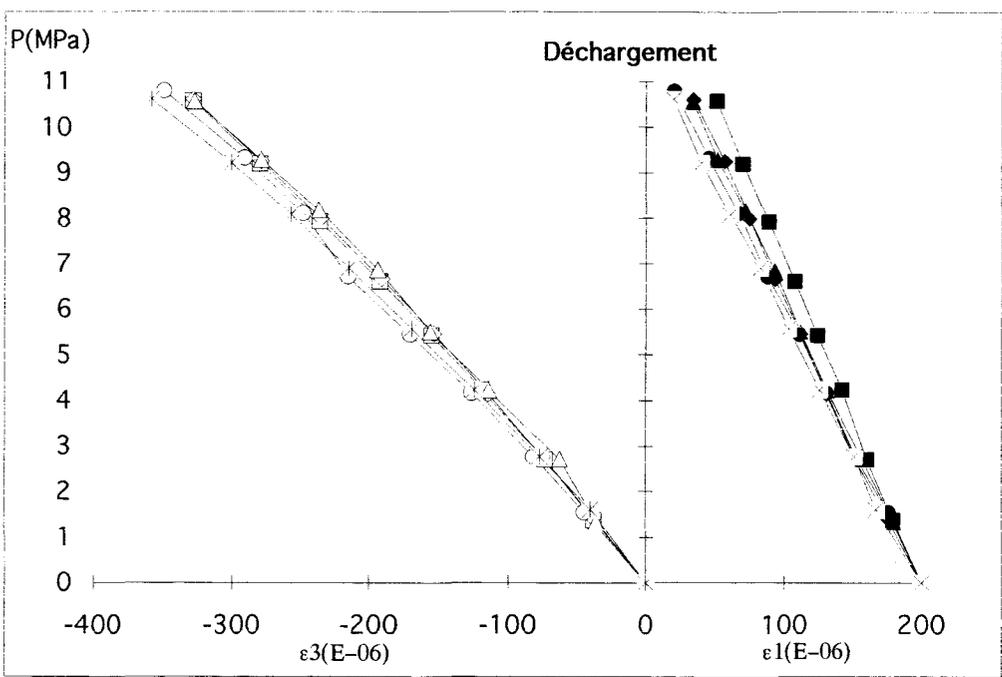


b) Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle à différents niveaux de la contrainte déviatorique ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.13: suite

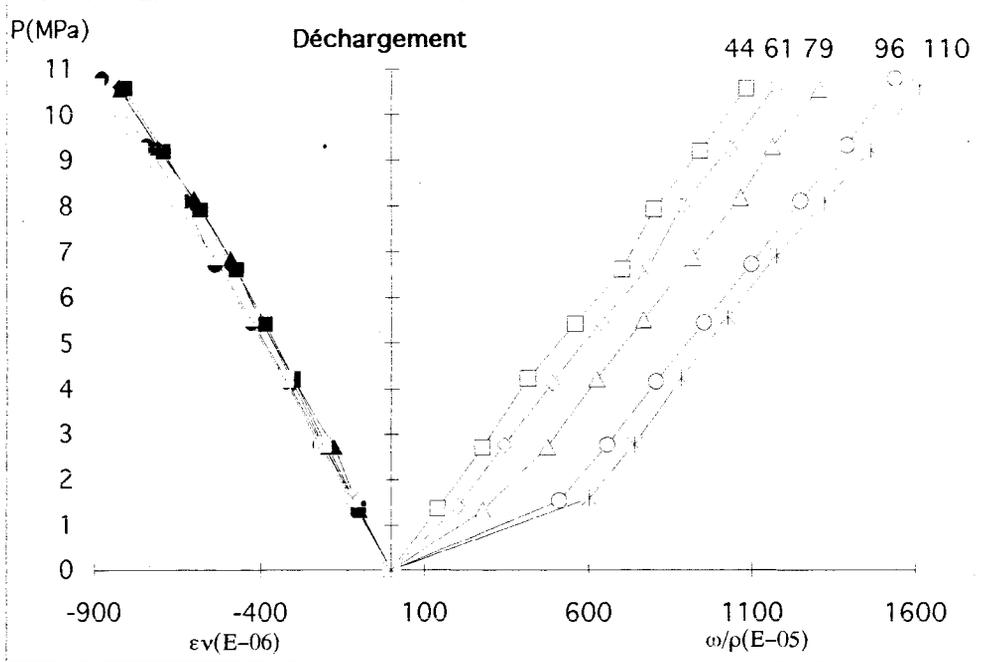


c) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle à différents niveaux de la contrainte déviatorique ( $P_c=30$  MPa)  
Figure AI.13: suite

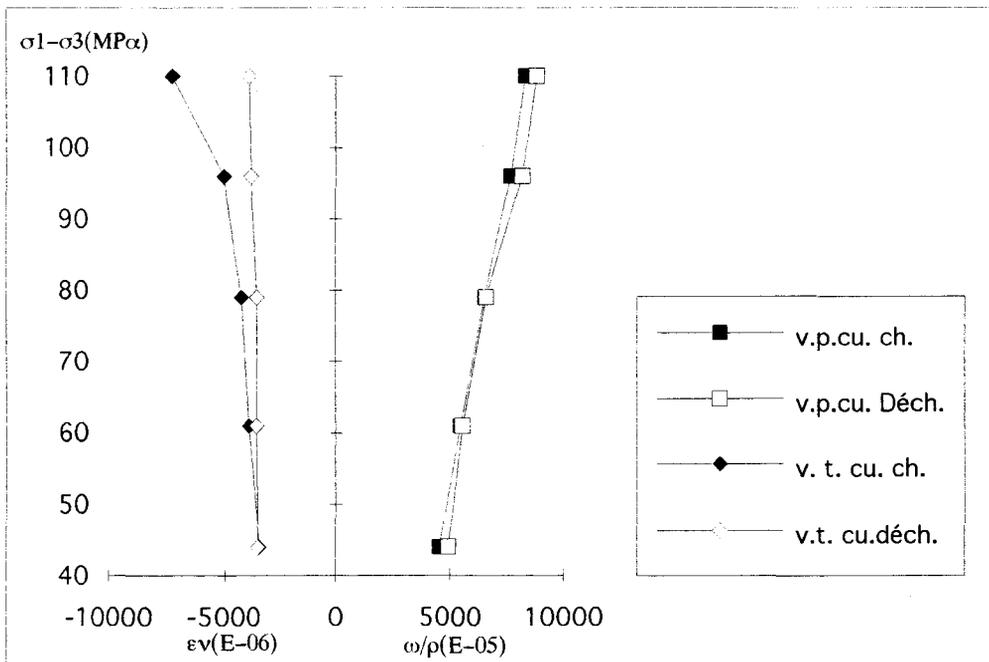


d) Variations des déformations en fonction de la pression interstitielle après chaque déchargement déviatorique complet ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.13: suite

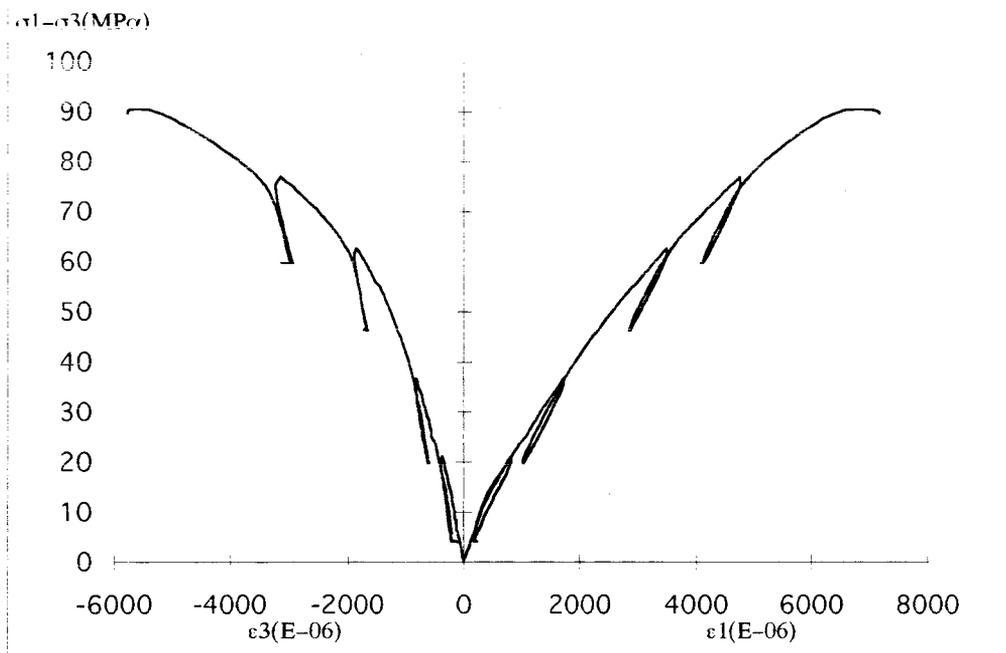


e) Variations du volume total et du volume poreux en fonction de la pression interstitielle après chaque déchargement déviatorique complet ( $P_c=30$  MPa)  
Figure AI.13: suite



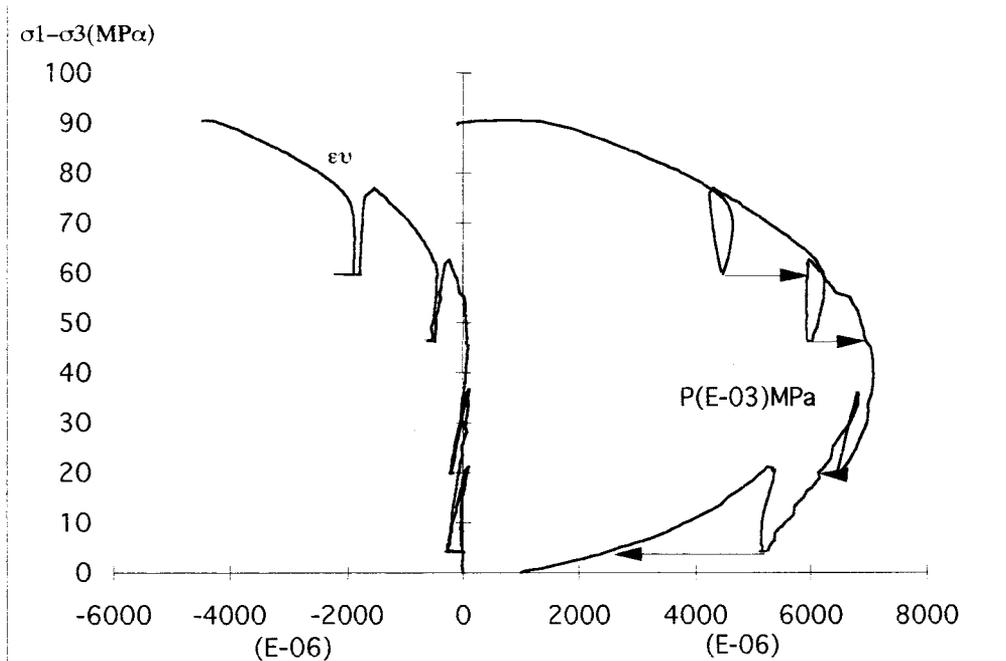
f) Variations du volume poreux cumulé (v.p.cu.) et du volume total cumulé (v.t.cu.) en fonction de la pression interstitielle à différents niveaux de la charge déviatorique et après le déchargement déviatorique complet ( $P_c=30$  MPa)

Figure AI.13: suite



a) Courbes de la contrainte déviatorique-déformations

Figure AI.14: Essai de compression triaxiale non drainée avec cycles de chargement-déchargement déviatorique ( $P_c=10$  MPa)



b) Variation volumique totale et évolution de la pression interstitielle en fonction de la contrainte déviatorique

Figure AI.14: suit

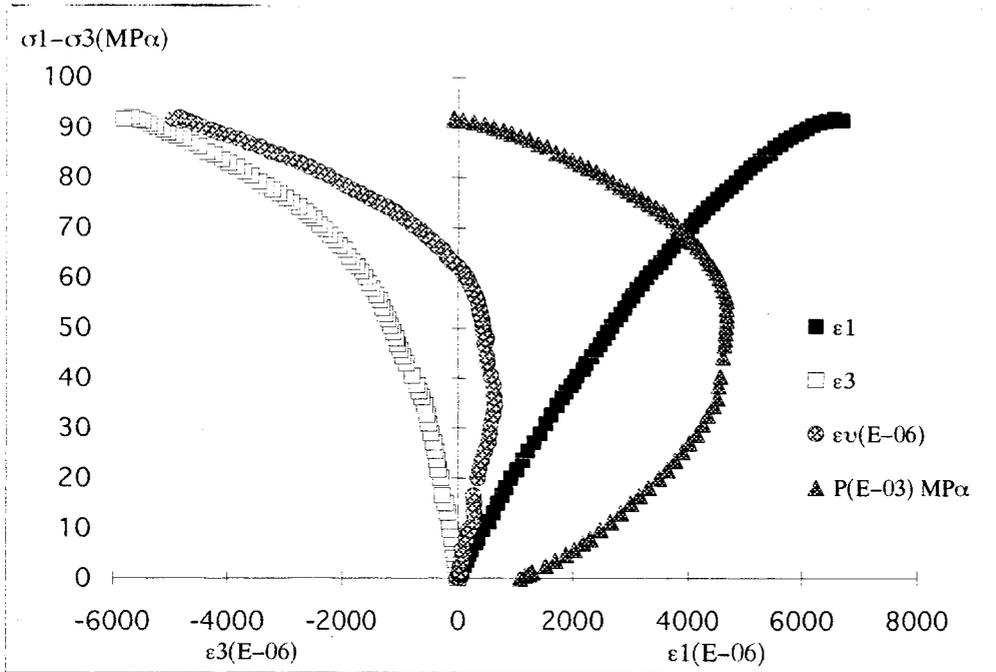


Figure AI.15: Essai de compression triaxiale monotone non drainée ( $P_c = 10 \text{ MPa}$ )

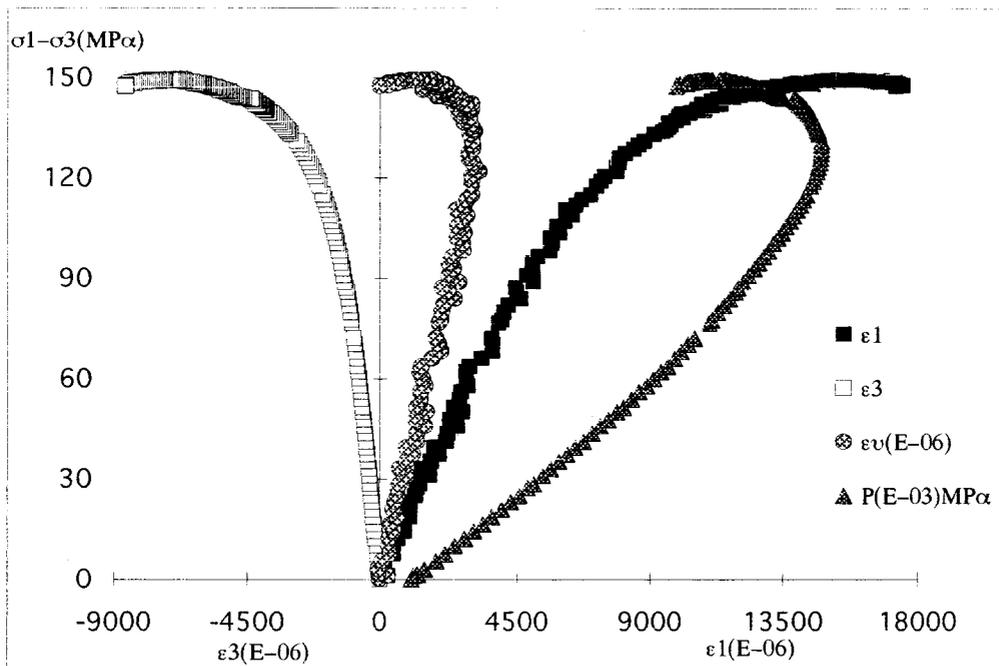


Figure AI.16: Essai de compression triaxiale monotone non drainée ( $P_c = 50 \text{ MPa}$ )

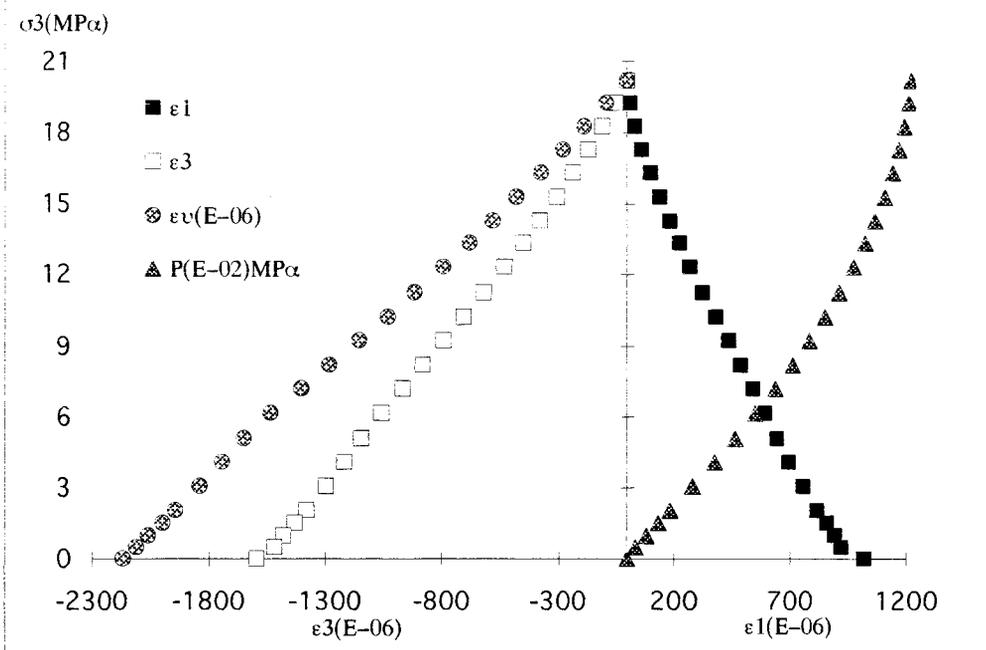


Figure AI.17: Essai d'extention latérale non drainée ( $P_c=20$  MPa)

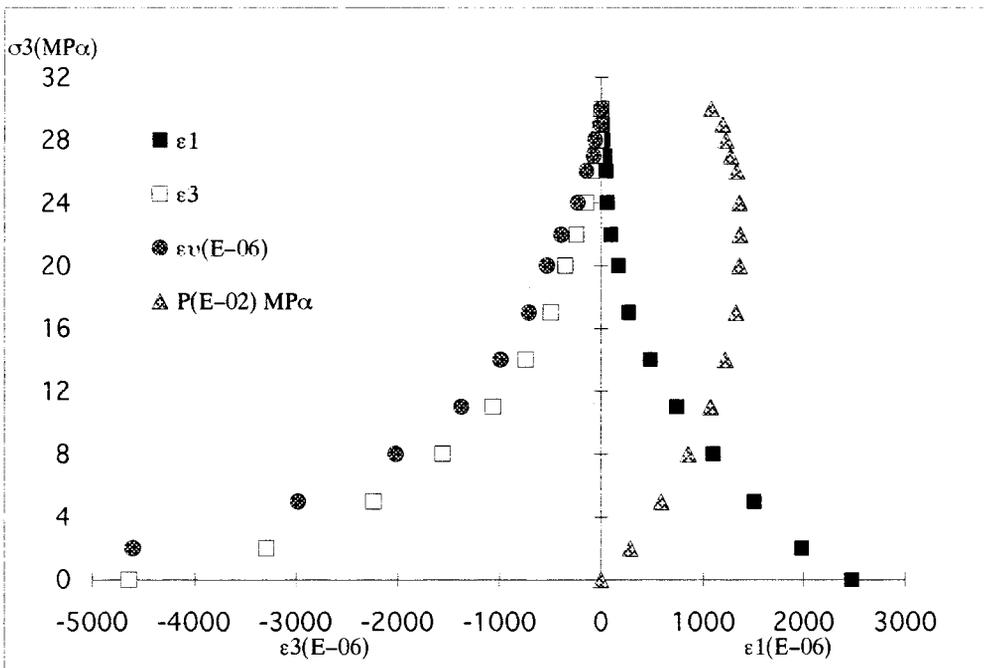


Figure AI.18: Essai d'extention latérale non drainée ( $P_c=30$  MPa)

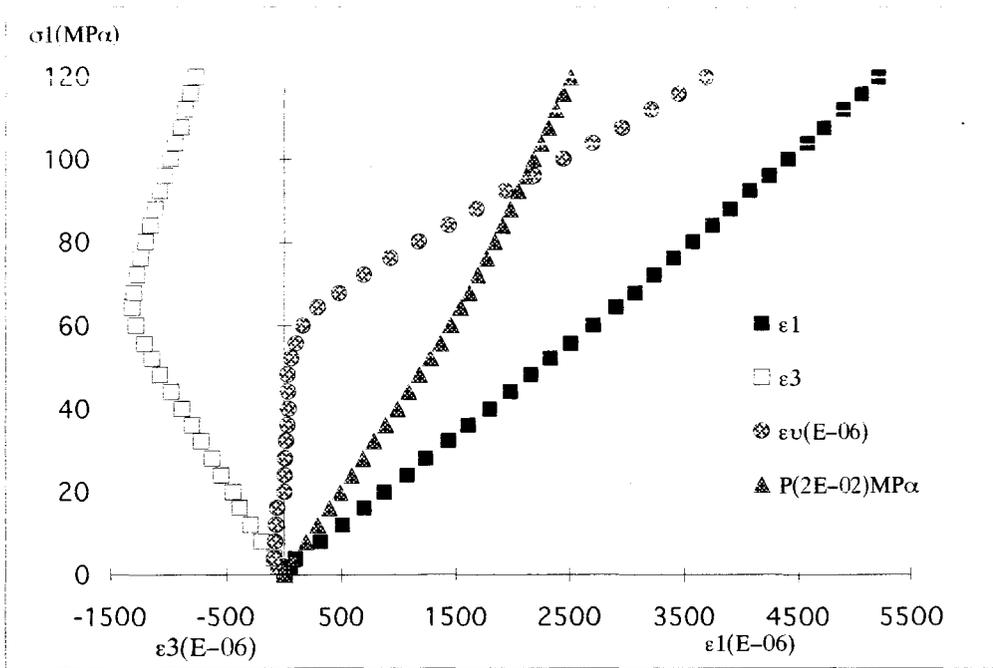


Figure AI.19: Essai de chargement proportionnel non drainé ( $k=2$ )

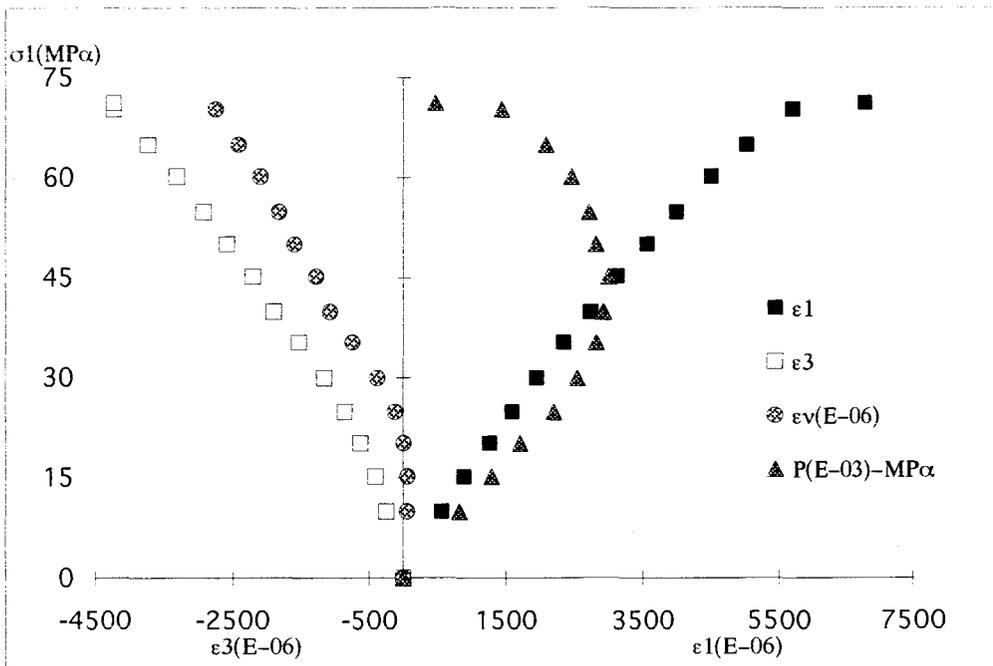


Figure AI.20: Essai de chargement proportionnel non drainé ( $k=10$ )

# **ANNEXE II**

## **CARACTERISTIQUES DU METHANOL**

### Caractéristique du Méthanol [KHER. 1991]

Le méthanol, contrairement à l'eau, est un fluide non polaire qui a peu d'effet chimique sur le matériau testé dans notre étude. Ses caractéristiques peuvent varier en fonction de la température et de la pression. En voici quelques unes :

=>une densité égale à  $\rho=0,7914 \text{ gr/cm}^3$  à la pression atmosphérique  $P=P_{at}$  et la température  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$

=>une viscosité dynamique de  $\mu=0,6$  centipoises à  $P=P_{at}$  et  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$

=>la variation du module de l'incompressibilité volumique  $K_{\eta}$  du méthanol en fonction de la température est donnée sur la figure AxII.1

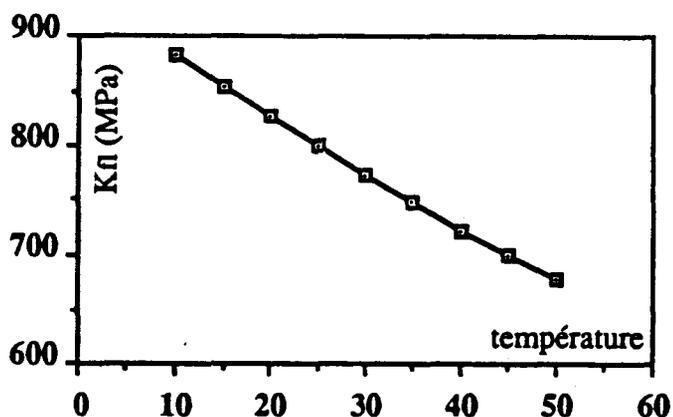


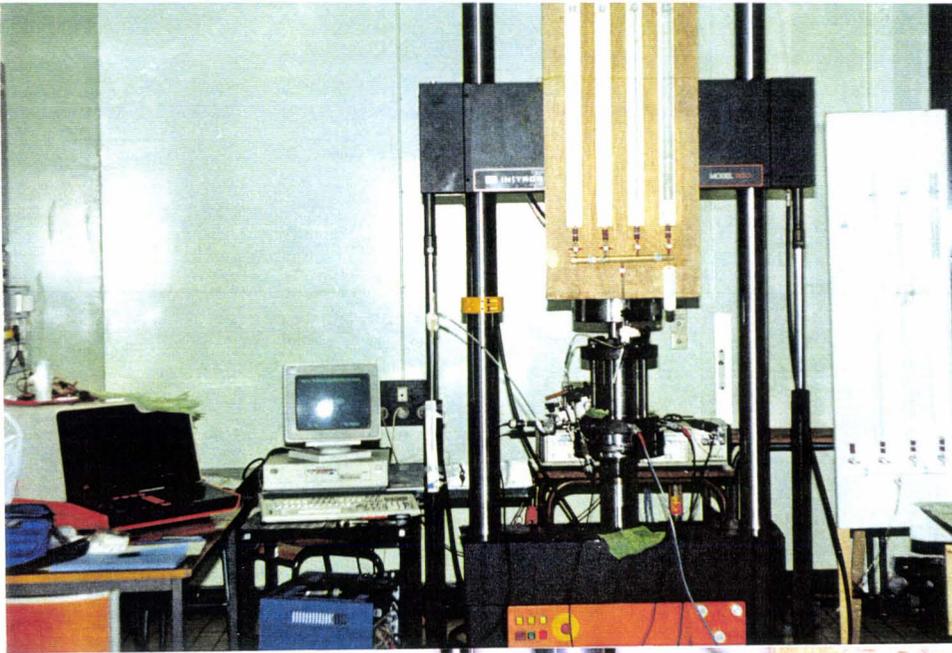
Figure AxII.1 : Variation du module de l'incompressibilité du méthanol en fonction de la température

Nous rappelons que nos essais ont été réalisés à la température ambiante  $20\pm5 \text{ }^\circ\text{C}$ . La valeur de  $K_{\eta}$  peut alors varier entre 800 à 850 MPa. Cependant pour la détermination de perméabilité, nous avons retenu les valeurs constantes de densité  $\rho=0,7914 \text{ gr/cm}^3$  et de viscosité  $\mu=0,6$  centipoises.

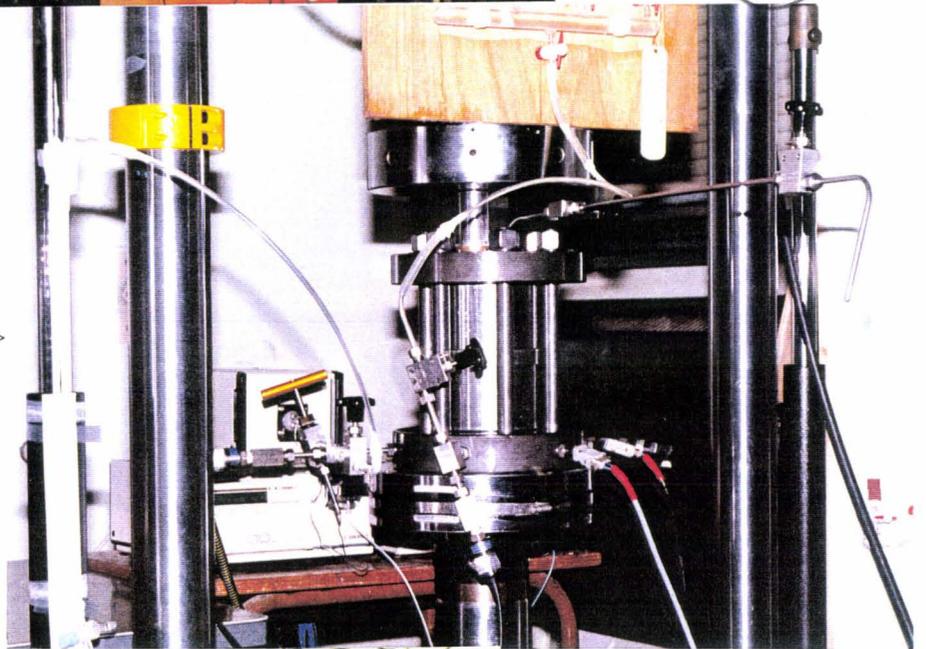
# **ANNEXE III**

## **PHOTOS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET DES ECHANTILLONS**





←= Vue générale du dispositif expérimentale

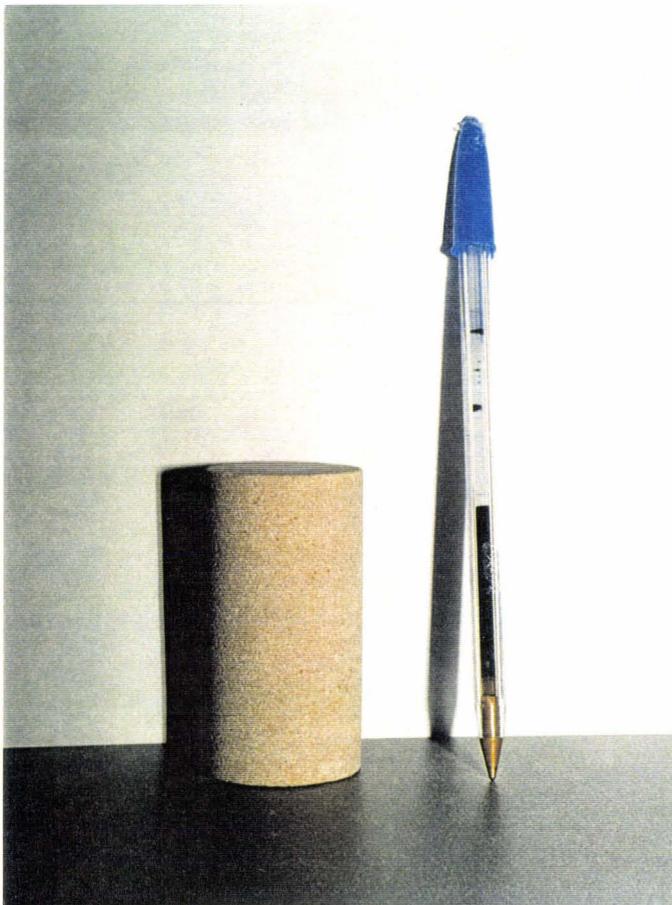


Cellule triaxiale =>

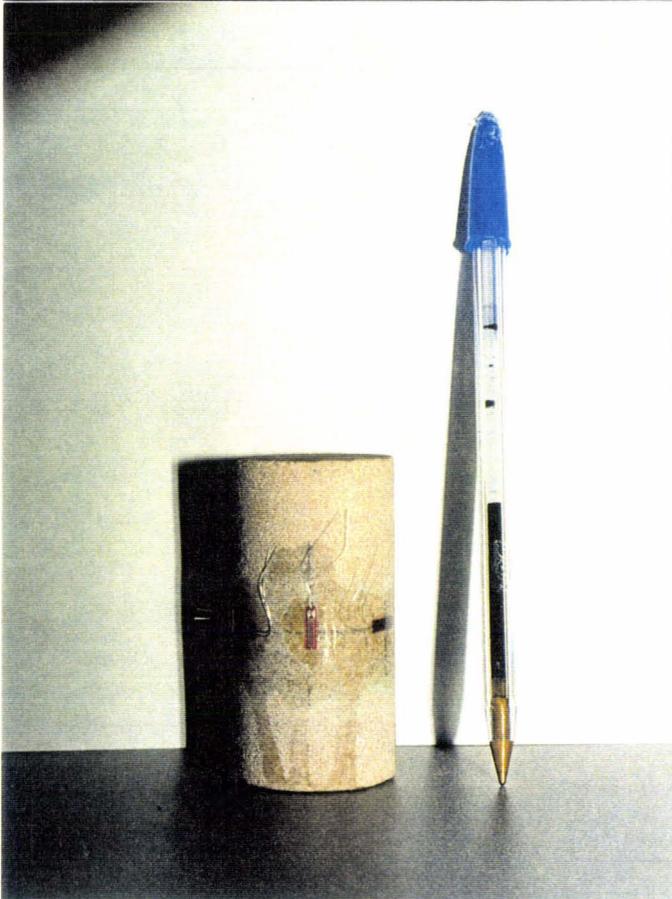
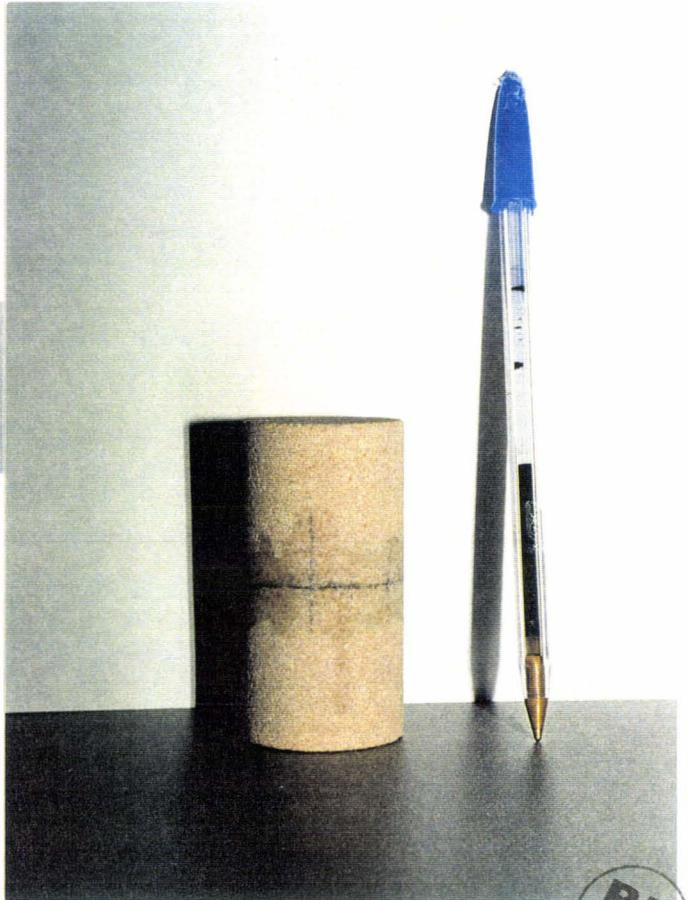


←=Echantillon mis en place

<=Echantillon sain



Echantillon avec marquage de l'emplacement des jauges

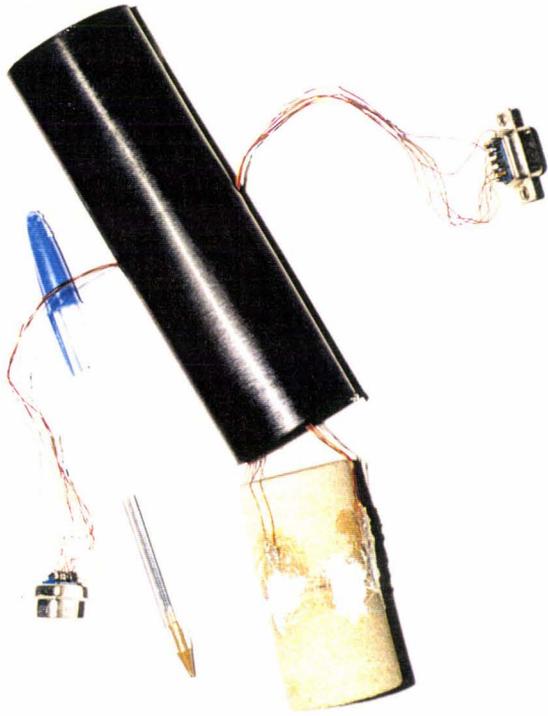


<=Echantillon avec les jauges collées

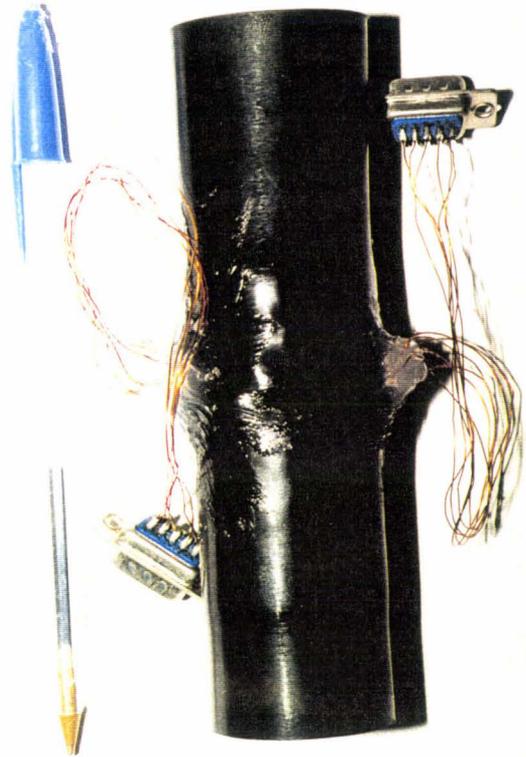


Figure AIII.2 : Préparation de l'échantillon

<=Echantillon après protection des jauges et soudage des connexions



Mise en gain et application de silicone pour l'étanchéité



<=Echantillon après protection des jauges et soudage des connexions

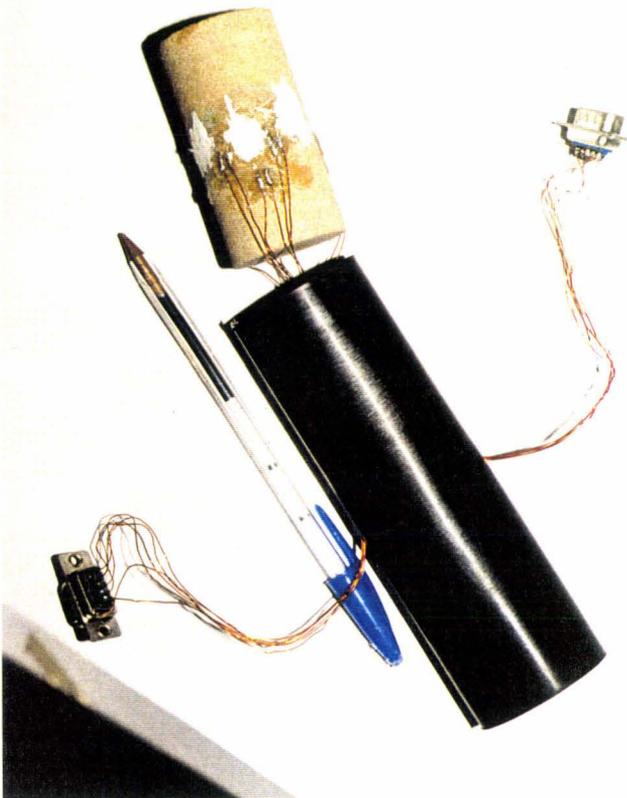
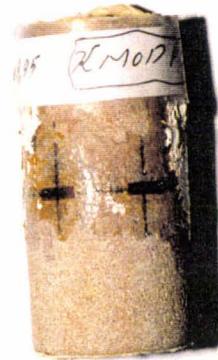


Figure AIII.2 : Suite



<=Essai avec cycles de décharg.-recharg. déviatorique et montées en pression P ( $P_c=10$  MPa)

Essai avec cycles de charge.-décharg.-recharg latéral ( $P_c=40$  MPa)



<=Essai non drainé avec chutes de pression P ( $P_c=5$  MPa)



Figure AIII.3 : Echantillon rompus