

# UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Année : 2005

N° d'ordre :3761

## THESE DE DOCTORAT

*Préparée au*

**Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR 8107)**

Ecole Polytechnique Universitaire de Lille

*Spécialité*

**Génie Civil**

Par

***Ali JALBOUT***

-----  
**Etude expérimentale de l'influence de l'endommagement induit  
sur le comportement mécanique d'une roche fragile**  
-----

Soutenue le 2 décembre 2005 devant le jury composé de :

<b><i>I. SHAHROUR</i></b>	<b><i>Université des Science et Technologies de Lille</i></b>	<b><i>Président</i></b>
<b><i>M-P. LUONG</i></b>	<b><i>Ecole Polytechnique de Paris- LMS</i></b>	<b><i>Rapporteur</i></b>
<b><i>C. SCHRODER</i></b>	<b><i>Université de Liege - L.G.V Belgique</i></b>	<b><i>Rapporteur</i></b>
<b><i>M. BOULON</i></b>	<b><i>Université de Grenoble 1</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>
<b><i>J-F SHAO</i></b>	<b><i>Université des Science et Technologies de Lille</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>
<b><i>M. SIBAI</i></b>	<b><i>Laboratoire de Mécanique de Lille</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>

*A*

*LA PALESTINE mon pays*

*A*

*MA FAMILLE*

## **AVANT-PROPOS**

*Ce travail de recherche a été réalisé au Laboratoire de Mécanique de Lille (LML), département de Géotechnique & Génie Civil (GTGC) à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL).*

*Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce sujet de thèse.*

*M<sup>r</sup> **J-F SHAO** Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille m'a accueilli dans son équipe de travail, et m'a facilité toutes les conditions pour mener ce travail à bien.*

*M<sup>r</sup> **M. SIBAI**, Ingénieur de Recherche au Laboratoire de Mécanique de Lille m'a réservé des moments précieux de discussion. Je le remercie infiniment pour son apport à la grande cohérence de ce manuscrit, sa grande disponibilité et sa sympathie.*

*M<sup>r</sup> **I. SHAHROUR**, Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille a bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse et d'examiner ce travail de recherche. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect.*

*M<sup>rs</sup> les Professeurs **M-P. LUONG** de L'Ecole Polytechnique de Paris et **C. SCHRODER** de l'Université de Liège (Belgique), ont bien voulu être rapporteurs de ma thèse. Je les remercie vivement pour tous les discussions, suggestions et ces précieux conseils*

*M<sup>r</sup> **M. BOUON**, Professeur à l'Université e Grenoble pour avoir bien voulu participer à mon jury et juger ce travail. Je lui exprime ma profonde reconnaissance.*

*Je n'oublie pas dans ces remerciements tous mes amis de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur sympathie et leur soutien durant toutes ces années de recherche.*

*Je dédie enfin ce manuscrit à tous les membres de ma famille qui m'ont toujours aidé, encouragé et soutenu durant toutes ces longues années de recherche jusqu'au l'achèvement de ce travail..*

## **RESUME**

La prédiction de la stabilité des ouvrages souterrains est toujours un enjeu économique important, que ce soit dans le domaine du génie civil, du génie minier ou du génie pétrolier. L'analyse de la stabilité de ces ouvrages nécessite une bonne connaissance des mécanismes de déformation et de rupture du milieu rocheux.

L'objet de ce travail, est l'étude de l'effet de l'anisotropie induite sur le comportement d'un grès des Vosges. La méthode consiste à créer différentes configurations d'endommagement correspondant à plusieurs états de fissurations, et par la suite, examiner l'évolution de certains paramètres mécaniques.

L'étude est réalisée au moyen d'essais conventionnels (compression triaxiale, traction, couplage) sur un matériau présentant une isotropie initiale.

L'endommagement du matériau est fait sur des grands blocs après plusieurs essais préliminaires de témoins. Trois configurations de dégradation ont été réalisées. Une étude détaillée est réalisée sur des échantillons carottés dans ces blocs. L'influence de l'anisotropie de l'endommagement induit sur l'évolution des propriétés mécaniques est étudiée. L'analyse des résultats met en évidence l'effet du pré - endommagement sur l'évolution des propriétés mécaniques.

## ***ABSTRACT***

The prediction of the stability of the underground works is always a significant economic stake, which it is in the field of the civil engineering, the mining engineering or the Petroleum engineering. The analysis of the stability of these works requires a good knowledge of the mechanisms of deformation and rupture of the rock medium. The object of this work is the study of the induced anisotropy of a Vosges sandstone. The method consists in to create a various configurations of damage, which is corresponding in several states of cracking, and examining the evolution of certain mechanical parameters. The study is carried out by means of conventional tests (triaxial compression, traction) on a material having an initial isotropy. The damage of material is made on large blocks after several witnesses preliminary tests. Three configurations of degradation were carried out. A detailed study is carried out on samples cored in these blocks. The influence of the anisotropy of the damage induced on the evolution of the mechanical properties has been studied. The analysis of the results highlights the effect of pre - damage on the evolution of the mechanical properties.

# SOMMAIRE

<b>RESUME</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTE DES PHOTOS</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>10</b>
<b>CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>13</b>
1.1. LES ROCHES .....	13
1.1.1 Les roches sédimentaires .....	13
1.1.2 Les sédiments détritiques .....	14
1.1.3 Les grès .....	15
1.1.4 La présence des discontinuités et des fissures dans les roches .....	15
1.2. L'ANISOTROPIE DE STRUCTURE .....	16
1.2.2 Rappel sur le comportement élastique linéaire anisotrope (loi de HOOKE) .....	19
1.3. L'ANISOTROPIE INDUITE PAR ENDOMMAGEMENT .....	22
<b>CHAPITRE 2 : IDENTIFICATION DU MATERIAU ETUDIÉ ET MODE OPÉRATOIRE</b> .....	<b>28</b>
2.1. ÉTUDE MINÉRALOGIQUE (DIFFRACTOMÉTRIE X ET MEB) : .....	28
2.2. ÉTUDE DE LA POROSITÉ .....	30
2.3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL .....	31
2.3.1 Dispositif de Mesures .....	33
2.3.2 Mode Opératoire .....	34
<b>CHAPITRE 3: COMPORTEMENT DU BLOC À L'ÉTAT SAIN</b> .....	<b>38</b>
3.1. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE .....	39
3.1.1. Essai de compression hydrostatique .....	40
3.1.2. Essai de Compression Simple .....	43
3.1.3. Essai de Compression Triaxiale avec cycle de chargement – déchargement – rechargement : .....	48
3.1.4. Discussion .....	56
➤ Résistance à la rupture .....	56
➤ Modules initiaux ( $E_{i0}$ et $E_{i0}$ ), et sécants ( $E_t$ et $E_t$ ) .....	57
➤ La perte de linéarité .....	63
3.1.5. Essai de Traction Directe .....	64
3.1.6. Trajet de chargement proportionnel .....	67
3.1.7. Trajet d'extension latérale .....	70
3.1.8. Les essais de couplage poromécanique : .....	72
3.1.8.1. Chemin de Compression Hydrostatique .....	74
3.1.8.2. Essai de compression triaxiale monotone avec montées en pression interstitielle .....	80
<b>CHAPITRE 4: ESSAIS PRÉLIMINAIRES ET COMPARAISON ENTRE BLOCS</b> .....	<b>86</b>
4.1. LA PRESSE TRIAXIALE VRAIE ET LES ESSAIS PRÉLIMINAIRES .....	86
4.1.1. Présentation de la presse triaxiale vraie .....	86
4.1.2 LES ESSAIS PRÉLIMINAIRES .....	87
A) Premier Bloc (A) .....	89
B) Deuxième Bloc (B) .....	90
C) Troisième Bloc (C) .....	91
D) Remarques .....	92
4.2 PROGRAMME D'ESSAI D'ENDOMMAGEMENT SUR BLOCS .....	93
4.2.1 Définition de l'endommagement .....	93
4.2.2 Essais d'endommagement sur blocs .....	94

4.2.2.1 Bloc 1 .....	95
4.2.2.2 Bloc 2 .....	96
4.2.2.3 Bloc 3 .....	97
<b>4.3 DEPOUILLEMENT DES ESSAIS SUR LES BLOCS PRE - ENDOMMAGES .....</b>	<b>101</b>
4.3.1 <i>Le Bloc 1 (charge uniaxiale à 0,7 de <math>\sigma_c</math>)</i> .....	101
4.3.1.1 Les Modules initiaux .....	101
4.3.1.2 Les modules sécants .....	102
4.3.1.3 La Résistance à la rupture.....	105
4.3.1.4 Les Comparaisons des essais hydrostatiques .....	106
4.3.1.5 La perte de linéarité .....	107
4.3.1.6 Les Essais de traction.....	108
4.3.2 <i>Le Bloc 2 (charge biaxial à 0,9 de <math>\sigma_c</math>)</i> .....	109
4.3.2.1 Les Modules initiaux .....	109
4.3.2.2 Les modules sécants .....	110
4.3.2.3 La Résistance à la rupture.....	112
4.3.2.4 Comparaison des essais hydrostatiques .....	112
4.3.2.5 La perte de linéarité .....	114
4.3.2.6 Les Essais de traction.....	115
4.3.3 <i>Le Bloc 3 (charge biaxial à 0,7 de <math>\sigma_c</math>)</i> .....	116
<b>4.4 COMPARAISON ENTRE BLOCS .....</b>	<b>116</b>
4.4.1 <i>Résistance à la rupture</i> .....	117
4.4.2 <i>Modules Initiaux</i> .....	120
4.4.2.1 Modules Longitudinaux Initiaux .....	120
4.4.2.2 Modules Initiaux Transversaux .....	123
4.4.3 <i>Modules sécants</i> .....	126
4.4.3.1 Modules Longitudinaux Sécants.....	126
4.4.3.2 Modules Transversaux Sécants.....	129
4.4.4 <i>Les Paramètres Hydrostatiques</i> .....	132
4.4.4.1 le module de compressibilité initial .....	132
4.4.4.2 le module de compressibilité .....	132
4.4.4.3 la pression de fermeture des microfissures .....	133
4.4.5 <i>L'Essai de Traction</i> .....	135
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>137</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>140</b>
<b>ANNEXE I: BLOC VIERGE.....</b>	<b>148</b>
<b>ANNEXE II : BLOC 1 .....</b>	<b>151</b>
<b>ANNEXE III : ESSAIS SUR LE BLOC 2.....</b>	<b>156</b>
<b>ANNEXE IV : ESSAIS SUR LE BLOC 3.....</b>	<b>161</b>
<b>ANNEXE V : LES COMPARAISONS DU BLOC3 .....</b>	<b>166</b>
<b>ANNEXE VI : LES MODULES SECANTS .....</b>	<b>171</b>
<b>ANNEXE VII : ETUDE MINERALOGIQUE .....</b>	<b>180</b>
<b>ANNEXE VIII : DES PHOTOS.....</b>	<b>184</b>

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : CEMENTATION DES GRAINS DANS UN MILIEU ROCHEUX.....	16
FIGURE 1.2 : DEFINITION DU REPERE DE STRUCTURE .....	20
FIGURE 1.3 : ESSAI DE COMPRESSION TRIAXIALE AVEC CYCLES DE DECHARGEMENT - RECHARGEMENT .....	25
FIGURE 1.4 : SCHEMA DE PRE – ENDOMMAGEMENT EN COMPRESSION ET DE CAROTTAGE DE L'ÉPROUVETTE .....	26
FIGURE 2.1 : SCHEMA DE LA PRESSE TRIAXIALE .....	32
FIGURE 2.2 : SCHEMA D'UNE ÉPROUVETTE AVEC LES JAUGES .....	35
FIGURE 3. 1 : SCHEMA REPRESENTATIF DE CAROTTAGE AVEC LES PLANS DE LITAGE .....	39
FIGURE 3.2 : CHEMIN REPRESENTATIF DE CHARGEMENT HYDROSTATIQUE DANS L'ESPACE DES CONTRAINTES ....	41
FIGURE 3.3 : COURBE REPRESENTATIVE DE L'ESSAI HYDROSTATIQUE 41 (CONTRAINTE – DEFORMATION VOLUMIQUE) .....	41
FIGURE 3.4 : ESSAI HYDROSTATIQUE SUR UN ECHANTILLON ISSU D'UN CAROTTAGE HORIZONTAL $\theta=0^\circ$ (A) ET D'UN CAROTTAGE VERTICALE $\theta=90^\circ$ (B) .....	42
FIGURE 3.5 : COURBE REPRESENTATIVE DE L'ESSAI DE COMPRESSION.....	45
FIGURE 3.6 : ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MONOTONE POUR UN CAROTTAGE HORIZONTAL $\theta=0^\circ$ .....	46
FIGURE 3.7 : ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE AVEC CYCLES DE CHARGEMENT- DECHARGEMENT –RECHARGEMENT AXIAL ( $\theta=0^\circ$ ).....	46
FIGURE 3.8 : SCHEMA DE LA PRESSE TRIAXIALE.....	49
FIGURE 3.9 : ESSAI DE COMPRESSION TRIAXIALE AVEC CYCLES DE CHARGEMENT- DECHARGEMENT POUR UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 5 MPa ET UN ANGLE DE CAROTTAGE DE $\theta=0^\circ$ .....	50
FIGURE 3.10 : ESSAI TRIAXIALE AVEC CYCLES DE CHARGEMENT -DECHARGEMENT POUR UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 10 MPa ET UN ANGLE DE CAROTTAGE DE $\theta=0^\circ$ .....	52
FIGURE 3.11 : ESSAI TRIAXIALE AVEC CYCLES DE CHARGEMENT - DECHARGEMENT POUR UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 20 MPa ET UN ANGLE DE $\theta=0^\circ$ .....	54
FIGURE 3.12 : COMPARAISON DES VALEURS DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN.....	56
FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE $\theta=0^\circ$ , $\theta=90^\circ$ .....	56
FIGURE 3.13 : COURBE DE LA RUPTURE POUR LES ESSAIS POUR $\theta=0$ ET $\theta=90^\circ$ .....	57
FIGURE 3.14 : ÉVOLUTION DES VALEURS DU MODULE INITIAL.....	58
EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE .....	58
FIGURE 3.15 : VALEURS DU MODULE LONGITUDINAL SECANT EN FONCTION .....	59
DES DEVIATEURS DES CONTRAINTES .....	59
FIGURE 3.16 : VALEURS DU MODULE TRANSVERSAL SECANT EN FONCTION DES DEVIATEURS DES CONTRAINTES .	60
FIGURE 3.17 : RAPPORT DU MODULE SECANTS EN FONCTION DES DEVIATEURS DES CONTRAINTES .....	61
FIGURE 3.18 : DEUX COURBES LISSEES D'UN ESSAI DE TRACTION DIRECTE.....	65
FIGURE 3.19 : VALEURS DU MODULE SECANT LONGITUDINAL EN FONCTION DES CONTRAINTES DE TRACTION ....	66
FIGURE 3.20 : LES PARTIES INITIALES DES ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE ET DE TRACTION .....	67
FIGURE 3.21 : SCHEMA DE LA CELLULE AUTONOME ET AUTOCOMPENSEE THESE (KHAZRAEI 1995) .....	68
FIGURE 3.22 : CHEMIN DE SOLLICITATION DE CHARGEMENT PROPORTIONNEL.....	69
FIGURE 3.23 : RESULTAT REPRESENTATIF D'UN ESSAI DE CHARGEMENT PROPORTIONNEL $k=1,5$ .....	70
FIGURE 3.24 : CHEMIN DE SOLLICITATION DANS L'ESPACE DES CONTRAINTES .....	71
FIGURE 3.25 : RESULTATS REPRESENTATIFS D'UN ESSAI D'EXTENSION LATÉRALE POUR $\theta=90^\circ$ .....	72
FIGURE 3.26 : CHEMIN DE CHARGEMENT HYDROSTATIQUE DANS L'ESPACE .....	75
DES CONTRAINTES ( $\sigma_1$ , $\sigma_2$ , $\sigma_3$ ) .....	75
FIGURE 3.27 : CHEMIN DE CHARGEMENT HYDROSTATIQUE EN CONDITION DRAINE .....	76
FIGURE 3.28 : ESSAI DE CHARGEMENT HYDROSTATIQUE EN CONDITION DRAINEE .....	76
FIGURE 3.29 : CHEMIN DE CHARGEMENT HYDROSTATIQUE EN CONDITION NON DRAINE SUR LE PLAN ( $P_c - P_1$ ) .....	77
FIGURE 3.30 : ESSAI DE CHARGEMENT HYDROSTATIQUE EN .....	78
CONDITION NON DRAINEE .....	78
FIGURE 3.31 : CHEMIN DE SOLLICITATION DE L'ESSAI $\Delta P_c - \Delta P_1$ SUR LE PLAN ( $P_c - P_1$ ) .....	79
FIGURE 3.32 : ESSAI A $\Delta P_c - \Delta P_1$ .....	79
FIGURE 3.33 : CHEMIN DE COMPRESSION TRIAXIALE EN CONDITION DRAINEE AVEC DES MONTEES EN $P_i$ DANS L'ESPACE DES CONTRAINTES .....	81
FIGURE 3.34 : ESSAI TRIAXIAL MONOTONE AVEC MONTEES EN PRESSION INTERSTITIELLE POUR UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 20 MPa .....	82
FIGURE 3.35 : VARIATION DES DEFORMATIONS EN FONCTION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE ( $P_c=20$ MPa) .....	83
FIGURE 4.1 : SCHEMA D'ORIENTATION DES CONTRAINTES PRINCIPALES .....	88



FIGURE 4.2 : VALEURS DE CONTRAINTE A LA RUPTURE OBTENUES RESPECTIVEMENT PAR DES ESSAIS DE COMPRESSION CONVENTIONNELLE ET DE COMPRESSION TRIAXIALE VRAIE .....	89
FIGURE 4.3 : SCHEMA DE CHARGEMENT APPLIQUE, VUE DES DEUX FAMILLES DE FISSURATION .....	90
FIGURE 4.4 : SCHEMA DE CHARGEMENT APPLIQUE, VUE DES DEUX FAMILLES DE FISSURATIONS.....	91
FIGURE 4.5 : SCHEMA DE CHARGEMENT APPLIQUE, VUE D'UNE SEULE FAMILLE DE FISSURATION .....	92
FIGURE 4.6 : SCHEMA DE CAROTTAGE POUR LE BLOC 1 .....	94
FIGURE 4.7 : COMPARAISON ENTRE DEUX ECHANTILLONS CAROTTES SUIVANT LES DIRECTIONS H ET V .....	95
FIGURE 4.8 : SCHEMAS REPRESENTATIFS DES DIFFERENTES TYPES DE FAMILLES DE FISSURATIONS .....	99
FIGURE 4.9 : VALEURS DE $E_{L0}$ , $E_{T0}$ POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS AVEC DIFFERENTES.....	101
FIGURE 4.10 : VALEURS DE $E_L$ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS AVEC DIFFERENTES VALEURS DE PRESSION DE CONFINEMENT .....	103
FIGURE 4.11 : VALEURS DE $E_T$ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS AVEC DIFFERENTES VALEURS DE PRESSION DE CONFINEMENT .....	104
FIGURE 4.12 : COMPARAISON DES VALEURS DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN FONCTION DE L'ORIENTATION DE CAROTTAGE.....	105
FIGURE 4.13 : COMPARAISON DES PARAMETRES DES ESSAIS HYDROSTATIQUES EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE A) MODULE DE COMPRESSIBILITE INITIALE B) MODULE DE COMPRESSIBILITE C) PRESSION DE FERMETURE DE MICROFISSURES .....	106
FIGURE 4.14 : COMPARAISON DES MODULES DE SECANTES EN TRACTION EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE ET POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS DE CAROTTAGE .....	108
FIGURE 4.15 : VALEURS DE $E_{T0}$ , $E_{L0}$ POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS .....	109
FIGURE 4.16 : VALEURS DE $E_L$ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS AVEC DIFFERENTES VALEURS DE PRESSION DE CONFINEMENT.....	110
FIGURE 4.17 : VALEURS DE $E_T$ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS AVEC DIFFERENTES VALEURS DE LA PRESSION DE CONFINEMENT.....	111
FIGURE 4.18 : COMPARAISON DES VALEURS DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN FONCTION DE L'ORIENTATION DE CAROTTAGE.....	112
FIGURE 4.19 : COMPARAISON DES PARAMETRES HYDROSTATIQUES EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE A) MODULE DE COMPRESSIBILITE INITIAL B) MODULE DE COMPRESSIBILITE.....	113
C) PRESSION DE FERMETURE DE MICROFISSURES.....	113
FIGURE 4.20 : COMPARAISON DES MODULES SECANTS EN TRACTION EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE ET POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS DE CAROTTAGE .....	115
FIGURE 4.21 : RAPPORT DES RESISTANCES A LA RUPTURE EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE POUR DIFFERENTES VALEURS DE PRESSION DE CONFINEMENT .....	118
FIGURE 4.22 : RAPPORT DES MODULES LONGITUDINAUX INITIAUX EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE POUR DIFFERENTES VALEURS DE PRESSION DE CONFINEMENT .....	121
FIGURE 4.23 : RAPPORT DES MODULES INITIAUX TRANSVERSAUX EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE POUR DIFFERENTES VALEURS DE LA PRESSION DE CONFINEMENT .....	125
FIGURE 4.24 : RAPPORT DES MODULES LONGITUDINAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (COMPRESSION SIMPLE).....	127
FIGURE 4.25 : RAPPORT DES MODULES LONGITUDINAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (PC=5 MPA).....	127
FIGURE 4.26 : RAPPORT DES MODULES LONGITUDINAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (PC=10 MPA).....	128
FIGURE 4.27 : RAPPORT DES MODULES LONGITUDINAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (PC=20 MPA).....	128
FIGURE 4.28 : RAPPORT DES MODULES TRANSVERSAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (COMPRESSION SIMPLE).....	129
FIGURE 4.29 : RAPPORT DES MODULES TRANSVERSAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (PC=5 MPA).....	130
FIGURE 4.30 : RAPPORT DES MODULES TRANSVERSAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (PC=10 MPA).....	130
FIGURE 4.31 : RAPPORT DES MODULES TRANSVERSAUX EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DEVIATORIQUE POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE (PC=20 MPA).....	131
FIGURE 4.32 : RAPPORT DES MODULES DU COMPRESSIBILITE INITIAUX EN FONCTION DE LA L'ANGLE DE CAROTTAGE POUR LES ESSAIS HYDROSTATIQUES .....	132
FIGURE 4.33 : RAPPORT DES MODULES DE COMPRESSIBILITE EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE POUR LES ESSAIS HYDROSTATIQUES.....	133

FIGURE 4.34 : RAPPORT DES PRESSIONS DE FERMETURE DES MICROFISSURATIONS EN FONCTION DE L'ANGLE DE CAROTTAGE POUR LES ESSAIS HYDROSTATIQUES .....	133
FIGURE 4.35 : RAPPORT DES MODULES SECANTS EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE TRACTION POUR DIFFERENTS ANGLES DE CAROTTAGE.....	135

## **LISTE DES TABLEAUX**

TABLEAU 1.1 : CLASSIFICATION DES ROCHES DETRITIQUES.....	14
TABLEAU 2.1 : RESULTATS DU TEST DE POROSITE SUR LE GRES DES VOSGES.....	30
TABLEAU 3.1 : VALEURS DE $P_f$ , $K_0$ , $K$ ET $E_{v0}$ , DEDUITES DES ESSAIS HYDROSTATIQUES .....	43
TABLEAU 3.2 : VALEURS DE $E_{i0}$ , $E_{t0}$ ET LA CONTRAINTE A LA RUPTURE POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS DE CAROTTAGE.....	47
TABLEAU 3.3 : VALEURS DEDUITES DES MODULES SECANTS EN FONCTION DE LA CONTRAINTE AXIALE .....	47
TABLEAU 3.3 : VALEURS $E_{t0}$ ET $E_{t0}$ ET LA CONTRAINTE A LA RUPTURE DES ESSAIS DE COMPRESSION TRIAXIALE (PC=5 MPA) AVEC CYCLES DE CHARGEMENT - DECHARGEMENT .....	51
TABLEAU 3.4 : VALEURS DEDUITES DES MODULES SECANTS $E_{t0}$ ET $E_{t0}$ EN FONCTION DU DEVIATEUR DE CONTRAINTES PC=5 MPA.....	51
TABLEAU 3.5 : VALEURS $E_{t0}$ ET $E_{t0}$ ET LA CONTRAINTE A LA RUPTURE DES ESSAIS DE COMPRESSION TRIAXIALE AVEC CYCLES DE CHARGEMENT - DECHARGEMENT (PC=10 MPA).....	52
TABLEAU 3.6 : VALEURS DEDUITES DES MODULES SECANTS $E_{t0}$ ET $E_{t0}$ EN FONCTION DU DEVIATEUR DE CONTRAINTES PC=10 MPA.....	53
TABLEAU 3.7 : VALEURS $E_{t0}$ ET $E_{t0}$ ET LA CONTRAINTE A LA RUPTURE DES ESSAIS DE COMPRESSION TRIAXIALE AVEC CYCLES DE CHARGEMENT - DECHARGEMENT ( PC=20 MPA).....	54
TABLEAU 3.8 : VALEURS DEDUITES DES MODULES SECANTS $E_{t0}$ ET $E_{t0}$ EN FONCTION.....	55
DU DEVIATEUR DE CONTRAINTES A PC=20 MPA.....	55
TABLEAU 3.9 : MOYENNES ARITHMETIQUES DE RESISTANCE A LA RUPTURE POUR CHAQUE NIVEAU DE PRESSION DE CONFINEMENT .....	57
TABLEAU 3.11 : MOYENNES ARITHMETIQUES DU MODULE INITIAL POUR CHAQUE NIVEAU DE PRESSION DE CONFINEMENT .....	58
TABLEAU 3.12 : LES MOYENNES DE $E_i$ ET $E_t$ ARITHMETIQUES POUR CHAQUE NIVEAU DE PRESSION DE CONFINEMENT ET DES CONTRAINTES DEVIATORIQUE .....	62
TABLEAU 3.13 : VALEURS DES CONTRAINTES AU SEUIL DE DILATANCE .....	64
TABLEAU 3.14 : VALEURS DEDUITES DES ESSAIS HYDROSTATIQUE .....	80
TABLEAU 3.15 : MODULES DU COUPLAGE TANGENTS A DIFFERENTS NIVEAUX DU DEVIATEUR (P <sub>c</sub> =20 MPA) .....	84
TABLEAU 4.1 : VALEURS DES CONTRAINTES A LA RUPTURE DANS LA PRESSE TRIAXIALE VRAIE.....	88
TABLEAU 4.2 : LES DIFFERENTS TYPES D'ESSAI REALISES SUR LES DIFFERENTS BLOCS PRE – ENDOMMAGES ET LE BLOC VIERGE .....	100
TABLEAU 4.3 : VALEUR DES CONTRAINTES AUX SEUILS DU DILATANCE EN MPA.....	107
TABLEAU 4.4 : VALEUR DES CONTRAINTES AU SEUIL DE DILATANCE .....	114

## **LISTE DES PHOTOS**

PHOTO 2.1 : PHOTOGRAPHIE DU GRES DES VOSGES EFFECTUEE AU MEB (GROSSISSEMENT 100).....	29
PHOTO 2.2 : PHOTOGRAPHIE DU GRES DES VOSGES EFFECTUEE AU MEB (GROSSISSEMENT 200).....	29
PHOTO 3.1 : ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE.....	44
PHOTO 3.2 VUE GENERALE DE LA PRESSE TRIAXIALE.....	48
PHOTO 3.3 : LE MONTAGE COMPLET DE TRACTION DIRECTE.....	64
PHOTO 3.4 : VUE DE L'APPAREIL DE TRACTION DIRECTE.....	65
PHOTO 3.5 : CELLULE AUTONOME ET AUTOCOMPENSEE AVEC TROIS POMPES GILSON.....	67
PHOTO 4.1 : VUE GENERALE DE LA PRESSE TRIAXIALE VRAIE DU L.M.L. ....	86
PHOTO 4.2 : UN BLOC DE GRES DANS LA PRESSE TRIAXIALE VRAIE AVEC LES PLAQUES DE REDUCTIONS.....	87
PHOTO 4.3 : LE BLOC 1 AVEC CES ORIENTATIONS DE CAROTTAGE.....	96
PHOTO 4.4 : LE BLOC 2 AVEC CES ORIENTATIONS DE CAROTTAGE.....	97
PHOTO 4.5 : LE BLOC 3 AVEC CES ORIENTATIONS DE CAROTTAGE.....	98

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Un massif rocheux est par nature un milieu hétérogène et ce quelle que soit l'échelle à laquelle on se place. On peut en effet citer les dislocations dans les cristaux, les fissures des roches, les joints et les failles du massif rocheux. Certaines roches sont polycristallines, chaque phase minérale présentant des propriétés différentes.

Cette diversité des milieux naturels a motivé la recherche d'une grande variété d'approches allant des études mésomécaniques aux approches macroscopiques. Dans cette étude nous avons choisi de travailler dans le cadre d'une approche expérimentale macroscopique, prenant en compte l'effet de la microfissuration sur le comportement de la roche. Dans ce contexte, on trouve facilement dans la littérature, deux types d'études expérimentales traitant de l'effet de l'endommagement sur les roches.

On peut citer dans un premier temps les travaux traitant cet effet sur des roches initialement isotropes IKOGOU (1992) KHAZRAIE (1995) sur le grès. Dans un second temps, on trouve d'autres travaux expérimentaux sur l'étude de l'endommagement des roches initialement anisotropes à symétrie de révolution (une anisotropie de structure), c'est à dire, possédant une symétrie axiale; c'est le cas du schiste HAMMAD (1992) ou l'argilite de Tournemire NIANDOU (1994).

Mais, on trouve rarement dans la littérature des études expérimentales sur des roches qui possèdent des symétries orthotropes (anisotropie de structure ou anisotropie induite). Dans ce cas la roche présente différentes directions de plans d'anisotropies. En effet, il y a très peu des travaux qui traitent l'effet de plusieurs familles de fissurations sur le comportement de roches (pour le cas de l'anisotropie induite), et il y a également très peu de travaux expérimentaux qui traitent le comportement des roches avec plusieurs plans d'anisotropies à l'échelle des fissures (pour le cas de l'anisotropie de structure).

Le but de ce travail expérimental est de réaliser une étude sur une roche initialement isotrope, puis induire dans cette roche une première anisotropie à symétrie axiale (avec une seule famille de fissuration) grâce à la presse triaxiale vraie du LML, dans un deuxième temps on va créer (toujours dans la presse de triaxiale vraie) une anisotropie avec deux familles de fissurations perpendiculaires entre elles. Sur ces roches (une naturelle et deux autres artificielles), est réalisée une étude expérimentale de l'endommagement induit. C'est à dire :

- ④ *Étude de l'endommagement sur une roche initialement isotrope.*
- ④ *Étude de l'endommagement sur une roche ayant subie initialement un endommagement anisotrope avec une seule famille de fissurations.*
- ④ *Étude de l'endommagement sur une roche ayant subie initialement un endommagement anisotrope avec deux familles de fissurations*

Dans le premier chapitre, essentiellement bibliographique, nous faisons un rappel portant sur les aspects géologiques des roches. Puis, nous présentons sur plusieurs définitions de l'endommagement trouver des méthodes illustrant le « pré -endommagement».

Le deuxième chapitre portera sur la présentation du matériau étudié, un dispositif expérimental est adapté pour une étude menée au sein de notre laboratoire.

Le troisième chapitre traite le comportement des grès des Vosges à l'état sain, un programme expérimental assez complet est développé pour cerner l'essentiel du comportement du grès des Vosges. Ayant identifié le comportement «isotrope», des essais avec différents chemins de sollicitations, et en deux orientations de carottage ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) ont été réalisés. Dans ce chapitre, nous essayerons de présenter les différents montages expérimentaux afin de présenter une partie importante des essais en mécanique des roches, à savoir : des essais de compression, des essais de traction, des essais de couplage et des essais de validation.

Le quatrième chapitre est consacré au développement d'une nouvelle méthode d'identification de l'endommagement anisotrope avec différents types de familles de fissurations. Ce chapitre est divisé en quatre volets

- ④ *En premier lieu, nous présentons des essais témoins pour vérifier l'existence des familles de microfissurations*
- ④ *Le deuxième volet est consacré à la méthode utilisée pour la création des familles de microfissurations de pré- endommagement dans les trois blocs, avec différents types de configurations.*
- ④ *Nous présentons dans le troisième volet une étude détaillée des trois blocs pré-endommagés.*
- ④ *Enfin, le dernier paragraphe est consacré à la comparaison entre le bloc sain et les blocs pré- endommagées sur les différents paramètres mécaniques*

# **CHAPITRE 1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

Dans ce chapitre, essentiellement bibliographique, nous faisons tout d'abord un rappel général portant sur les aspects géologiques des roches. Après avoir rappelé la définition des roches sédimentaires détritiques, nous analysons l'origine physique de l'anisotropie de structure. Puis, nous présentons les concepts de base de l'élasticité linéaire anisotrope. Le chapitre s'achève sur l'analyse de l'endommagement anisotrope induit, en vue de notre étude expérimentale.

### **1.1. LES ROCHES**

D'une manière générale, les processus de formation géologique des roches ont une influence très importante sur le comportement mécanique de celles-ci. La description précise des compositions minéralogiques et des textures de la roche fournit au mécanicien des informations toujours précieuses. Dans cette optique, les géologues classent les roches en trois grands groupes CHAMLEY (1990), COJAN et RENARD (1999), PROTHERO et SCHWAB (2003), READING (1996), et TUCKER (2001) :

- les roches sédimentaires sont formées à partir de dépôts d'éléments détritiques, chimiques ou biochimiques (grès, argilite....)
- les roches éruptives (basal....)
- les roches métamorphiques (schiste, marbre....)

Pour l'étude du comportement mécanique d'un grès des Vosges, il nous a paru important de faire un rappel général sur l'origine des grès (roche sédimentaire détritique), ainsi que sur la présence des discontinuités et des fissures au sein de la roche.

#### **1.1.1 Les roches sédimentaires**

Les roches sédimentaires font partie inhérente du cycle géologique, puisque leurs constituants (grains ou ions solubles) résultent de l'altération de roches ou de sédiments préexistants. Ces constituants ont subi un certain transport et ils se sont déposés, ou ont été précipités dans un bassin de sédimentation. L'évolution post-dépôt de ces sédiments (diagenèse) les transforme en roches sédimentaires. Ces roches peuvent subir un métamorphisme et être à leur tour soumises à l'altération lors de leur passage à la surface des continents.



Il est possible de classer les roches sédimentaires en quatre grandes classes génétiques

- les roches détritiques.
- les roches biogéniques, biochimiques ou organiques.
- les roches d'origine chimique résultant de la précipitation de minéraux dans un milieu sursaturé.
- une dernière classe est consacrée aux "autres roches sédimentaires" dont l'origine n'est pas liée à l'altération.

### 1.1.2 Les sédiments détritiques

Une première distinction parmi les roches détritiques est fondée sur l'état d'agrégation des particules sédimentaires : on oppose les roches meubles et les roches plastiques aux roches dures ou cohérentes. Dans les roches meubles, les grains détritiques sont entièrement indépendants les uns des autres : ils forment un assemblage en équilibre mécanique dont les espaces intergranulaires (pores) représentent une fraction importante du volume de la roche. Dans les roches plastiques, la présence de minéraux argileux en quantité importante permet une déformation sous contrainte. Dans les roches cohérentes, les constituants sont intimement soudés les uns aux autres. La transformation du sédiment meuble en roche indurée résulte soit de l'introduction d'un ciment entre les grains, soit de la compaction du sédiment, soit encore de la déshydratation des constituants argileux.

Un critère général sert à la classification des roches meubles et cohérentes: c'est la dimension des particules détritiques. On admet généralement trois grandes classes granulométriques (Tableau 1.1):

Tableau 1.1 : classification des roches détritiques.

<i>Diamètre des particules</i>	<i>sédiments meubles</i>		<i>sédiments indurés</i>	
<i>&gt; 2 mm</i>	<i>gravier</i>		<i>conglomérat, brèche</i>	
<i>de 2 mm à 62 μm</i>	<i>sable</i>		<i>grès</i>	
<i>&lt; 62 μm</i>	<i>de 62 μm à 4 μm</i>	<i>silt</i>	<i>de 62 μm à 4 μm</i>	<i>siltite</i>
	<i>&lt; 4 μm</i>	<i>argile</i>	<i>&lt; 4 μm</i>	<i>argilite</i>

On notera que parmi les sédiments détritiques, on trouve les grès objet de la présente étude.

### ***1.1.3 Les grès***

Les grès sont l'équivalent consolidé des sables ; ce sont des roches dont les constituants détritiques ont une granulométrie comprise entre 60  $\mu\text{m}$  et 2 mm. L'examen montre d'une part l'existence d'une phase granulométrique principale, la plus grossière, qui comporte les grains du grès et d'autre part, soit une matière interstitielle qui réunit les grains et qu'on appelle le liant, soit des fluides comme de l'eau, du pétrole et de l'air.

Le liant peut être de nature chimique et représenter une précipitation in situ de la matière minérale (silice sous forme d'opale, de calcédoine ou de quartz, carbonate de calcium ou plus rarement hématite, gypse, etc.) on parle dans ce cas du ciment de la roche. Si l'on observe au contraire qu'une phase détritique plus fine occupe les interstices entre les grains de la phase grossière, on parlera d'une matrice intergranulaire, représentant une infiltration mécanique de particules fines entre des grains jointifs.

Du point de vue mécanique, la grande susceptibilité à la microfissuration sous chargement mécanique est un paramètre important qui a motivé le choix de ce type de roche pour notre travail.

### ***1.1.4 La présence des discontinuités et des fissures dans les roches***

L'étude des roches sédimentaires détritiques consolidées montre également l'existence des fissurations et des discontinuités en leur sein.

Les discontinuités présentes dans un milieu fracturé constituent des plans de division ; elles représentent les zones de faiblesse du massif GATELIER (2001), ZHAO et al (2004). On distingue principalement, trois types de discontinuités à l'échelle de l'écorce terrestre : les failles dont les faces ont subi un déplacement relatif tangentiel important ; les diaclases, pour lesquelles on ne note pas de déplacement relatif entre les faces, et enfin les joints. Les failles et les diaclases sont des plans de divisions d'origine mécanique alors que les joints sont les hétérogénéités présentes dans les formations sédimentaires.

Par contre, à l'échelle d'un échantillon de laboratoire, la roche est formée essentiellement des grains, des pores et des microfissures (Figure 1.1) un pore est un espace vide entre les grains dont les dimensions caractéristiques sont presque toutes du même ordre de grandeur. Une fissure est un pore avec une ou deux dimensions caractéristiques plus petites que la troisième, le rapport d'aspect, doit être inférieur à  $10^{-2}$ , KRANZ (1983). On peut noter

ici que les zones de contact entre grains sont des régions privilégiées pour l'apparition de microfissures sous l'action d'un champ de contrainte de compression. On a pu constater en effet, que quatre mécanismes de contact peuvent générer des fissures : d'abord, le mécanisme de « contact hertzien » entre deux grains soumis à l'action d'une force de compression normale au contact ; ensuite, la différence de propriétés élastiques entre grains ; la flexion d'un grain entre deux grains adjacents au premier et enfin, le « mouvement rigide » des grains sous l'action des efforts exercés par les grains voisins.

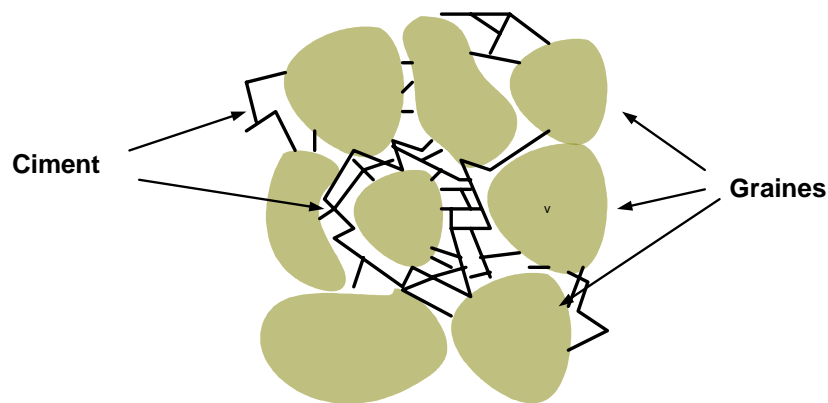


Figure 1.1 : cimentation des grains dans un milieu rocheux

En vue d'une comparaison des résultats expérimentaux à venir, on se propose de présenter les deux grands types d'anisotropie : l'anisotropie structurale et l'anisotropie induite. Par définition, un milieu est anisotrope s'il présente des propriétés liées à des directions privilégiées AMADIE (1954).

## 1.2. L'anisotropie de structure

La plupart des roches présentent une anisotropie due à l'orientation des minéraux, leurs propriétés physiques dépendent alors de l'orientation de la sollicitation par rapport aux axes structuraux [voir CUXAC (1991)].

Les principales structures que l'on rencontre dans les roches sont rappelées ci dessous:

- structures planaires : il s'agit soit de la stratification et litage sédimentaire, soit de la schistosité de flux et foliation, ou encore de la schistosité de crénulation.
- structures linéaires : on appelle linéation, toute trace linéaire inscrite sur un plan de schistosité ou de foliation. C'est une structure pénétrative, il s'agit soit de la linéation d'allongement et minérale, soit de la linéation d'intersection.

L'anisotropie peut être liée à des éléments planaires et/ou linéaires. On peut définir cinq systèmes de symétrie pour les roches :

1- symétrie sphérique : matériau isotrope

2- symétrie axiale : le matériau présente la symétrie de l'ellipsoïde de révolution. Un tel système est encore appelé orthotrope de révolution ou hexagonal par analogie aux systèmes cristallins. Un corps isotrope transverse appartient à ce système.

3- symétrie orthorhombique : le matériau présente la symétrie de l'ellipsoïde de triaxial. Elle correspond au système orthotrope.

4- symétrie monoclinique : présente une axe de la symétrie et un plan perpendiculaire.

5- symétrie triclinique : dans ce cas il n'y a pas de symétrie, seul un centre de symétrie est présent).

Plusieurs études sur le comportement mécanique des roches anisotropes ont montré l'influence de l'anisotropie de structure sur la déformabilité élastique, et la résistance à la rupture. PERES RODRIGUES (1966), GOTTSCHALK (1990), BLUME (1995), NASSERI et al (2002) ont indiqué que l'anisotropie des propriétés mécaniques et physiques a des liens très importants avec la stratification des roches étudiées. SAINT- LEU (1978) NIANDOU et al (1997) et d'autres ont observé également que l'effet de l'anisotropie de structure du matériau influence très particulièrement la résistance à la rupture et que cette dernière dépend fortement de la direction de stratification des matériaux, et bien sûr de la direction de chargement. Pour cette raison, plusieurs cas sont généralement traités, en tenant compte des directions de chargement et des directions d'anisotropie :

1- en condition sans pression de confinement : dans le cas de chargement parallèle à la stratification, la rupture se produit par un déchirement tout au long de la stratification, et au milieu de la stratification dans le cas d'un chargement perpendiculaire.

2- pour une pression de confinement modérée, la rupture se produit par cisaillement de la structure du matériau (pour la stratification inclinée) ou par le cisaillement non- structurel (pour la stratification parallèle, perpendiculaire, ou avec une faible inclination).

3- pour les fortes pressions de confinement, la rupture se produit par « entortillement des feuilles de stratification » pour une charge parallèle à la stratification, et elle se produit en « éclatement » pour les autres orientations de charge.

Les premières études expérimentales significatives sur le comportement mécanique des roches anisotropes stratifiées ont été réalisées par MÜLLER (1930). Cet auteur a effectué

des essais de compression simple sur des échantillons rectangulaires et cylindriques pour différentes sortes de roches anisotropes dont un grès lité et une argilite. Ces échantillons ont été chargés perpendiculairement et parallèlement au litage. Il a constaté pour l'argilite, que la résistance à la rupture  $\sigma_{c//}$  dans la direction parallèle aux plans de stratification est environ à 70% de celle dans la direction perpendiculaire au litage ( $\sigma_{c//}=70\%\sigma_{c\perp}$ ). En outre, il a observé pour le grès lité que le module d'Young dans la direction parallèle au litage est plus grand que celui dans la direction perpendiculaire à la stratification ( $E_{//}=1,23E_{\perp}$ ).

LEPPER (1949) GRIGGS (1951) ont publié des résultats d'essais de compression simple d'un programme de recherche sur l'étude du comportement d'un marbre. Ils trouvent que la résistance du marbre dans la direction perpendiculaire aux plans préférentiels est environ 1,6 fois plus grande que celle dans la direction parallèle à ces plans ( $\sigma_{c\perp}=1,6\sigma_c$ ).

PRICE (1958) et HOBBS (1960) furent parmi les premiers à avoir réaliser des essais en compression triaxiale pour étudier le comportement rhéologique de roches anisotropes comme le grès lité l'argilite de Snowdown et le charbon d'Oakdale. Les pressions de confinement utilisées par PRICE (1958) sont supérieures à 35MPa. Ainsi, il a pu montrer que la résistance à la rupture du grès lité et de l'argilite, dans la direction perpendiculaire au litage ( $\theta=90^\circ$ ) est supérieure à celle dans la direction parallèle ( $\theta=0^\circ$ ). Il a également noté que le module d'Young est plus grand quand la contrainte maximale ( $\sigma_1$ ) est parallèle aux plans préférentiels. De plus, pour cette direction ( $\theta=0^\circ$ ), il a montré que la résistance à la rupture et le module d'Young des roches étudiés augmentent avec la pression de confinement. Quant à HOBBS (1960), il a observé que certaines des propriétés mécaniques d'anisotropies (limite d'élasticité, résistance à la rupture) du charbon qui se manifestent clairement en compression uniaxiale ( $\sigma_1>\sigma_2=\sigma_3=0$ ) et à faibles pressions de confinement (inférieures à 7MPa approximativement) disparaissent lorsque la pression de confinement devient très importante.

DONATH (1960, 1961, 1964) a réalisé un des programmes d'études les plus importants sur la détermination de l'anisotropie de déformation et de résistance à la rupture de roches stratifiées. Les essais ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de roches, tels que l'ardoise de Martinsburg, l'argilite de Longwood et le calcaire de Manlius, carottés pour différentes valeurs d'angle  $\theta$  entre l'axe de chargement et le plan de stratification ;  $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  et  $90^\circ$ . Les pressions de confinement utilisées sont 3,5 10,5 35 50 100 et 200MPa.

Ainsi, les résultats expérimentaux ont montré que dans les roches à anisotropie planaire, les résistances maximale et minimale à la compression sont atteintes respectivement dans la direction perpendiculaire aux strates ( $\theta=90^\circ$ ) et dans la direction formant un angle égal

à 30° ( $\theta=30^\circ$ ) avec le plan de stratification. Il a été noté qu'une augmentation de la pression de confinement réduit l'effet de l'anisotropie. Autrement dit, la résistance maximale est atteinte dans la direction perpendiculaire à la stratification (fréquemment) ou dans celle parallèle aux strates (rarement). De  $\theta=0^\circ$  à  $\theta=90^\circ$ , la résistance varie en passant par un minimum pour  $\theta$  comprise entre 30° et 45°. ALLIROT et BOEHLER (1979) ont montré que, le taux d'accroissement de la résistance à la rupture d'une roche stratifiée suivant l'augmentation de la pression de confinement est souvent plus petit pour  $\theta$  comprise entre 30° et 45° et atteint son maximum pour  $\theta=0^\circ$ , l'anisotropie des modules est généralement plus importante que l'anisotropie des résistances à la rupture.

### 1.2.2 Rappel sur le comportement élastique linéaire anisotrope (loi de HOOKE)

On se propose de rappeler le cadre de l'élasticité linéaire anisotrope, permettant d'analyser les données expérimentales sur les roches anisotropes ALLIROT et BOEHLER (1979).

Désignant par  $(\sigma_{ij})$  les composantes du tenseur de contraintes et par  $(\varepsilon_{kl})$ , celles du tenseur de déformation, le comportement élastique linéaire, est régi par la loi de Hooke généralisée.

$$(1.1) \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

où  $C_{ijkl}$  sont les composants du tenseur d'élasticité.

Dans le cas tridimensionnel le plus général, le tenseur d'élasticité possède 21 composantes indépendantes.

L'équation (1.1) peut être réécrite sous la forme inverse suivante :

$$(1.2) \quad \varepsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl}$$

où  $A_{ijkl}$  sont les composantes du tenseur de souplesse avec également 21 composantes indépendantes.

L'écriture intrinsèque de cette relation, valable pour tout le système de coordonnées arbitraires  $(x, y, z)$ , donne :

$$(1.3) \quad \varepsilon = A : \sigma$$

Les 21 éléments de la matrice de comportement (A) jouent différents rôles et ont différentes significations physiques.

La symétrie de la structure interne d'un milieu est reflétée dans ses propriétés élastiques. Le nombre de coefficients élastiques se réduit en conséquence.

Dans la plupart des cas pratiques, les roches anisotropes sont modélisées comme des matériaux orthotropes ou isotropes transverses dans un système de coordonnées lié à leur structure apparente ou à leurs directions de symétrie (figure 1.2).

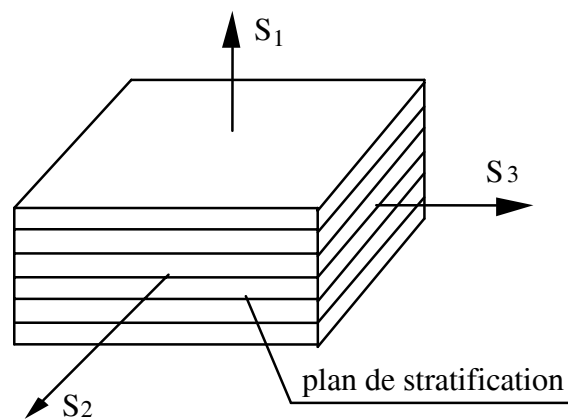


Figure 1.2 : Définition du repère de structure

Un milieu est dit orthotrope pour une propriété donnée, si cette propriété est invariante par changement de direction obtenue par symétrie relative à deux plans orthogonaux (ce qui entraîne d'ailleurs la symétrie par rapport au troisième plan orthogonal).

Un milieu est élastique isotrope transverse si ses caractéristiques d'élasticité sont identiques pour tous les couples de directions orthogonales.

Pour un matériau orthotrope avec un repère structural ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) (Figure 1.2), l'équation (1.3) peut être écrite, en notation de Voigt, comme suit :

$$(1.4) \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

Où  $E_1, E_2, E_3$  sont les modules d'Young dans les directions  $S_1, S_2$  et  $S_3$ .  $G_{23}, G_{31}, G_{12}$  sont les modules de cisaillement dans les plans  $(S_2, S_3), (S_3, S_1), (S_1, S_2)$  respectivement. Ainsi, le coefficient de déformabilité  $\frac{1}{G_{23}}$  caractérise la variation de l'angle droit entre  $S_2$  et  $S_3$  ( $2\varepsilon_{23}$ ), effet de la cause qui est la contrainte de cisaillement dans le plan  $(S_2, S_3)$ . Le coefficient de Poisson,  $\nu_{ij}$ , caractérise le raccourcissement ou l'allongement (effet) dans la direction (j) pour une traction ou une compression (cause) dans la direction (i). Par exemple,  $\nu_{12}$  caractérise l'allongement dans la direction 2 pour une compression dans la direction 1.

La matrice des coefficients (A) étant symétrique, nous avons les relations suivantes :

$$(1.5) \quad \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad ; \quad \frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3} \quad ; \quad \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3}$$

La formulation orthotrope a été utilisée dans la littérature pour caractériser la déformabilité des roches tel que les charbons, les schistes, les ardoises, les gneiss, les granites. Des valeurs spécifiques des 9 constants élastiques pour un schiste se trouvent dans HOMAND et al (1993).

Pour un matériau isotrope transverse, 5 constants élastiques indépendants sont nécessaires pour décrire la réponse mécanique. Si l'axe d'isotropie est repéré par  $S_1$  (Figure 1.2), le matériau est " isotrope " dans tous les plans normaux à  $S_1$ . Ainsi, en supposant, par



exemple, que les paramètres élastiques indépendants sont  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{23}$  et  $G_{12}$ , par rapport au cas orthotrope, nous avons les égalités suivantes :

$$E_2 = E_3, \text{ mêmes modules d'Young dans les directions } S_2 \text{ et } S_3$$

$$(1.6) \quad \nu_{12} = \nu_{13}, \text{ mêmes contractions ou dilatations suivant } S_2 \text{ et } S_3 \text{ pour une traction ou une compression appliquée suivant } S_1$$

$$G_{12} = G_{31}, \text{ mêmes modules de cisaillement dans les plans } (S_1, S_2) \text{ et } (S_3, S_1)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \text{ module de cisaillement autour de } S_1$$

En outre, l'équation (1.5) devient :

$$(1.7) \quad \nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1}$$

La formulation isotrope transverse a été utilisée pour caractériser la déformabilité des roches telle que le schiste, l'argilite, l'ardoise, le basalte. Pour de telles roches, le plan isotrope transverse est supposé être parallèle aux plans de foliation, de schistosité ou de litage.

### **1.3. L'anisotropie induite par endommagement**

Cette section est consacrée à la caractérisation de l'anisotropie de l'endommagement par microfissurations.

L'endommagement est un phénomène, qui prend son origine au niveau microscopique, mais il a des incidences sur les propriétés macroscopiques des matériaux. Il s'agit en effet d'une modification de propriétés d'un matériau ayant subi, d'une façon ou d'une autre, un ensemble de sollicitations mécaniques, GATELIER et al (2002) et MARTIN (1993) KEMENY et COOK (1991) LAJATAI (1998) FICHANT (1996).

L'endommagement décrit en théorie la modification des propriétés des matériaux entre l'état vierge et l'état généré par des microfissures induites BESSINGER et COOK (1996), STEAD (1999). La plus part des propriétés physiques des matériaux sont influencées par ces microfissurations.

Les facteurs physiques externes susceptibles de causer et d'accroître la fissuration des roches sont principalement de nature mécanique, thermique ou chimique.. etc.

➤ *Endommagement thermique :*

L'endommagement par un choc thermique permet en général d'avoir une fissuration homogène et isotrope dans le matériau. Le choc thermique est obtenu par un échauffement du matériau au four ou dans un micro - ondes. Les caractéristiques des matériaux sont évaluées en fonction de la température, de la durée et du nombre de cycles d'échauffement.

L'application de températures élevées peut induire des contraintes thermiques importantes dans les roches DAVID et al (1999) SIBAI et al (2002). Du fait de l'hétérogénéité minéralogique des roches, une variation de température suffisamment grande peut provoquer une délitage différentielle des grains dont la conséquence est l'ouverture des zones de contact entre ces derniers. Ce processus entraîne la formation de fissures intergranulaires d'origine thermique. Pour des températures très élevées, une fissuration intragranulaire peut être induite. La création de réseaux connectés de fissures inter ou intragranulaires dans la roche aura pour conséquence un changement sensible des paramètres mécaniques des matériaux.

HOMAND et HOUPERT (1989) ont mis en évidence une corrélation claire entre l'évolution des paramètres mécaniques et le degré de fissuration thermique pour des granites traités thermiquement jusqu'à 600 °C. Ils ont observé que la fissuration intracristalline se développait à partir de 500 °C, la majorité des joints de grains étant ouverts.

BOUNENNI (2002) a créé un état de fissuration initial ou d'endommagement diffus par exposition aux micro-ondes. Cet état d'endommagement a servi à étudier l'impact de la microfissuration dans les argilites. Il a pu faire évoluer l'endommagement de manière graduelle et mesurer la perméabilité en fonction de l'état de fissuration. Cela lui a permis d'établir une loi de variation relative de la perméabilité en fonction de l'endommagement. Il a trouvé que l'effet de l'endommagement d'origine mécanique n'est pas le même que l'effet d'endommagement créé par l'échauffement aux micro-ondes, cet auteur a montré que le caractère diffus de l'endommagement est mieux produit par la voie thermique que mécanique.

➤ *L'Endommagement mécanique*

Avant de citer quelques méthodes expérimentales utilisées pour dégrader mécaniquement les roches, on propose un éclairage sur l'impact de la microfissuration sur le comportement fragile d'une roche. Plusieurs études bibliographiques [PELLEGRINO (1995) BIENIAWASKI (1967A, 1967B, 1967C, 1968), BRACE (1963) ont permis de répondre à un grand nombre d'interrogations concernant cet aspect.

En augmentant la contrainte mécanique principale majeure, les observations faites par de nombreux auteurs peuvent se résumer en plusieurs points : la fermeture des fissures préexistantes pour un niveau de contrainte très faible. Ensuite, des déformations dites élastiques provoquées par les glissements des fissures préexistantes commencent à être observées. Pour un niveau de contrainte de 30% à 40% de la résistance à la rupture, on observe l'apparition de la première génération de microfissures mécaniquement induites. Ces microfissurations sont orientées principalement dans la direction de la contrainte principale majeure. Aux environs de 50% à 55% de la résistance à la rupture, on enregistre souvent une augmentation relativement importante de l'activité fissurale 'des fissures récemment produites'. Pour la quatrième phase qui se situe entre 70% à 90% de la résistance à la rupture, il y a des productions de nouvelles fissures associées avec les existantes, cette phase est très importante pour notre étude, car dans cette partie où le développement des fissures devient très important, on s'intéresse à la propagation irréversible des fissures. En d'autres termes, la densité des fissurations sera élevée à ce stade. Proche du pic, la densité des fissures augmente considérablement jusqu'à la rupture.

La conséquence mécanique de l'endommagement est bien la dégradation des propriétés élastiques de la roche. Dans les littératures, on trouve des études expérimentales qui traitent l'effet de l'endommagement soit sur des roches initialement isotropes IKOGOU (1990) et KHAZRAEI (1995), soit sur des roches initialement anisotropes à symétrie de révolution (roches qui possèdent une symétrie axiale), c'est par exemple le cas du schiste HAMMAD (1992) ou de l'argilite de Tournemire NIANDOU (1995)

Des essais de compression avec des cycles de déchargement – recharge ont été réalisés sur le grès des Vosges KHAZRAEI (1995). Les cycles de décharge – recharge sont réalisés au cours de l'essai de compression à partir d'une contrainte déviatorique désiré. Le processus est répété plusieurs fois au cours de l'essai jusqu'à la rupture. Ces cycles de déchargement sont essentiellement utilisés pour évaluer la dégradation des propriétés élastiques du matériau à différentes valeurs de contrainte déviatorique. En d'autre term, à différentes étapes de la fissuration induite. Il a déterminé à l'aide des boucles fermées de décharge, les modules longitudinaux et transversaux pour différents niveaux de contrainte déviatorique (Figure 1.3).

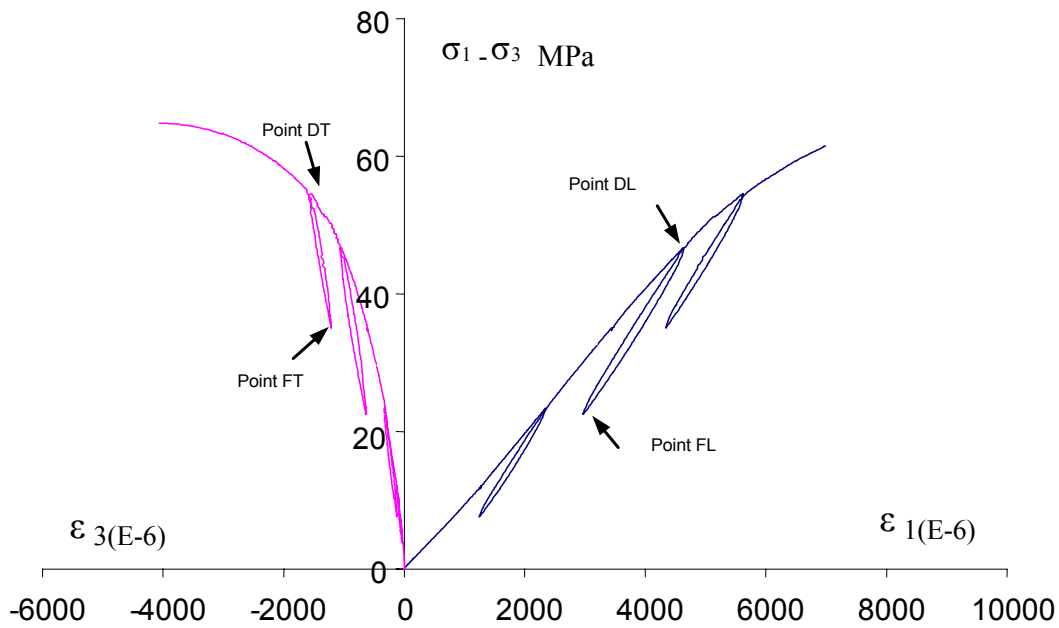


Figure 1.3 : Essai de compression triaxiale avec cycles de déchargement - rechargement

La détermination des modules se fait à l'aide de DL et FL (Figure 1.3) qui sont les points correspondants respectivement aux points de début et de fin de décharge, pour les déformations longitudinales. Le point DT et le point FT, sont les points correspondants respectivement aux points du début et de fin de décharge, pour les déformations transversales.

Les modules élastiques peuvent être obtenus à partir de ces points de la manière suivante :

$$E (\text{longitudinal}) = (\sigma_D - \sigma_{FL}) / (\varepsilon_{DL} - \varepsilon_{FL})$$

$$E (\text{transversal}) = (\sigma_D - \sigma_{FT}) / (\varepsilon_{DT} - \varepsilon_{FT})$$

où  $\sigma_D$ ,  $\varepsilon_{DL}$  et  $\varepsilon_{DT}$  sont respectivement : la contrainte déviatorique de compression, la déformation axiale et la déformation transversale au point de décharge. De la même manière, on peut définir  $\sigma_D$ ,  $\varepsilon_{FL}$  et  $\varepsilon_{FT}$  respectivement : la contrainte déviatorique de compression, la déformation axiale et la déformation transversale au point de fin de décharge et de début de charge.

SAYEHI (1992) propose, pour caractériser l'endommagement d'un grès de Fontainebleu en compression, de réaliser des essais de compression suivis par des essais de traction. Sa méthodologie expérimentale consiste à créer une anisotropie directionnelle par une charge triaxiale sur des grands échantillons. Les essais sont ensuite arrêtés à des

déviateurs fixés. Pour chaque valeur de déviateurs, un état de microfissurations sera créé et qui correspond à ces déviateurs. Le déchargement sera effectué en quelques minutes jusqu'à une contrainte nulle. Les échantillons sont ensuite carottés (Figure 1.4), les éprouvettes préalablement microfissurées en compression seront testées en traction monotone ou avec chargement – déchargement dans le but de quantifier l'endommagement anisotrope en compression. Il a été observé que, pour un matériau préalablement endommagé en compression, l'application d'un chargement de traction affecte de manière sensible la raideur en traction (diminution de la raideur initiale en traction).

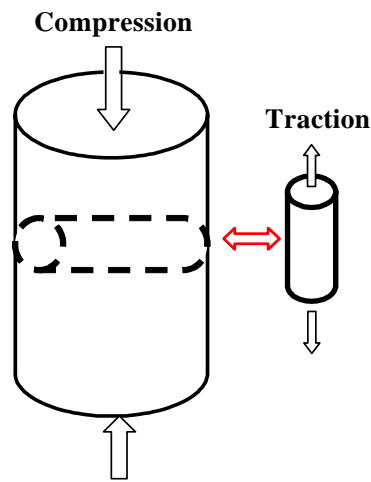


Figure 1.4 : schéma de pré – endommagement en compression et de carottage de l'éprouvette

La méthodologie expérimentale unidimensionnelle proposée par SAYEHI, nous donne un nombre limité de configurations d'endommagement à comparer. On note également que la taille des échantillons pré – endommagés n'est pas équitable pour faire plusieurs carottes.

Dans notre étude, nous proposons de provoquer plusieurs cas des configurations de pré – endommagement sur des blocs assez grands. Le pré – endommagement est fait par des chemins multiaxiaux non axisymétriques afin d'avoir des échantillons carottés plus représentatifs d'un endommagement induit plus complexe.

# **CHAPITRE 2**

# **IDENTIFICATION DU**

# **MATERIAU ET MODE**

# **OPERATOIRE**

## **Chapitre 2 : Identification du Matériau étudié et Mode Opératoire**

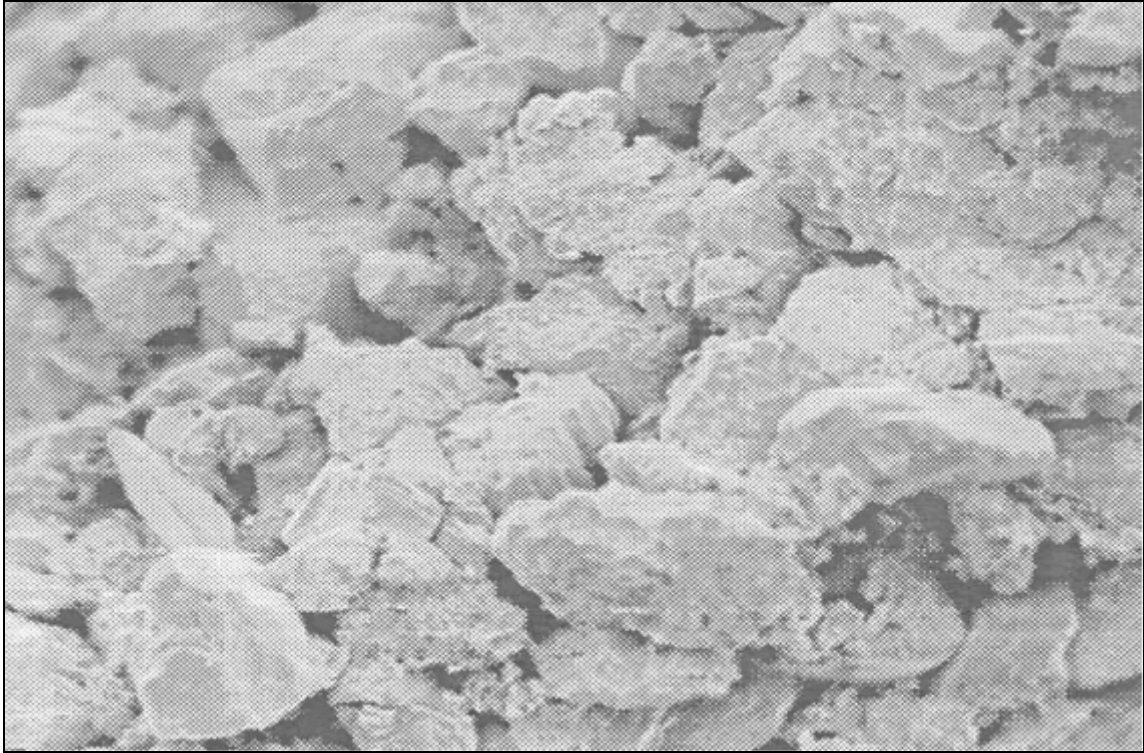
Nous avons choisi pour cette étude une roche sédimentaire poreuse (un grès des Vosges), il s'agit d'une roche d'origine détritique, ce grès est de couleur beige-marron, et a un poids volumique de l'ordre de 2.06 g/cm<sup>3</sup>. Nos blocs sont prélevés de la carrière de Bleuville (88410 à Monthureux sur Saône)

### **2.1. Etude Minéralogique (diffractométrie X et MEB) :**

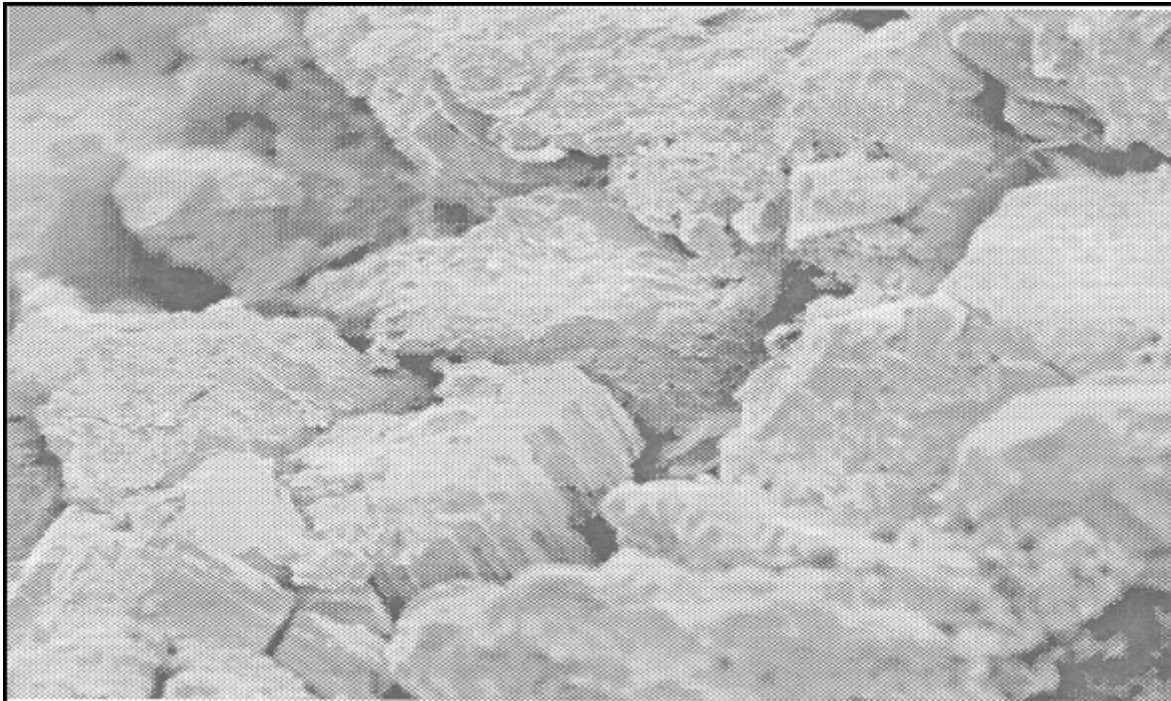
Des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) ont été réalisées. C'est un outil privilégié pour la caractérisation de la microstructure d'un matériau. Sa large gamme d'agrandissement permet de couvrir diverses échelles de la microstructure des matériaux (de 0.1  $\mu\text{m}$  à 1 cm). Le principe de base est de permettre à un faisceau très fin d'électrons, monocinétique, de balayer la surface d'un échantillon ou se produisent des interactions détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec du faisceau d'électrons. Une sonde de microanalyse électronique est intégrée dans le MEB, elle permet de caractériser les éléments constituant notre échantillon.

Deux agrandissements d'un échantillon ont été effectués, le premier de 100 (photo 2.1) et le second de 200 (photo 2.2).

D'après l'analyse donnée en (annexe VIII) on remarque que ce grès est composé essentiellement de Silice de 90% et de Potassium 10%.



*Photo 2.1 : Photographie du grès des Vosges effectuée au MEB (grossissement 100)*



*Photo 2.2 : Photographie du grès des Vosges effectuée au MEB (grossissement 200)*



## 2.2. Etude de la Porosité

La porosité est généralement composée de la porosité des pores et de la porosité des microfissures naturelles. Cette dernière est formée des microfissures visibles au microscope, en lames minces, et même parfois à l'œil nu RICARD et BERCOVICI (2002). Les microfissures se situent entre les cristaux, aux joints de grains, ou sont intracristallines; leur extension est variée. Ce sont des vides très plats dont le rapport d'aspect (épaisseur sur longueur) est de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$ . La porosité correspondant à ce volume de vide est très faible, généralement inférieure à 1 %. Mais, il existe dans les roches une porosité naturelle beaucoup plus importante associée à ces fissures, c'est la porosité des pores. Les deux porosités ont une influence déterminante sur les propriétés hydrauliques et mécaniques du matériau. Généralement les caractéristiques physiques et mécaniques des roches changent en fonction des porosités.

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

$$\phi = \frac{V_p}{V}$$

La porosité ouverte totale du grès étudié a été mesurée à l'aide d'un prosimètre au mercure. Elle est équivalente à la somme de la macroporosité (pores de rayon supérieur à 7500 Å) et de la microporosité. Une étude effectuée sur deux échantillons ainsi qu'une visualisation de sa composition sont présentées en annexe (VIII). Un résumé succinct des résultats est donné dans le Tableau 2.1 On constate que la porosité ouverte de ce grès est de l'ordre de 22%.

Tableau 2.1 : Résultats du test de porosité sur le Grès des Vosges

<i>Echantillon</i>	<i>Porosité (%)</i>	<i>Poids volumique naturel (g/cm<sup>3</sup>)</i>
<i>N° 1</i>	<i>23</i>	<i>2,7</i>
<i>N° 2</i>	<i>21</i>	<i>2,12</i>

### 2.3. Dispositif expérimental

La préparation des échantillons et la réalisation des différents essais nécessitent un certain nombre de matériels qui sont utiles et indispensables à la bonne conduite de ceux-ci :

1- Un carottier diamanté pour carotter des échantillons de forme cylindrique dans les blocs de roches.

2- Une rectifieuse, capable de rectifier les surfaces des échantillons afin d'avoir deux surfaces parallèles (la tolérance est de 10  $\mu\text{m}$ ).

3- Une presse hydraulique ‘‘8033 INSTON’’ de capacité maximale de 500 kN. Son système de pilotage permet la réalisation des essais en mode ‘Déplacement contrôlé’ ou ‘force contrôlée’. Au cours de l’essai, les variations de force et de déplacement axial sont visualisées sur l’écran d’une console.

4- Une cellule triaxiale de capacité de 100 MPa se composant principalement :

- d’un plateau inférieur muni d’une embase sur laquelle se place l’échantillon.
- d’un corps de cellule cylindrique.
- du plateau supérieur muni d’un piston permettant d’appliquer le déviateur.
- de six tirants solidarissant les plateaux inférieur et supérieur.

C’est au niveau du plateau inférieur que sont effectués les différents passages (l’entrée du circuit de l’huile, la fixation de l’échantillon, les sorties des fils pour la liaison électrique entre les jauges et la chaîne d’acquisition).

5- Une pompe à haute pression de type <<GILSON<sup>®</sup>>>et de capacité maximale de 60MPa permet d’appliquer la pression de confinement. Cette pompe est en mesure de maintenir la pression constante lors d’une baisse de celle-ci. Elle ne permet pourtant pas de faire chuter la pression dans le cas d’une surpression. De ce fait, l’opérateur agit sur une vanne de régulation pour réduire la pression.

6- Pour réaliser l’essai de traction directe, il est important d’avoir un montage spécial. Le montage de traction est constitué de deux ensembles symétriques. Chaque ensemble est constitué principalement de deux pièces filetées, la première de ces pièces est montée sur la machine, et la deuxième est collée avec l’araldite (ciba<sup>®</sup>-araldite 2011) sur l’échantillon. Les deux pièces sont liées entre elles par une tige de 9 mm. A l’extrémité de cette tige, des billes de 20 mm de diamètre sont fixées pour assurer l’alignement de l’échantillon au cours de l’essai.

8- Un dispositif servant à la préparation et à la protection des matérielle de mesure (jauges), il se compose des éléments suivants :

- le ciment de sous-couche des jauges 'strain gage ciment' pc-12 KYOWA.
- La colle « M-Bond200 » Adhésive qui polymérise instantanément.
- Le produit « Vishy<sup>®</sup> » de protection M-Coat A.
- Le produit « Vishy<sup>®</sup> » de protection M-Coat D.
- Les cosses relais et les fils de connexion de diamètre 2/100 mm.
- Le schéma du dispositif expérimental est représenté ci-dessous.

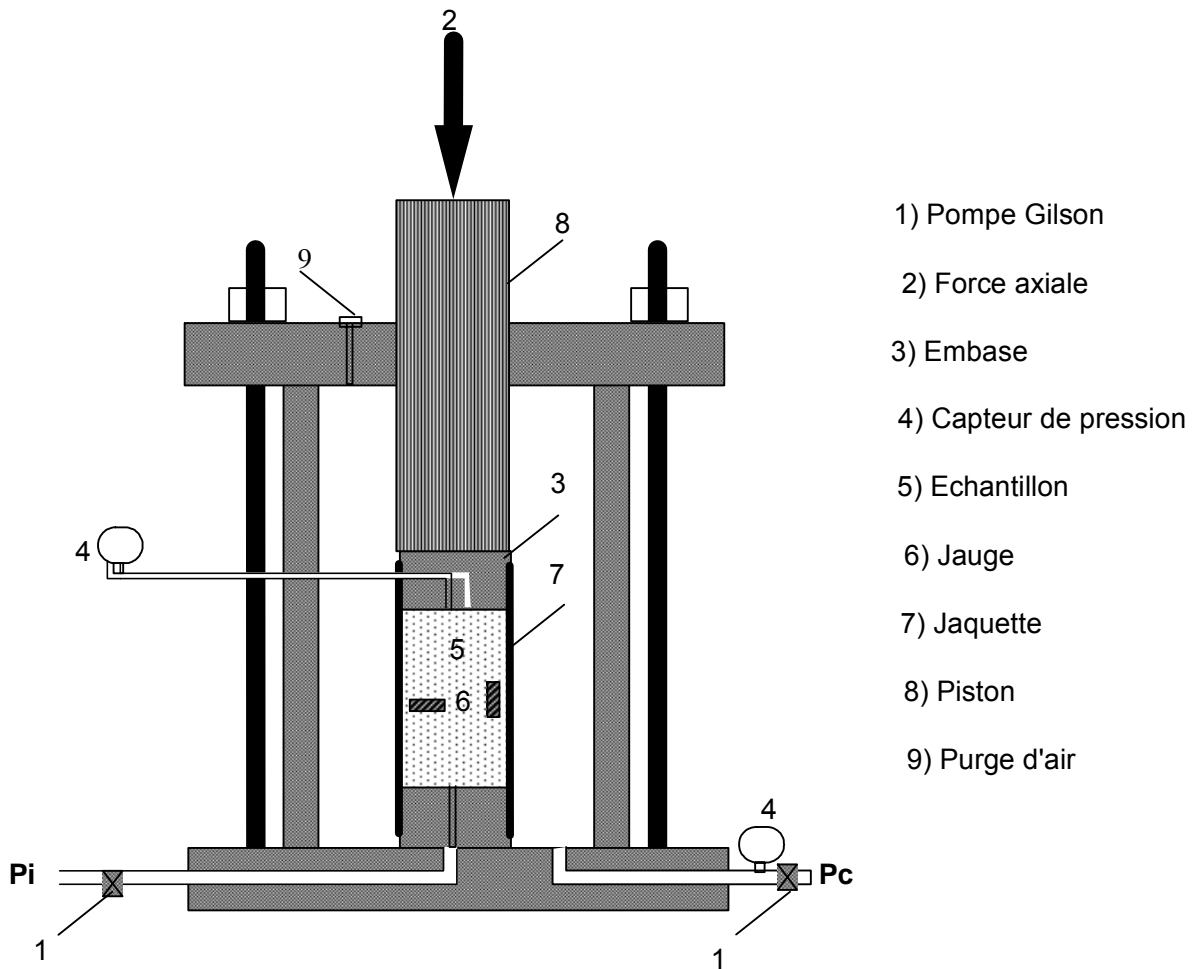


Figure 2.1 : Schéma de la presse triaxiale

### 2.3.1 Dispositif de Mesures

Le dispositif de mesures comporte les éléments suivants :

➤ *Mesure de Déformations*

Les jauges extensométriques d'une longueur de 5 mm, permettent de mesurer la déformation locale à l'endroit où elles sont collées (à la mi-hauteur de l'éprouvette dans un essai normal), les jauges sont au nombre de quatre, diamétralement opposées, deux transversales et deux longitudinales. La valeur finale sera la moyenne du même type de jauge, la valeur de déformations volumiques est calculée à partir l'équation suivante

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 + 2 * \varepsilon_3$$

où  $\varepsilon_1$  est égale à la moyenne de la déformation longitudinale et  $\varepsilon_3$  donne la moyenne de la déformation transversale

➤ *Mesure de Pression*

La mesure de pression a été faite à l'aide des manomètres de la pompe Gilson avec une précision de 0,2 MPa, celle-ci nous permet de contrôler la variation du confinement. La pression interstitielle exige une précision plus importante, nous avons utilisé un capteur de pression avec une précision de 0,1 MPa.

➤ *Mesure de la Contrainte axiale*

Un capteur de force intégré à la presse nous donne la valeur de la force axiale appliquée sur l'échantillon.

L'ensemble du dispositif de mesure est connecté à une chaîne d'acquisition de donnée (systeme4000 Vishy©), la chaîne est reliée à un micro -ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition de données, tous les signaux de mesure sont convertis en unité directe de mesure (MPa,  $\mu\text{m}$ , KN ...), Les valeurs mesurées sont contrôlées par la lecture directe sur l'écran pendant toute la durée d'essai.

### 2.3.2 Mode Opératoire

A cette étape, nous soulignons les principes à respecter afin de pouvoir obtenir des résultats expérimentaux fiables et d'éviter un échec éventuel de l'essai

#### ➤ *Carottage et Rectification*

Les échantillons sont façonnés en cylindres de même longueur suivant différentes orientations. Les bases des éprouvettes sont rectifiées de façon à obtenir des sections bien parallèles et d'avoir pratiquement les mêmes dimensions, soit 37,5 mm de diamètre et 75 mm de hauteur. Toutefois, seules les dimensions exactes des échantillons, mesurées à l'aide d'un pied à coulisse, seront utilisées pour la détermination des contraintes.

#### ➤ *Collage des jauges*

Le collage est une opération très minutieuse, la parfaite réalisation nous donnera un essai bien réussi. La position prévue pour les jauges est déjà marquée à l'aide de traits très fins. Compte tenu des difficultés rencontrées concernant l'adaptation du collage des jauges à la rugosité de la surface du grès, il est 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) ces deux opérations peuvent servir à éviter le problème de rugosité de surface du grès. On applique la sous couche de ciment en pellicules très fines. Après séchage complet du ciment (environ une heure à l'air libre), et pour éviter toutes perturbations des mesures des déformations, il est nécessaire à l'aide d'un papier abrasif de procéder au polissage de la surface de sous couche jusqu'à l'apparition des grains de la roche. Ensuite, les jauges sont collées de sorte qu'il n'y ait 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 côté des jauges (Figure 2.2). Enfin, l'ensemble des jauges et des cosses relais est protégé à l'aide de deux couches de produits de protection :

- Une couche de M-Cote A qui sèche après environ 30 minutes,
- Une couche de M-Cote D qui sèche après environ 20 minutes.

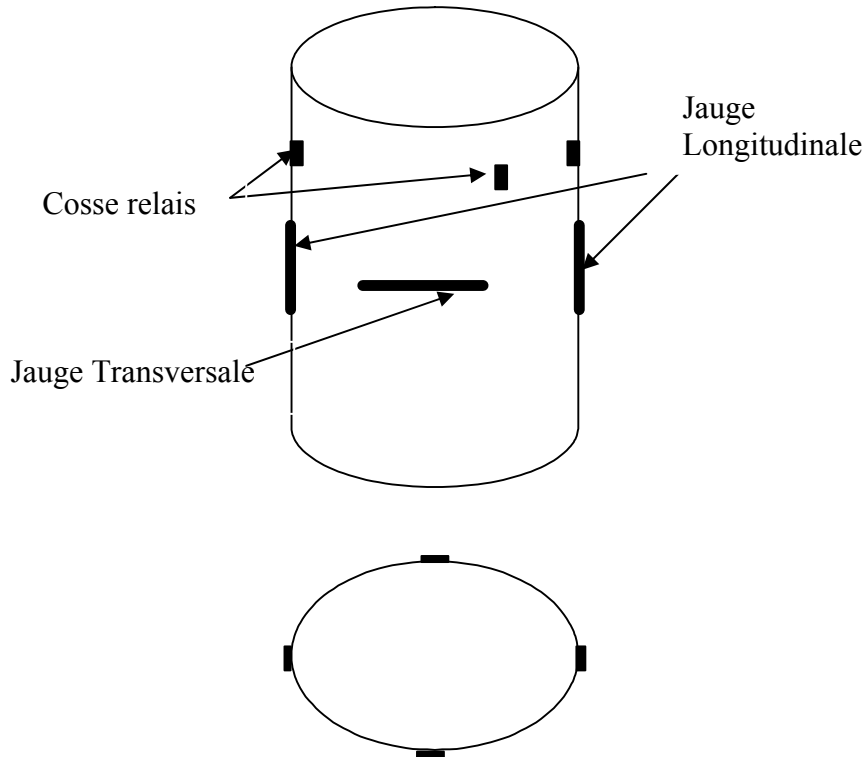


Figure 2.2 : Schéma d'une éprouvette avec les jauges

➤ *Mise en Gaine de l'Éprouvette*

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 Néoprène, permet d'empêcher toute pénétration d'huile de confinement dans l'échantillon et d'assurer la séparation des circuits intérieur et extérieur durant l'essai. Un trou préalablement percé à mi-hauteur de la gaine assure le passage des fils électriques. Celui-ci est ensuite rebouché à l'aide d'une colle « Silicone », lorsque les fils sont tirés au maximum à l'extérieur. Là encore, cette opération requiert une infinie précaution, afin de ne pas abîmer les jauges, ni décrocher les fils.

➤ *Mise en place de l'échantillon*

Pour un bon fonctionnement de l'ensemble des appareils surtout la chaîne d'acquisition de données, il est nécessaire de les mettre en route au moins une heure avant toute utilisation. Cela permet un échauffement initial des appareils qui leur est indispensable.

Par précaution, tous les capteurs, et les jauges sont vérifiés. Puis, deux joints toriques sont mis autour des embases afin d'assurer l'étanchéité de l'éprouvette. Après remplissage de

la cellule, 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 pour les essais en conditions saturées.

➤ *Saturation sous pression*

Cette opération est importante pour obtenir des résultats fiables ; la procédure décrite ci-dessous est proprement adaptée à ce type de matériau. L'opération commence à partir d'un état dans lequel l'échantillon est sec. L'opération est composée de différentes étapes :

1) L'échantillon est mis dans un réservoir sous une cloche de verre, celle-ci a deux sorties, l'une est connectée à une pompe puissante pour chasser l'air dans la cloche, la deuxième est reliée à un tuyau connecté à une vanne qui contrôle la circulation du méthanol (le fluide utilisé pour la saturation).

2) On commence à vider l'air dans la cloche en appliquant le sous vide (la vanne est fermée), l'opération nous permet de chasser les bulles d'air dans l'échantillon vers l'extérieur, cette opération prend environ 5 heures.

3) en ouvrant la vanne, le fluide commence à circuler jusqu'à l'échantillon avec un débit très faible, l'application de cette procédure permet de faire pénétrer le fluide dans les pores de petite taille et de chasser les petites bulles d'air, on continue à injecter le fluide jusqu'au remplissage du réservoir. Cette opération prend environ une heure ; on arrête ensuite l'injection du fluide et la pompe continue à travailler pendant une heure.

4) on arrête la pompe, on fait sortir l'échantillon du méthanol, et on monte une manipulation complète. C'est-à-dire, qu'on applique un champ de contrainte isotrope égal à 2 MPa dans la cellule. On fait circuler continuellement le fluide avec une pression de 1,5 MPa par l'embase inférieure à travers l'échantillon. L'injection du fluide sera poursuivie pendant 2 à 3 heures, jusqu'à la disparition des bulles d'air. Après cette procédure on considère que l'échantillon est saturé.

# **CHAPITRE 3**

# **COMPORTEMENT DU**

# **GRÉS A L'ETAT SAIN**



### **Chapitre 3: COMPORTEMENT DU BLOC A L'ETAT SAIN**

Le but principal de cette partie est de déterminer le comportement mécanique de base du grès étudié et de déterminer tous les paramètres mécaniques et hydrauliques nécessaires. Ces paramètres permettront de comprendre le comportement de cette roche, ils vont servir également comme guide dans la suite du travail. De ce fait, nous avons réalisé le maximum d'essais sur un bloc vierge afin de mieux comprendre le mécanisme des déformations. En fait, nous avons réalisé différents types de chemins de sollicitations (compression, traction,...etc.) avec différentes conditions d'essais (drainé, non drainé,...etc.),

On peut classer les essais réalisés sur le bloc vierge (les essais de base) en quatre groupes :

- 1) des essais de compression
  - 1-1- essai hydrostatique
  - 1-2- essai de compression simple
  - 1-3- essai de compression triaxiale
- 2) des essais de traction directe
- 3) des essais avec des chemins de sollicitation complexes
  - 3-1- essai d'extension latérale
  - 3-2- essais proportionnels,
- 4) des essais de couplage
  - 4-1- essai drainé
  - 4-2- essai non drainé
  - 4-3- essai à  $P_c = P_i$
  - 4-4- essai triaxial avec des montées en pression interstitielle

Un essai hydrostatique nous permet généralement de vérifier l'isotropie du matériau. Les essais de compression (compression simple et triaxiale) et de traction permettent de suivre l'évolution des propriétés du grès au cours de la déformation. Les essais d'extension latérale et proportionnelle sont des essais de validation. Enfin, avec les essais de couplage on détermine le mécanisme d'interaction fluide – squelette.

L'ensemble des essais de base sur le bloc vierge, nous permet de comprendre le comportement initial de cette roche avant la réalisation des essais de pré - endommagement dans la presse triaxiale vraie.

### 3.1. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Afin de vérifier l'isotropie initiale du matériau, nous avons réalisé un certain nombre d'essais dans deux directions perpendiculaires. En effet, un cube vierge de grès (on nomme le bloc à l'état sain un « bloc vierge ») de dimension de 40x40x40 cm<sup>3</sup> donnera différents échantillons issus du carottage suivant deux directions, l'une horizontale et l'autre verticale,  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$  (Figure 3.1). En effet, au cours de la formation géologique de ce grès, un lit de litage est présent dans cette roche. Pour avoir un repère fixe de carottage de l'échantillon dans cette partie de travail, on a considéré que les plans de litage naturels (Figure 3.1) sont des plans parallèles à l'angle de carottage  $\theta=0^\circ$ .

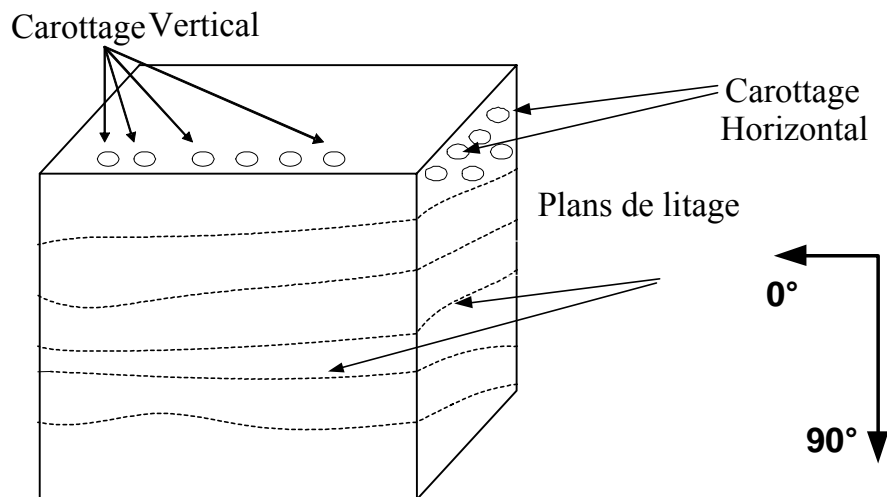
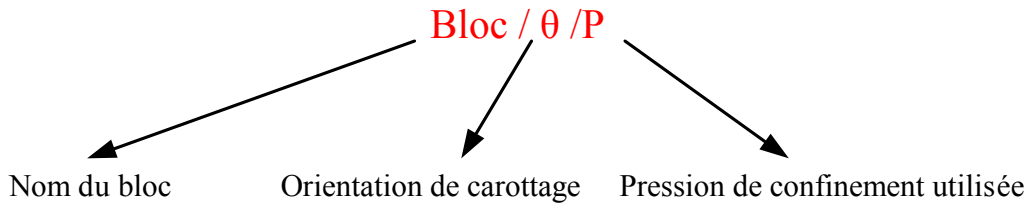


Figure 3. 1 : Schéma représentatif de carottage avec les plans de litage

Devant un nombre important d'essais, et en fonction de l'angle de carottage, nous avons utilisé la nomenclature suivante pour pouvoir identifier rapidement l'essai par la suite :



Les échantillons testés sont façonnés en cylindres de longueur approximative de 77 mm. Les bases de ces éprouvettes sont rectifiées de manière à obtenir des sections bien parallèles. Le but recherché est d'avoir des cylindres de 37,5 mm de diamètre et de 75 mm de hauteur. Toutefois, seules les dimensions exactes des échantillons, mesurées à pied à coulisse, seront utilisées pour la détermination des paramètres.

Nous avons réalisé des essais dans deux directions perpendiculaires afin de vérifier l'isotropie initiale de la roche. Cette isotropie, peut être démontrée également à partir d'un essai hydrostatique ; pour cela nous avons commencé par cet essai.

Ensuite, des essais de compression simple et de traction directe ont été réalisés pour déterminer la résistance à la rupture et le module d'Young.

Pour voir l'effet de la pression de confinement sur le comportement de cette roche, et plus précisément sur la déformabilité de la roche et sur la résistance à la rupture, des essais triaxiaux avec différentes valeurs de pression de confinement ont été réalisés.

### ***3.1.1. Essai de compression hydrostatique***

L'essai hydrostatique consiste à soumettre l'éprouvette à un champ de contrainte sphérique ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ ) en condition drainée (figure 3.2). L'essai de compression hydrostatique se déroule comme suit : après avoir installé l'éprouvette dans la cellule triaxiale, nous la plaçons entre les deux embases de la presse. La pression hydrostatique est appliquée par l'injection de l'huile dans la cellule, à l'aide d'une pompe Gilson<sup>®</sup>, jusqu'à la pression désirée.

Nous avons réalisé une montée en pression jusqu'à 60 MPa. Le chargement est effectué par palier, et la saisie des données (déformations transversales, longitudinales et la pression isotrope) est faite quelques minutes après avoir atteint le niveau de chaque palier, de telle sorte qu'on ait une vitesse moyenne de chargement de 0,25 MPa/min environ.

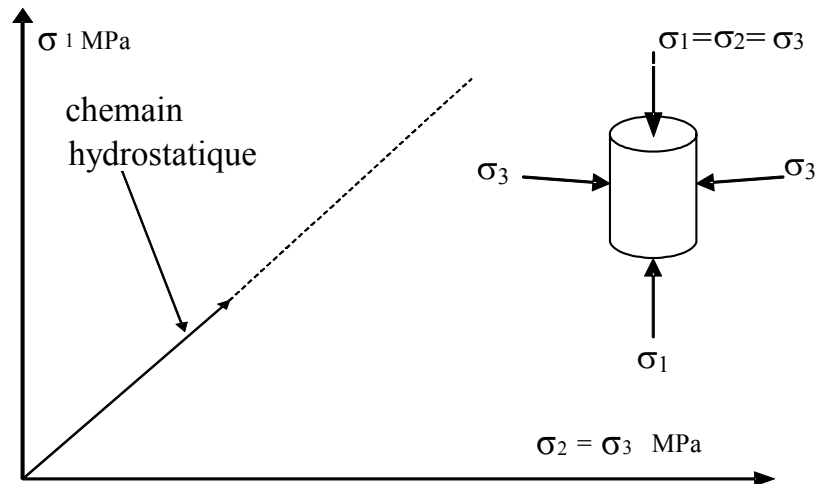


Figure 3.2 : chemin représentatif de chargement hydrostatique dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ )

La courbe représentative de l'essai hydrostatique est présentée sur la figure 3.3

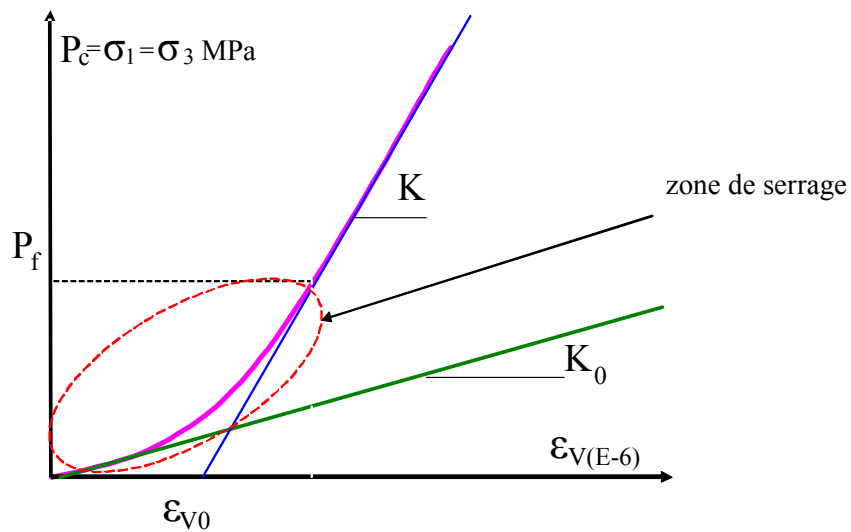


Figure 3.3 : courbe représentative de l'essai hydrostatique (contrainte – déformation volumique)

Nous calculons à partir de cette courbe les paramètres suivants :

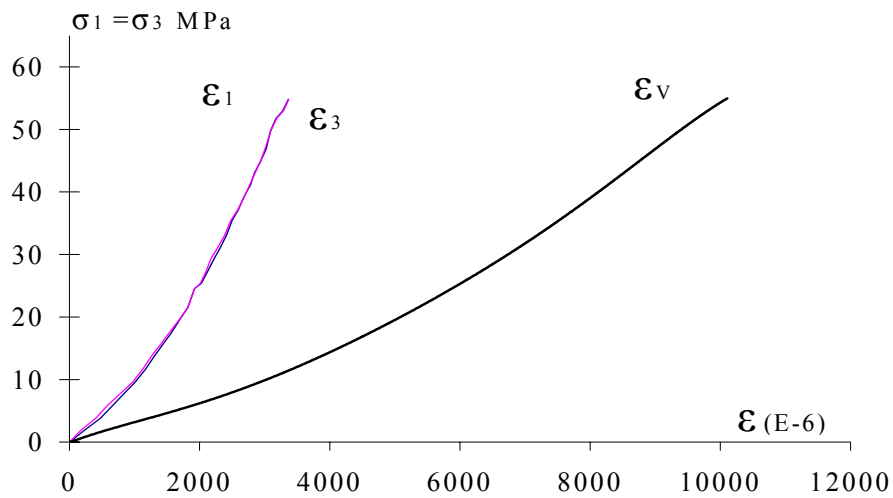
Le module initial  $K_0$  est la tangente de la partie initiale de la courbe contrainte – déformation volumique.

Le module de compressibilité  $K$  est la tangente de la partie linéaire (après la zone de serrage) de la courbe contrainte - déformation volumique.

La pression de fermeture  $P_f$  est la pression qu'il faut appliquer pour fermer toutes les microfissures initiales existantes dans l'échantillon, le seuil de la partie non linéaire nous donne également le volume des microfissures initiales  $\epsilon_{vo}$ , cette partie de la courbe représente la zone de serrage.

Nous montrons sur la figure 3.4, les courbes de déformations longitudinale, transversale et volumique en fonction de la contrainte appliquée, pour un échantillon issu d'un carottage horizontal et d'un carottage vertical.

A) Vierge/0°/hydrostatique



B) Vierge/90°/hydrostatique

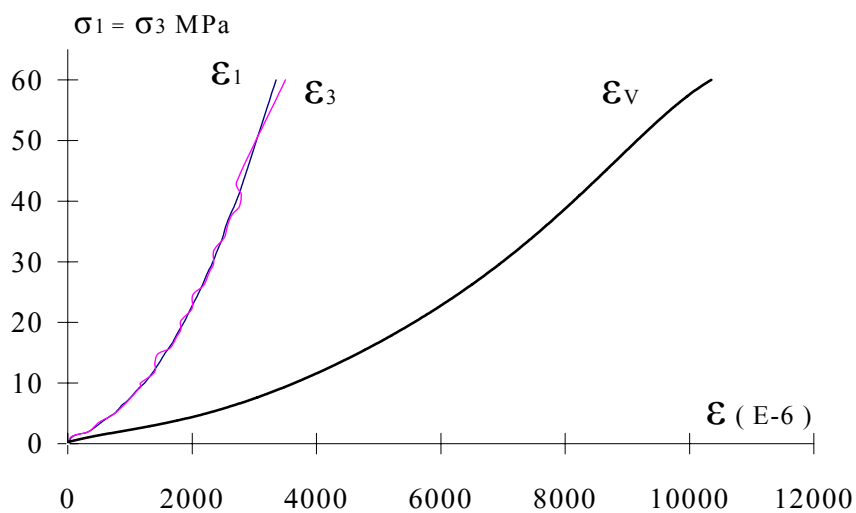


Figure 3.4 : Essai hydrostatique sur un échantillon issu d'un carottage horizontal  $\theta=0^\circ$  (A) et d'un carottage verticale  $\theta=90^\circ$  (B)

Toutes les valeurs des paramètres des essais hydrostatiques sont indiquées dans le tableau 3.1

Tableau 3.1 : Valeurs de  $P_f$ ,  $K_0$ ,  $K$  et  $\varepsilon_{v0}$ , déduites des essais hydrostatiques

Orientation de carottage	$P_f$ MPa	$K_0$ MPa	$K$ MPa	$\varepsilon_{v0}$ ( $10^{-6}$ )
$\theta=0^\circ$	22	3100	7650	5600
$\theta=90^\circ$	21	2400	8200	5750

La figure 3.4 montre clairement que les réponses des déformations (longitudinale, transversale et volumique), dans les deux directions de carottage, sont similaires. Cette isotropie de déformations pour un chargement isotrope est également très marquée par l'égalité entre les déformations longitudinales et les déformations transversales sur chaque courbe des deux orientations ( $\theta=0^\circ$  ou  $\theta=90^\circ$ ). On remarque aussi que les valeurs  $P_f$ ,  $K$  et  $\varepsilon_{v0}$  dans les deux directions de carottages sont également comparables, avec une légère différence pour les valeurs de  $K_0$ . La courbe contrainte- déformation volumique met en évidence une phase non linéaire à faible pression de contrainte due à la fermeture des microfissures initiales suivie par une partie linéaire, correspondant aux déformations du squelette poreux non fissuré.

### 3.1.2. Essai de Compression Simple

L'essai de compression simple consiste à appliquer une contrainte uniaxiale de compression ( $\sigma_1$ ) et de suivre l'évolution des déformations dans deux directions perpendiculaires. L'échantillon est placé entre les deux plateaux de la presse photo (3.1), et la force axiale est appliquée à l'aide du déplacement du plateau supérieur. L'essai a été réalisé en déplacement contrôlé, la vitesse de chargement est égale à 0,5  $\mu\text{m}/\text{sec}$ . L'essai a été conduit jusqu'à la rupture. Les déformations de l'éprouvette et la force appliquée sont enregistrées à l'aide de la chaîne d'acquisition.



*Photo 3.1 : essai de compression simple*

Deux chemins de contraintes ont été considérés ; un chemin monotone, et un deuxième avec des cycles charges – décharges.

Les courbes représentatives de cet essai sont résumées sur la figure 3.5 (PELLEGRINO 1995) BIENIAWSKI (1967A, 1967B, 1967C, 1968), BRACE (1963), EBERHARDT (1998).

À partir de ces courbes, on peut déterminer les paramètres suivants :

Le module longitudinal initial  $E_{l0}$  de la courbe (contrainte –déformation longitudinale) est le tangent de la partie initiale de cette courbe. Le module transversal initial  $E_{t0}$  est le tangent de la partie initiale de la courbe (contrainte –déformation transversale). En effet, dans un premier temps et en appliquant la contrainte axiale, les microfissures existants dans l'échantillon vont se refermer progressivement. Après cette zone, les déformations vont augmenter linéairement en fonction de la contrainte axiale, dans cette partie, des cycles de décharges - recharges ont été réalisés, on détermine les modules sécants (module longitudinal  $E_l$  et le module transversal  $E_t$  ) qui présentent la tangente de la partie de décharge (le calcul des modules sera entre le premier et le dernière points du cycle de décharge (Figure 3.5)(voir paragraphe 1.3).

La courbe de déformation volumique de la figure 3.5 présente deux phases, une phase contractante et une autre dilatante. Le point A est le seuil entre les deux phases.

On détermine la résistance à la rupture à partir du pic de la courbe contrainte - déformation.

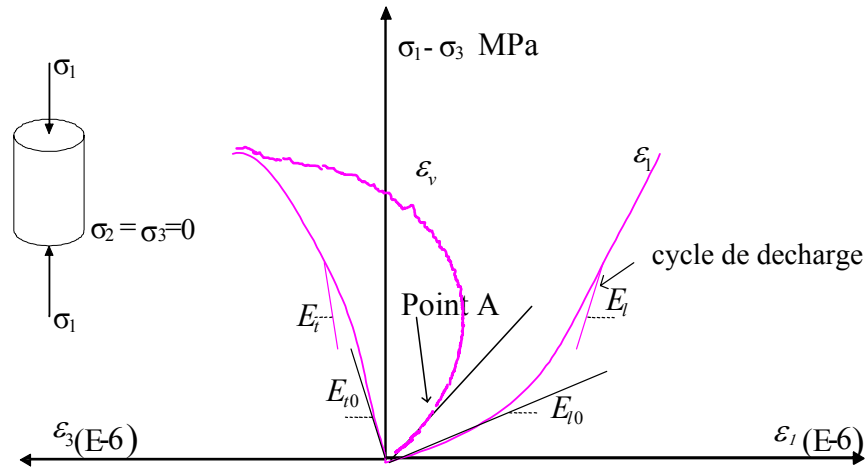


Figure 3.5 : courbe représentative de l'essai de compression

#### A) Essai de Compression Simple Monotone

Les courbes de déformations longitudinales, transversales et volumiques en fonction de la contrainte appliquée sont représentées sur la figure 3.6 pour l'orientation de  $\theta=0^\circ$ , la courbe correspondant à  $\theta=90^\circ$  étant présentée en annexe I.

On observe d'abord sur cette courbe la fermeture des fissures orientées plus ou moins perpendiculaire à la direction de la contrainte axiale. Ensuite la courbe contrainte – déformation longitudinale devient linéaire, mais cela ne correspond pas à un comportement élastique, car il nous faut un essai de déchargement pour montrer si les déformations sont réversibles ou non. La courbe contrainte – déformation volumique change de pente assez rapidement. En effet la fissuration naturelle commence à se propager à partir d'un seuil très bas (point A) ce seuil se traduit par la perte de linéarité précoce des déformations transversales.



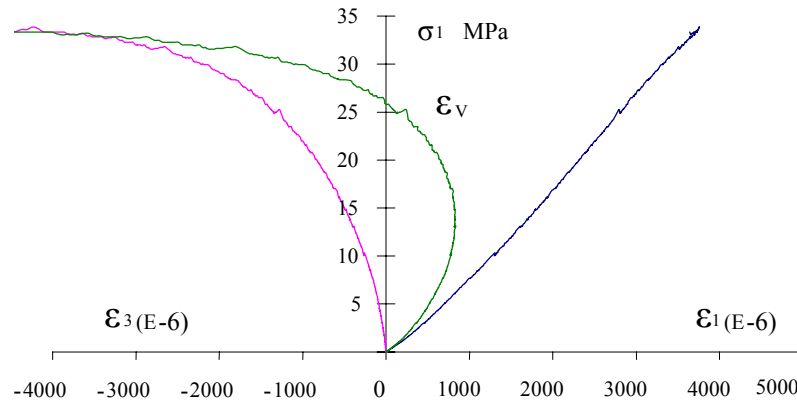


Figure 3.6 : Essai de compression simple monotone pour un carottage horizontal  $\theta=0^\circ$

B) Essai de compression simple avec cycles de chargement - déchargement - recharge axiale :

Nous avons appliqué ici la même procédure que pour les essais de compression monotone. Nous avons réalisé quatre cycles de décharge - recharge pour chaque test, la contrainte axiale étant déchargée jusqu'à 1 MPa pour chaque cycle. Nous montrons sur la figure 3.7 les courbes de déformations longitudinale, transversale et volumique en fonction de la contrainte appliquée pour l'orientation de  $\theta=0^\circ$ , la courbe qui correspond à  $\theta=90^\circ$  sera présentée en annexe 1. On remarque ici l'existence de déformations irréversibles plus importantes dans la direction longitudinale que dans la direction transversale. Nous avons également des boucles d'hystérésis, ces boucles sont nettement plus importantes près du pic.

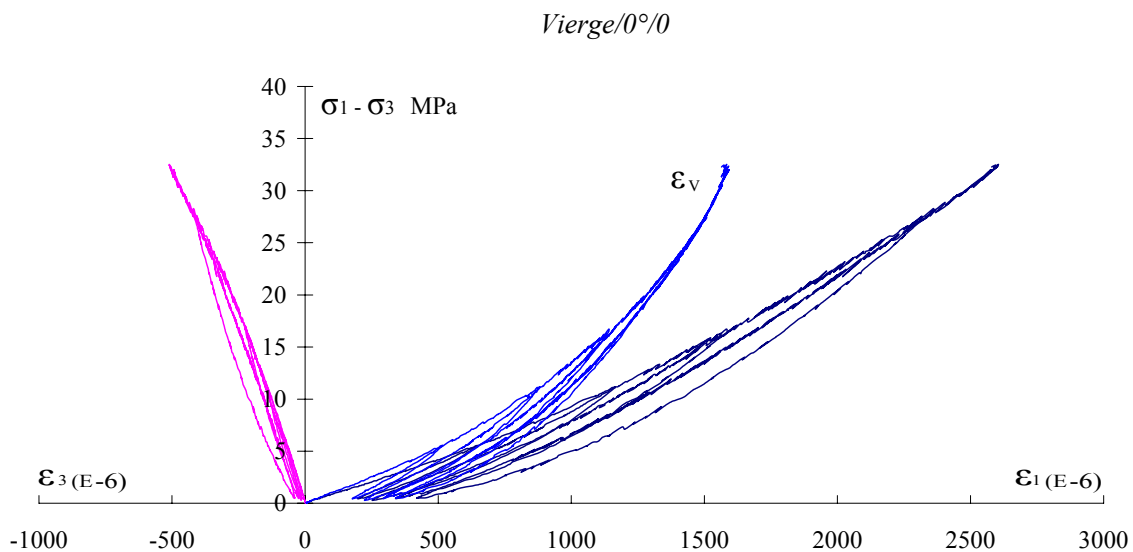


Figure 3.7 : Essai de compression simple avec cycles de chargement - déchargement - recharge axial ( $\theta=0^\circ$ )

Les modules longitudinaux et transversaux initiaux, calculés à partir des courbes obtenues lors des essais de compression simple avec cycles de décharge, ainsi que les valeurs à la rupture pour les deux angles de carottage sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Valeurs de  $E_{l0}$ ,  $E_{t0}$  et la contrainte à la rupture pour différentes orientations de carottage

Orientation de carottage	$E_{l0}$ MPa	$E_{t0}$ MPa	$\sigma_1$ MPa
$\theta=0^\circ$	7900	70000	32,7
$\theta=90^\circ$	7500	63000	34,7

On constate que les modules initiaux ainsi que les résistance à la rupture dépendent très peu de l'angle de carottage, ce qui confirme que ce grès est initialement isotrope.

Les modules longitudinale et transversale sécants à différents niveaux de contraintes, pour les deux angles de carottage sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Valeurs déduites des modules sécants en fonction de la contrainte axiale

A)  $\theta=0^\circ$

$\sigma_1$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
4,6	9422	74756,4
9,1	9750,7	68540,6
13,2	10456,5	65721,3
23,3	11776,3	60149,9

B)  $\theta = 90^\circ$

$\sigma_1$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
4,6	10200	91800
9,1	11800	93700
13,2	13500	87000
23,3	14900	88100

La encore la différence entre les deux orientations est assez faible, avec des valeurs plus élevées pour l'orientation  $\theta = 90^\circ$ .

**3.1.3. Essai de Compression Triaxiale avec cycle de chargement –déchargement – rechargement :**

L'essai triaxial consiste à soumettre une éprouvette dans un champ de contraintes isotropes ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = Pc$ ) à l'aide de la pompe Gilson©. On maintient la contrainte isotrope constante, et on applique un chargement déviatorique en augmentant la contrainte axiale à l'aide de la presse hydraulique (photo 3.2). La vitesse de chargement est égale à 0,5 micron/sec. Les éprouvettes sont préparées de la même manière que pour l'essai de compression simple. Nous avons utilisé deux colliers de serrage pour assurer l'étanchéité de l'échantillon, il est important de vérifier également que le contact entre l'éprouvette et le piston de la cellule est assuré.

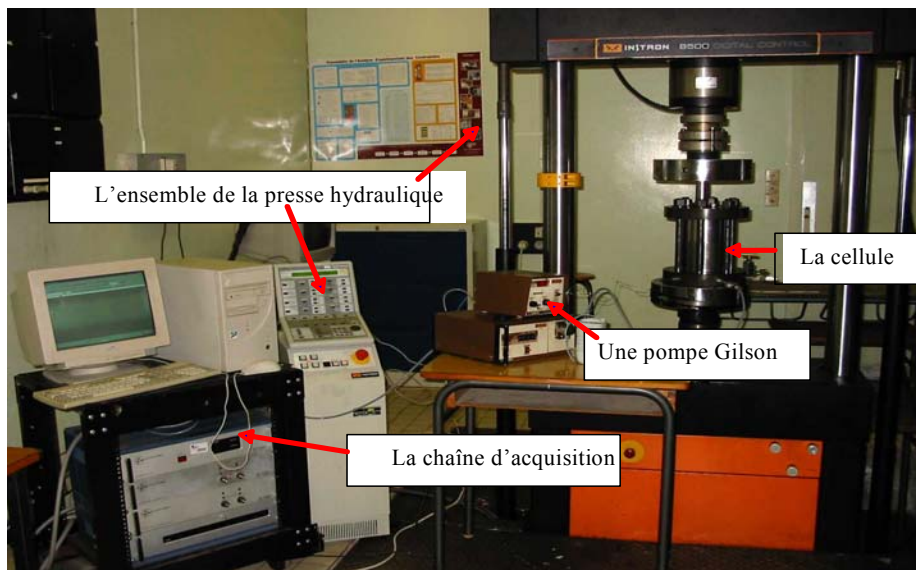
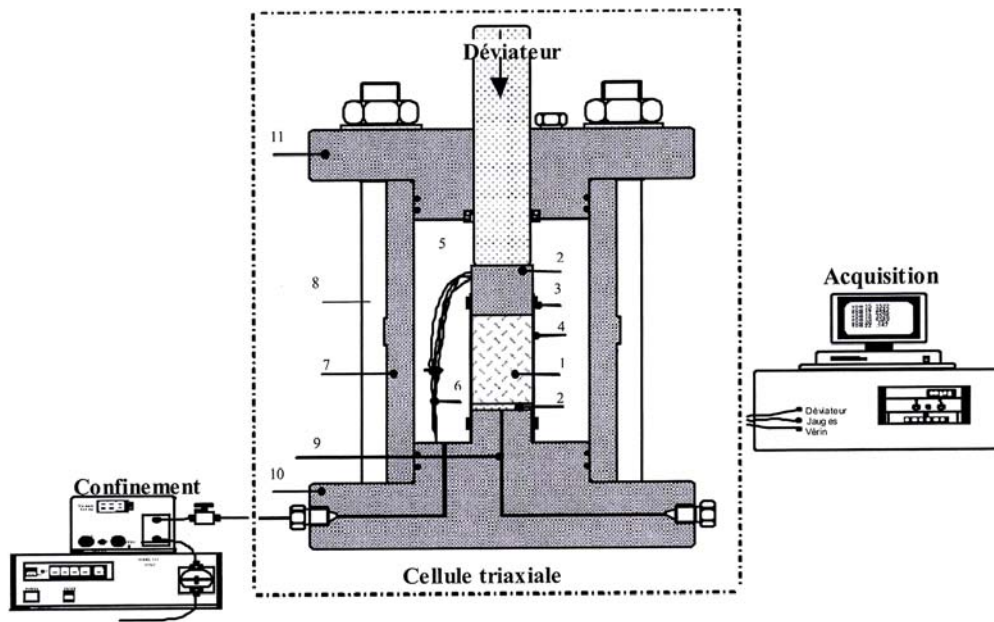


Photo 3.2 : vue générale de la presse triaxiale



- |                           |  |
|---------------------------|--|
| (1) éprouvette            | (7) chambre                                      |
| (2) embase drainante      | (8) tirant                                       |
| (3) collier de serrage    | (9) circuit de fluide pour essais poromécaniques |
| (4) jaquette              | (10) embase inférieure                           |
| (5) fluide de confinement | (11) embase supérieure                           |
| (6) fils de jauges        |  |

Figure 3.8 : schéma de la presse triaxiale

Après avoir mis en place l'échantillon dans la cellule, cette dernière est placée entre les deux plateaux de la machine ; on s'assure également du contact entre le plateau de la machine et le piston de la cellule. On purge la cellule et on monte ensuite la pression de confinement jusqu'à la pression désirée, pendant cette phase, le plateau supérieur est toujours bloqué. On applique la charge déviatorique par le déplacement du plateau supérieur de la machine. Les déformations et la contrainte déviatorique axiale sont enregistrées continuellement,

Les essais triaxiaux sont effectués avec des cycles de décharge. Pour les essais de compression simple nous avons déchargé jusqu'à 1 MPa de la contrainte axiale, en revanche pour les essais triaxiaux, la décharge de la contrainte déviatorique a été réalisée jusqu'à 40 à 60 % de la charge déviatorique appliquée. La vitesse de déchargement déviatorique est la même que celle du chargement. Après la réalisation des cycles de chargement déchargement prévus, l'essai a été conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Nous avons réalisé 3 essais triaxiaux à différentes pressions de confinement (5, 10 et 20 MPa) et pour les deux angles de carottage  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ , Nous montrons sur la figure 3.9 les

courbes de déformations longitudinale, transversale et volumique en fonction de la contrainte déviatorique appliquée, avec une pression de confinement à 5 MPa pour l'orientation de  $\theta=0^\circ$ , la courbe correspondant à  $\theta=90^\circ$  est présentée en annexe I. L'origine O sur ces courbes correspond à l'état hydrostatique ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=P_c$ ), avant le chargement déviatorique. Nous calculons les valeurs initiales des modules ( $E_{l0}$  et  $E_{t0}$ ), ainsi que les valeurs des modules sécants sur les cycles des décharges (tableaux 3.3, 3.4), La même démarche sera suivie pour les essais à 10 MPa et à 20 MPa (de confinement) (Figure 3.10, Tableaux 3.5, 3.6, Figure 3.11, et Tableau 3.7, 3.8). Toutes les courbes correspondant à  $\theta=90^\circ$  sont présentées en annexes I.

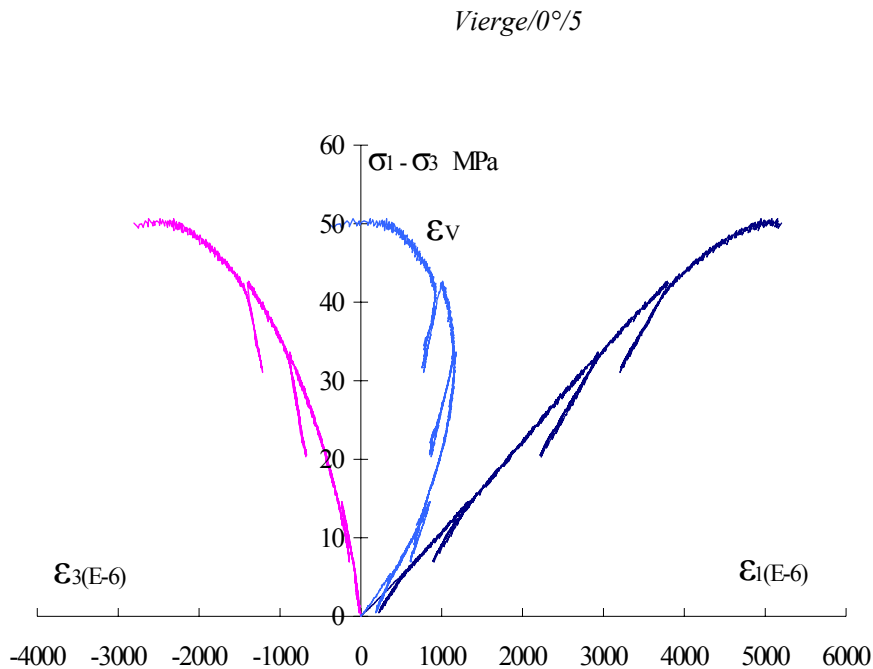


Figure 3.9 : Essai de compression triaxial avec cycles de chargement- déchargement pour une pression de confinement de 5 MPa et un angle de carottage de  $\theta=0^\circ$

Tableau 3.3 : Valeurs  $E_{10}$  et  $E_{t0}$  et la contrainte à la rupture pour des essais de compression triaxiale ( $P_c=5$  MPa) avec cycles de chargement - déchargement

Orientation de carottage	$E_{10}$ (MPa)	$E_{t0}$ (MPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)
$\theta=0^\circ$	10500	89000	50
$\theta=90^\circ$	11500	85000	52

Tableau 3.4 : Valeurs déduites des modules sécants  $E_{10}$  et  $E_{t0}$  en fonction du déviateur de contraintes  $P_c=5$  MPa

A)  $\theta=0^\circ$

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
5,4	17106,2	90196,4
14,6	17429,0	80655,3
33,7	18456,3	68428,2
42,7	19208,3	69030,0

B)  $\theta=90^\circ$

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
9,15	20972,04	115648,69
21,51	21540,74	93403,79
32,73	19885,59	81906,90
44,69	20148,00	74880,67
56,56	20036,67	69398,38

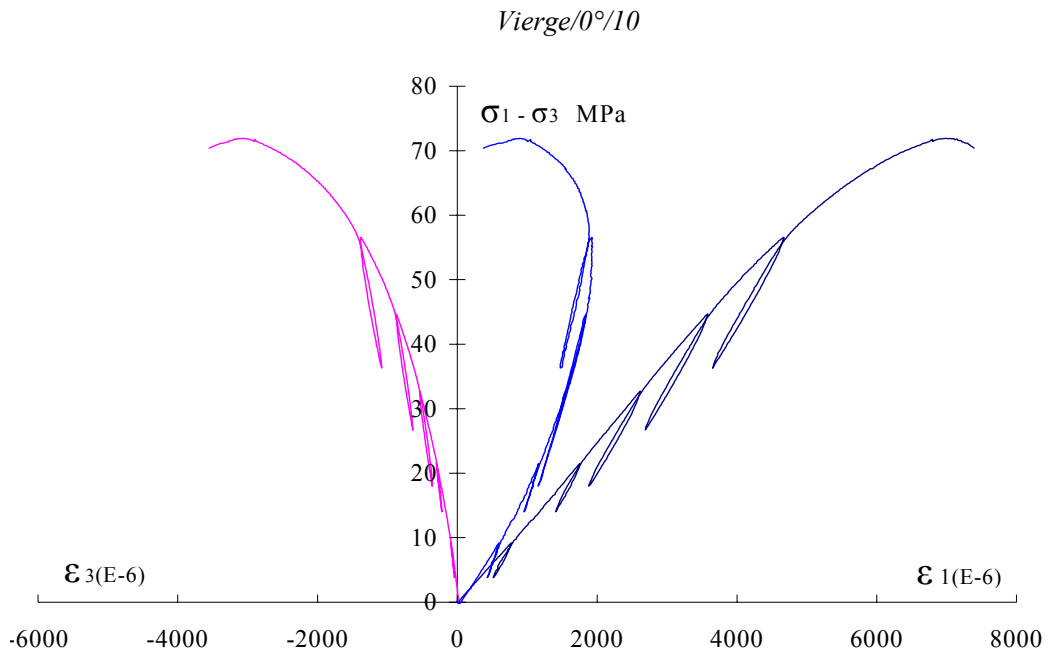


Figure 3.10 : Essai triaxial avec cycles de chargement -déchargement pour une pression de confinement de 10 MPa et un angle de carottage de  $\theta=0^\circ$

Tableau 3.5 : Valeurs  $E_{10}$  et  $E_{t0}$  et la contrainte à la rupture pour des essais de compression triaxiale avec cycles de chargement - déchargement ( $P_c=10$  MPa)

<i>Orientation de carottage</i>	$E_{10}$ (MPa)	$E_{t0}$ (MPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)
$\theta=0^\circ$	12000	108000	68
$\theta=90^\circ$	12500	84500	70

Tableau 3.6 : Valeurs déduites des modules sécants  $E_{10}$  et  $E_t$  en fonction du déviateur de contraintes  $P_c=10$  MPa

A)  $\theta=0^\circ$

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$E_t$ (Mpa)
9,15	20972,04	115648,69
21,51	21540,74	93403,79
32,73	19885,59	81906,90
44,69	20148,00	74880,67
56,56	20036,67	69398,38

B)  $\theta=90^\circ$

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
8,2	26520,0	171335,6
18,2	23140,0	146019,3
36,1	22754,5	118364,1
45,0	23712,0	114612,2
55,7	23858,8	107681,4
65,7	24960,0	108916,4



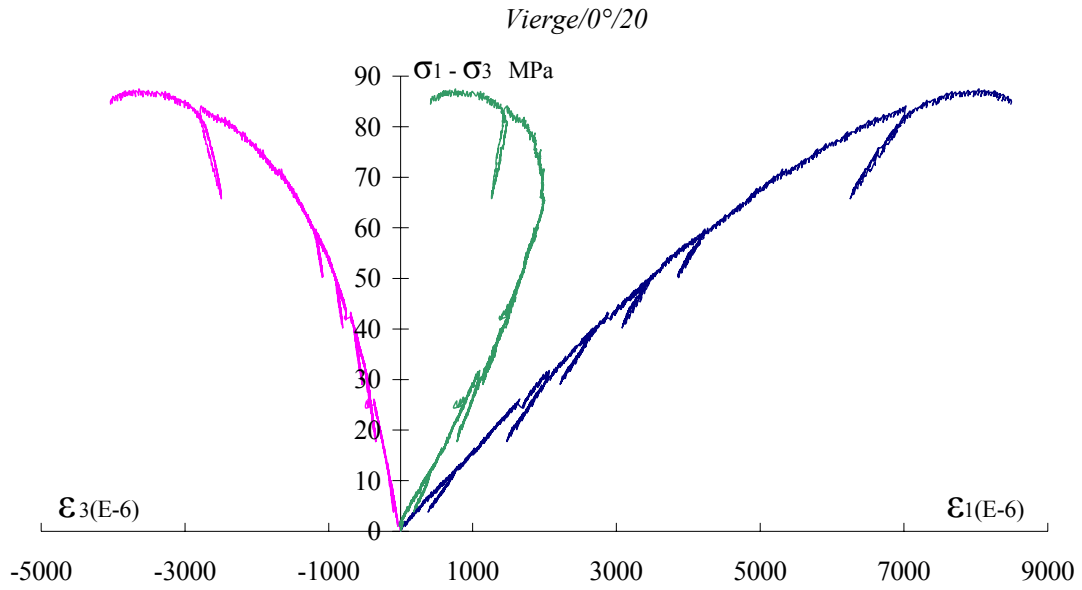


Figure 3.11 : Essai triaxiale avec cycles de chargement - déchargement pour une pression de confinement de 20 MPa et un angle de  $\theta=0^\circ$

Tableau 3.7 : Valeurs  $E_{10}$  et  $E_{t0}$  et la contrainte à la rupture pour des essais de compression triaxiale avec cycles de chargement - déchargement ( $P_c=20$  MPa)

Orientation de carottage	$E_{10}$ (MPa)	$E_{t0}$ (MPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)
$\theta=0^\circ$	13200	108000	87
$\theta=90^\circ$	14400	112000	88

Tableau 3.8 : Valeurs déduites des modules sécants  $E_{10}$  et  $E_{t0}$  en fonction du déviateur de contraintes à  $P_c=20$  MPa

A)  $\theta=0^\circ$

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
12,5	22309,2	118008,8
31,7	23957,2	102623,7
40,2	24262,9	109847,6
50,4	25535,5	106286,2
59,7	25771,0	103487,9
84,1	23632,1	065582,2

B)  $\theta=90^\circ$

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$E_l$ (MPa)	$E_t$ (MPa)
14,00	17259,18	112499,70
23,49	19943,32	109184,40
32,35	19532,83	103014,97
43,02	20691,95	92656,62
50,22	21674,66	108969,11
58,42	20822,06	99337,58
68,58	20441,38	88171,28

### 3.1.4. Discussion

➤ *Résistance à la rupture*

La figure 3.12 présente la variation de la résistance à la rupture en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions de confinement.

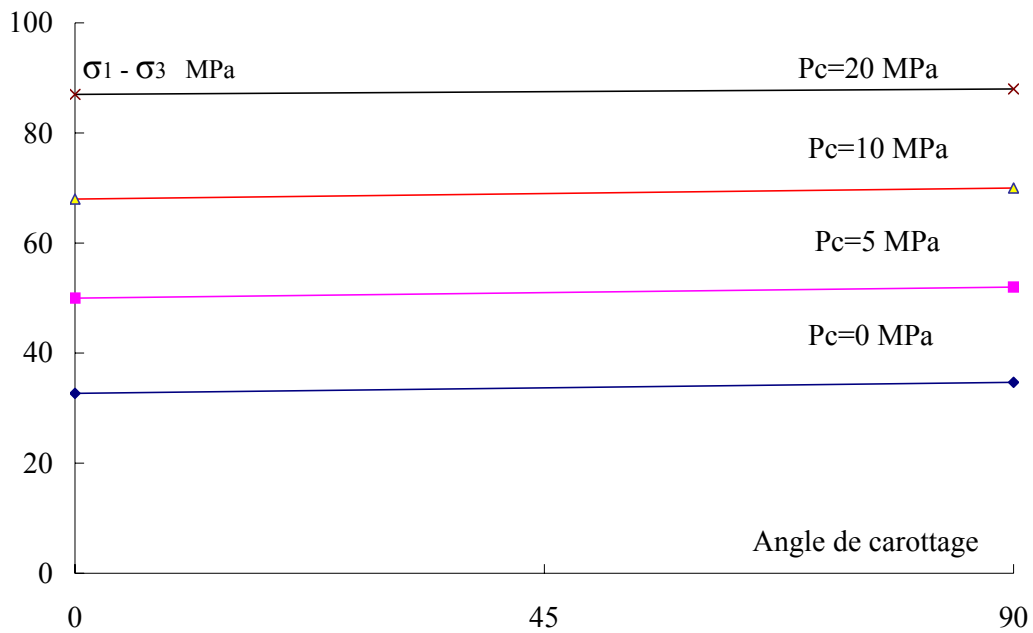


Figure 3.12 : Comparaison des valeurs de la résistance à la rupture en fonction de l'angle de carottage  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$

Les valeurs de la contrainte à la rupture sont quasiment identiques pour les deux angles de carottage  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ . La figure 3.13 montre, le plan p-q ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$  et  $p = \frac{(\sigma_1 + 2 * \sigma_3)}{3}$ ), les valeurs de la contrainte à la rupture obtenues lors des essais de compression sur des angles  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ . On remarque que, le matériau présente une isotropie de résistance à la rupture. On note aussi que, la valeur au pic augmente nettement avec la pression de confinement.

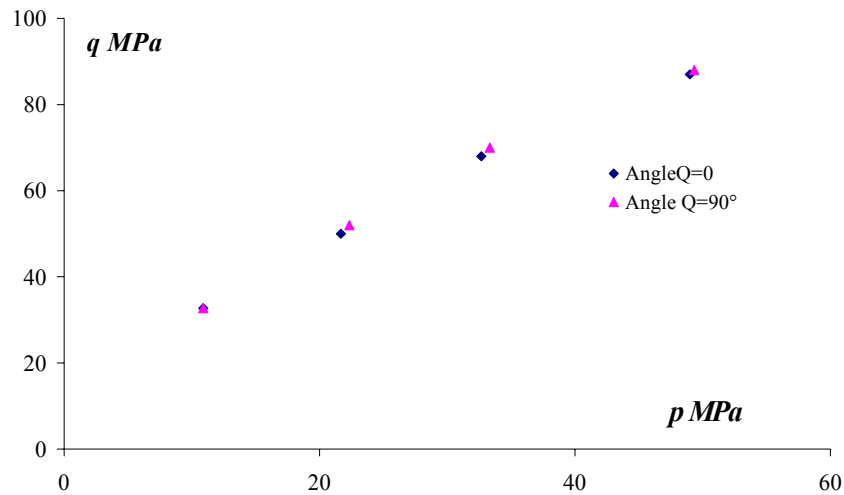


Figure 3.13 : courbe de la rupture pour les essais à  $\theta=0$  et  $\theta=90^\circ$

Dans la suite du travail, nous allons prendre la moyenne arithmétique des valeurs au pic pour chaque niveau de pression de confinement (tableau 3.9), ces valeurs seront les valeurs de base pour le bloc vierge (pour des futures comparaisons entre blocs dans le chapitre suivant)

Tableau 3.9 : moyennes arithmétiques de résistance à la rupture pour chaque niveau de pression de confinement

contrainte à la rupture	$P_c=0$ MPa	$P_c=5$ MPa	$P_c=10$ MPa	$P_c=20$ MPa
$\sigma_1-\sigma_3$ MPa	32,7	51	69	87,5

➤ Modules initiaux ( $E_{i0}$  et  $E_{t0}$ ), et sécants ( $E_i$  et  $E_t$ )

En ce qui concerne l'évolution des modules sécants des cycles de décharge ( $E_t$  et  $E_i$ ), on présente d'abord les courbes dans la partie initiale ( $E_{t0}$  et  $E_{i0}$ ), ensuite les courbes dans la partie non linéaire ( $E_t$  et  $E_i$ ). La figure 3.14 nous montre les valeurs des modules initiaux en fonction de  $\theta$ . On constate que  $E_{t0}$  et  $E_{i0}$  ne dépend pas de  $\theta$ , ils varient par contre beaucoup en fonction de la pression de confinement.

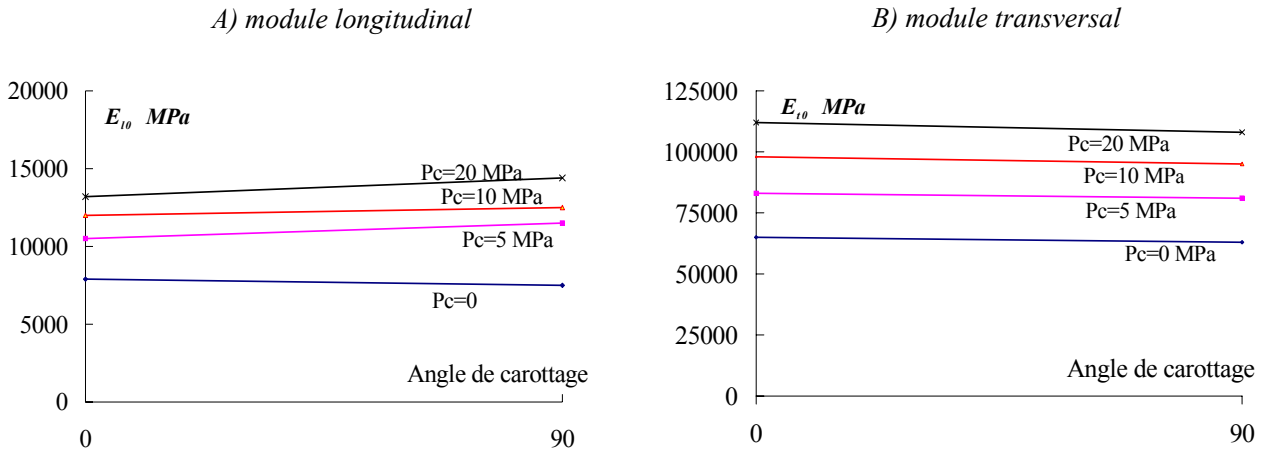


Figure 3.14 : Evolution des valeurs du module initial en fonction de l'angle de carottage

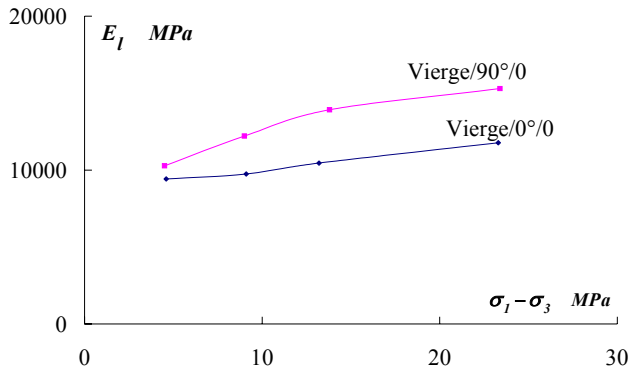
De la même façon, nous allons prendre la moyenne arithmétique du module initial (longitudinal et transversal) pour chaque niveau de pression de confinement (tableau 3-11).

Tableau 3.11 : moyennes arithmétiques du module initial pour chaque niveau de pression de confinement

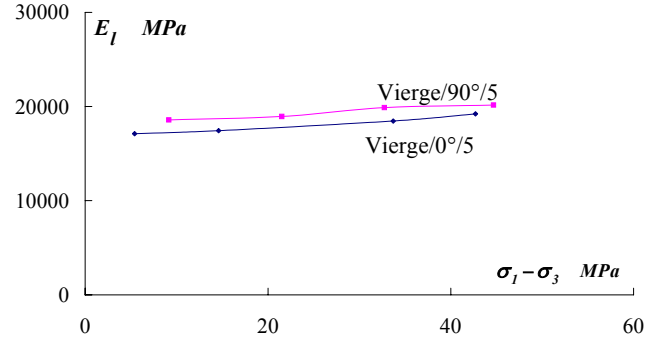
module initial	Pc=0 MPa	Pc=5 MPa	Pc=10 MPa	Pc=20 MPa
$E_{l0}$	7700	11000	12200	13800
$E_{t0}$	64000	87000	96000	111000

Les figures 3.15 présentent la variation de  $E_l$  en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions de confinement. A l'exception de l'essai de compression simple, et à partir de 5 MPa de pression de confinement, les valeurs de  $E_l$  sont quasi constantes en fonction des déviateurs de contraintes, ceci signifie que l'endommagement induit n'affecte pas le module longitudinal. La différence des valeurs entre les deux orientations ( $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ ) est faible, ce qui confirme de nouveau l'isotropie du grès étudié. Il faut noter que pour l'essai de compression simple, nous avons une légère augmentation des valeurs de  $E_l$  en fonction des déviateurs. En effet, pour cet essai, l'ouverture des microfissures naturelles est nettement plus simple que pour un essai avec pression de confinement.

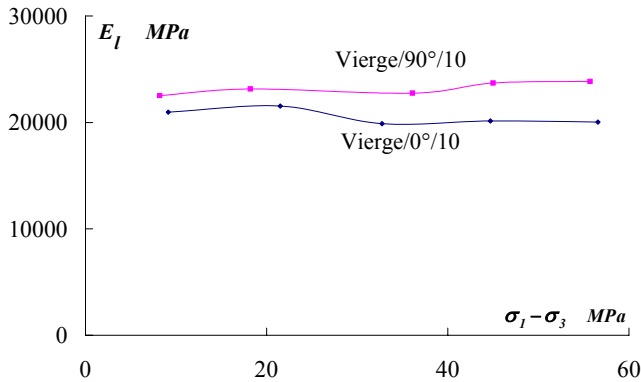
A)  $P_c=0$  MPa



B)  $P_c= 5$  MPa



C)  $P_c= 10$  MPa



D)  $P_c= 20$  MPa

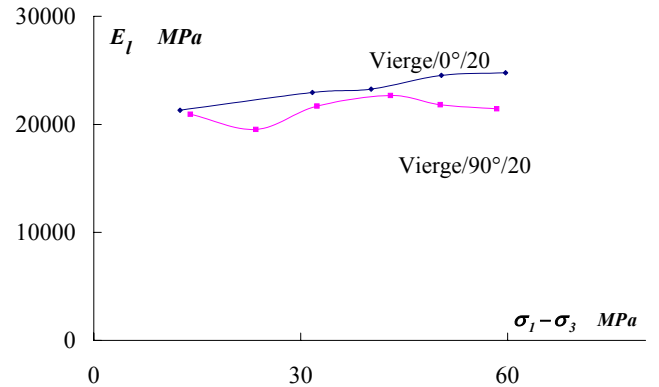


Figure 3.15 : Valeurs du module longitudinal sécant en fonction des déviateurs des contraintes

Les figures 3.16 présentent la variation de  $E_t$  en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions des confinements. Les valeurs de  $E_t$  diminuent fortement en fonction du déviateur de contraintes. L'endommagement induit affecte essentiellement le module transversal. La différence des valeurs entre les deux orientations ( $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ ) est faible. Il faut noter que pour l'essai de compression simple, nous avons également une légère diminution des valeurs de  $E_t$  en fonction du déviateur.

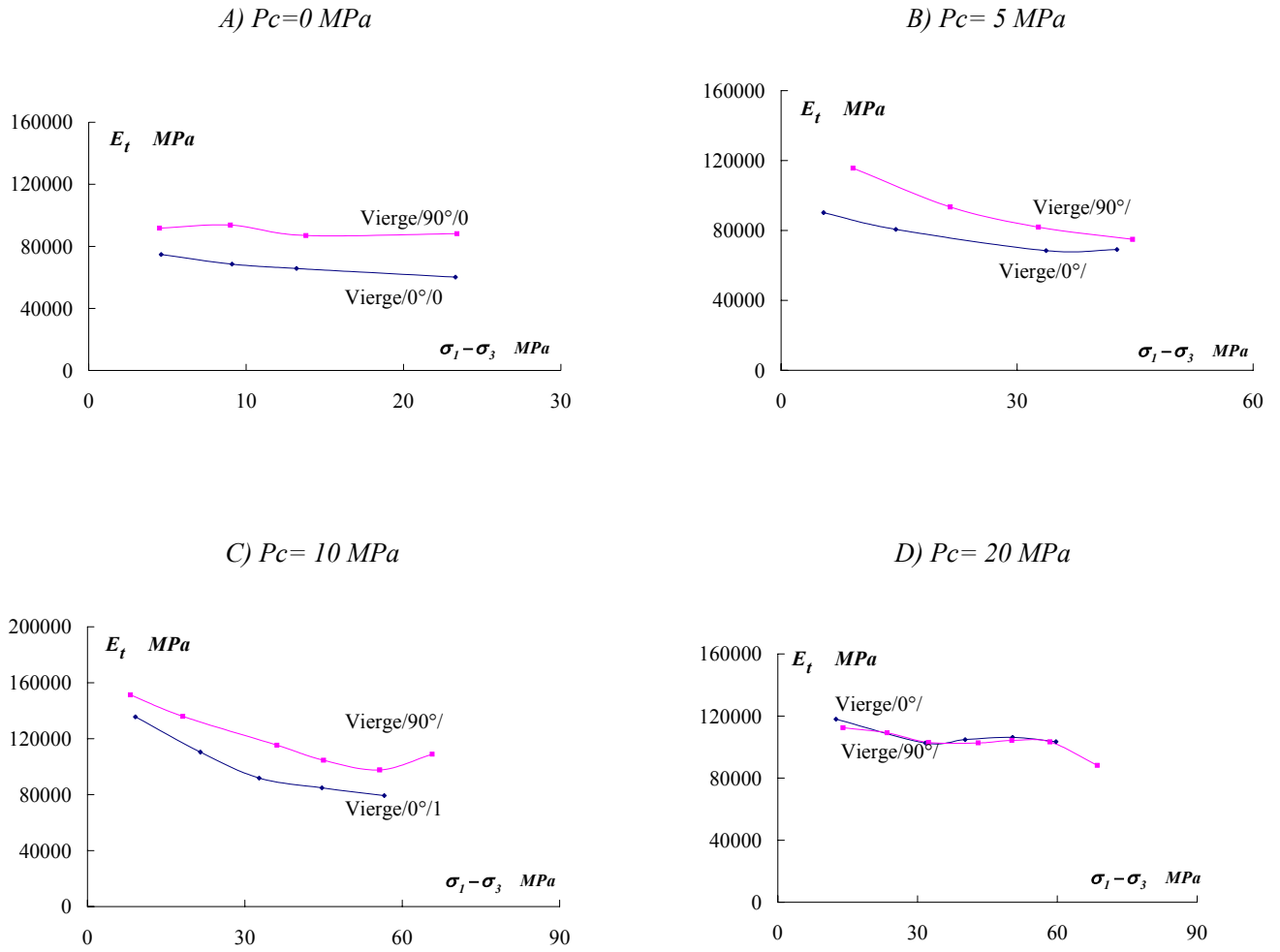
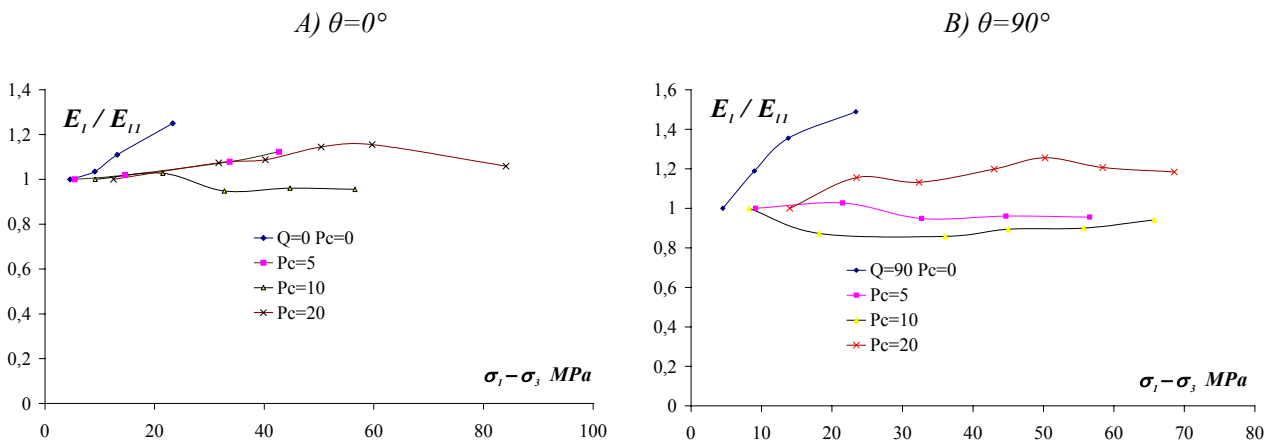


Figure 3.16 : Valeurs du module transversal sécant en fonction des déviateurs des contraintes

A partir de ces courbes (Figure 3.15 et Figure 3.16), on trace les courbes du rapport entre les valeurs du module sécant du cycle (i) et la valeur du module sécant du 1<sup>er</sup> cycle, en fonction de la contrainte déviatorique (Figure 3.17).



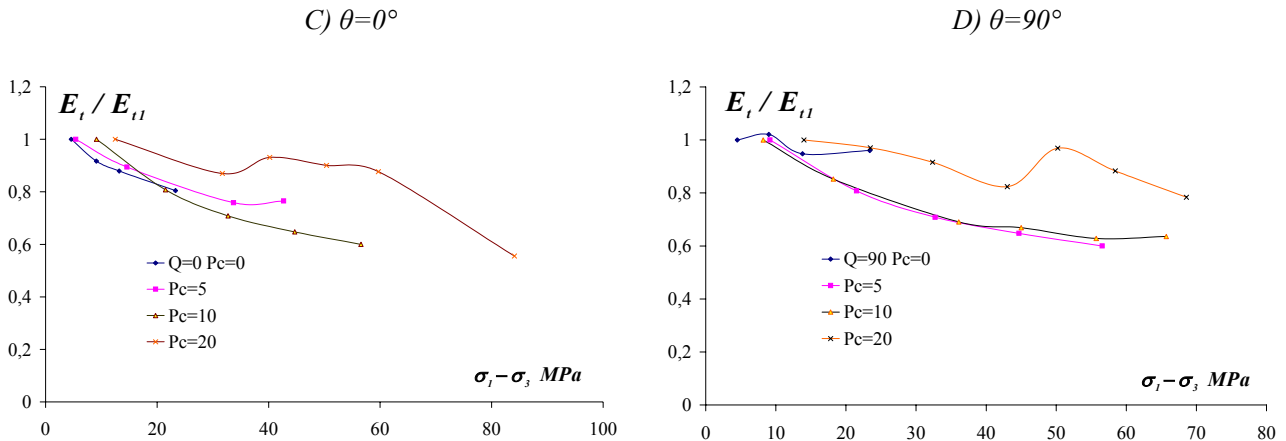


Figure 3.17 : rapport du module sécant en fonction des déviateurs de contraintes

A partir des figures 3.17-A et 3.17-B, on remarque que les modules sécants longitudinaux pour un essai de compression simple augmentent rapidement en fonction de la contrainte déviatorique. Par contre, ceux avec une pression de confinement restent quasi constantes.

En revanche, les figures 3.17-C et 3.17-D (correspondant aux modules sécants transversaux) montrent que les valeurs des rapports diminuent de la même manière pour les deux orientations

Dans le tableau 3.12 sont donnés les modules sécants  $E_t$  et  $E_l$  en fonction de la pression de confinement et du déviateur de contrainte. Dans ce tableau, nous avons calculé la moyenne arithmétique pour chaque niveau de pression de confinement et des contraintes déviatoriques, Les valeurs de ce tableau seront les valeurs de base pour la suite du travail.



$\sigma_3$ MPa	$\sigma_1 - \sigma_3$ MPa	$E_l$ MPa	$E_t$ MPa
0	4,55	9850	83200
	9,05	10990	81100
	13,5	12200	76350
	23,35	13500	74150
5	7,27	17800	10300
	18,1	18100	87000
	33,12	19100	75100
	43,7	19700	72900
10	8,67	21700	143000
	19,86	22300	123700
	34,4	21300	103200
	44,84	21900	94700
	56,1	21900	88500
20	13,25	19780	115250
	27,6	21950	105900
	50,31	23100	104450
	29	23700	103890
	71,26	23200	84450

Tableau 3.12 : les moyennes arithmétiques de  $E_l$  et  $E_t$  pour chaque niveau de pression de confinement et de contraintes déviatoriques

➤ *La perte de linéarité*

À travers les constatations et les observations sur les déformations mécaniques, la pression de confinement apparaît comme l'un des paramètres les plus importants qui affectent le seuil de la perte de linéarité et l'apparition de la zone dilatante.

D'une manière générale, la non linéarité initiale de la courbe de déformation longitudinale est due à la fermeture des microfissures initiales, l'importance de cette zone diminue avec l'augmentation de la pression de confinement. En revanche, la perte de linéarité de la courbe de déformation transversale est due au développement de microfissures orientées dans la direction de chargement. Cette perte de linéarité des courbes contrainte –déformation latérale coïncide avec le seuil de microfissurations (point A de la courbe 3.5), c'est généralement autour de ce niveau de la contrainte déviatorique que la première microfissuration induite a été rapportée dans la littérature NIHEI et al (2003). Ce niveau marque le début d'une phase de propagation des microfissures (désignée aussi par seuil de dilatance). Après la zone de serrage, nous avons une phase linéaire de la courbe contrainte - déformation longitudinale, cette phase est la conséquence de la tendance des microfissures à se développer stablement et parallèlement à l'axe de chargement. Cette phase de déformation s'étend jusqu'à un niveau élevé de la résistance à la rupture (65- 80 %) PELLEGRINO (1995).

La dilatance est définie comme l'augmentation inélastique du volume lorsqu'on déforme l'échantillon (déformation volumique inélastique). L'évolution de la dilatance exige le tracé d'une ligne de référence élastique virtuelle qui est habituellement une extrapolation de la partie quasi linéaire de la courbe de déformation volumique, en ignorant la phase de serrage. La dilatance est alors l'écart qui peut exister entre cette courbe et la droite fictive qu'on aurait obtenue si la déformation volumique était élastique comme dans le cas du chargement hydrostatique. On définit le seuil de dilatance comme étant le niveau de contrainte déviatorique où se situe la perte de linéarité de la courbe de déformation volumique. Ce concept de seuil de dilatance n'a pas de signification physique réelle parce que la transition entre le stade de déformation purement élastique et celui du développement de la microfissuration est progressive. Les variations des seuils de dilatance, relative aux essais de compression présentés, sont proposées dans le tableau 3.13.

Tableau 3.13 : valeurs des contraintes au seuil de dilatance

Pression de confinement	Seuil de dilatance ( $\sigma_1 - \sigma_3$ MPa)	
	$\theta=0^\circ$	$\theta=90^\circ$
Pc=0 MPa	6	5,5
Pc=5 MPa	10	10
Pc=10 MPa	16	15
Pc=20 MPa	21.5	22

### 3.1.5. Essai de Traction Directe

L'essai de traction directe consiste à appliquer une contrainte uniaxiale de traction  $\sigma_1$ , et à suivre l'évolution des déformations dans la direction axiale.



Photo 3.3 : Le montage complet d'un essai de traction directe

Le montage d'un essai de traction directe est schématisé sur la photo 3.3, il est constitué de deux ensembles symétriques. Chaque ensemble est constitué principalement de deux pièces filetées, la première de ces pièces est montée sur la machine, et la deuxième est collée sur l'échantillon. Les deux pièces sont liées entre elles par une tige de 9 mm de diamètre pour

assurer l'alignement de l'échantillon. L'éprouvette est collée avec une colle de type (ciba-araldite 2011) sur ses deux faces.

La force axiale est appliquée par la presse, avec une vitesse de déplacement égale à 0,05 micron/sec, et l'essai a été conduit jusqu'à la rupture. Nous avons remarqué que la rupture finale se produit souvent dans la partie centrale de l'échantillon (phot 3.4).

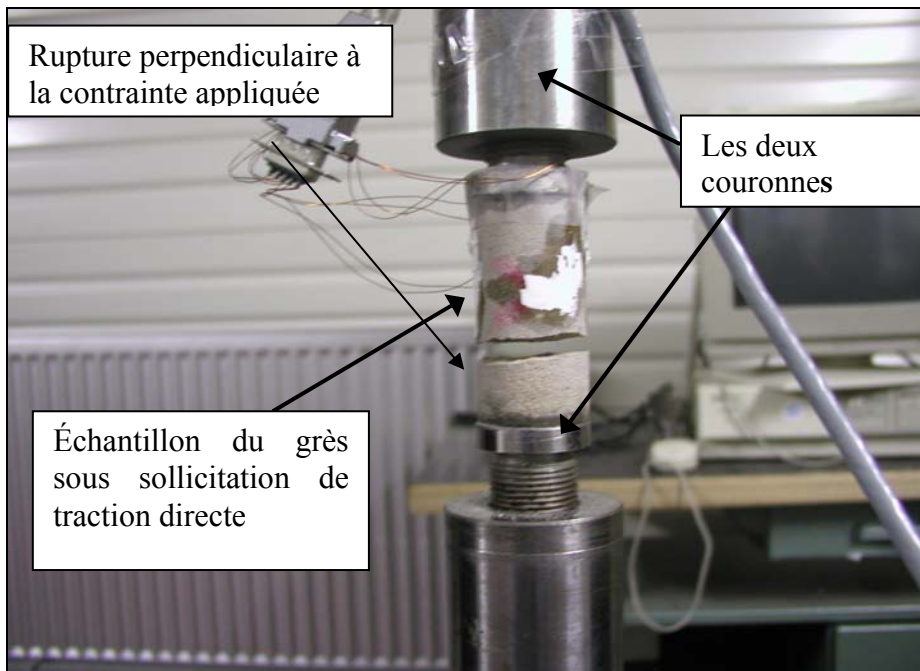


photo 3.4 : vue de l'appareil de traction directe

Les figures 3.18 montrent la courbe de déformation longitudinale en fonction de la contrainte appliquée pour les deux angles de carottage  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ .

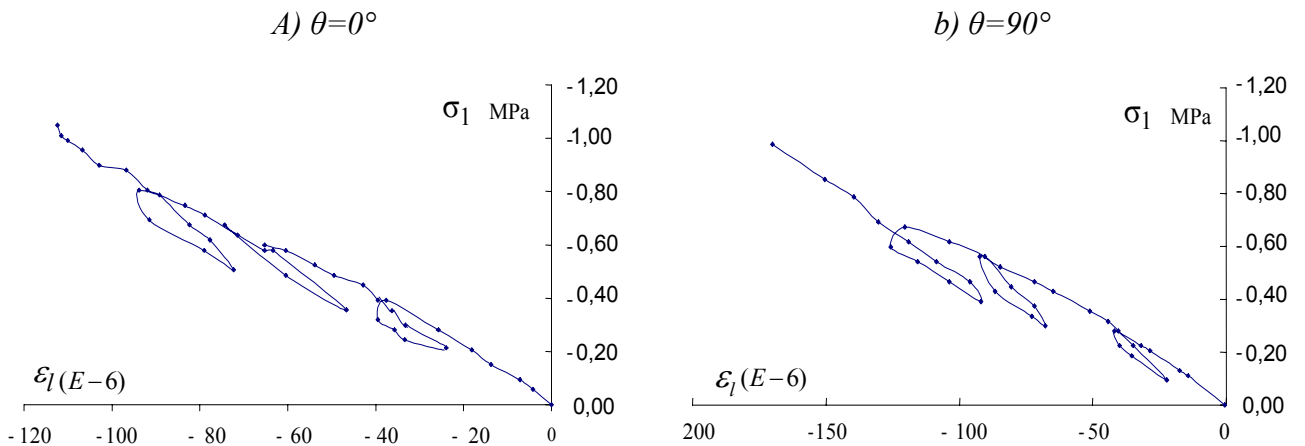


Figure 3.18 : deux courbes lissées d'un essai de traction directe

La mise en oeuvre d'un essai de traction directe est assez difficile. On remarque sur les courbes de la figure 3.18 que les valeurs des contraintes ainsi que celles des déformations à la rupture sont très faibles par rapport à un essai de compression simple, Cette remarque a été déjà faite par SAYEHI(1992) pour le grès de Fontainebleau.

On a effectué pour le bloc vierge deux essais ( $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ) de traction avec cycles de charge –décharge. Le module élastique sécant en traction croît au fur et à mesure que la contrainte axiale augmente. La variation du module en fonction de la contrainte est représentée sur la figure 3.19. Etant donné que ce grès est fragile nous n'étions pas arrivé à mesurer les déformations après le pic.

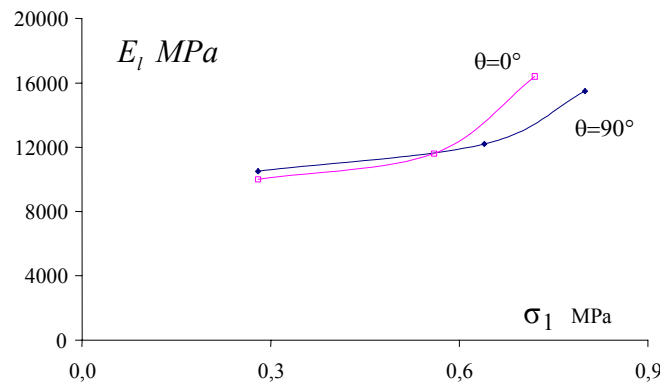


Figure 3.19 : Valeurs du module sécant longitudinal en fonction des contraintes de traction

Pour comparer les modules entre un essai de compression simple et un essai de traction directe, on considère la partie initiale de chaque courbe, c'est à dire la première montée de charge axiale pour chaque essai. La figure 3.20 montre une superposition des courbes contrainte – déformation longitudinale pour les deux essais. On remarque que les modules tangents sont pratiquement les mêmes pour un essai de compression et un essai de traction SIBAI et al (1993).

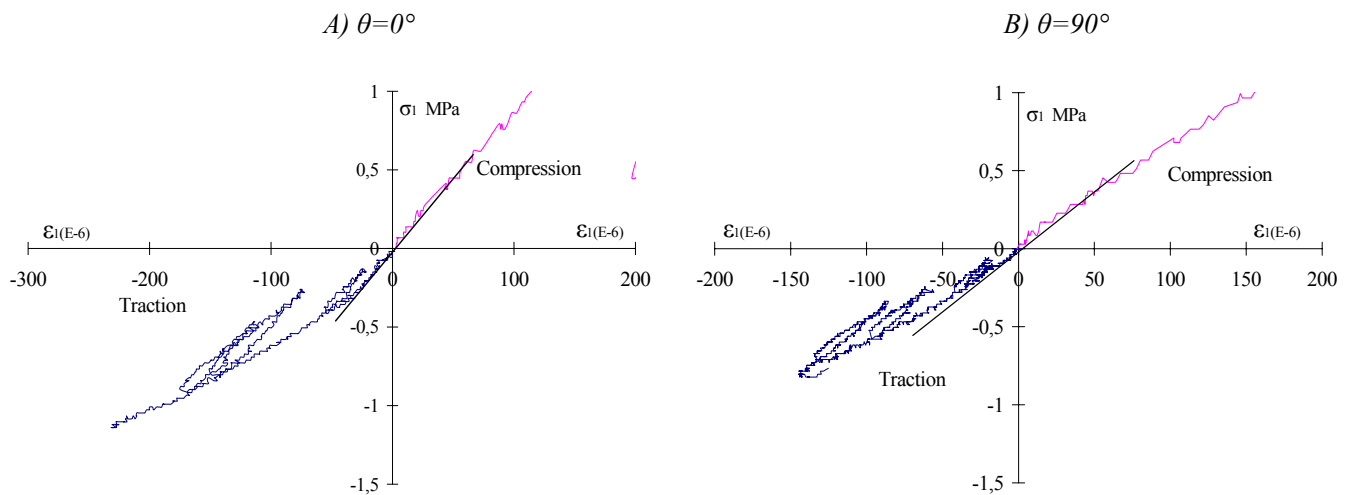


Figure 3.20 : Les parties initiales des essais de compression simple et de traction

### 3.1.6. Trajet de chargement proportionnel

Généralement, on réalise cet essai en force contrôlée. Mais, puisque la manipulation de la presse dans ce type de charge est assez difficile, nous avons choisi d'utiliser une cellule autonome et autocompensée avec son dispositif expérimental pour mieux assurer le déroulement de l'essai (photo 3.5).

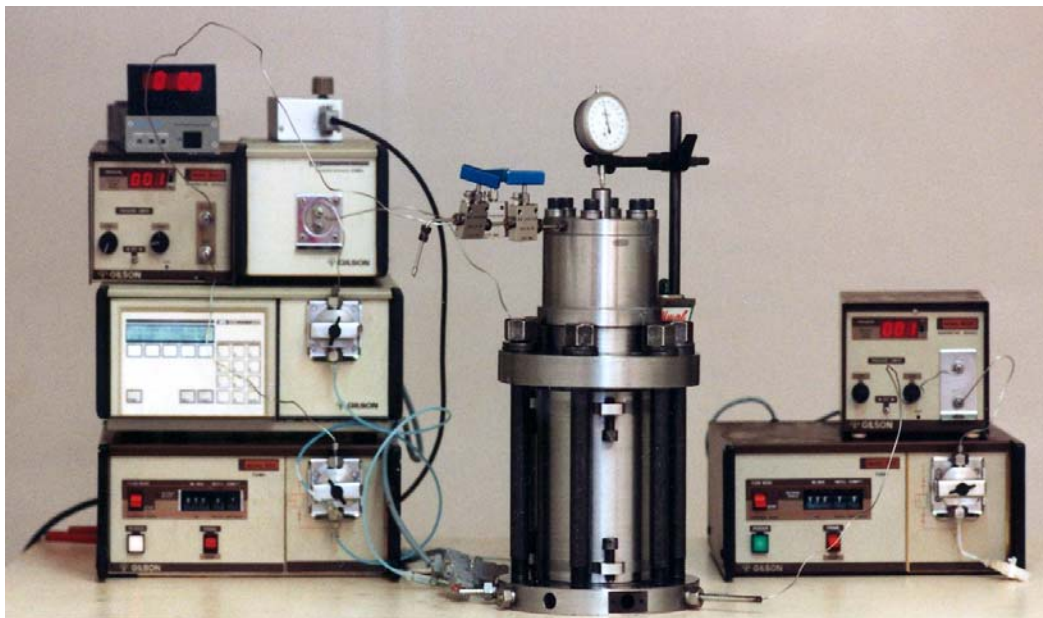


Photo 3.5 : cellule autonome et autocompensée avec trois pompes Gilson

La cellule autonome et autocompensée a été conçue au laboratoire de mécanique de Lille (Brevet n° 9007594), la figure 3.21 montre le schéma de cette cellule. On dispose dans cette cellule d'une chambre d'autocompensation qui permet d'empêcher la pression de confinement de provoquer une réaction sur le piston de la cellule. La force axiale appliquée est donc purement déviatorique. Cette cellule est autonome car nous avons une chambre supérieure qui permet d'obtenir une contrainte axiale (déviatorique) sans utiliser une presse extérieure. L'application de la contrainte axiale et de la pression de confinement s'effectue par l'intermédiaire de deux pompes Gilson. Comme nous l'avons expliqué au paragraphe 2.3, ces pompes ne permettent pas de réguler l'éventuel dépassement de la pression imposée dû à différents phénomènes. De ce fait, deux vannes de régulation sont installées pour permettre d'ajuster la pression de confinement et la contrainte axiale.

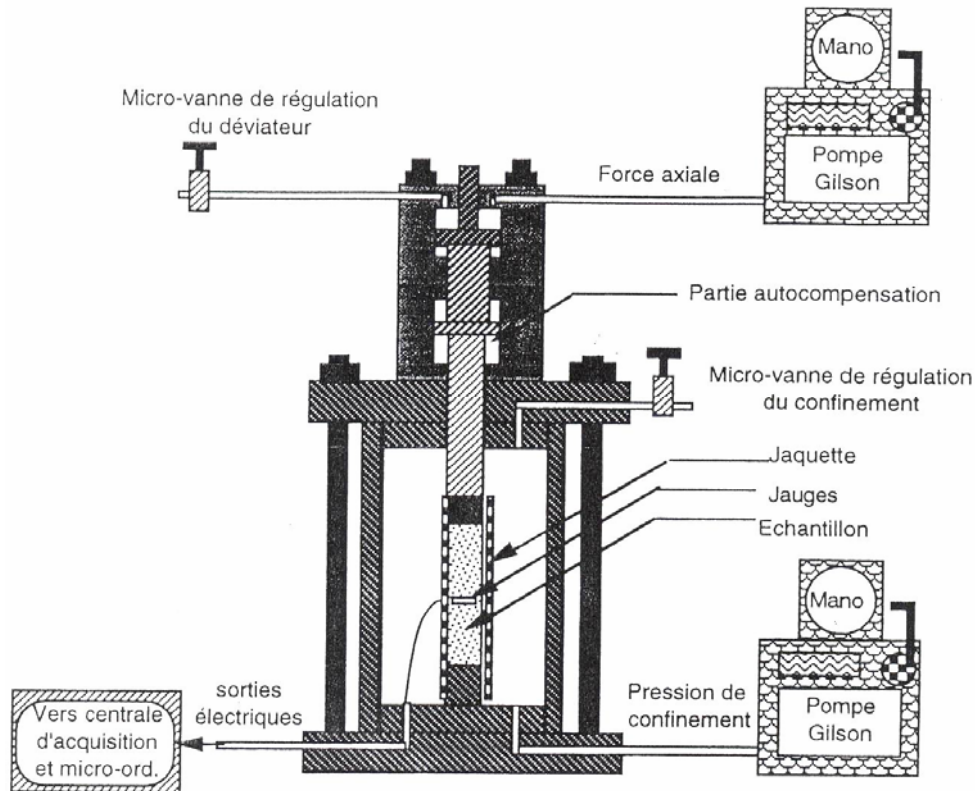


Figure 3.21 : schéma de la cellule autonome et autocompensée thèse (KHAZRAEI 1995)

Dans un essai proportionnel, on garde toujours au cours de l'essai le rapport des contraintes  $\sigma_1/\sigma_3$  constant. La figure 3.22 présente le chemin de sollicitation dans l'espace des contraintes.

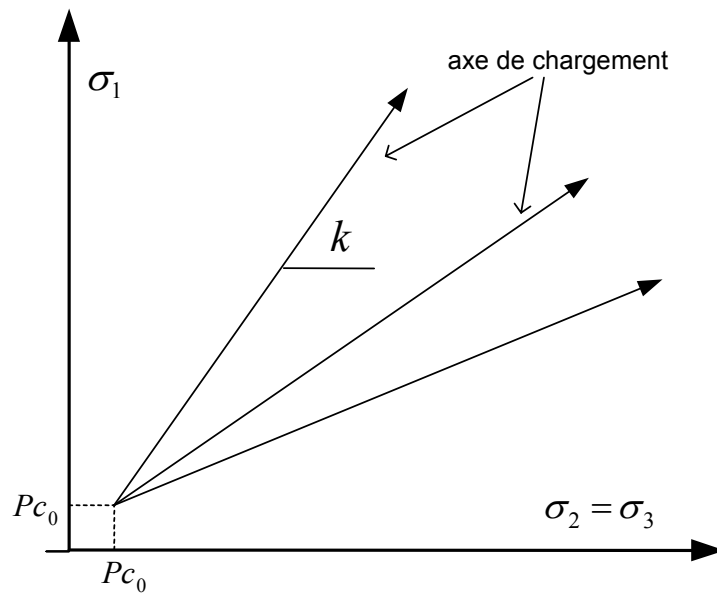


Figure 3.22 : chemin de sollicitation de chargement proportionnelle

On procède à la mise en place de l'éprouvette de la même manière que pour un essai de compression triaxiale dans une cellule traditionnelle ; la vitesse de chargement axial choisie est de l'ordre de  $1,72 \cdot 10^{-2}$  MPa/s.

Pour la réalisation de cet essai, on peut procéder de la manière suivante : après une saturation de l'éprouvette, l'essai commence à partir d'une pression de confinement de  $P_c = 1$  MPa. On applique la contrainte axiale et la pression de confinement par palier de sorte à garder toujours le rapport  $k = \sigma_1 / \sigma_3$  constant, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on atteigne, soit la rupture, soit la limite de la pompe Gilson<sup>®</sup> (60 MPa). Nous avons effectué trois essais proportionnels avec les rapports ( $k = 1,5 ; 7$  et  $8$ ).

Les déformations obtenues en fonction de la contrainte axiale sont représentées dans la figure 3.23, Il est à noter que la réponse du matériau dans ce type d'essai dépend fortement de la valeur du rapport des contraintes  $k = \sigma_1 / \sigma_3$ .



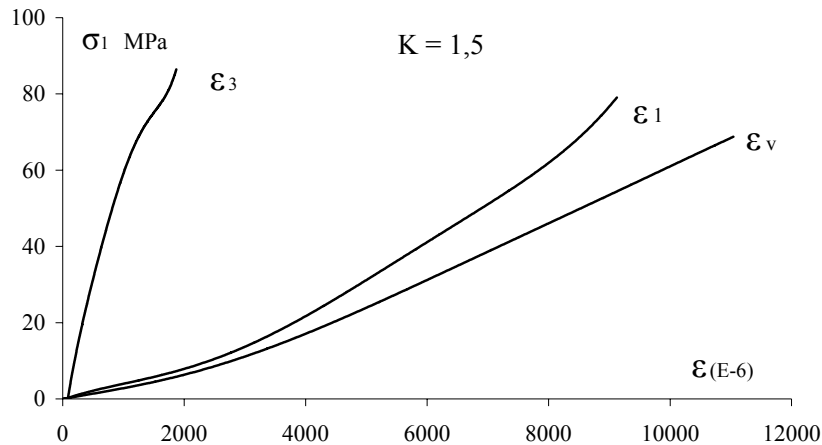


Figure 3.23 : Résultat représentatif d'un essai de chargement proportionnel  $k=1,5$

L'essai proportionnel dont le rapport  $k$  est faible ( $k=1,5$ ) n'a pas entraîné la rupture de l'échantillon, le grès se comporte de la même façon que sous un état de contraintes hydrostatiques. Pour un  $k$  assez élevé, ( $k=7$ ,  $k=8,5$ ) (voir annexe I), le comportement du grès tend vers un comportement sous compression uniaxiale et les essais réalisés conduisent à la rupture.

### 3.1.7. Trajet d'extension latérale

Pour ce type d'essais, nous procédons comme suit : après avoir placé l'éprouvette dans la cellule, un chargement hydrostatique est appliqué jusqu'à un niveau donné de pression de confinement. Puis, après la stabilisation complète des jauges et des capteurs et en maintenant la contrainte axiale constante, on procède à un déchargement progressif par paliers de pression de confinement, jusqu'à la rupture ou bien jusqu'à un déchargement complet de la pression de confinement. L'asservissement dans cet essai est en force contrôlée et l'essai a été réalisé dans la cellule autonome et autocompensée. La saisie des valeurs des jauges et de la pression sont effectuées quelques minutes après la stabilisation des jauges de telle sorte qu'on ait la même vitesse de sollicitation pour le déchargement ainsi que pour le chargement dans un chemin de compression hydrostatique, La figure 3.24 présente le chemin de sollicitation dans l'espace des contraintes.

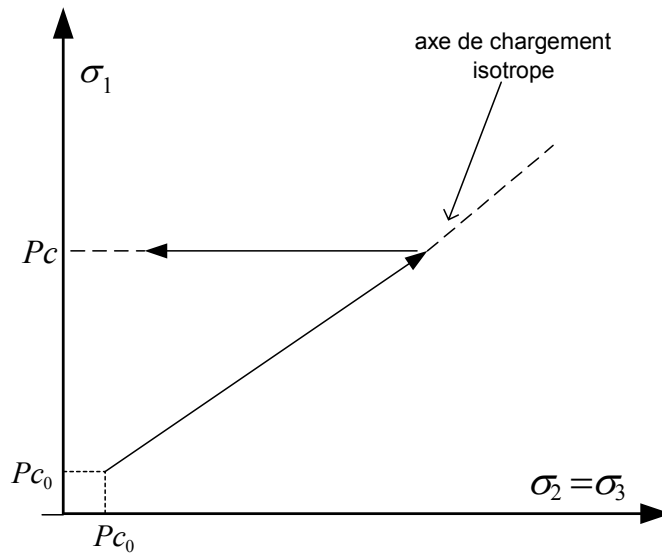
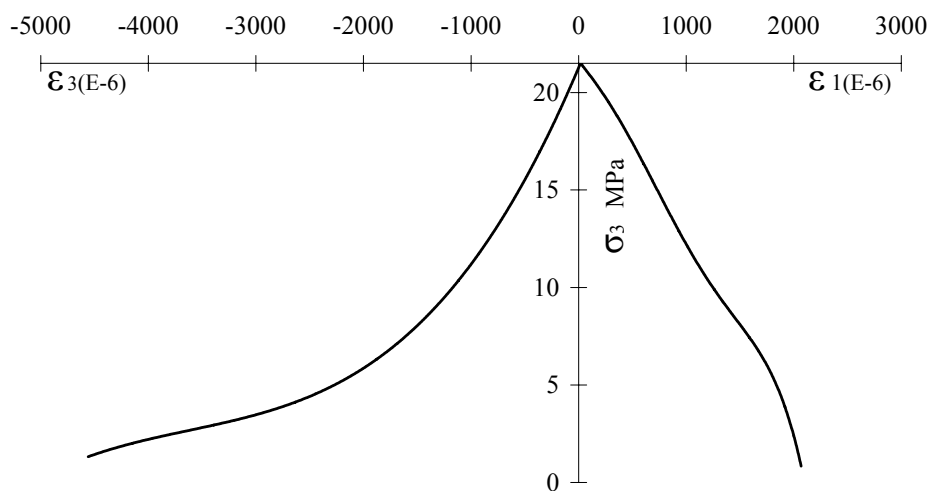


Figure 3.24 : chemin de sollicitation dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )

Nous avons effectué deux essais avec deux pressions de confinement initiales de 21,5 et 45 MPa. La figure 3.25 montre les déformations longitudinales et transversales en fonction de la contrainte latérale, pour l'orientation de carottage  $\theta=90^\circ$ .

A)  $P_{ci} = 21,5 \text{ MPa}$



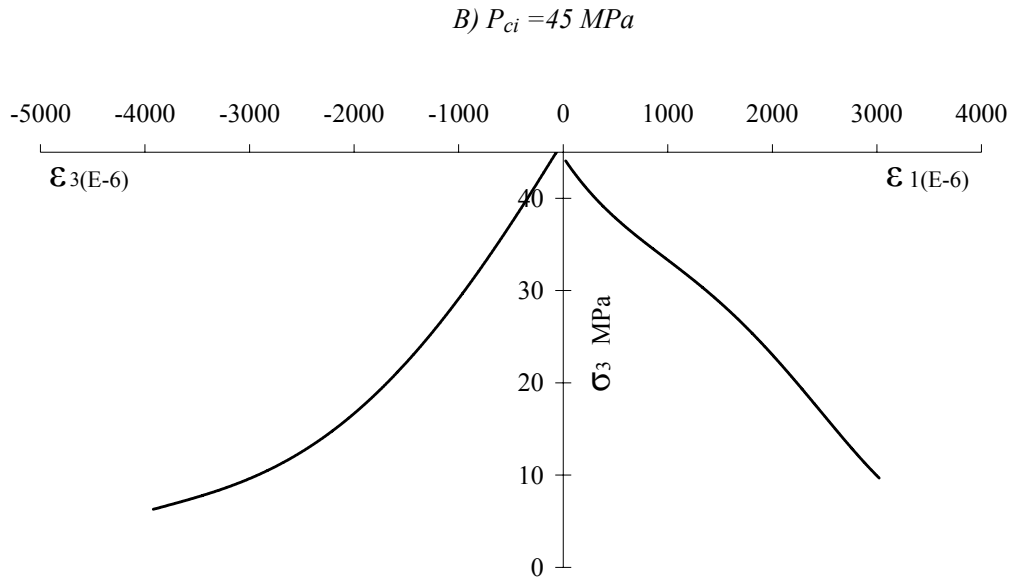


Figure 3.25 : Résultats représentatifs d'un essai d'extension latérale pour  $\theta=90^\circ$

Avec une pression de confinement initiale égale à 45 MPa, une rupture brutale de l'éprouvette est obtenue ; par contre, dans l'essai avec une pression de 21,5 MPa , la rupture macroscopique de l'éprouvette n'est obtenue qu'au relâchement total de la contrainte latérale ( $\sigma_3 = 0$ ), ceci en raison du faible niveau d'endommagement.

### 3.1.8. Les essais de couplage poromécanique :

Les essais ont été réalisés dans le but de calculer les paramètres du couplage (coefficients de BIOT) de ce grès. Ces essais de couplage ont été conduits soit pour un chemin hydrostatique, soit pour un chemin triaxial.

#### ➤ Rappel sur la détermination des paramètres de couplage

Dans le cas d'un matériau homogène, isotrope et dans l'hypothèse des transformations infinitésimales, les équations de comportement thermoporoélastique linéaire, dans le cas isotherme ( $T=T_0$ ), et en utilisant les constantes élastiques du matériau, peuvent être écrites sous la forme suivante ( COUSSY 1991):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{ij} - \sigma_{o,ij}) - \frac{\nu}{E}tr(\sigma_{ij} - \sigma_{o,ij})\delta_{ij} + \frac{bM}{3K_u} \left( \frac{m}{\rho_o} \right) \delta_{ij} \quad (3.1)$$

où  $K_0$  est le module de compressibilité non drainé du matériau,  $b$  est le coefficient de contrainte effective de Biot ( c'est un scalaire),  $\sigma$  est le tenseur de contrainte,  $\varepsilon$  celui de la déformation,  $\rho$  la masse volumique du fluide et  $M$  est le module de Biot.

Le volume du fluide échangé avec l'extérieur dans ce cas peut être écrit sous la forme :

$$\frac{m}{\rho_0^f} = \frac{1}{M} \left( 1 + \frac{b^2 M}{K_0} \right) (P - P_0) + \frac{b}{3K_0} \text{tr}(\sigma - \sigma_0) \quad (3.2)$$

Les paramètres du couplage pour les différentes configurations de chargement sont présentées ci-dessous :

- Cas non Drainé

Dans le cas non drainé, il n'y a aucun échange de fluide avec l'extérieur; on déduit à partir de l'équation (3.1) :

$$\text{tr}(\sigma - \sigma_0) = 3K_u \text{tr}\varepsilon \quad (3.3)$$

$K_u$  est module de compressibilité non drainé

et de la relation (3.2) on obtient :

$$-\frac{1}{M} \left( 1 + \frac{b^2 M}{K_u} \right) (P - P_0) = \frac{b}{3K_u} \text{tr}(\sigma - \sigma_0) \quad (3.4)$$

Dans un essai de compression isotrope non drainé on a:

$$K_u = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_v} \quad (3.5)$$

où  $\sigma_m = \frac{1}{3} \text{tr}\sigma$  est la contrainte isotrope,  $\varepsilon_v = \text{tr}\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  est la déformation volumique. A partir de cet essai, on peut également mesurer l'évolution de la pression interstitielle en fonction de la variation de la contrainte isotrope. Le rapport entre ces deux variations est le coefficient de Skempton, soit :

$$B_s = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta P_i} \quad (3.6)$$

- Cas Drainé

Dans le cas drainé, on a respectivement :

$$tr(\sigma - \sigma_o) = 3K_b tr \varepsilon \quad (3.7)$$

et

$$\frac{m}{\rho_o^n} = \frac{b}{3K_b} tr(\sigma - \sigma_o) \quad (3.8)$$

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

$$K_b = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_v} \quad (3.9)$$

A partir des résultats de cette expérience, on peut calculer le coefficient de Biot b, soit :

$$b = 1 - \frac{K_b}{K_s} \quad (3.10)$$

où  $K_s$  est le module de compressibilité de la matrice solide du matériau. En admettant que dans un essai de compression hydrostatique draine avec  $\Delta\sigma_m = \Delta P$ , ce sont les grains de la matrice solide qui subissent la contrainte, on a :

$$K_s = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_v} \quad (3.11)$$

### 3.1.8.1. Chemin de Compression Hydrostatique

Pour ce type d'essai, on doit respecter la même procédure technique que par l'essai hydrostatique, c'est-à-dire, mesurer l'évolution des déformations longitudinales et transversales en fonction de la contrainte hydrostatique appliquée sur un échantillon saturé, La pression interstitielle et la contrainte hydrostatique sont appliquées à l'aide de la pompe Gilson<sup>®</sup>, l'essai a été conduit jusqu'à 60 MPa de pression de confinement, Nous montrons le chemin de chargement effectué dans l'espace des contraintes sur la figure 3.2.

Le chargement a été effectué par paliers et la saisie des données est faite quelques minutes après avoir atteint le niveau de chaque palier de telle sorte qu'on ait une vitesse moyenne de chargement de 0,25 MPa/min environ.

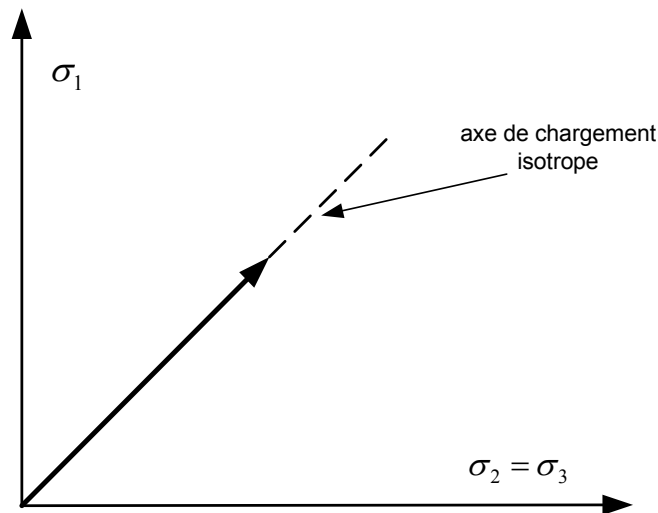


Figure 3.26 : Chemin de chargement hydrostatique dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )

Deux types d'essais ont été réalisés, un essai drainé et un autre non drainé,

➤ *Condition Drainée*

Le mot drainé désigne en général l'essai au cours duquel le fluide interstitiel peut sortir ou entrer librement dans l'espace poreux de l'échantillon, sous l'effet d'un chargement mécanique. Le drainage peut s'effectuer par l'intermédiaire des deux embases. Pour garder la pression interstitielle constante au cours de l'essai comme le montre la figure 3.27 (dans le plan ( $P_c - P_i$ )), on peut envisager deux types de chargement :

- Le chemin (i) dans lequel la pression interstitielle reste nulle au cours de l'essai (Figure 3.27).

- Le chemin (ii) est un essai à pression interstitielle imposée, pendant lequel cette pression est constante et égale à  $P_{i0}$ . Le début de l'essai correspond à un état dans lequel la pression interstitielle est égale à  $P_{i0}$  et celle de confinement est environ deux fois plus grande que  $P_{i0}$  (point 1 figure 3.27) ; on applique ensuite le premier palier de la contrainte hydrostatique  $P_c$  en condition non drainée (la vanne de drainage est fermée). Cette montée en

$P_c$  entraîne une augmentation de  $P_i$  (point 2), qui sera lentement diminuée par l'intermédiaire d'une vanne pour la ramener à la pression interstitielle initiale  $P_{i0}$  (point 3). On répète de la même façon les parcours des points 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à 53 MPa.

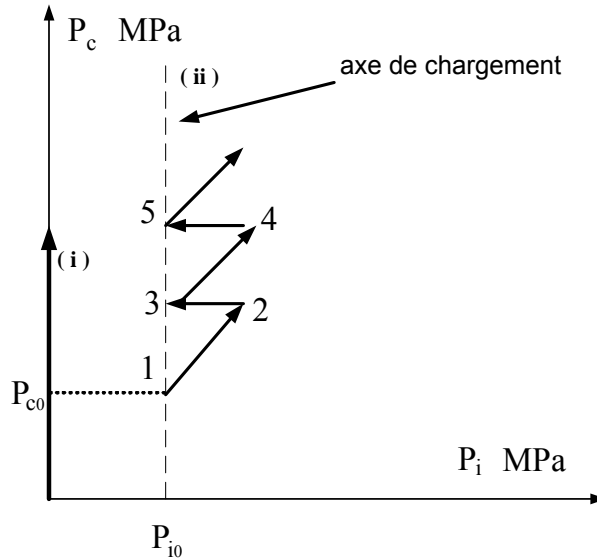


Figure 3.27 : Chemin de chargement hydrostatique en condition drainée sur le plan  $(P_c - P_i)$

Nous montrons sur la figure 3.28 les courbes de déformations longitudinale, transversale et volumique en fonction de la contrainte isotrope appliquée.

Dans cet essai, la pente de la partie linéaire des courbes  $\Delta P_c - \Delta \varepsilon_v$  donne le module de compressibilité drainé du matériau  $K_B$ .

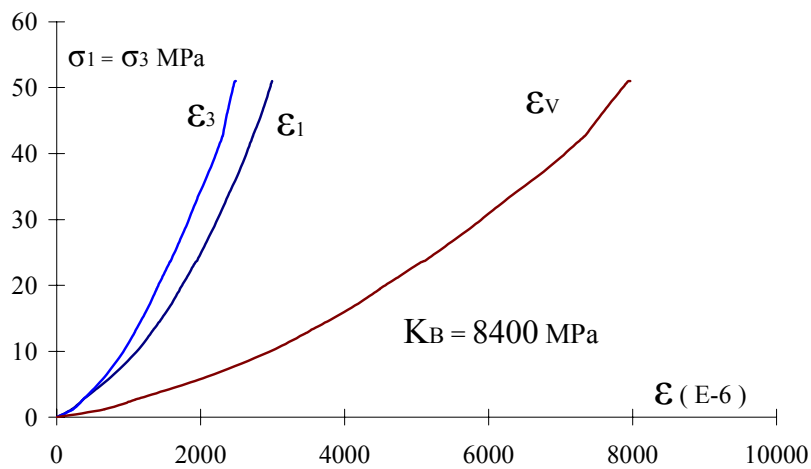


Figure 3.28 : Essai de chargement hydrostatique en condition drainée

On remarque que le module de compressibilité  $K_B$  pour un échantillon saturé est très proche d'un essai hydrostatique sur échantillon sec (7700 MPa et 8200 MPa). Nous avons ici également une proximité entre les déformations longitudinales et les déformations transversales.

➤ *Condition Non Drainée*

La désignation non drainée définit les essais au cours desquels il n'y a aucun échange de fluide avec l'extérieur. Après la saturation complète de l'échantillon, toutes les vannes de purge seront fermées. L'application de contrainte de confinement est effectuée par palliers et la pression interstitielle sera alors variable sous l'effet du chargement. Pour s'assurer de l'uniformité de cette pression tout au long de l'échantillon, nous avons installé deux capteurs de pression à chaque extrémité de l'éprouvette.

La figure 3.29 présente le chemin de chargement effectué dans le plan  $P_c - P_i$ . Le point de départ de l'essai correspond à un état de contrainte hydrostatique  $P_c=1$  MPa et  $P_i=0,5$  MPa.

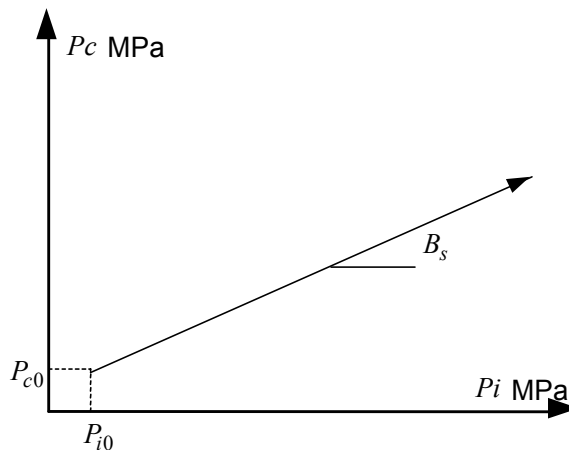


Figure 3.29 : Chemin de chargement hydrostatique en condition non drainée sur le plan  $(P_c - P_i)$

Les pentes des parties linéaires des courbes  $\Delta P_c - \Delta \varepsilon_v$  et  $\Delta P_c - \Delta P_i$  obtenues (figure 3.30) donnent respectivement le module de compressibilité non drainé  $K_u$  et le coefficient de SKEMPTON  $B_s$ .



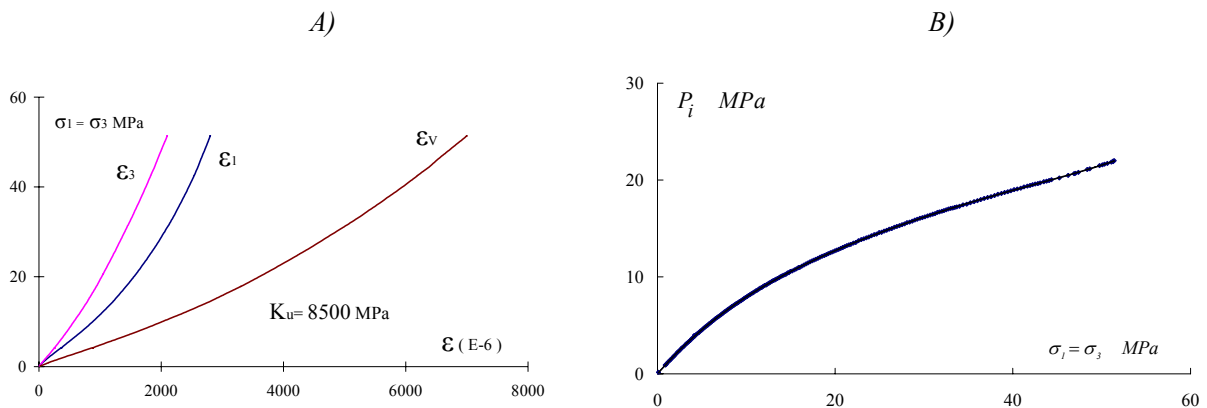


Figure 3.30 : Essai de chargement hydrostatique en condition non drainée

On constate que les courbes ont la même allure que celles obtenues lors d'un essai drainé. Quant à la réponse en pression interstitielle, la courbe  $P_c - P_i$  (Figure 3.30-B) donne la valeur du coefficient de SKEMPTON  $B_s = 0,3$ .

➤ Essai à  $\Delta P_c = \Delta P_i$

Le but de cet essai est de solliciter uniquement la phase solide du matériau. L'application de ce chemin permet de mesurer le module de compressibilité de la matrice solide  $K_s$  qui est la pente de la partie linéaire de la courbe de déformation volumique  $\epsilon_v$  en fonction de la contrainte moyenne  $P_c$ .

La valeur initiale de la pression de confinement est de  $P_c = 0,6$  MPa, celle de la pression interstitielle est de  $P_i = 0,5$  MPa. On commence par l'augmentation de  $\Delta P_i$  point (1-2) en chemin non drainé (Figure 3.31), la valeur de la pression interstitielle va monter avec l'augmentation de la pression de confinement, elle atteint le point (2), ensuite on monte en pression interstitielle jusqu'à ce qu'on atteigne  $\Delta P_c = \Delta P_i$  (3), et ainsi de suite.

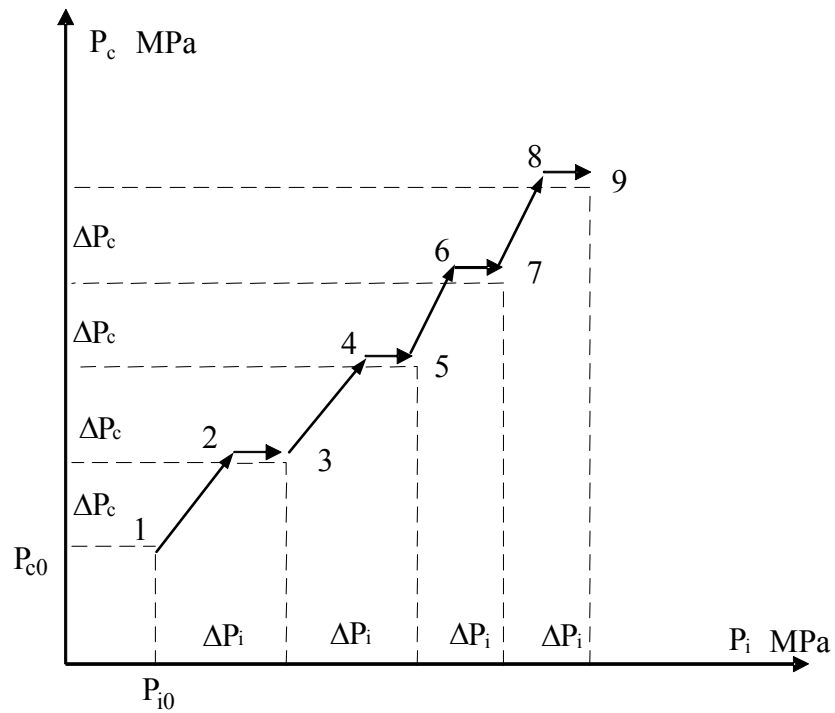


Figure 3.31 : chemin de sollicitation de l'essai  $\Delta P_c - \Delta P_i$  sur le plan  $(P_c - P_i)$

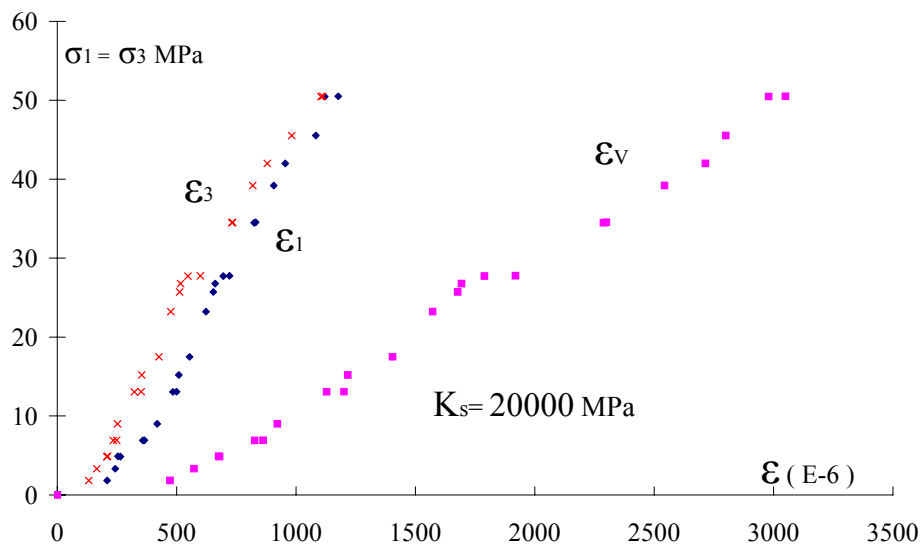


Figure 3.32 : Essai à  $\Delta P_c - \Delta P_i$

On observe que les déformations axiales et transversales sont presque identiques (Figure 3.32), ceci montre l'isotropie du comportement de la matrice du grès testé sous sollicitation hydrostatique.

Les valeurs des modules de compressibilité non drainés  $K_u$ , de compressibilité de la matrice solide  $K_s$  et du coefficient de SKEMPTON  $B_s$ , sont présentées dans le tableau 3.14,

Tableau 3.14 : Valeurs déduites des Essais hydrostatique

<i>Essai</i>	$K_b$	$K_u$	$K_s$	$B_s$
<i>drainé</i>	8400			
<i>non drainé</i>		8500	-	0,3
$\Delta P_c - \Delta P_i$		-	20000	-

À partir de la relation (3.6), on obtient le coefficient de Biot  $b=0.62$ .

### **3.1.8.2. Essai de compression triaxiale monotone avec montées en pression interstitielle**

L'essai a pour objectif d'étudier les réponses mécaniques à différents niveaux de contrainte déviatorique, en montant la pression interstitielle. En d'autres termes, voir l'effet de l'endommagement induit sur les réponses du couplage fluide – squelette.

L'essai est réalisé dans la cellule autonome et autocompensée (paragraphe 3.1.6), cet essai est réalisé de la même manière qu'un essai triaxial, après avoir placé l'échantillon dans la cellule, on monte en pression de confinement jusqu'à la pression désirée (Figure 3.33). On augmente ensuite la contrainte déviatorique (en régime drainé) en gardant la pression de confinement constante. Pour une valeur donnée de la contrainte déviatorique, on ferme le drainage et on augmente la pression interstitielle dans l'éprouvette jusqu'à la moitié de la pression de confinement. Les déformations sont enregistrées quelques minutes après la stabilisation de la pression interstitielle. Après la réalisation de cette montée en  $P_i$ , on chute la pression interstitielle à zéro pour revenir de nouveau à  $n_1$  (figure 3.33) ; on recommence le chargement déviatorique au niveau suivant  $n_2$ , et ainsi de suite.

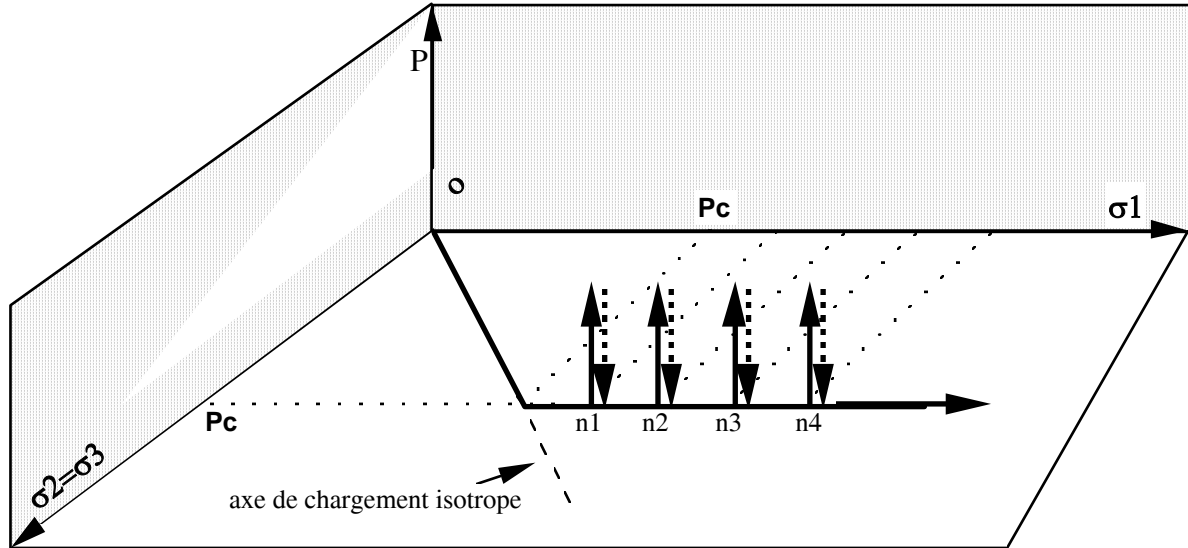


Figure 3.33 : Chemin de compression triaxiale en condition drainée avec des montées en  $P_i$  dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, P$ ) (KARAMI1998)

Quatre montées en  $P_i$  à différents niveaux de contrainte déviatorique ont été réalisées dans les différentes zones de la courbe contrainte déformation, les essais ont été conduits jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Nous avons effectué deux essais à deux pressions de confinement 5 et 20 MPa.

Pour chaque essai nous avons tracé :

- Les courbes classiques des déformations longitudinales, transversales et volumiques en fonction de la contrainte déviatorique. Les courbes obtenues sont présentées sur la figure 3.34 pour  $P_c = 20$  MPa et en annexe I pour  $P_c = 5$  MPa.

- Les courbes de la variation des déformations longitudinales  $\varepsilon_1$  et transversales  $\varepsilon_3$  en fonction de la pression interstitielle pour différents niveaux de la contrainte déviatorique sont présentées sur la figure 3.35, pour  $P_c = 20$  MPa, et en annexe I pour  $P_c = 5$  MPa.

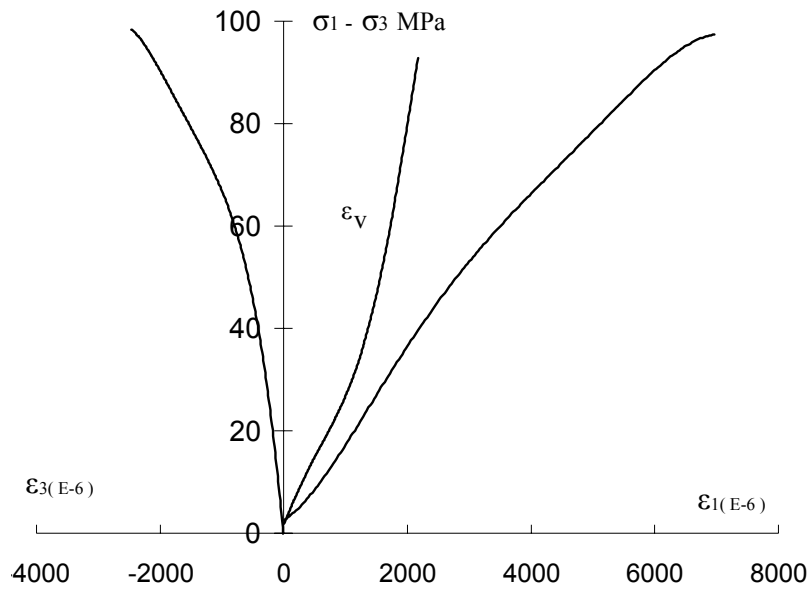
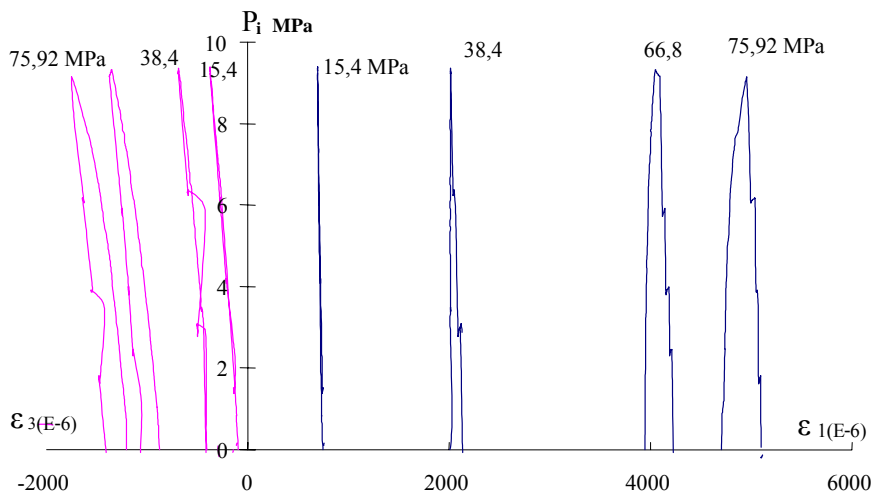


Figure 3.34 : Essai triaxial monotone avec montées en pression interstitielle pour une pression de confinement de 20 MPa

La comparaison entre la figure 3.34 et la figure 3.11 (pour un essai sur un échantillon sec), montre une très faible augmentation de la résistance au pic due à la saturation de l'échantillon.

A) cycle de charge-décharge



## B) cycle de charge

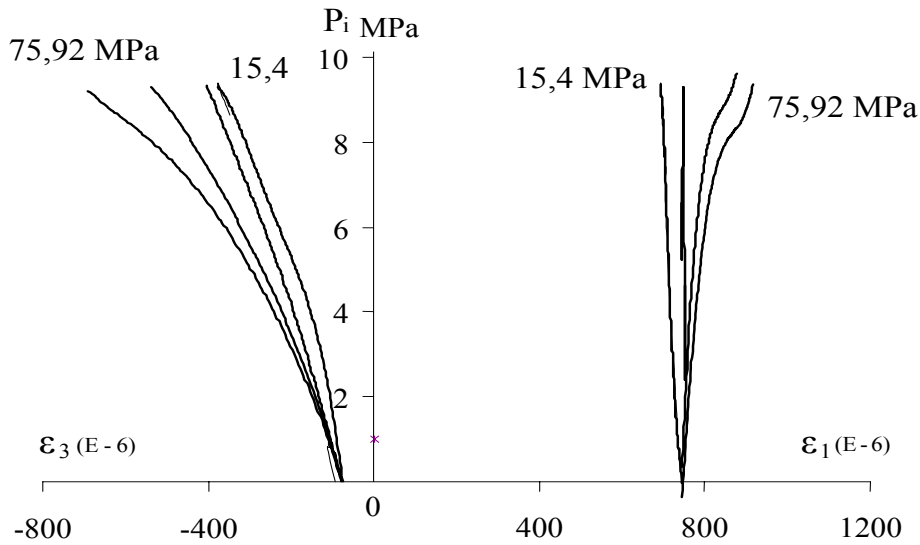


Figure 3.35 : Variation des déformations en fonction de la pression interstitielle ( $P_c=20$  MPa)

La figure 3.35-A représente des valeurs cumulées des déformations liées à la contrainte déviatorique et à la montée en pression. En revanche, la figure 3.35-B montre la réponse du matériau due uniquement à la montée en pression interstitielle pour chaque niveau de contrainte déviatorique.

On constate (pour les deux essais à  $P_c=20$  MPa et  $P_c=5$  MPa) pour tous les niveaux de la contrainte déviatorique que, la non linéarité de déformation transversale  $\epsilon_3$  en fonction de  $P_i$  est plus importantes que celle pour la déformation longitudinale  $\epsilon_1$  (Figure 3.35); cela peut être dû au développement orienté de la fissuration.

On observe également que les déformations latérales sont globalement non linéaires, la non linéarité s'accroît lorsque la valeur de la contrainte déviatorique augmente. Cela peut être dû à une ouverture forcée des microfissures à l'aide de la pression interstitielle. Quant à la variation de déformation longitudinale, on distingue deux cas de figure : lorsque le déviateur est faible la variation de la déformation est quasi linéaire, et à partir de 66,8 MPa de contrainte déviatorique les courbes deviennent non linéaires.

Nous présentons dans le tableau 3.15, les modules tangents des courbes de déformations – pression interstitielle (courbe de charge) pour différents niveaux de déviateurs.

Tableau 3.15 : Modules du couplage tangents à différents niveaux du déviateur ( $P_c=20$  MPa)

A)  $P_c=20$  MPa

Niveau	$\sigma_1 - \sigma_3$ MPa	$P_i - \varepsilon_1$	$P_i - \varepsilon_3$
1	15,4	-171000	27500
2	38,4	-315000	26300
3	66,8	332000	23900
4	75,9	145550	20000

B)  $P_c=5$  MPa

Niveau	$\sigma_1 - \sigma_3$ MPa	$P_i - \varepsilon_1$	$P_i - \varepsilon_3$
1	10,4	-251000	165000
2	19,9	-321000	121000
3	30,3	268000	78600
4	45,4	185000	72000

Les modules tangents montrent que les variations des déformations transversales sont nettement plus importantes que celles des déformations longitudinales. Les variations des déformations longitudinales sont très faibles et passent de contractante à la extension.

**CHAPITRE 4**  
**ESSAIS PRELIMINAIRES**  
**ET COMPARAISON**  
**ENTRE BLOCS**



## **Chapitre 4 : ESSAIS PRELIMENAIRES Et COMPARAISON ENTRE BLOCS**

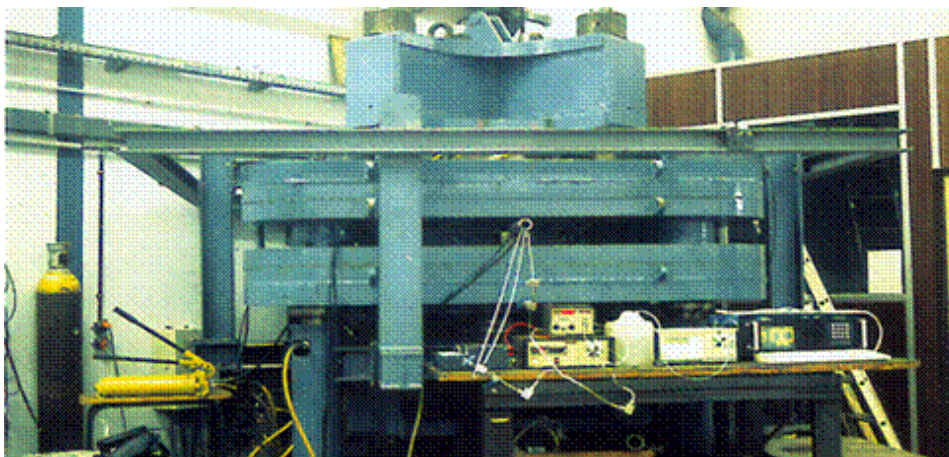
L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact des différents types de pré-endommagement sur une roche initialement isotrope. Nous présentons les trajets de chargement utilisés afin de créer différentes familles de fissurations. Les différents paramètres mécaniques des matériaux endommagés seront la cible de notre étude.

### **4.1. La presse triaxiale vraie et les essais préliminaires**

#### **4.1.1. Présentation de la presse triaxiale vraie**

La presse triaxiale vraie est une presse de grande dimension et de grande capacité. Elle permet de simuler des ouvrages souterrains en utilisant des blocs allant jusqu'à 50 cm de côté. Elle peut générer dans les trois directions de l'espace des efforts indépendants jusqu'à 1750 tonnes, les contraintes appliquées sur chaque face sont équivalentes à 70 MPa pour le bloc de 50 cm de côté (Photo 4.1). Des plaques de réduction permettent, avec le système de chargement, d'appliquer des contraintes allant jusqu'à 110 MPa pour un bloc de 40 cm de côté (Photo 4. 2) SIBAI et al (2004).

Pour éviter les effets de frottement et minimiser l'effet de la contrainte de cisaillement, nous avons collé sur les faces des blocs des carreaux en acier de 3 mm d'épaisseur. Le collage se fait par la Silicone, nous avons placé également et pour la même raison, des feuilles en Téflon entre les faces des blocs et les plaques de réduction.



*Photo 4.1 : Vue générale de la presse triaxiale vraie du L.M.L.*

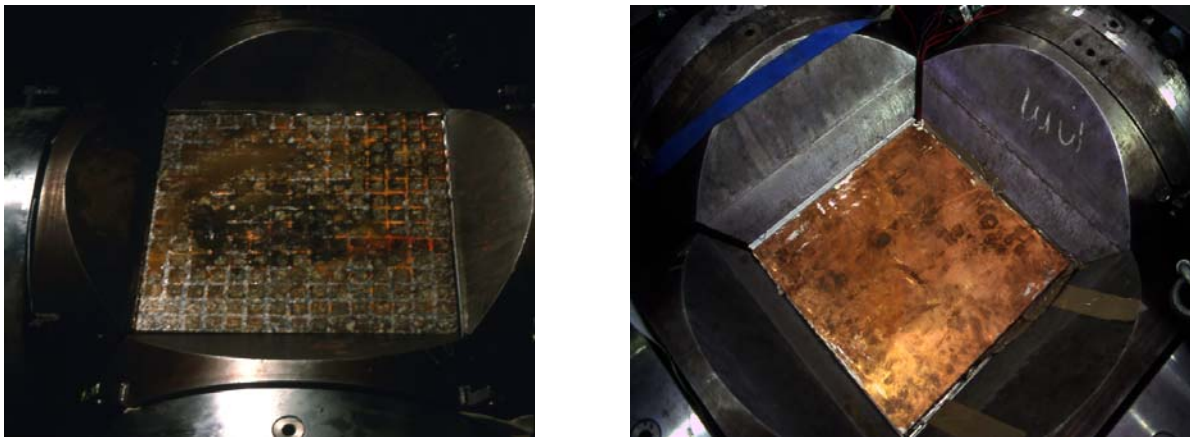


Photo 4.2 : Un bloc de grès dans la presse triaxiale vraie avec les plaques de réduction

Les essais ont été réalisés sur des blocs de 40x40x40 cm<sup>3</sup>. Les différents types d'essais effectués dans la presse peuvent être classés en deux groupes :

- *Des essais de vérification et d'observation : ces essais ont été effectués dans le but de vérifier l'influence des chemins des contraintes sur les familles de fissurations, et de connaître le niveau de contrainte nécessaire pour atteindre la rupture.*
- *Des essais d'endommagement sur des blocs, pour pouvoir étudier l'influence de l'endommagement sur les différents paramètres mécaniques.*

#### **4.1.2 Les essais préliminaires**

Dans le but d'observer visuellement les familles des fissures et de connaître la résistance à la rupture pour un chemin de sollicitation donné suivant les trois contraintes principales  $\sigma_v$ ,  $\sigma_h$  et  $\sigma_H$  (figure 4. 1), nous avons réalisé trois essais au triaxial vrai, un essai de compression simple avec  $\sigma_v = \sigma_h = 0$ , un essai triaxial à deux contraintes égales (la pression de confinement  $\sigma_v = \sigma_h = 20$  MPa), et un essai biaxial à deux contraintes égales  $\sigma_v = \sigma_H$ . Les valeurs des contraintes à la rupture sont données dans le tableau 4.1.

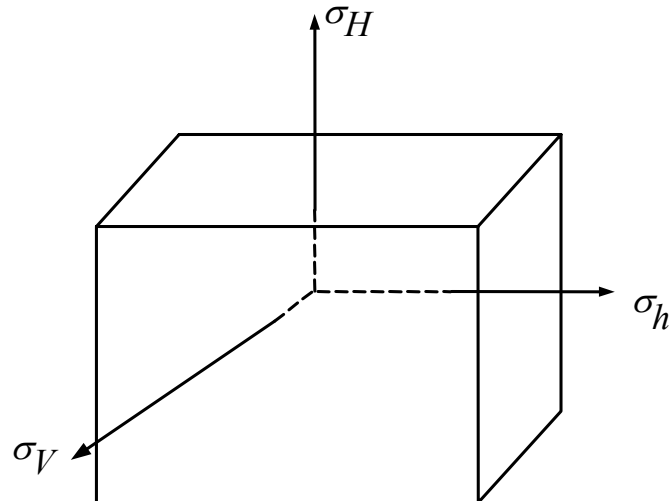


Figure 4.1 : schéma d'orientation des contraintes principales

Des essais conventionnels sur des échantillons cylindriques (de 37,5 mm de diamètre et de 75 mm de hauteur) (*chapitre 3*) ont également été réalisés, afin de comparer les valeurs des contraintes à la rupture avec celles obtenues lors des essais dans la presse triaxiale vraie. La valeur moyenne de la contrainte à la rupture pour un essai de compression simple est de l'ordre de 32,7 MPa (tableau 3.9). La valeur moyenne de la contrainte à la rupture pour un essai triaxial à 20 MPa de pression de confinement est de 87,5 MPa (Tableau 3.9).

La comparaison entre les valeurs données dans le tableau 4.1 et les valeurs données par les essais conventionnel permet d'observer une bonne concordance.

Tableau 4.1 : Valeurs des contraintes à la rupture dans la presse triaxiale vraie

	$\sigma_V$ MPa	$\sigma_h$ MPa	$\sigma_H$ MPa
<i>Bloc A</i>	0	0	32
<i>Bloc B</i>	20	20	87
<i>Bloc C</i>	24	0	24

Nous avons tracé dans le plan  $p - q$  ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$  et  $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$ ), Les valeurs de la contrainte à la rupture pour les essais conventionnels (Tableau 3.9) ainsi que les valeurs de la contrainte à la rupture pour les essais réalisés dans la presse triaxiale vraie (Tableau 4.1) (Figure 4.2). Cette figure montre que les deux types d'essais sont quasiment sur la même droite.

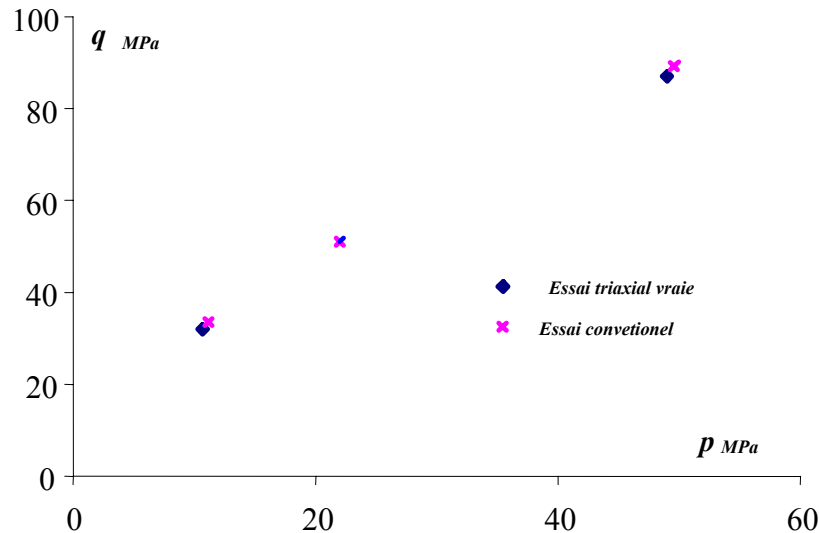


Figure 4.2 : Valeurs de contrainte à la rupture obtenues respectivement par des essais de compression conventionnelle et de compression triaxiale vraie

#### A) Premier Bloc (A)

Comme nous l'avons vu dans le tableau 4.1, ce bloc a subi un essai de compression simple. L'essai a été réalisé en force contrôlée, la vitesse de chargement est égale à 0.2 MPa/min, elle a été conduite jusqu'à la rupture. Nous avons eu une chute rapide des contraintes après la rupture (rupture fragile). Le chemin de déchargement des contraintes est similaire à celui du chargement. Une fois l'essai terminé, nous avons pris toutes les précautions nécessaires pour sortir l'échantillon de la machine

Nous avons pu observer dans ce bloc deux familles perpendiculaires de fissurations (familles dominantes) (Figure 4.3). Les deux familles de fissurations sont perpendiculaires aux contraintes mineures  $\sigma_v = \sigma_h = 0$ , ce qui correspond aux directions d'extension maximale. Ces résultats suggèrent que la rupture serait contrôlée par un critère d'extension maximale STACEY (1981).

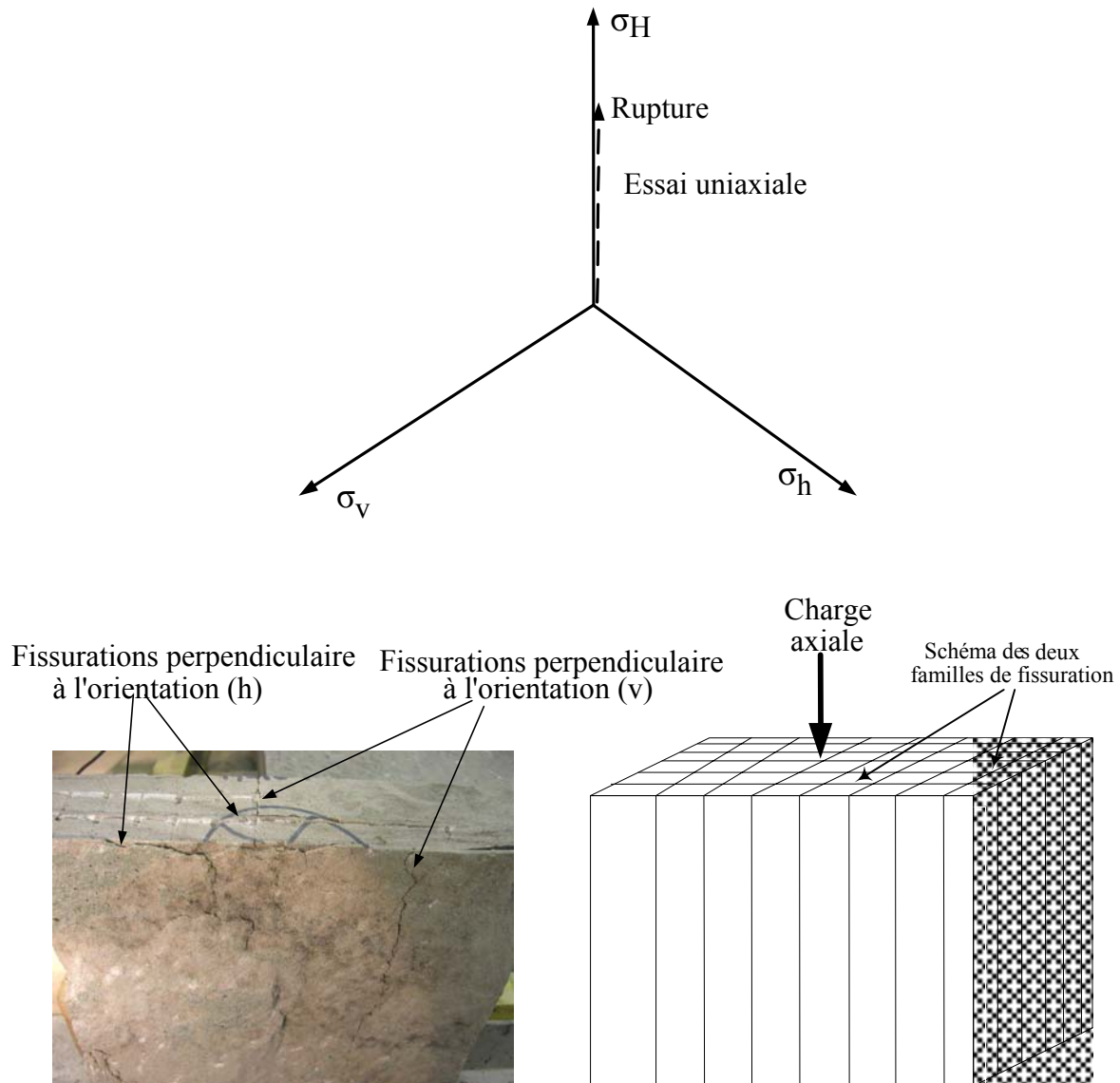


Figure 4.3 : schéma de chargement appliqué, vue des deux familles de fissuration

### B) Deuxième Bloc (B)

L'essai sur le deuxième bloc ressemble à un essai conventionnel à 20 MPa de pression de confinement. Il a été réalisé en deux étapes (avec une vitesse de charge égale à 0.2 MPa /min), d'abord nous avons monté jusqu'à 20 MPa de pression de confinement pour mettre le bloc sous sollicitation isotrope  $\sigma_v = \sigma_h = \sigma_H$ . Le champ hydrostatique a été maintenu pendant quelques minutes, ensuite nous avons commencé la charge axiale jusqu'à la rupture (87 MPa). Le bloc a été démonté de la même manière que le premier bloc, la photo de ce bloc après la rupture sont présentées en figure 4.4. Aussi nous avons remarqué l'existence de deux familles

de fissurations après la rupture. Les plans de fissurations sont toujours perpendiculaires aux contraintes mineures  $\sigma_v = \sigma_h = 20$  MPa.

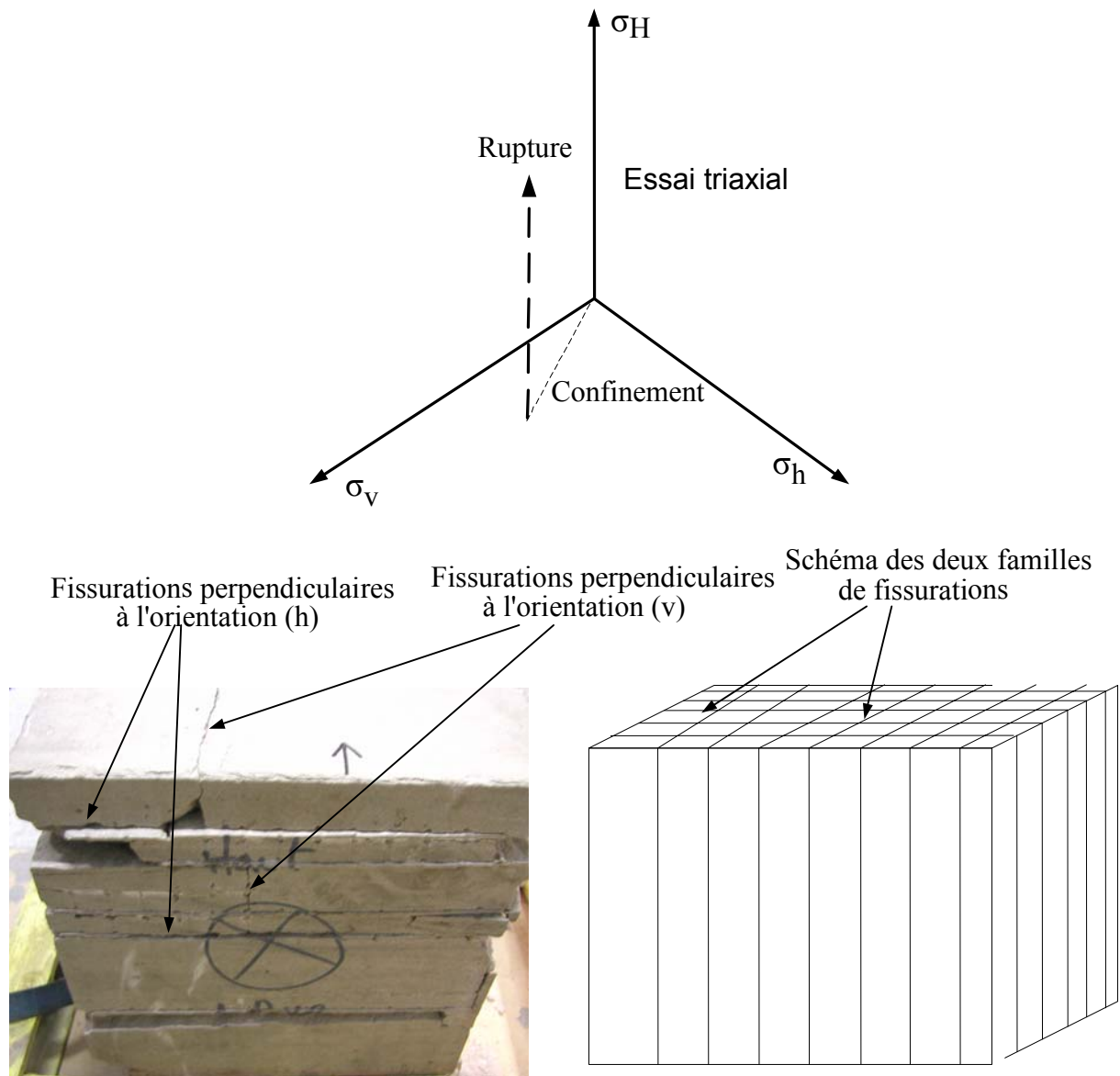


Figure 4.4 : schéma de chargement appliqué, vue des deux familles de fissurations

Pour les deux chemins de sollicitation précédents, On constate que nous avons le même nombre de familles de fissurations dominantes.

### C) Troisième Bloc (C)

C'est un essai de type biaxial ( $\sigma_v = \sigma_H$ ) et  $\sigma_h = 0$ . L'essai a été conduit jusqu'à la rupture, l'observation des photos de rupture montre une seule famille de fissurations (Figure 4.4), cette

famille est perpendiculaire à la contrainte mineure  $\sigma_h = 0$  (Figure 4.5), ce qui correspond à la direction de déformation perpendiculaire maximale.

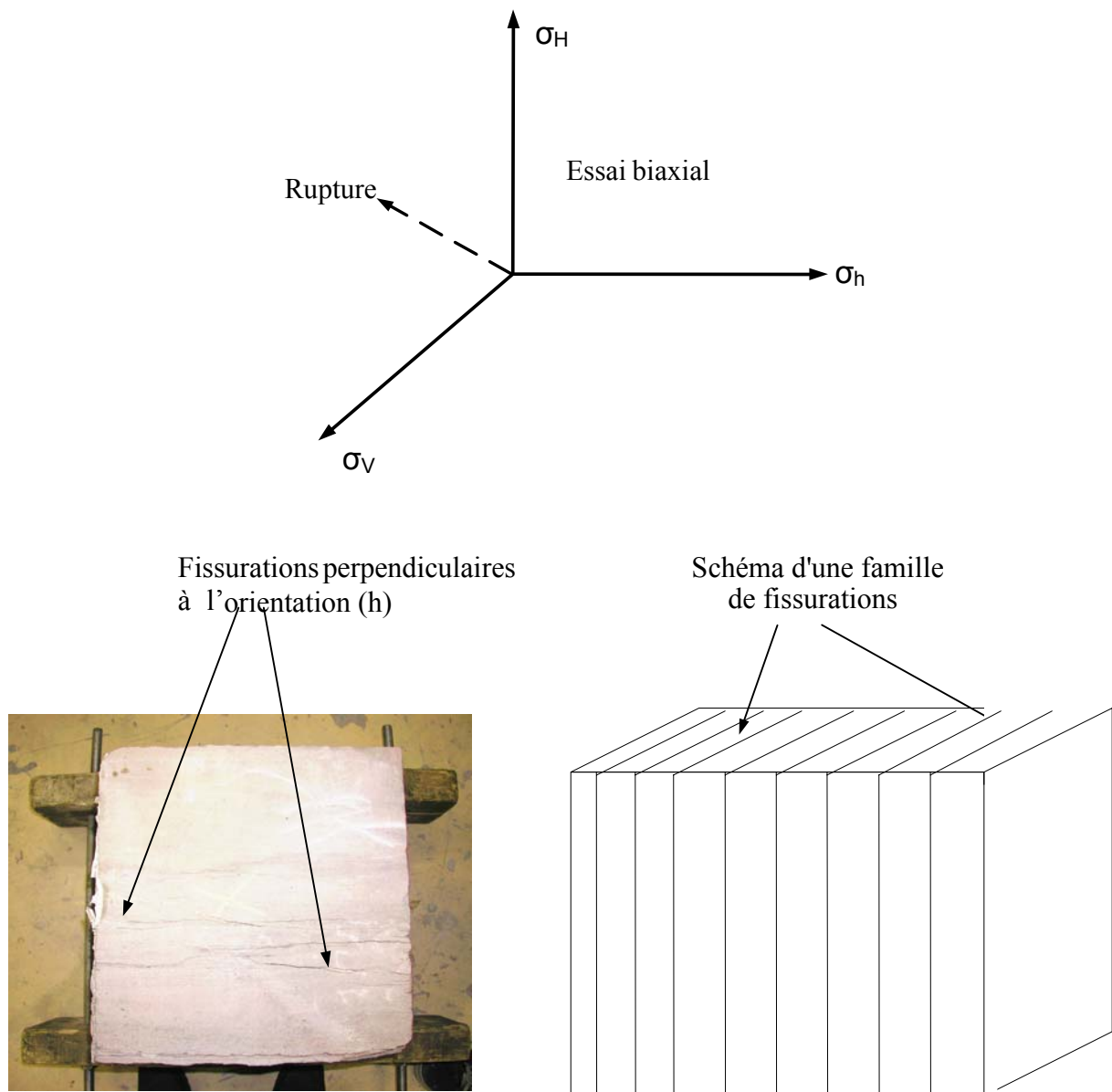


Figure 4.5 : schéma de chargement appliqué, vue d'une seule famille de fissurations

#### D) Remarques

Les plans des fissurations sont toujours perpendiculaires aux contraintes mineures LAJTAI (1998) BRACE et BOMBOLAKIS (1963). Lorsque nous avons une seule contrainte mineure, on constate l'existence d'une seule famille de fissuration (bloc C), nous avons en

revanche deux familles de fissurations dans le cas de deux contraintes mineures identiques (bloc A et bloc B) JALBOUT et al (2004).

## **4.2 Programme d'essais d'endommagement sur Blocs**

### **4.2.1 Définition de l'endommagement**

Les essais préliminaires dans la presse triaxiale vraie ont servi à déterminer les contraintes à la rupture pour un chemin de contrainte donné et à observer l'orientation des familles de fissurations.

Afin d'endommager des blocs selon la définition précédente, de nouveaux tests sur la presse triaxiale vraie ont été réalisés, le but sera de créer un état de microfissurations connu pour un niveau fixe des contraintes LAVROV et al (2003), CAI et al (2004). Les valeurs de contrainte choisies ont été de 0,7 et 0,9 de la contrainte à la rupture ( $0,7 \sigma_i$  et  $0,9 \sigma_i$ ).

Nous avons voulu pré - endommager les blocs afin d'avoir deux configurations de fissurations TANG et al (2002), CHIARELLI et al (2003), ZHAO (1998), LEMAITRE et CHABOUCHE (1978). La première consiste à la création d'une seule famille de fissuration (comme dans le test préliminaire C), avec un endommagement anisotrope à symétrie axiale. La deuxième à la création de deux familles perpendiculaires de fissurations (comme dans les tests préliminaires A et B), avec un endommagement anisotrope. Mais nous avons remarqué d'après les études préliminaires que les blocs (A) et (B) ont présenté le même nombre de familles de fissurations. De ce fait, nous avons choisi de réaliser un seul test de pré-endommagement pour ce type de configuration, et c'est le cas le plus simple que nous avons choisi (cas de compression simple du bloc A).

Dans le cas d'une seule famille (comme le bloc C), nous avons voulu voir également l'effet du niveau de contraintes de pré – endommagement sur les paramètres mécaniques. Dans cette configuration, deux tests ont été réalisés, le premier est à 0,7 de  $\sigma_i$ , le deuxième est à 0,9 de  $\sigma_i$ .

Une étude expérimentale détaillée sera réalisée sur ces roches (une naturelle et d'autres artificiellement endommagées) :

- *étude de l'endommagement sur une roche ayant subie initialement un endommagement anisotrope à symétrie de révolution, avec une seule famille de fissurations.*
- *étude de l'endommagement sur une roche ayant subie initialement un endommagement anisotrope avec deux familles de fissurations.*



- Enfin, une comparaison entre les essais expérimentaux sur le bloc vierge (initialement isotrope) et ceux des blocs préalablement endommagés sera présentée.

#### 4.2.2 Essais d'endommagement sur blocs

Nous allons considérer que la création d'un état d'endommagement correspondant à un niveau donné de contrainte (0,7 ou 0,9 de  $\sigma_i$ ) est semblable à celle qui est créée lors des essais préliminaires en terme des familles de fissures dominantes.

##### **Repérage et Découpage des blocs**

Afin de faciliter notre travail par la suite, nous fixons un repérage pour les blocs testés, nous avons nommé :

Bloc 1 : le bloc ayant subi un chemin de chargement uniaxial de  $0,7 \sigma_i$ .

Bloc 2 : le bloc ayant subi un chemin de chargement biaxial de  $0,9 \sigma_i$ .

Bloc 3 : le bloc ayant subi un chemin de chargement biaxial de  $0,7 \sigma_i$ .

Les blocs 1, 2 et 3 ont été découpés en plusieurs tranches dans différentes orientations(annexe VIII). L'angle de carottage  $\theta$  est l'angle entre la direction principale  $\sigma_H$  et la direction de carottage, ce ceci signifie que les échantillons à  $\theta=0^\circ$  sont les échantillons carottés suivant la direction de contrainte  $\sigma_H$  (Figure 4.6).

Le bloc 1 a été carotté dans les directions suivantes (0, 30°, 45° et 90°)

Le bloc 2 a été carotté dans les directions suivantes (0, 45° et 90°)

Le bloc 3 a été carotté dans les directions suivantes (0, 45° et 90°)

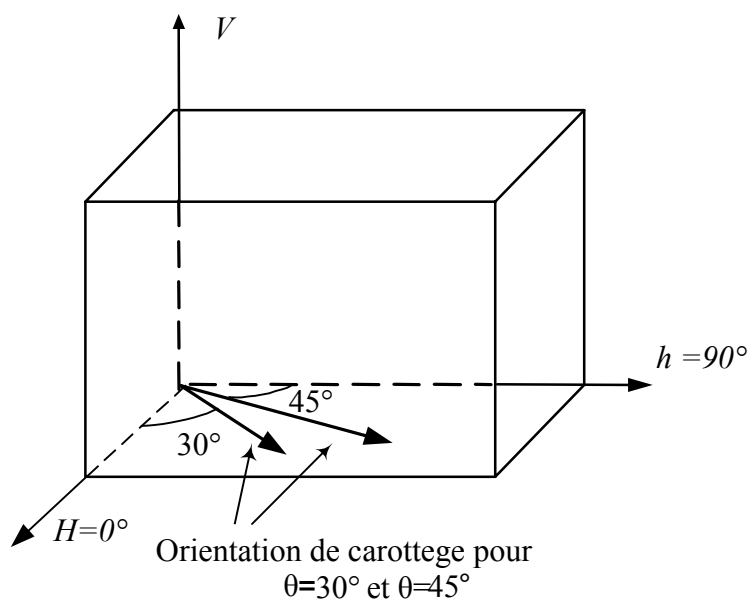


Figure 4.6 : schéma de carottage pour le bloc 1

Il faut noter que malgré la création de deux familles de fissurations pour le bloc 1, notre matériau reste toujours de type anisotrope à symétrie transversale. Deux essais de compression simple ont été réalisés sur des échantillons cylindriques carottés du bloc 1, et dans les deux directions (h et v) afin de montrer l'isotropie de comportement dans les directions h et v. La figure 4.7 nous permet de faire une comparaison entre des courbes longitudinales et transversales pour les deux échantillons. On constate que les courbes sont presque superposées et que le comportement est isotrope dans les directions h et v.

Cette comparaison nous permet la réalisation de tous les essais du bloc 1 suivant deux directions uniquement (H et h), en considérant que le comportement est isotrope dans les directions h et v. De la même manière, on peut considérer que les blocs 2 et 3 sont isotropes dans les directions H et v.

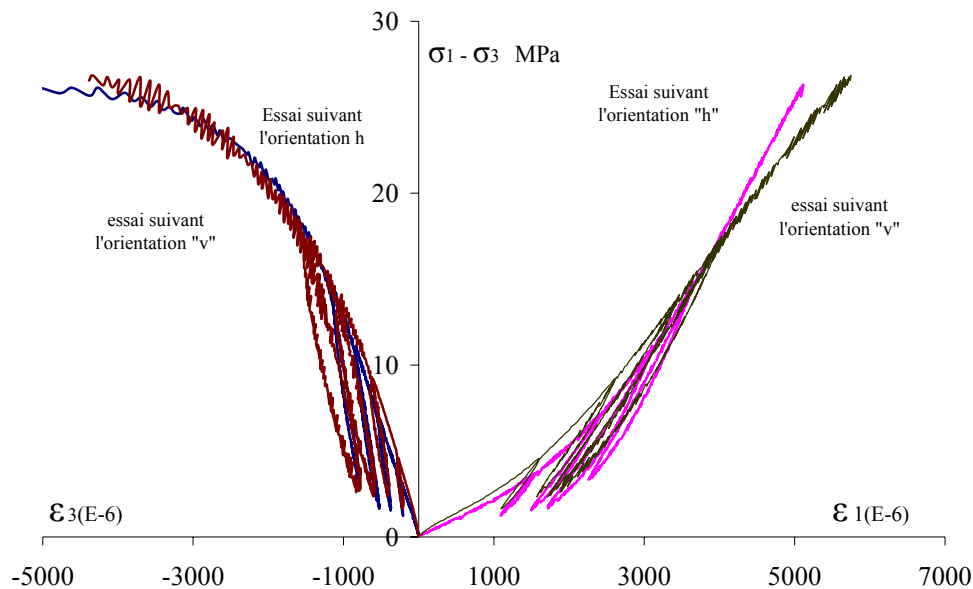


Figure 4.7 : comparaison entre deux échantillons carottés suivant les directions h et v

#### 4.2.2.1 Bloc 1

Le premier test est un essai de type de compression simple (comme le bloc A). L'essai est arrêté à 0,7 de la contrainte de la rupture (Tableau 4.1), les valeurs des contraintes (appliquées sur le bloc) sont :

$$\sigma_H = 0,7 * 32 = 23 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_v = \sigma_h = 0$$

Ceci nous permet de créer deux familles de fissurations perpendiculaires aux directions principales v et h. La photo 4.3 montre le bloc 1 après découpage et carottage.

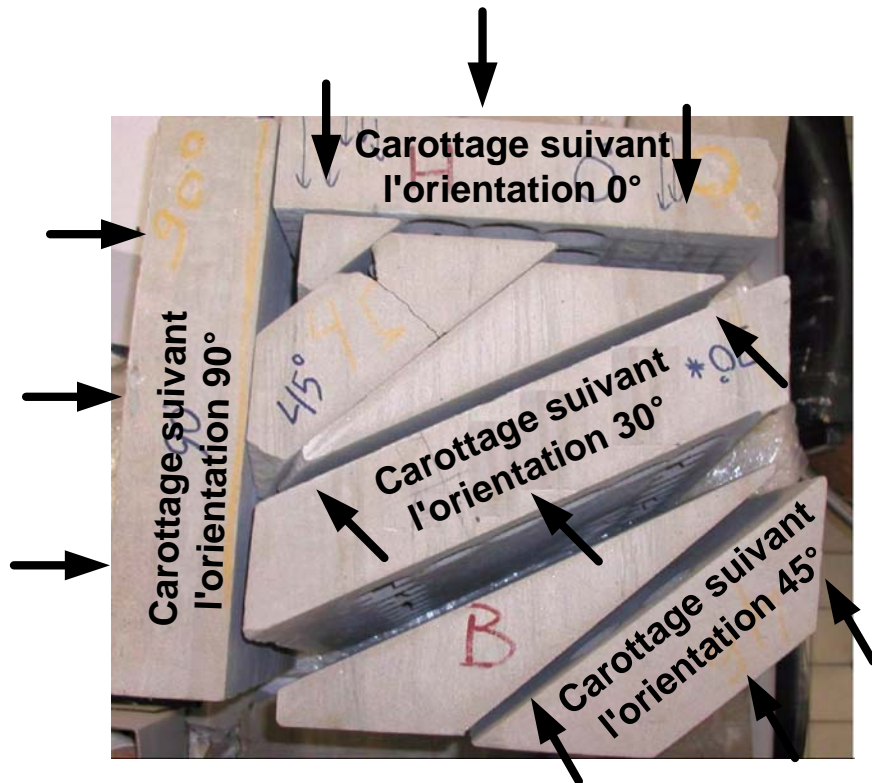


Photo 4.3 : le bloc 1 avec les orientations de carottage

#### 4.2.2.2 Bloc 2

Le deuxième test est un essai biaxial (comme le bloc C), ce type de chargement nous permet de créer une seule famille de fissurations perpendiculaire à la direction h, la valeur de contrainte est de l'ordre de :

$$\sigma_v = \sigma_H = 0,9 * 24 = 21,5 \text{ MPa}, \quad \sigma_h = 0$$

La photo 4.4 montre le bloc 2 après découpage et carottage.

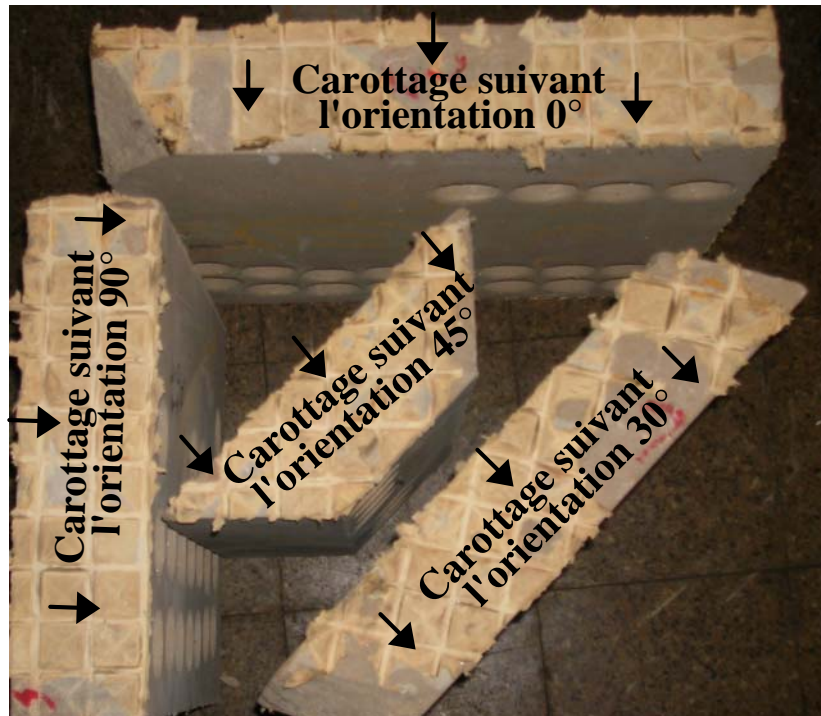


Photo 4.4 : le bloc 2 avec les orientations de carottage

#### 4.2.2.3 Bloc 3

Comme précédemment indiqué, le troisième test est un essai biaxial (comme le bloc C), ce type de chargement nous permettra de créer également une seule famille de fissurations perpendiculaire à la direction h ; la valeur de la contrainte à l'arrêt de l'essai est de l'ordre de :

$$\sigma_V = \sigma_H = 0,7 * 24 = 17 \text{ MPa}, \quad \sigma_h = 0$$

La photo 4.5 montre le bloc 3 après découpage et carottage.

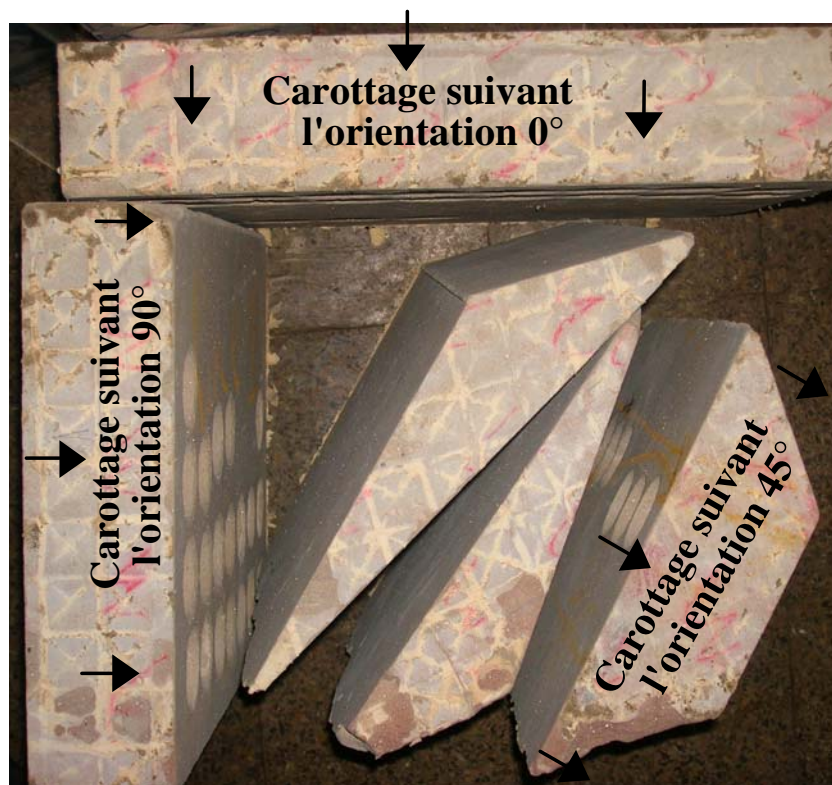
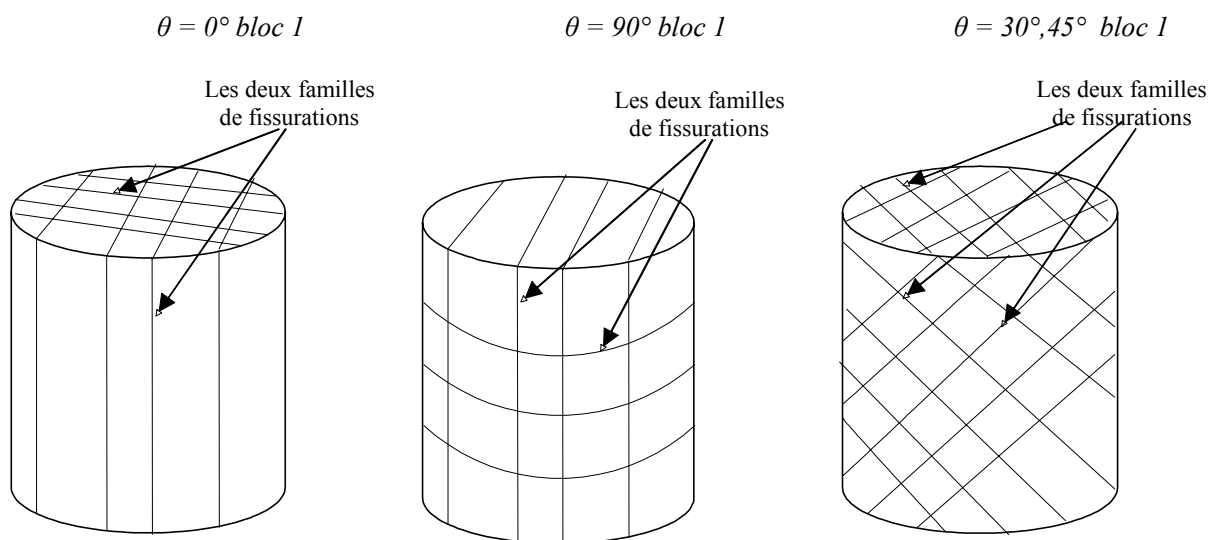


Photo 4.5 : le bloc 3 avec les orientations de carottage

La figure 4.8 montre les schémas représentatifs des différents types de familles de fissurations pour différentes orientations de carottage et différents blocs.



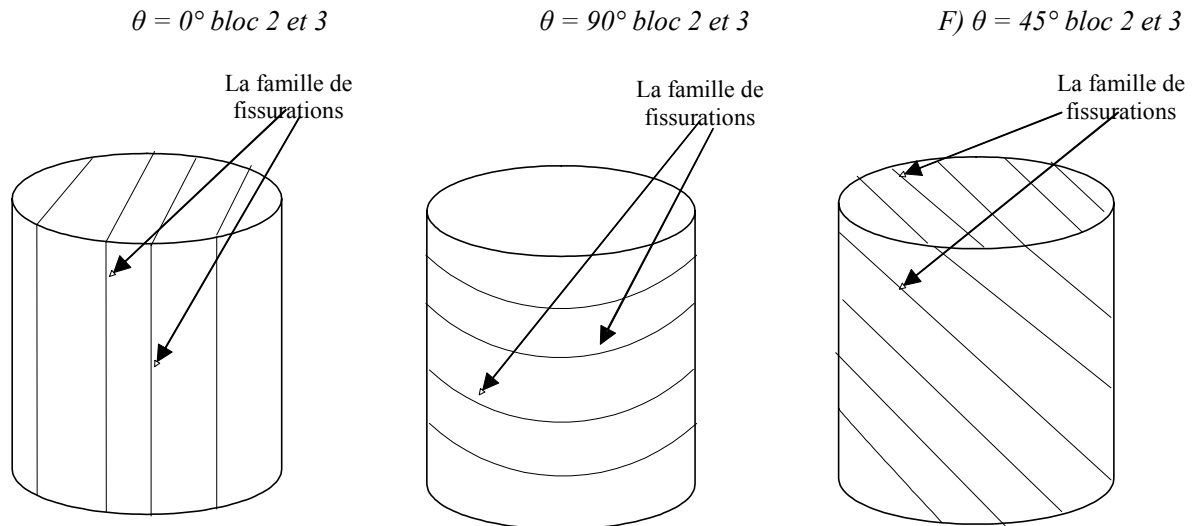


Figure 4.8 : schémas représentatifs des différentes types de familles de fissurations

Les résultats des essais sur des cylindres carottés, de ces trois blocs dégradés, seront comparés aux résultats du bloc à l'état sain pour les mêmes types d'essais présentés *au chapitre 3*. L'objectif est de voir l'influence de chaque type d'endommagement sur les propriétés mécaniques du grès.

#### ***Démarche expérimentale***

Le tableau 4.2 représente l'ensemble des essais réalisés sur les quatre blocs dans différentes orientations.

Dans ce type d'endommagement, il existe pour chaque orientation une interaction très forte entre les fissures de pré - endommagement et les fissures créées lors de l'endommagement induit. De ce fait, nous avons voulu présenter la comparaison des résultats en deux étapes

- *Comparaison des différentes orientations pour chaque bloc.*
- *Comparaison entre les blocs pré - endommagés et le bloc vierge.*

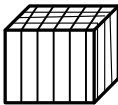
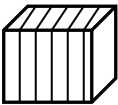
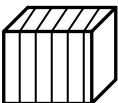
		essai mécanique						Essai couplage	extension latérale	Essai proportionnel $\sigma_1/\sigma_3=K$
		$\theta$	hydrostatique	compression simple	traction	Triaxial				
						5 MPa	10 MPa	20 MPa		
<i>bloc vierge</i>	$0^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		+
	$90^\circ$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>bloc 1</i> 	$0^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		
	$30^\circ$	+	+		+	+	+			
	$45^\circ$	+	+	+	+	+	+			
	$90^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		
<i>bloc 2</i> 	$0^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		
	$45^\circ$	+	+	+	+	+	+			
	$90^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		
<i>bloc 3</i> 	$0^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		
	$45^\circ$	+	+	+	+	+	+			
	$90^\circ$	+	+	+	+	+	+	+		

Tableau 4.2 : les différents types d'essais réalisés sur le bloc vierge et les différents blocs pré – endommagés

### 4.3 Dépouillement des essais sur les Blocs pré - endommagés

Pour la suite du travail, plusieurs paramètres mécaniques feront l'objet de notre comparaison ( $E_{l0}$ ,  $E_{t0}$ ,  $E_l$ ,  $E_t$  ...etc.). La définition de ces paramètres est la même que celle utilisée en paragraphes 3.1.1, 3.1.2 et 3.1.3.

#### 4.3.1 Le Bloc 1 (charge uniaxiale à 0,7 de $\sigma_c$ )

##### 4.3.1.1 Les Modules initiaux

La figure 4.9-A montre la courbe de la raideur transversale initiale en fonction de l'angle de carottage. Le module transversal initial  $E_{t0}$  augmente avec la pression de confinement, on peut noter que ce module est nettement plus faible pour un essai de compression simple que pour des essais triaxiaux.

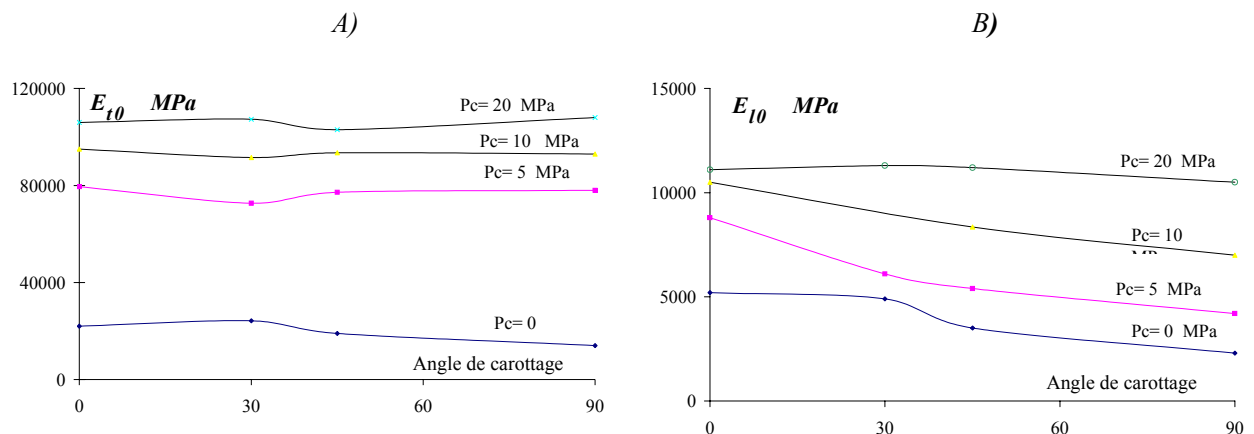


Figure 4.9 : Valeurs de  $E_{l0}$ ,  $E_{t0}$  pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

Pour un essai de compression simple, les microfissurations sont importantes au début de la charge, elles le sont moins pour les essais avec pression de confinement. On peut remarquer que les microfissures créées par pré - endommagement se ferment rapidement dès 5 MPa de pression de confinement, et que l'influence de la pression de confinement (à partir de cette pression) est relativement faible car les valeurs des modules transversaux sont relativement comparables (nous avons fait la même remarque lors d'un essai hydrostatique (paragraphe 4.3.1.4)).

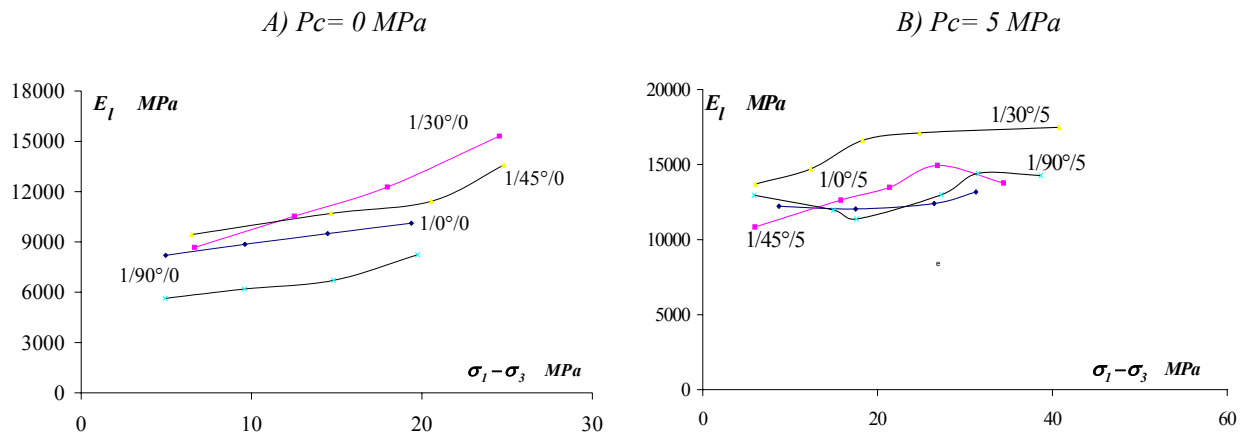
En revanche, on note que les modules longitudinaux initiaux  $E_{l0}$  (figure 4.9-B) augmentent continûment avec la pression de confinement, cette évolution progressive des



valeurs commence à partir de l'essai de compression simple jusqu'à 20 MPa. Les valeurs dépendent fortement de l'angle de carottage pour la même pression de confinement, cette dépendance diminue légèrement pour l'essai à 20 MPa. Ces résultats sont dûs à la distribution des microfissurations préalablement créées dans l'éprouvette. La microfissuration est plus importante pour  $\theta=90^\circ$  que pour  $\theta=0^\circ$  (Figure 4.8), en raison des modules plus faibles. Les orientations  $\theta=30^\circ, 45^\circ$  donnent des valeurs de  $E_{l0}$  comprises entre celles de  $\theta=0^\circ$  et  $90^\circ$ .

#### 4.3.1.2 Les modules sécants

Les figures 4.10 montrent la variation de  $E_l$  (pour différentes orientations de carottage  $\theta$ ) en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions de confinement. La différence entre les courbes de  $E_l$  en fonction du déviateur diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement, cette différence est quasi nulle pour 20 MPa de pression de confinement (Figure 4.10-D). La valeur du module sécant (et pour toutes orientations) est de l'ordre de 15000 MPa pour la pression de confinement à 20 MPa. D'une manière générale (sauf l'essai de compression simple), les différences entre les valeurs de  $E_l$  ne dépassent pas 20% pour la même pression de confinement. Ceci signifie que les modules sécants varient de façon similaire pour les différents angles de carottage.



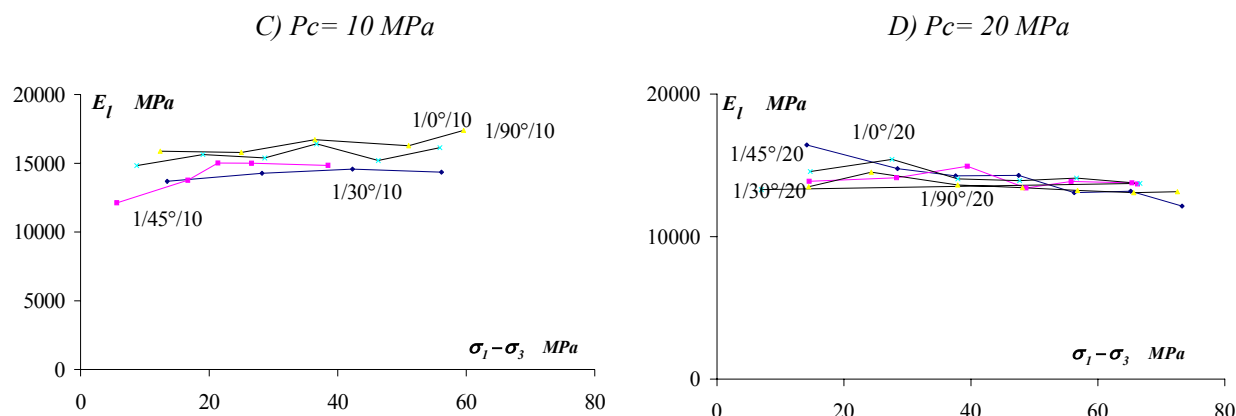


Figure 4.10 : Valeurs de  $E_t$  en fonction de la contrainte déviatorique pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

Pour une pression de confinement faible, les fissurations créées par le pré – endommagement commencent à se fermer avec l’application de la pression déviatorique (Figure 4.10-A-B), on note ici que la fermeture des fissurations de pré- endommagement est plus importante que l’ouverture des fissurations provoquée par l’application du déviateur de contrainte. Avec l’application d’une pression de confinement élevée, ce phénomène devient moins important car les fissurations pré – endommagées peuvent se fermer avec l’application de celle-ci.

Les figures 4.11 montrent la variation du module transversal  $E_t$  en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions de confinement. On remarque que les valeurs de  $E_t$  diminuent fortement suivant le niveau du déviateur de contrainte, cette diminution est due à la combinaison de l’endommagement induit et de l’ouverture de la microfissuration de pré - endommagement.

D’une manière générale (sauf l’essai de compression simple), pour chaque pression de confinement, et pour un niveau de déviateur donné, la différence de  $E_t$  entre les orientations est comprise entre 15% et 25%.

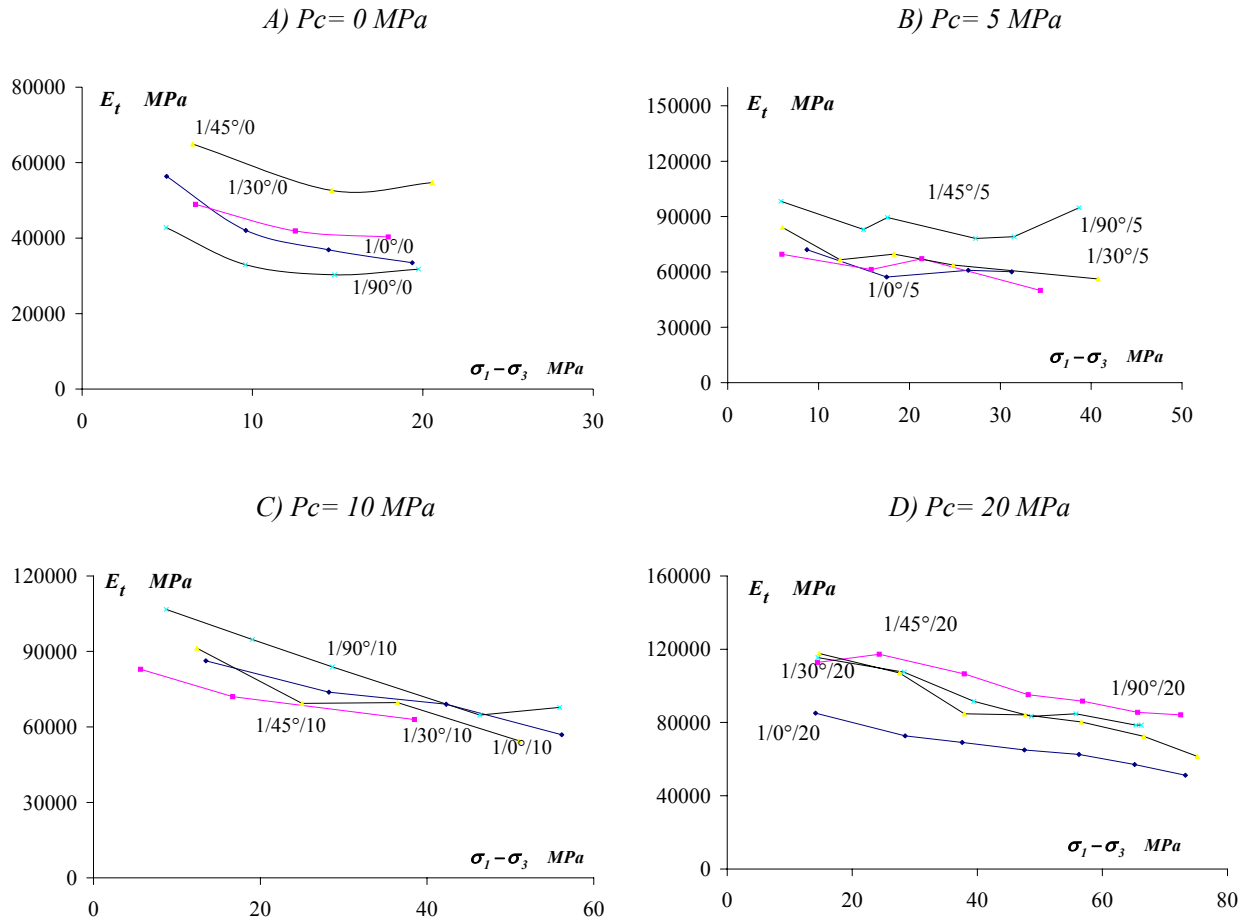


Figure 4.11 : Valeurs de  $E_t$  en fonction de la contrainte déviatorique pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

On peut noter que le développement du module transversal est logique dans le sens où les valeurs diminuent avec l'application de la contrainte déviatorique, les fissurations transversales provoquées par la contrainte déviatorique sont nettement plus importantes que les fissurations de pré - endommagement.

On peut également noter que l'influence de la contrainte déviatorique est plus remarquable sur le module transversal que sur le module longitudinal.

### 4.3.1.3 La Résistance à la rupture

La figure 4.11 montre l'évolution de la résistance à la rupture en fonction de l'angle de carottage, pour différentes pressions de confinement.

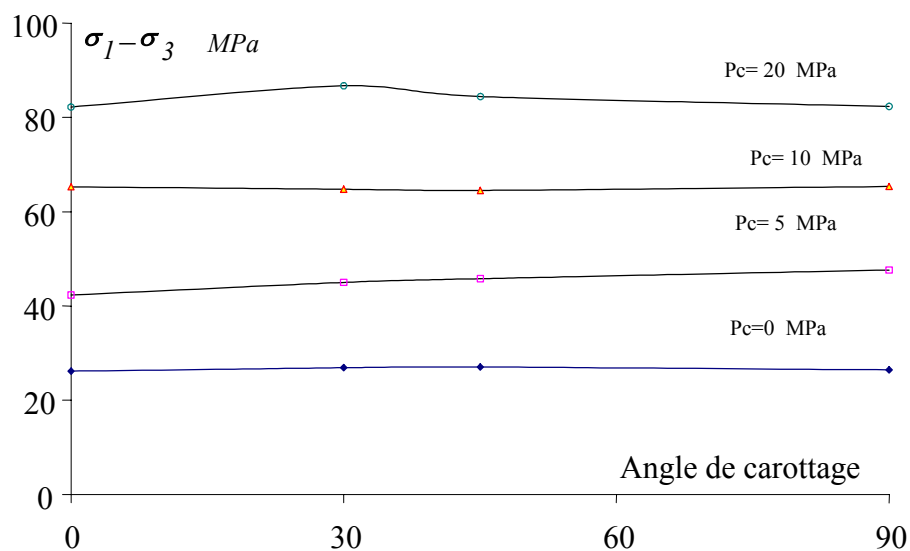


Figure 4.12 : Comparaison des valeurs de la résistance à la rupture en fonction de l'orientation de carottage

Les valeurs de la contrainte à la rupture pour une pression de confinement donnée sont quasi identiques pour tous les angles de carottage. La valeur au pic augmente nettement avec l'augmentation de la pression de confinement (Figure 4.12).

La première remarque est que la résistance à la rupture est indépendante de l'angle de carottage. Il n'y a pas d'influence de l'orientation de la microfissuration sur la valeur de la contrainte à la rupture.

Il faut noter ici que l'influence sur la résistance à la rupture est complètement différente selon qu'il s'agisse d'une anisotropie de structure ou d'anisotropie induite due à un pré-endommagement. Généralement, pour un matériau avec une anisotropie de structure, la résistance à la rupture varie en fonction de l'angle de stratification, ces valeurs sont généralement plus importantes pour l'orientations 0° et 90° AMADEI (1983), ALLIROT et BOEHLER (1979). En revanche, avec une anisotropie de pré-endommagement, ce qui est notre cas, les valeurs sont proches.

#### 4.3.1.4 Les Comparaisons des essais hydrostatiques

Les figures des essais hydrostatiques qui se trouvent en annexe II, montrent les réponses hydrostatiques pour les essais à différentes orientations de carottage  $\theta=0^\circ, 45^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ . Dans ce qui suit, on fait les comparaisons entre les différents types d'orientations (Figure 4.13).

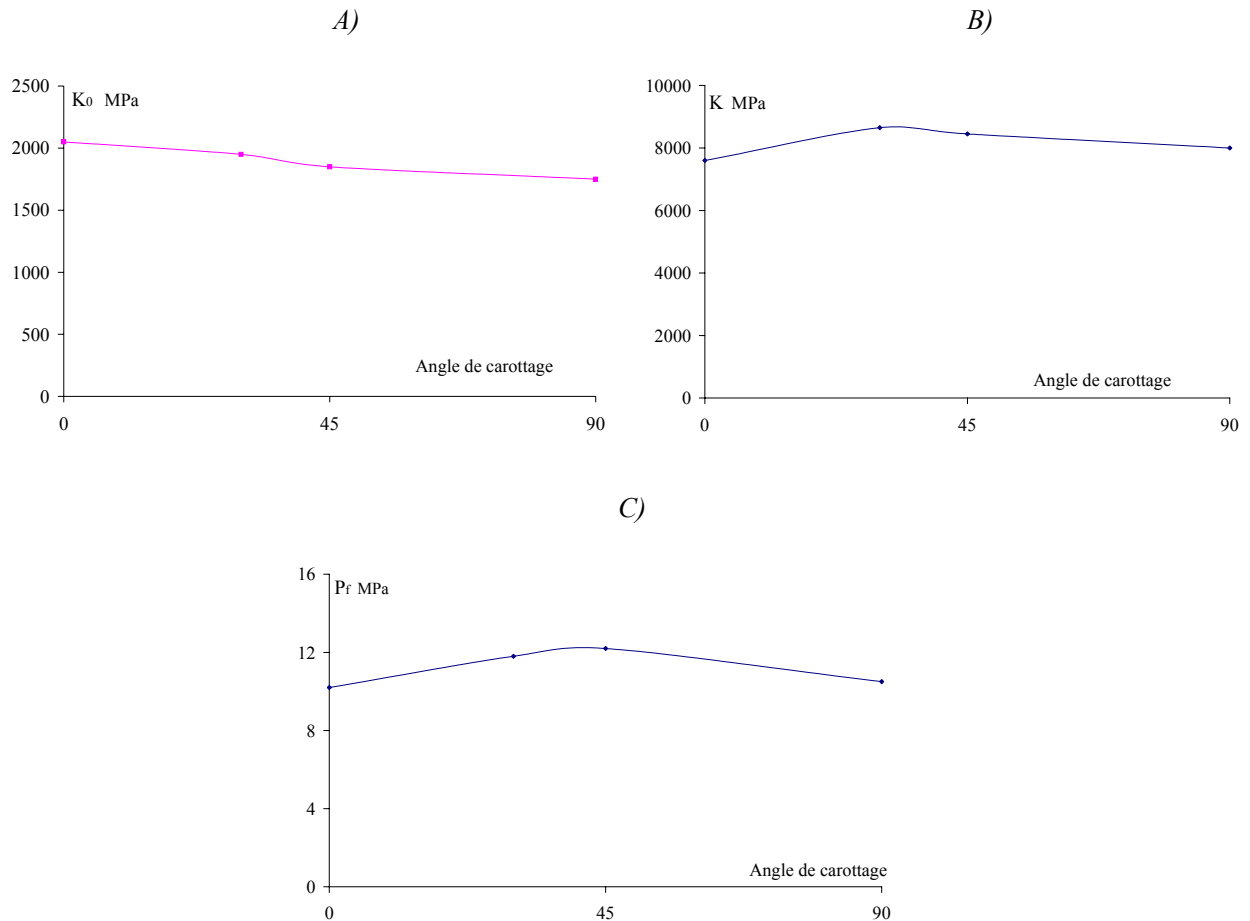


Figure 4.13 : Comparaison des paramètres des essais hydrostatiques en fonction de l'angle de carottage A) module de compressibilité initial B) module de compressibilité C) pression de fermeture de microfissures

La figure 4.13-A montre la variation du module de compressibilité initial  $K_0$  en fonction de l'angle de carottage  $\theta$  ; on peut considérer que les valeurs de  $K_0$  sont quasi constantes. On peut voir que l'angle de carottage n'a pas d'effet important sur les valeurs de  $K_0$ .

La figure 4.13-B montre les valeurs du module de compressibilité  $K$  en fonction de l'angle de carottage  $\theta$ , les valeurs de  $K$  sont quasi constantes (de 7600 MPa à 8400) MPa. Ces valeurs sont plus élevées pour  $\theta=30^\circ, 45^\circ$ . On peut considérer qu'après la fermeture des

microfissures de pré - endommagement dans l'éprouvette, les valeurs de K sont indépendantes de l'angle de carottage.

La figure 4.13-C montre la variation de la pression de fermeture en fonction de l'angle de carottage. Dans ce cas de configuration, la pression de fermeture est nécessaire pour fermer à la fois, les microfissurations induites par le pré-endommagement, et les microfissurations initiales ouvertes par l'application de la charge de pré-endommagement. On remarque que la variation de cette pression est faible (10,5 à 12 MPa). L'orientation des familles de fissurations n'a en effet pas une forte influence sur la variation de la valeur de la pression de fermeture.

#### 4.3.1.5 La perte de linéarité

A travers les courbes de compression en annexe II, on observe que la pression de confinement joue un rôle clef parmi les paramètres qui influencent la perte de linéarité et l'apparition de la zone dilatante. La fermeture de microfissures initiales pour différentes orientations est la raison essentielle de la non linéarité initiale de la courbe de déformation longitudinale; l'application de la pression de confinement diminue l'importance de cette zone. En revanche, le développement des microfissurations induites orientées est la cause de la perte de linéarité de la courbe transversale.

En appliquant la même définition citée au paragraphe 3.1.4, on obtient les valeurs du seuil de dilatance relatives aux angles de carottage en fonction de la pression de confinement (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : valeurs des contraintes aux seuils de dilatance (MPa)

	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=90^\circ$
$P_c=0 \text{ MPa}$	2,5	2,3	2	2,5
$P_c=5 \text{ MPa}$	7	6,4	7,5	7,5
$P_c=10 \text{ MPa}$	9,2	8,6	9,2	9,7
$P_c=20 \text{ MPa}$	14,4	15,2	16,7	15,2

Les valeurs du seuil de dilatance sont quasi identiques pour tous les angles de carottage pour une pression de confinement donnée. Ces valeurs augmentent nettement avec l'augmentation de la pression de confinement.

#### 4.3.1.6 Les Essais de traction

Toutes les courbes des essais de traction sont données en annexe II. Ces courbes montrent la déformation longitudinale en fonction de la contrainte appliquée pour les angles de carottage  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ .

Il faut noter que les valeurs à la rupture sont très faibles par rapport à un essai en compression simple.

La figure 4.14 montre l'évolution des valeurs des modules sécants en fonction de la contrainte axiale, ces modules diminuent au fur et à mesure que la contrainte axiale augmente.

On voit bien que la variation de ce module est fortement influencée par l'angle de carottage (qui correspond aux différents types de microfissurations existantes). Cette variation des modules pour différentes orientations est nettement plus sensible dans le cas de traction que dans le cas de compression, ceci est lié au fait que les modules varient plus rapidement en ouverture de microfissures qu'en fermeture.

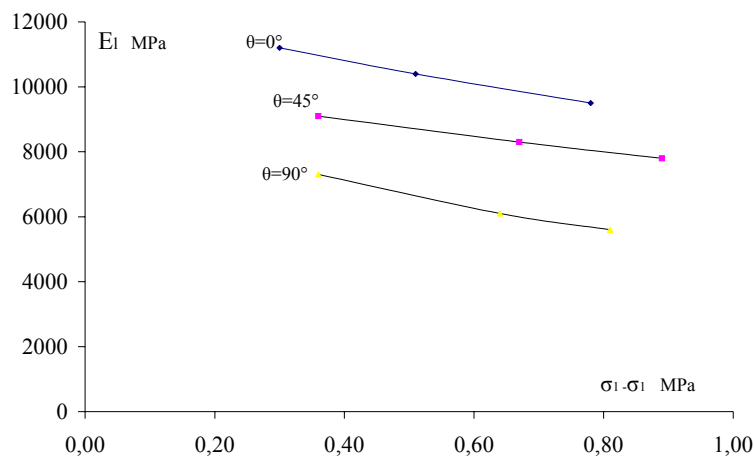


Figure 4.14 : Comparaison des modules de sécants en traction en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes orientations de carottage

### 4.3.2 Le Bloc 2 (charge biaxial à 0,9 de $\sigma_c$ )

#### 4.3.2.1 Les Modules initiaux

La figure 4.15-A montre la courbe du module transversal initial en fonction de l'angle de carottage. Le module transversal initial  $E_{t0}$  augmente avec la pression de confinement, on peut noter que ce module est nettement plus faible pour un essai de compression simple que pour des essais triaxiaux.

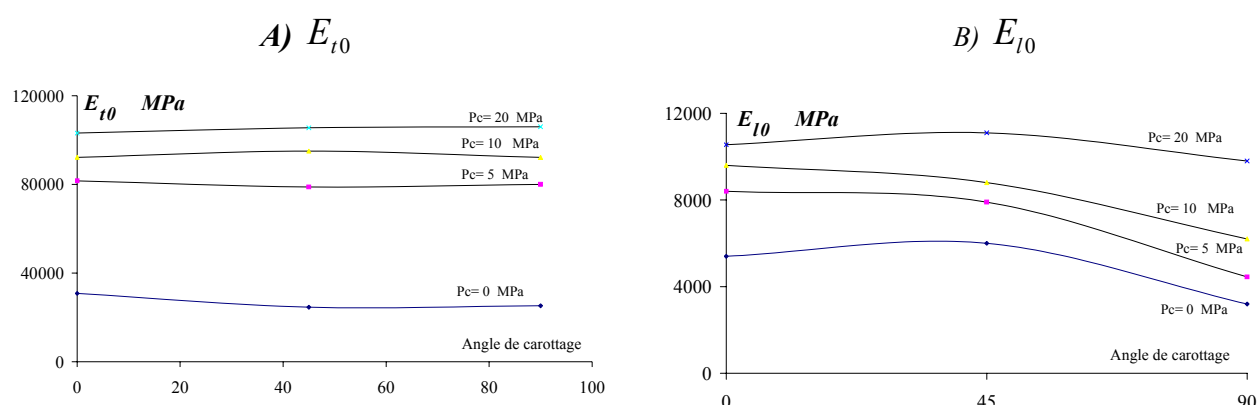


Figure 4.15 : Valeurs de  $E_{t0}, E_{l0}$  pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

Pour un essai de compression simple, les microfissurations au début de la charge sont élevées. Par contre, avec l'application de la pression de confinement, les fissures commencent à se fermer. On remarque que les microfissures créées par pré - endommagement se ferment rapidement dès 5 MPa de pression de confinement, et que l'influence de la pression de confinement (à partir de cette pression) est relativement faible, ceci est lié au fait que les valeurs des modules transversaux sont relativement comparables.

En revanche, on remarque que les modules longitudinaux initiaux  $E_{l0}$  (Figure 4.15-B) augmentent avec la pression de confinement (sans avoir un saut important à 5 MPa de pression de confinement). Cette évolution progressive des valeurs commence à partir de l'essai de compression simple jusqu'à l'essai avec  $P_c=20$  MPa. Les valeurs dépendent fortement de l'angle de carottage pour la même pression de confinement, cette dépendance diminue pour l'essai à 20 MPa de confinement.



### 4.3.2.2 Les modules sécants

Les figures 4.16 montrent la variation de  $E_I$  en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions de confinement. Il faut noter ici que la tendance générale des courbes pour le bloc 2 est quasiment la même que celle du bloc 1. On constate donc que la différence entre les courbes de  $E_I$  diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement, cette différence est quasi nulle pour 20 MPa de pression de confinement (Figure 4.16-D). La valeur du module sécant (et ceci pour toutes les orientations) est de l'ordre de 18000 MPa pour des pressions de confinement de 20 MPa. D'une manière générale, les différences de valeurs de  $E_I$  ne dépassent pas 20% pour la même pression de confinement (à l'exception des essais 2/90°/0 et 2/0°/5). Ceci signifie, que la variation des modules sécants a la même tendance que celle de l'angle de carottage.

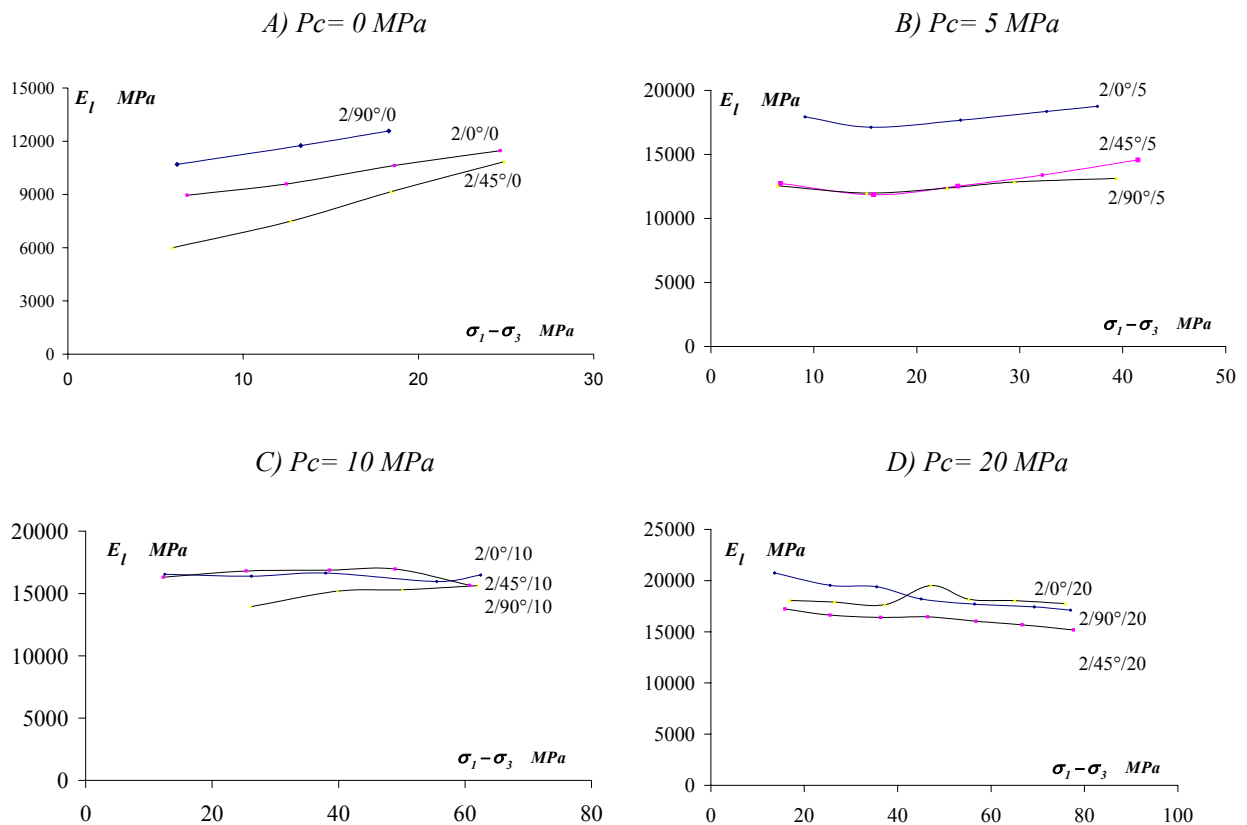


Figure 4.16 : Valeurs de  $E_I$  en fonction de la contrainte de déviatorique pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

Les figures 4.17 montrent la variation du module transversal  $E_t$  en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes pressions de confinement. On remarque (sauf pour l'essai de compression simple) que les valeurs de  $E_t$  diminuent fortement suivant le niveau du déviateur de contrainte, cette diminution est due à la combinaison de l'endommagement induit et de l'ouverture de la microfissuration de près -endommagement.

D'une manière générale, pour chaque pression de confinement, et pour un niveau de déviateur donné, la différence entre les valeurs de  $E_t$  ne dépassent pas une variation de 15% à 25%.

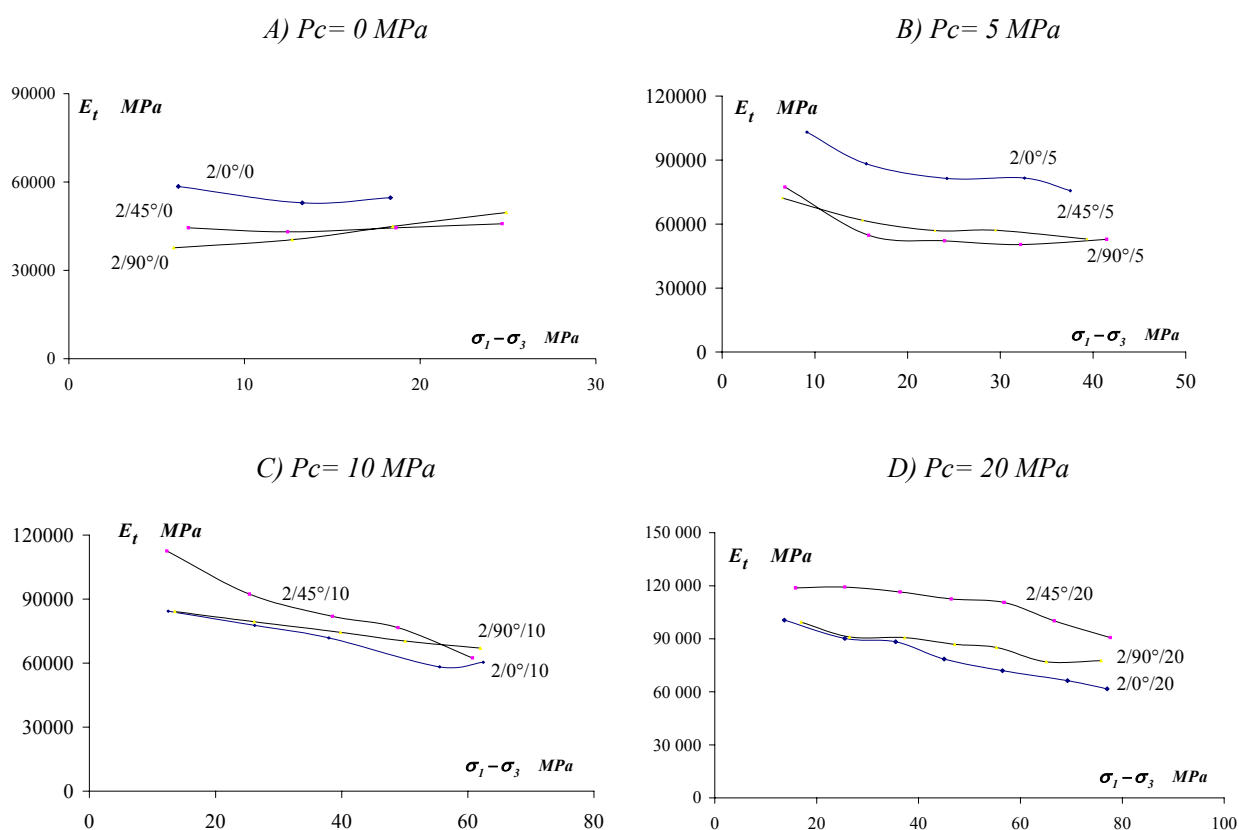


Figure 4.17 : Valeurs de  $E_t$  en fonction de la contrainte déviatorique pour différentes orientations avec différentes valeurs de la pression de confinement

On note que les remarques concernant le bloc 1 (Paragraphe 4.3.1.2) et qui portent sur les modules sécants sont également applicables au bloc 2.

### 4.3.2.3 La Résistance à la rupture

La figure 4.18 montre l'évolution de la résistance à la rupture en fonction de l'angle de carottage

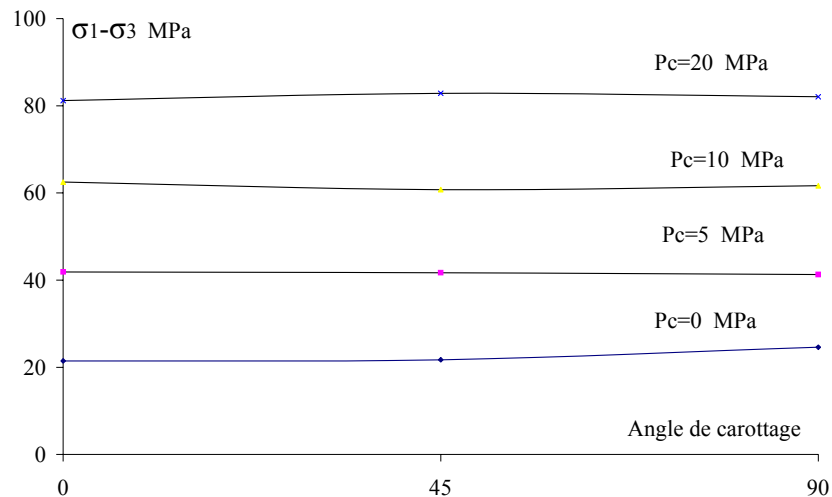


Figure 4.18 : Comparaison des valeurs de la résistance à la rupture en fonction de l'orientation de carottage

Les valeurs de la contrainte à la rupture sont quasi identiques pour tous les angles de carottage. La valeur au pic augmente nettement avec la pression de confinement (figure 4.18). On remarque également que la résistance à la rupture est indépendante de l'angle de carottage (comme nous l'avons vu pour le bloc 1).

### 4.3.2.4 Comparaison des essais hydrostatiques

Les figures des déformations longitudinale, transversale et volumique en fonction de la contrainte sphérique pour les essais hydrostatiques sont données en annexe III.

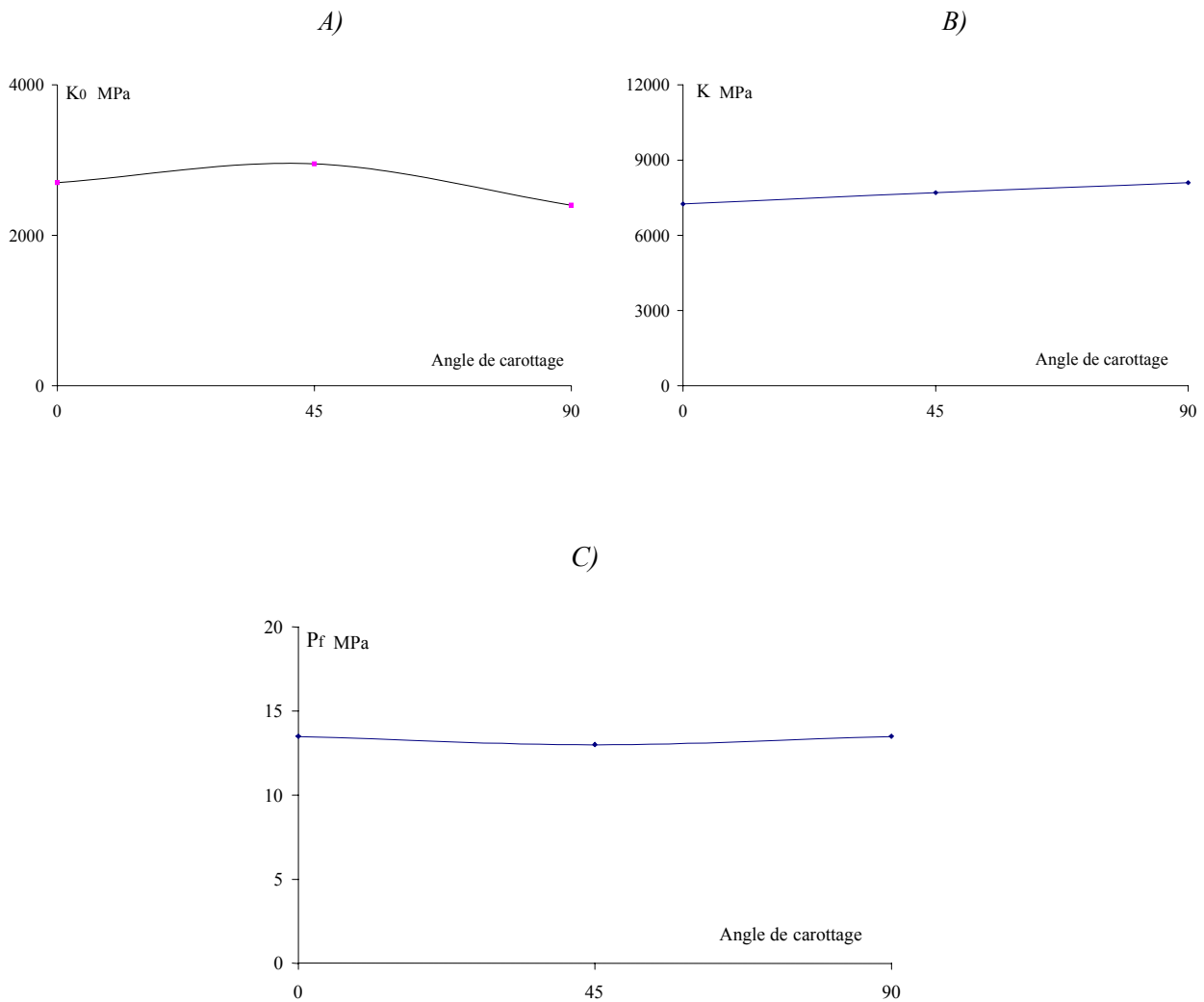


Figure 4.19 : Comparaison des paramètres hydrostatiques en fonction de l'angle de carottage A) module de compressibilité initial B) module de compressibilité C) Pression de fermeture de microfissures

Les figures 4.19 montrent les comparaisons entre les paramètres ( $K, K_0, P_f$ ) d'un essai hydrostatique.

La figure 4.19-A montre la variation du module de compressibilité initial  $K_0$  en fonction de l'angle de carottage, les valeurs sont proches avec une légère différence pour  $\theta=45^\circ$ .

En revanche, la figure 4.19-B montre la variation du module de compressibilité  $K$  en fonction de l'angle de carottage, les valeurs varient de 7000 MPa pour  $\theta=0^\circ$  jusqu'à 8100 pour  $\theta=90^\circ$ . On peut considérer également, pour ce bloc, qu'après la fermeture des microfissurations de pré-endommagement dans l'éprouvette, les valeurs de  $K$  sont indépendantes de l'angle de carottage.

La figure 4.19-C montre la variation de la pression de fermeture en fonction de l'angle de carottage. On remarque que les valeurs de  $P_f$  sont très proches, l'orientation des fissurations de pré - endommagement n'a pas une nette influence sur les valeurs de pression de fermeture.

#### 4.3.2.5 La perte de linéarité

Sur les courbes des essais triaxiaux regroupées en annexe III, on observe que la pression de confinement joue un rôle clef parmi les paramètres qui gouvernent la perte de linéarité et l'apparition de la zone dilatante. La fermeture des microfissures initiales pour différentes orientations est la raison essentielle de la non linéarité initiale de la courbe de déformation longitudinale. L'application de la pression de confinement diminue l'importance de cette zone. En revanche, le développement des microfissures induites orientées est la cause de la perte de linéarité de la courbe transversale.

En appliquant la même définition citée au paragraphe 3.1.4, on trouve les valeurs du seuil de dilatance en fonction des valeurs de pression de confinement relatives aux angles de carottage (tableau 4.4).

Tableau 4.4 : valeur des contraintes au seuil de dilatance

	$\theta=0^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=90^\circ$
$P_c=0 \text{ MPa}$	3,4	2,2	3,1
$P_c=5 \text{ MPa}$	7	6,7	8
$P_c=10 \text{ MPa}$	12,7	11,2	10,6
$P_c=20 \text{ MPa}$	/	/	18

Les valeurs du seuil de dilatance sont quasi identiques pour tous les angles de carottage pour une pression de confinement donnée. Ces valeurs augmentent nettement avec l'augmentation de la pression de confinement. Les essais à  $P_c=20 \text{ MPa}$  de pression de confinement (pour les orientations de  $\theta=0^\circ$  et de  $\theta=45^\circ$ ) ne présentent qu'une phase contractante, car les déformations longitudinales sont nettement plus importantes que les déformations transversales (annexe III).

Les valeurs du seuil de dilatance de l'essai à 20 MPa de confinement n'apparaissent pas dans le tableau 4.4 car nous avons eu une difficulté à les déterminer pour cet essai ( pour quelle raison).

#### 4.3.2.6 Les Essais de traction

Toutes les courbes d'essais de traction sont données en annexe III. Les courbes des essais montrent la déformation longitudinale en fonction de la contrainte appliquée pour les angles de carottage  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ .

La figure 4.20 montre l'évolution des valeurs des modules sécants en fonction de la contrainte axiale, ces modules diminuent au fur et à mesure que la contrainte axiale augmente.

On voit bien que la variation des valeurs est fortement influencée par l'angle de carottage (qui correspond aux différents types de microfissurations existantes). Les modes de fissurations ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agisse d'essai de traction ou d'essai de compression.

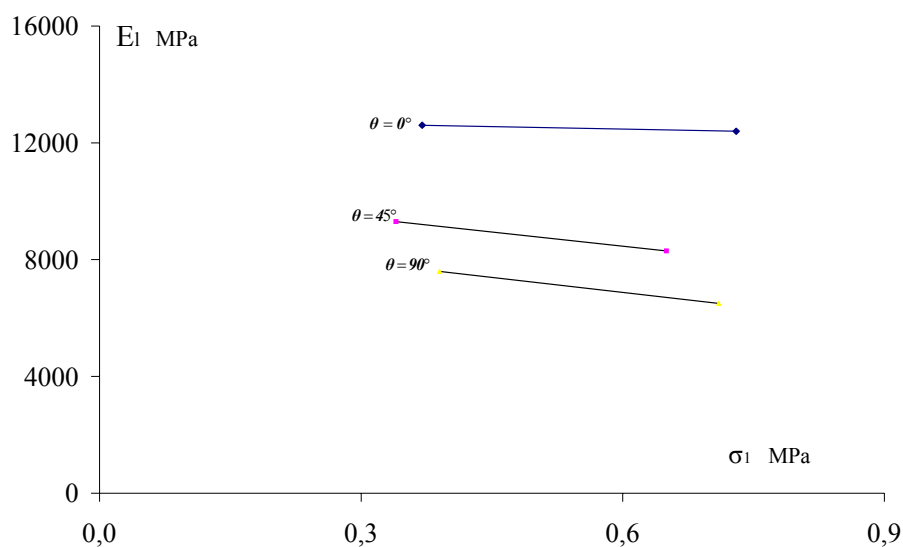


Figure 4.20 : Comparaison des modules sécants en traction en fonction de la contrainte déviatorique et pour différentes orientations de carottage

### 4.3.3 Le Bloc 3 (charge biaxial à 0,7 de $\sigma_c$ )

Les résultats du bloc 3 sont semblables à ceux du bloc 2. Dans le but de ne pas charger ce chapitre, tous les résultats de ce bloc sont donnés en annexe IV.

## 4.4 Comparaison entre blocs

Afin d'avoir une comparaison claire, nous avons pris comme référence les paramètres des essais sur le bloc vierge. Un rapport entre un paramètre « d'un essai sur un bloc endommagé » et le même paramètre de « bloc vierge » nous présente le niveau d'endommagement de ce paramètre.

Les paramètres que nous avons choisi pour notre comparaison sont classés en 3 catégories :

A) Cinq paramètres pour les essais de compression : la résistance à la rupture ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ; les modules initiaux (2 paramètres  $E_{t0}$  et  $E_{t0}$ ) et les modules sécants (2 paramètres  $E_l$  et  $E_t$ )

B) Trois paramètres pour les essais hydrostatiques : le module de compressibilité ( $K$ ), le module de compressibilité initial ( $K_0$ ) et la pression de fermeture des microfissurations  $P_f$ .

C) Un paramètre pour les essais de traction : les modules de décharge en traction.

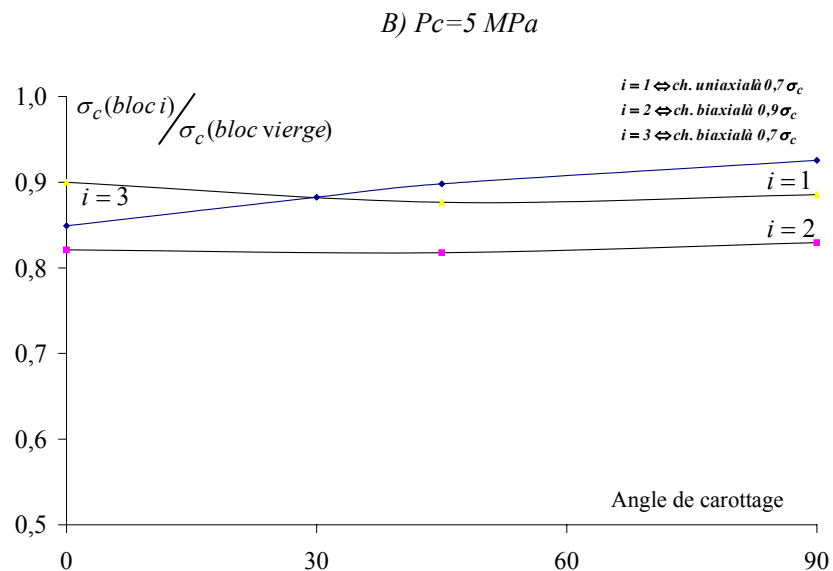
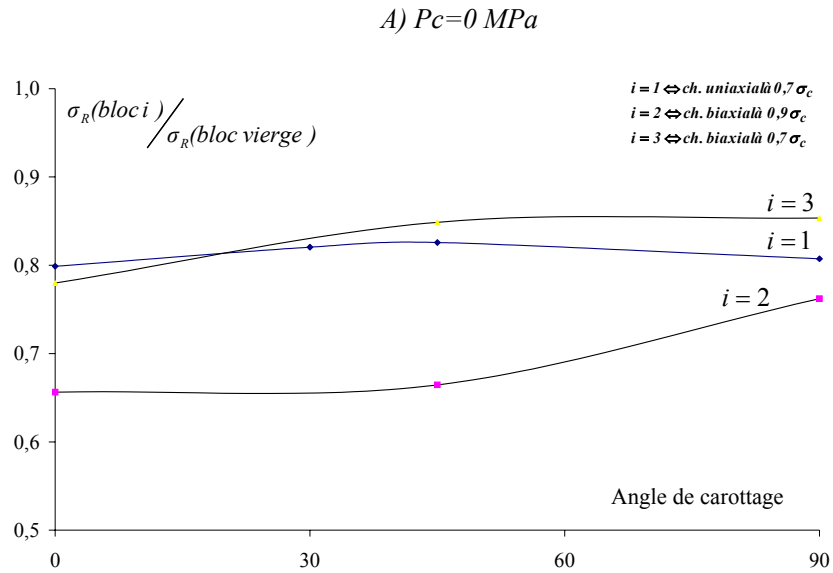
Dans la suite de ce chapitre, nous allons mettre l'accent sur deux types de comparaison :

i) *influence des familles de microfissures* : la comparaison dans ce cas sera effectuée entre le bloc 1 (avec deux familles de microfissures) et le bloc 3 (avec une seule famille de microfissures), en gardant toujours le même niveau de contrainte ( $0,7\sigma_c$ ).

ii) *influence du niveau de contrainte* : dans ce cas, la comparaison sera faite entre le bloc 2 ( $0,9\sigma_c$ ) et le bloc 3 ( $0,7\sigma_c$ ), en rappelant que ces deux blocs ont une seule famille de microfissures.

#### 4.4.1 Résistance à la rupture

Les figures 4.21 montrent, pour chaque pression de confinement, les rapports entre les valeurs de la résistance à la rupture pour un bloc endommagé et la résistance à la rupture pour le bloc vierge en fonction de l'angle de carottage.





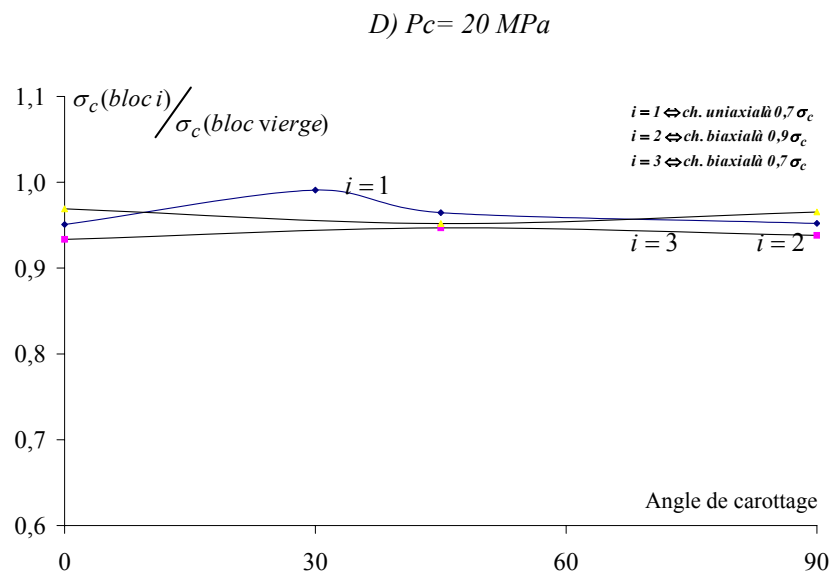
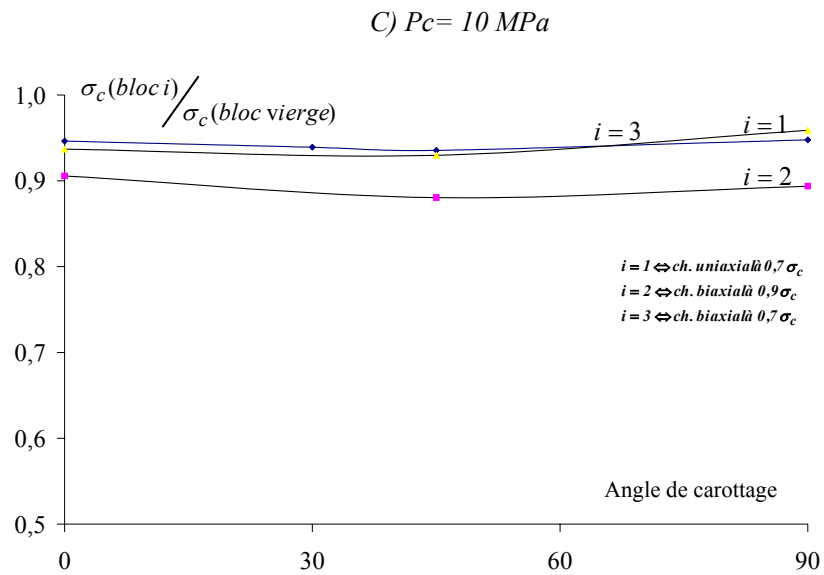


Figure 4.21 : Rapports des résistances à la rupture en fonction de l'angle de carottage pour différentes valeurs de pression de confinement

La figure 4.21-A met en évidence la différence des rapports (entre blocs) pour les essais de compression simple. Les valeurs correspondant au bloc 2 présentent une forte variation par rapport à celles des autres blocs. En effet, les rapports varient entre 0,65 et 0,75 pour le bloc 2, tandis qu'ils sont aux alentours de 0,8 pour les blocs 1 et 3. On rappelle ici que le niveau de contrainte (pré-endommagement) pour le bloc 2 est plus important que pour les blocs 1 et 3, ce bloc présente en revanche une seule famille de microfissurations.

D'une manière générale, les trois blocs donnent une résistance plus élevée pour l'orientation de 90°. En effet, par l'application de la contrainte pour cette orientation, on commence par la fermeture des microfissures de pré-endommagement. Ensuite, l'augmentation de la contrainte induit des microfissures. Nous avons en revanche, une interaction très importante entre les microfissures de pré-endommagement et les microfissurations induites pour les autres orientations.

La figure 4.21-B montre la variation des rapports pour les essais avec une pression de confinement de 5 MPa. On voit encore que le bloc 2 présente les rapports les plus faibles (autour de 0,8). Les deux blocs 1 et 3 quant à eux, ont des valeurs très proches (autour de 0,9). Au fur et à mesure que la pression de confinement augmente ( $P_c=10$  MPa) les valeurs du bloc 2 commencent à se rapprocher des valeurs des blocs 1 et 3 et les courbes sont presque superposées (Figure 4.21-C). A partir d'une pression de confinement assez élevée ( $P_c = 20$  MPa) on remarque que les rapports des valeurs de résistance sont presque les mêmes (Figure 4.21-D) ceci signifie que nous n'avons plus d'influence, ni de l'angle de carottage, ni de l'effet de pré-endommagement. Ces valeurs sont de l'ordre de 0,95. En d'autres termes, les valeurs de la résistance à la rupture pour des pressions de confinement de 20 MPa sont très proches de celles d'un bloc vierge.

➤ *effet des familles de microfissures :*

Pour comparer l'effet d'existence de la famille de microfissures sur les rapports de résistance à la rupture, les blocs représentatifs sont le bloc 1 avec deux familles de microfissures et le bloc 3 avec une seule famille de microfissures. La comparaison des figures montre que les deux blocs ont des valeurs proches pour la même pression de confinement et qu'ils sont quasiment superposés pour  $P_c=10$  et 20 MPa. Ceci signifie que l'influence du nombre de familles de microfissures sur la résistance à la rupture est faible.

➤ *effet du niveau de contrainte de pré-endommagement*

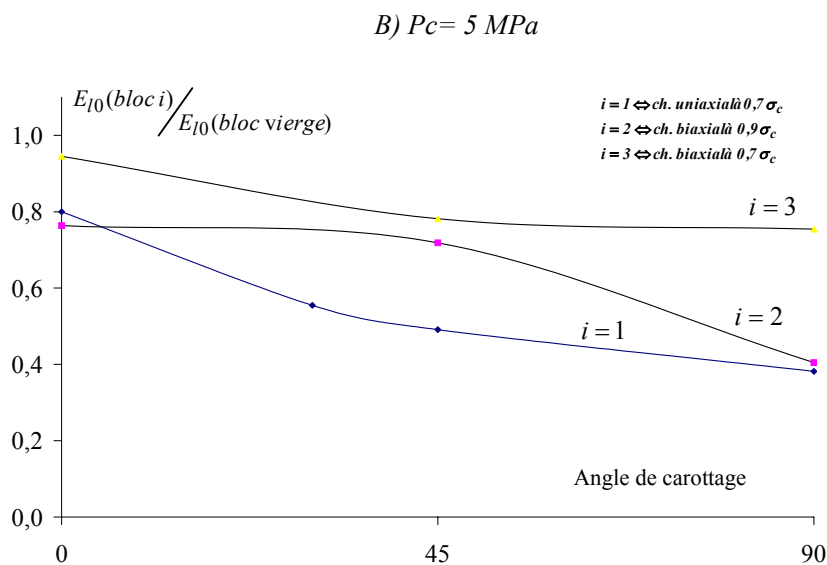
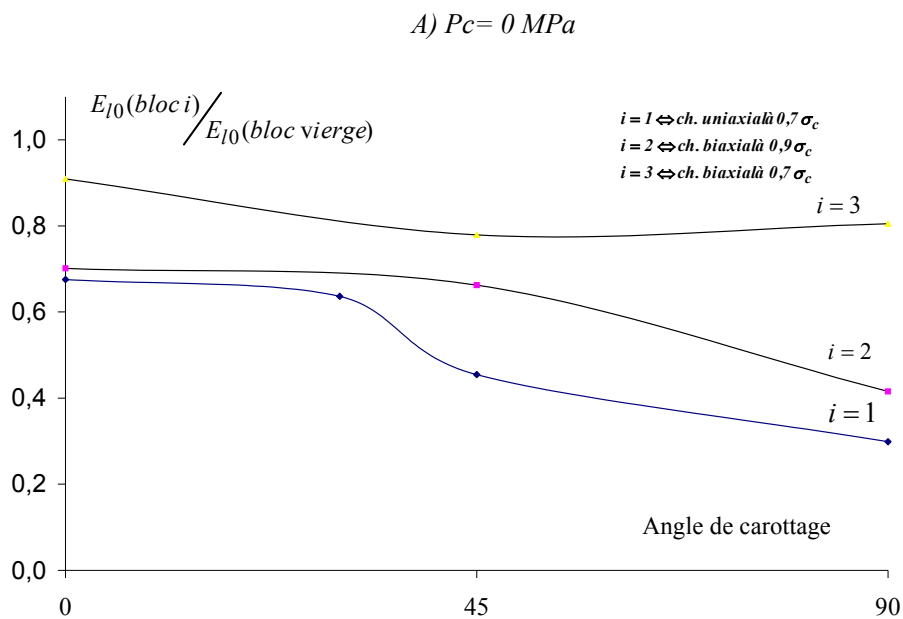
Pour comparer cet effet, nous avons choisi les blocs 2 et 3. Les figures 4.21-A-B-C-D montrent que la comparaison entre ces deux blocs passe par plusieurs étapes dépendant des valeurs de la compression de confinement. Pour une sollicitation de type compression simple, on voit bien un écart entre les deux blocs, cet écart commence à diminuer au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement jusqu'à  $P_c=20$  MPa, où les deux blocs ont des valeurs très proches.

#### 4.4.2 Modules Initiaux

Dans ce paragraphe, nous présentons la comparaison entre blocs, pour les modules initiaux longitudinaux, ainsi que les modules transversaux.

##### 4.4.2.1 Modules Longitudinaux Initiaux

Les figures (4.22) montrent pour chaque pression de confinement, les rapports entre les valeurs du module initial longitudinal pour un bloc pré - endommagé et le module initial longitudinal pour un bloc vierge en fonction de l'angle de carottage.



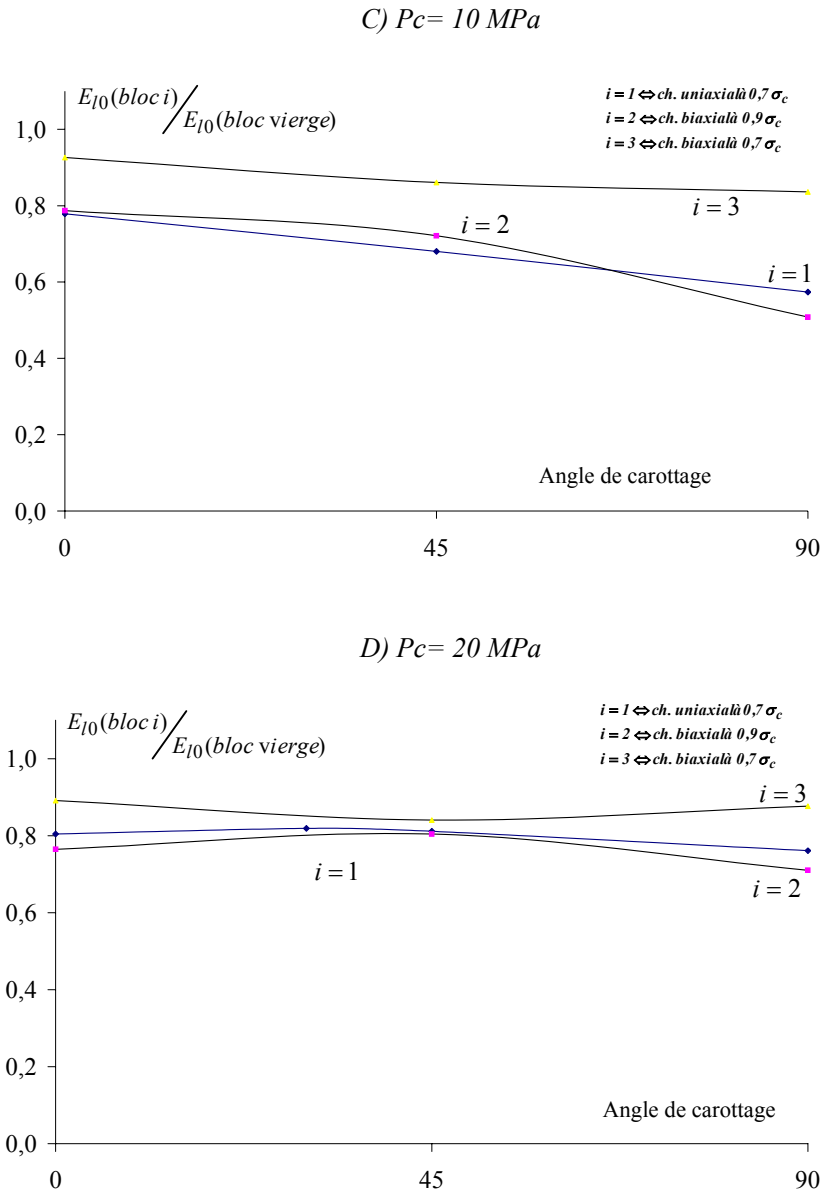


Figure 4.22 : Rapports des modules longitudinaux initiaux en fonction de l'angle de carottage pour différentes valeurs de pression de confinement

La figure 4.22 -A correspondant a un essai de compression simple, montre que les valeurs du rapport du bloc 1 restent inférieures aux valeurs des autres blocs, mais l'écart est moins significatif pour l'éprouvette à  $\theta=0$ . On remarque pour le bloc 1, que l'éprouvette à  $\theta=90^\circ$  présente toujours un rapport plus faible (0,3) avec des valeurs plus importantes pour  $\theta=0^\circ, 45^\circ$ . Le bloc 3 possède des rapports autour de (0,9), ces valeurs sont nettement plus importantes que celles des autres blocs.

Les figures 4.22-B présentent les rapports des modules pour une pression de confinement de 5 MPa, on peut remarquer que les rapports du module initial pour les

éprouvettes à  $\theta=90^\circ$  des blocs 1 et 2 sont presque identiques. Ils présentent par contre, un grand écart pour les éprouvettes avec des familles de microfissures inclinées ( $\theta=45^\circ$ ). Le bloc 3 présente à nouveau un rapport supérieur aux autres blocs.

La figure 4.22 –C montre l'évolution des rapports pour une pression de confinement égale à 10 MPa. Les valeurs des rapports pour les blocs 1 et 2 sont proches et comprises entre 0,55 et 0,8 ; en revanche, le bloc 3 donne des valeurs supérieures et comprises entre 0,85 et 0,96. L'orientation  $\theta=90^\circ$  pour les trois blocs et pour le même niveau de pression de confinement, présente des rapports inférieurs à ceux des autres orientations.

La figure 4.22–D montre l'évolution du rapport pour  $P_c=20$  MPa, on voit que les blocs 1 et 2 gardent toujours des valeurs de l'ordre de 0,8 pour les différents angles de carottage. Le bloc 3 quant à lui garde une légère supériorité des valeurs par rapport aux autres blocs (de l'ordre de 0,93).

On montre que l'effet de la pression de confinement est très important sur le module longitudinal initial, surtout en ce qui concerne les blocs 1 et 2.

On remarque, que le module initial longitudinal reste un bon indicateur de la microfissuration induite lors du pré-endommagement. En effet, les valeurs des rapports de ce module sont nettement plus faibles pour l'orientation de  $\theta=90^\circ$ , cette orientation présente l'état de microfissurations (de pré-endommagement) le plus important (cf Figure 4.8). Au fur et à mesure de l'augmentation du confinement, on observe une fermeture progressive de la microfissuration de pré-endommagement, les valeurs des rapports se rapprochent de 1. En d'autres termes, les valeurs de ces modules pour des pressions de confinement à 20 MPa deviennent proches de celles d'un bloc vierge.

➤ *effet des familles de microfissurations :*

Pour comparer l'effet des familles de microfissurations sur les modules longitudinaux initiaux, ce sont toujours les blocs 1 et 3 qui vont faire l'objet de ce type de comparaison. On peut voir que ce rapport est nettement plus élevé pour le bloc 3 que pour le bloc 1. L'effet des familles de microfissurations est très significatif sur le module longitudinal initial. L'existence de deux familles de microfissurations dans le bloc 1, donne des déformations initiales très importantes, par rapport au bloc 3 (avec une seule famille de microfissurations). Ce type d'effet subsiste même jusqu'à une pression assez élevée ( $P_c=20$  MPa).

Il nous paraît important de comparer ici les blocs 1 et 2 pour l'orientation des microfissurations inclinées ( $\theta=30^\circ$  et  $45^\circ$ ). En effet, l'interaction des microfissurations de pré-endommagement dans le cas du bloc 1 (deux familles) nous donne des valeurs nettement plus

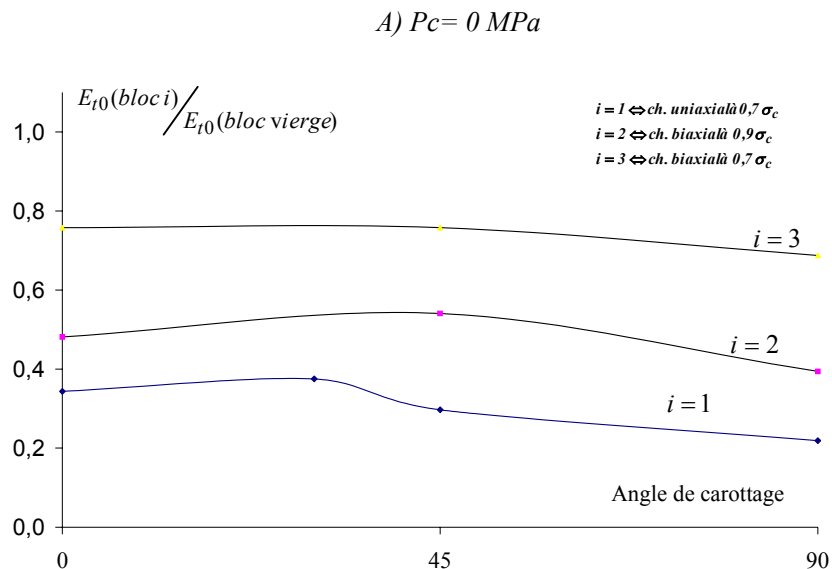
faibles que dans le cas du bloc 2 (une seule famille) malgré l'importance de son niveau de contrainte de pré - endommagement ( $0,9 \sigma_c$ ).

➤ *effet du niveau de pré - endommagement*

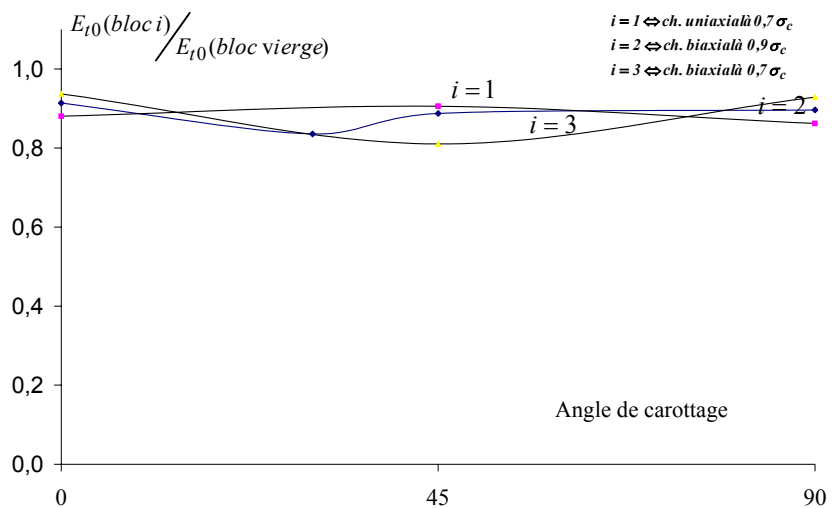
L'écart entre les rapports correspondants aux blocs 2 et 3 est très important pour l'essai de compression simple, cet écart commence à diminuer lorsque la pression de confinement augmente. Il est également plus important pour l'orientation de carottage  $\theta=90^\circ$ , surtout lorsque la pression de confinement est assez faible ( $P_c = 0$  MPa ou  $P_c = 5$  MPa). Cependant pour une pression de confinement élevée ( $P_c = 10$  MPa ou  $P_c = 20$  MPa), cet écart devient négligeable pour toutes les orientations.

**4.4.2.2 Modules Initiaux Transversaux**

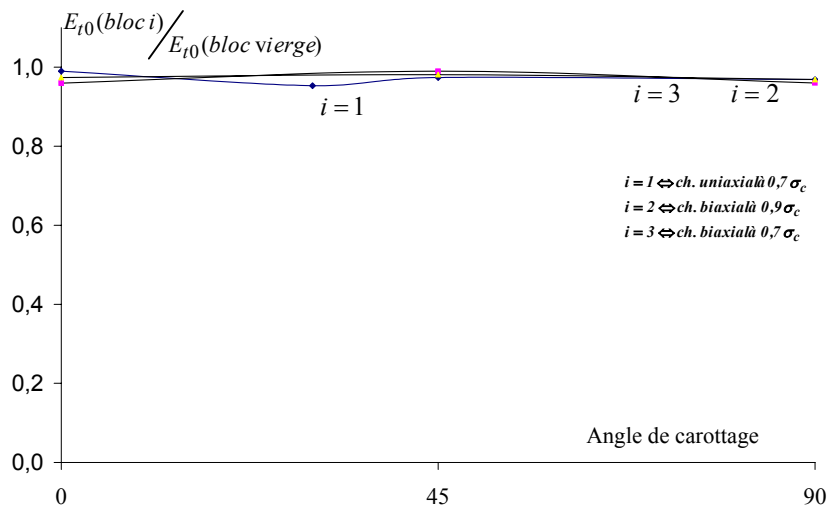
Les figures 4.23 montrent pour chaque pression de confinement, les rapports entre les valeurs du module transversal initial pour un bloc endommagé, et le module transversal initial pour le bloc vierge en fonction de l'angle de carottage.



B)  $P_c = 5 \text{ MPa}$



C)  $P_c = 10 \text{ MPa}$



D)  $P_c = 20 \text{ MPa}$

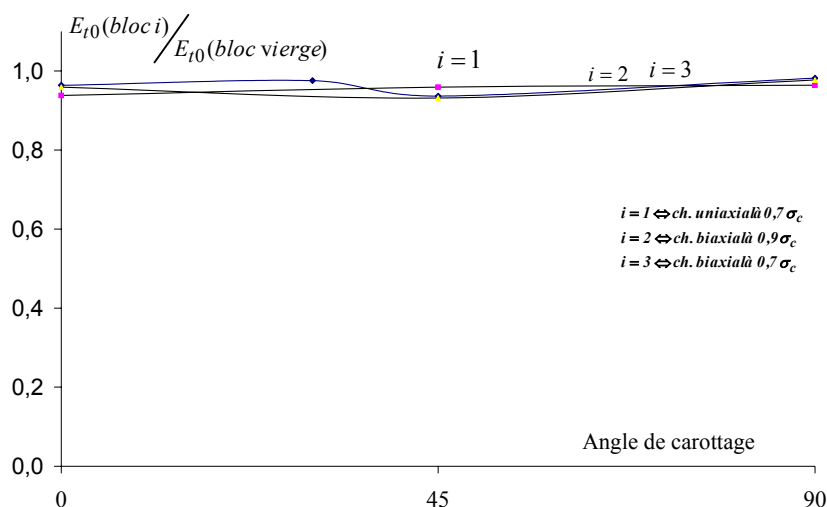


Figure 4.23 : Rapports des modules initiaux transversaux en fonction de l'angle de carottage pour différentes valeurs de la pression de confinement

La figure 4.23 -A met en évidence la différence entre les trois blocs pour un essai de compression simple. Le module transversal initial - pour tous les angles de carottage- du bloc 1 est très affecté par l'endommagement, les valeurs des rapports pour  $\theta=90^\circ$  sont plus faibles que celles pour  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=45^\circ$ . Cette même tendance s'observe pour les blocs 2 et 3. Les valeurs de rapport qui correspondent au bloc 1 varient autour de 0,37.

En montant la pression de confinement, l'écart entre les rapports correspondant aux trois blocs se réduit d'autant plus que la pression de confinement appliquée est forte. Ainsi, la figure 4.23-B montre l'évolution du module transversal initial pour les essais avec une pression de confinement égale à 5 MPa. Pour les essais avec une pression de confinement assez élevée ( $P_c = 10 \text{ MPa}$  et  $P_c = 20 \text{ MPa}$ ), les écarts s'immiscent, et les courbes sont pratiquement superposées (Figure 4.23 -C-D).

➤ *effet de la famille des microfissurations*

La différence entre les deux blocs (1 et 3) pour un essai de compression simple est très importante (les valeurs correspondant au bloc 1 sont presque égales à la moitié des valeurs du bloc 3). Comme nous l'avons vu dans le cas du module initial longitudinal, l'existence de deux familles de microfissures a une influence très importante sur ce module.

On remarque que la différence entre ces deux blocs commence à disparaître à partir d'un confinement de 5 MPa.



➤ *effet du niveau de contrainte*

La comparaison sera faite entre les blocs 1 et 2. Le bloc 2 présente des rapports de modules moins élevés dans le cas de la compression simple. Cette différence disparaît à partir de 5 MPa de confinement.

Pour terminer, on remarque que la fermeture des microfissures de pré – endommagement longitudinal commence à 10 MPa, tandis que la fermeture des microfissures de pré – endommagement transversal commence à 5 MPa.

#### **4.4.3 Modules sécants**

Dans ce paragraphe, nous présentons la comparaison des modules sécants longitudinaux et transversaux.

Dans cette partie, on va discuter de la *tendance générale* de l'évolution des modules sécants. En effet, il est difficile de donner une analyse fine de ces résultats, car nous avons une interaction d'effets très importante entre les microfissurations induites et les microfissurations de pré-endommagement. De ce fait nous présentons ici uniquement l'angle  $\theta=90^\circ$  de carottage. Le reste des résultats est regroupé en annexe V.

##### **4.4.3.1 Modules Longitudinaux Sécants**

Les figures (4.24 - 4.25 - 4.26 - 4.27) montrent pour "chaque pression de confinement" les rapports des valeurs entre le module longitudinal pour un bloc endommagé et le module longitudinal pour le bloc vierge, en fonction des contraintes déviatoriques.

Pour les essais de compression simple, les rapports correspondant au bloc 3 présentent des valeurs entre (0,9 et 1). Le bloc 2 présente des rapports entre (0,8 et 0,9) ; le bloc 1 donne en revanche, les rapports les plus faibles (0,5 à 0,8).

A partir de 5 MPa de pression de confinement, les valeurs des rapports pour les blocs 1 et 2 se rapprochent, avec des valeurs variant entre (0,6 et 0,8). Le bloc 3 garde toujours des valeurs proches de 1. La tendance générale pour des pressions de confinement plus élevées (10 MPa -20 MPa) est équivalente à celle de la pression de 5 MPa ; nous avons toujours le même ordre de grandeur des valeurs (bloc 3, 2, et 1), sauf pour l'essai 2/90°/10 qui nous donne des valeurs entre (0,6 et 0,8).

$P_c=0$

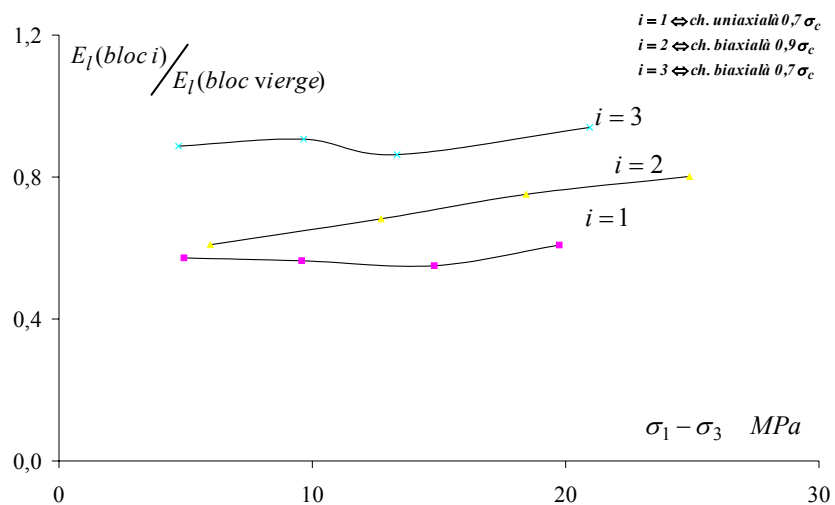


Figure 4.24 : Rapports des modules longitudinaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage (compression simple)

$P_c=5 \text{ MPa}$

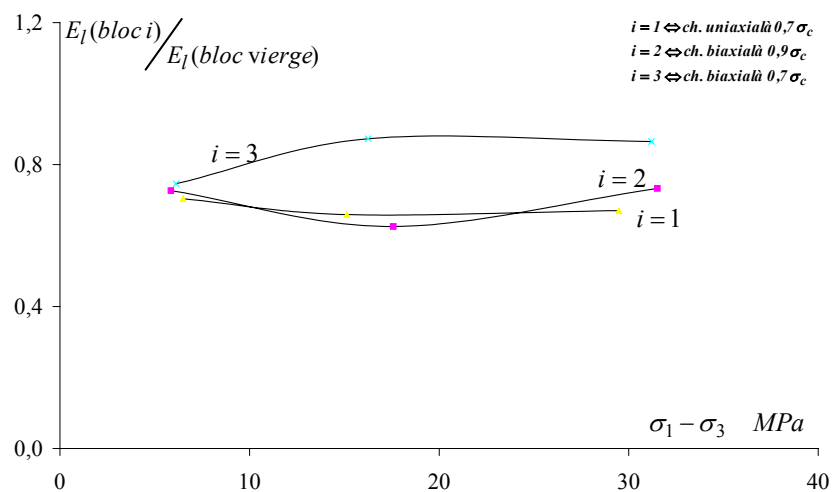


Figure 4.25 : Rapports des modules longitudinaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage ( $P_c=5 \text{ MPa}$ )

**$P_c=10$  MPa**

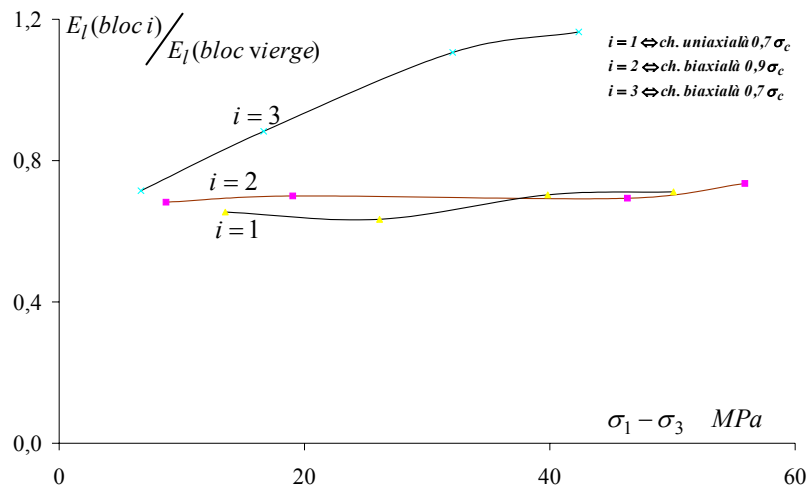


Figure 4.26 : Rapports des modules longitudinaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage ( $P_c=10$  MPa)

**$P_c=20$  MPa**

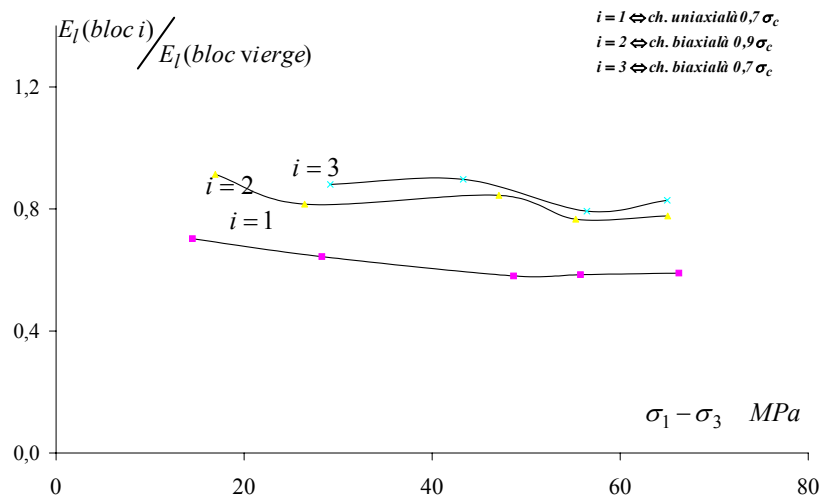


Figure 4.27 : Rapports des modules longitudinaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage ( $P_c=20$  MPa)

Pour l'essai à  $P_c=0$ , la famille de fissurations de  $\theta=90^\circ$  du bloc 1, se développe dans le même sens que la charge axiale appliquée, par contre, pour les autres blocs, les familles de fissurations sont perpendiculaires à la charge axiale, ceci donne des valeurs du module longitudinal moins élevées que pour le bloc 1 (Figure 4.8).

#### 4.4.3.2 Modules Transversaux Sécants

Les figures 4.28–4.29–4.30 – 4.31 montrent pour «chaque pression de confinement» les valeurs des rapports entre le module transversal pour un bloc endommagé et le module transversal pour le bloc vierge, en fonction des contraintes déviatoriques.

$P_c=0 \text{ MPa}$

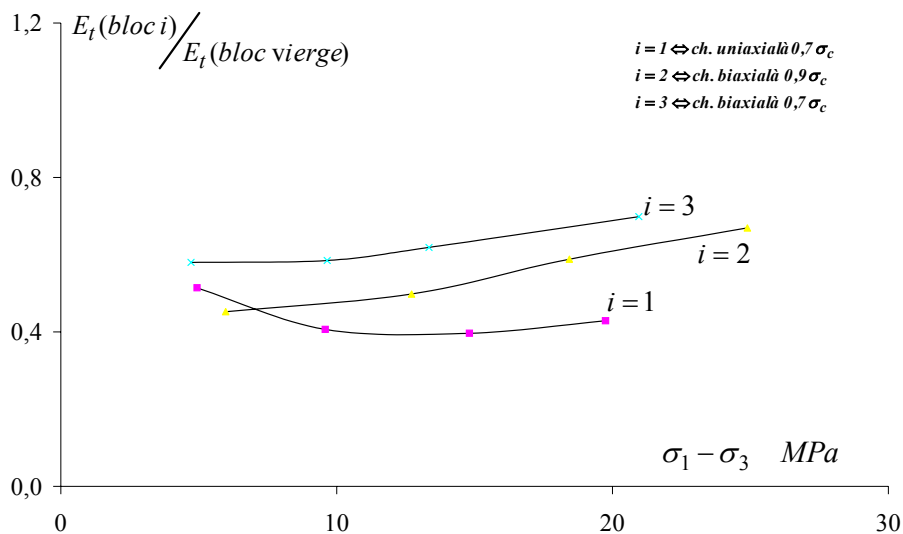


Figure 4.28 : rapport des modules transversaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage (compression simple)

**$P_c=5$**

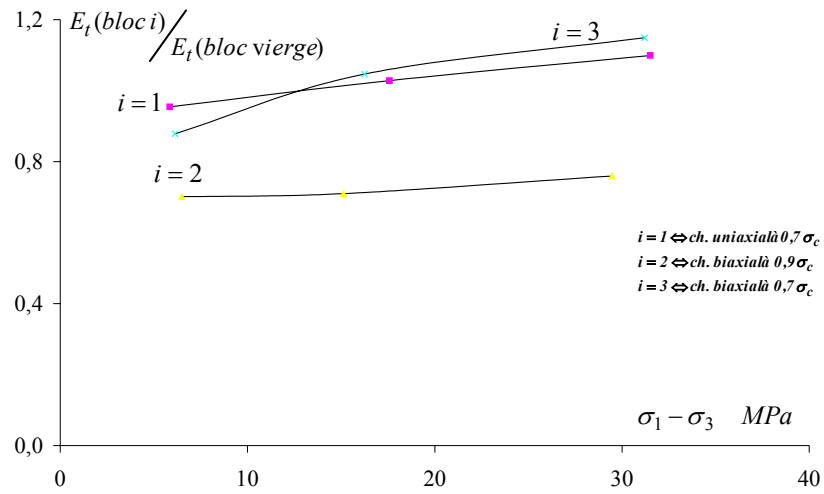


Figure 4.29 : rapport des modules transversaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage ( $P_c=5$  MPa)

**$P_c=10$**

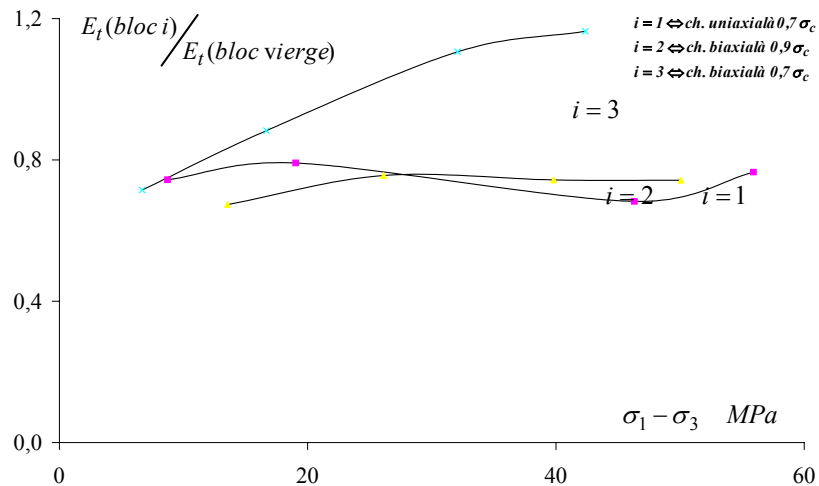


Figure 4.30 : rapport des modules transversaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage ( $P_c=10$  MPa)

**$P_c=20\text{ MPa}$**

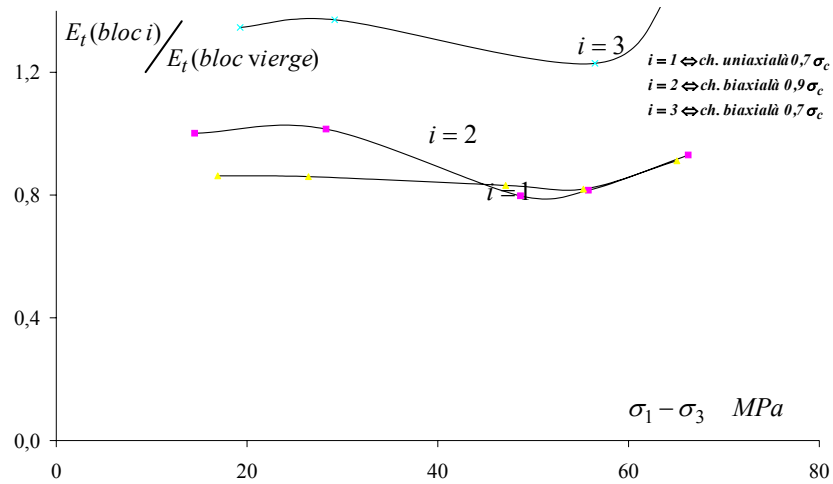


Figure 4.31 : rapports des modules transversaux en fonction de la contrainte déviatorique pour différents angles de carottage ( $P_c=20\text{ MPa}$ )

La figure 4.28 montre la variation des rapports des essais en compression simple, les valeurs pour les blocs 1 et 2 varient entre 0,45 et 0,7; par contre, les valeurs qui correspondent au bloc 3 sont toujours les plus élevées et elles varient entre 0,6 et 1; avec l'augmentation de pression de confinement, on remarque que ces valeurs deviennent élevées par rapport aux essais de compression simple. Les valeurs qui correspondent au bloc 3 restent toujours supérieures à celles correspondant aux autres blocs.

La comparaison entre les blocs 1 et 3 montre que le bloc 3 a toujours des valeurs proches de 1; alors que les valeurs du bloc 1 ne dépassent pas 0,8.

*On peut dire d'une manière générale, que la comparaison des modules sécants « entre blocs », nous semble plus délicate que les autres paramètres, car comme nous l'avons signalé auparavant, l'interaction entre microfissurations induites et microfissurations de pré-endommagement est très importante. On peut considérer que la tendance générale des courbes n'indique pas une variation très importante des rapports du module sécant pour chaque bloc.*

#### 4.4.4 Les Paramètres Hydrostatiques

Nous avons également comparé trois paramètres pour les essais hydrostatiques : le module de compressibilité initial ( $K_0$ ), le module de compressibilité ( $K$ ) et la pression de fermeture des microfissurations ( $P_f$ ) (cf figure 3.3).

##### 4.4.4.1 le module de compressibilité initial

La figure 4.32 montre les rapports entre le module de compressibilité initial pour un bloc endommagé et le module de compressibilité initial pour le bloc vierge en fonction de l'angle de carottage.

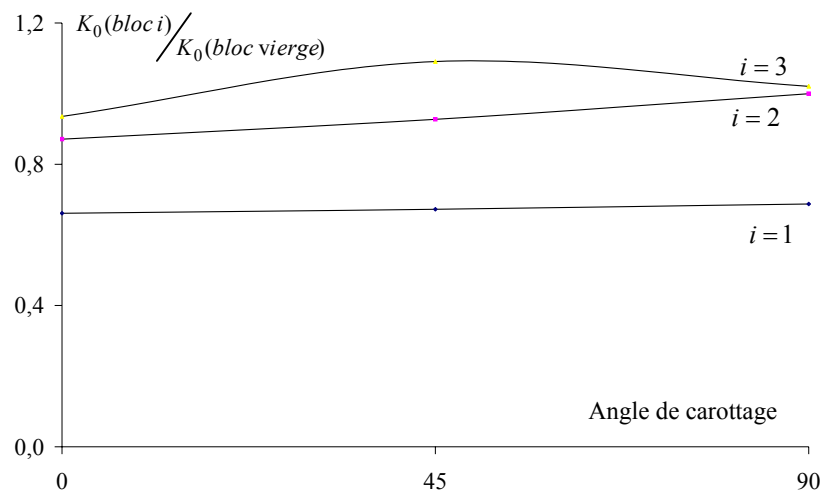


Figure 4.32 : rapports des modules de compressibilité initiaux en fonction de l'angle de carottage pour les essais hydrostatiques

On remarque que le bloc 1 présente les valeurs les plus faibles par rapport aux autres blocs. Ce bloc a une microfissuration dont l'effet est plus important dans la zone de serrage (zone de fermeture des microfissures initiales), les blocs 2 et 3 présentent des valeurs proches, ces valeurs sont plus proches de celles du bloc à l'état vierge que de celles du bloc 1.

##### 4.4.4.2 le module de compressibilité

La figure 4.33 montre les rapports entre le module de compressibilité pour un bloc endommagé et le module de compressibilité du bloc vierge en fonction de l'angle de carottage.

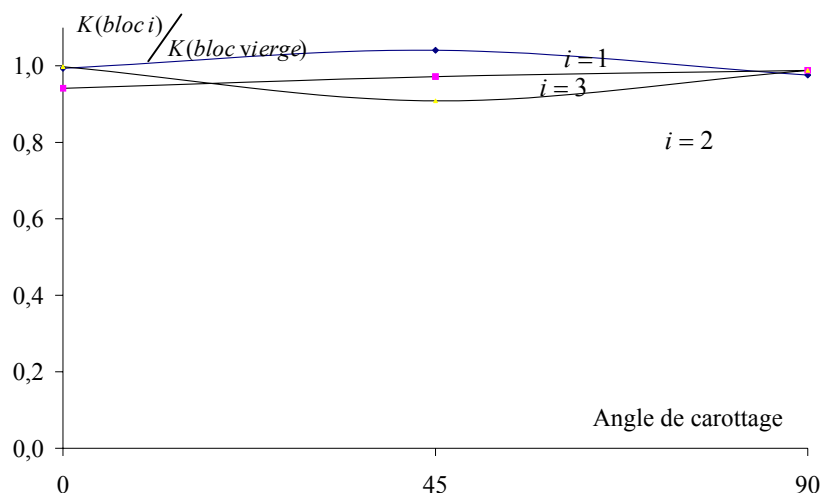


Figure 4.33 : rapports des modules de compressibilité en fonction de l'angle de carottage pour les essais hydrostatiques

Cette figure montre que les valeurs correspondant aux trois blocs sont proches de 1. Puisque ce module correspond à la partie linéaire de la courbe de compressibilité, toutes les microfissures existantes dans les blocs sont déjà fermées, et on revient « presque » à l'état vierge.

#### 4.4.4.3 la pression de fermeture des microfissures

La figure 4.34 montre les rapports entre la pression de fermeture des microfissures pour un bloc endommagé et la pression de fermeture des microfissures du bloc vierge en fonction de l'angle de carottage.

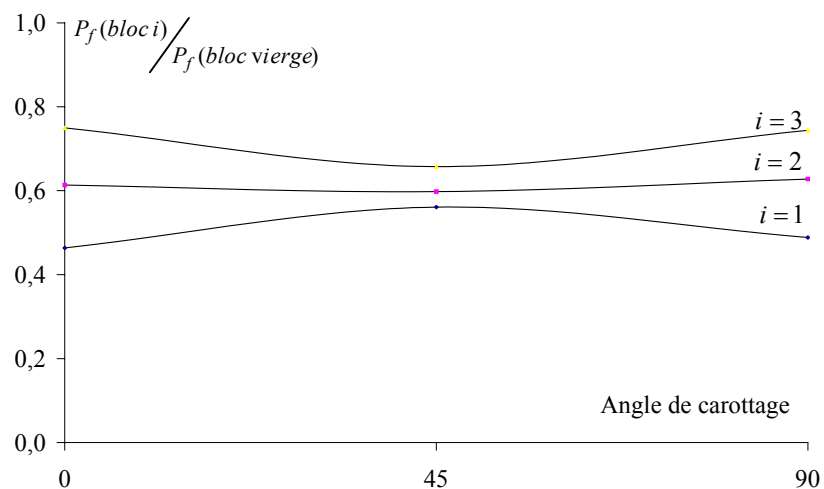


Figure 4.34 : rapport des pressions de fermeture des microfissurations en fonction de l'angle de carottage pour les essais hydrostatiques



On remarque, pour le bloc 1, qu'on a besoin d'une pression hydrostatique égale à la moitié de celle du bloc vierge pour la fermeture des microfissurations de pré – endommagement pour  $\theta=0^\circ$ , cette pression donne le rapport le plus faible ; par contre la pression de fermeture devient plus importante pour le bloc 2 (autour de 0,6). Enfin, le bloc 3 donne la pression de fermeture la plus élevée avec des rapports proches de 0,8.

➤ *effet de la famille de microfissurations*

Les blocs 1 et 3 sont représentatifs de ce type de comparaison. Les courbes des modules de compressibilité initiaux (Figure 4.32), nous montrent que le bloc 3 présente des valeurs fortement supérieures aux valeurs du bloc 1. Cette remarque est valable pour tous les angles de carottage. C'est-à-dire que le bloc 1 (avec toutes ses orientations de carottage) présente des déformations initiales, dans la zone de serrage, nettement plus importantes que celles du bloc 3. Après le dépassement de la zone de serrage (Figure 4.33), les modules de compressibilité des blocs ont presque les mêmes valeurs de rapport (de l'ordre de 1).

La comparaison montre clairement que la pression de fermeture des microfissurations pour le bloc avec deux familles de microfissurations (bloc 1), est nettement plus faible que celle avec une seule famille de microfissurations (bloc 2) (Figure 4.34).

➤ *effet de la contrainte de pré-endommagement*

Les blocs concernés sont les blocs 2 et 3. Le bloc 3 présente des rapports de module de compressibilité initial (Figure 4.32) plus élevés que le bloc 2. En d'autres termes le bloc 2 présente des déformations initiales plus importantes que le bloc 3.

En ce qui concerne le module de compressibilité  $K$ , les blocs présentent presque le même comportement, et les différentes orientations donnent des valeurs très proches des valeurs du bloc vierge (Figure 4.33).

Le bloc 3 présente les rapports de  $P_f$  (Figure 4.34) les plus élevés. Le bloc 2 qui présente une microfissuration plus importante, a en effet besoin d'une pression de fermeture moins élevée.

La comparaison nous montre que, l'influence du nombre des familles de microfissurations est nettement plus importante sur les modules de compressibilité initiaux que sur le niveau de la contrainte de pré - endommagement.

#### 4.4.5 L'Essai de Traction

Les figures 4.35 montrent les rapports entre les modules sécants (longitudinaux) en traction du bloc endommagé et les modules sécants en traction du bloc vierge en fonction de la contrainte de traction pour deux orientations de carottage ( $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ).

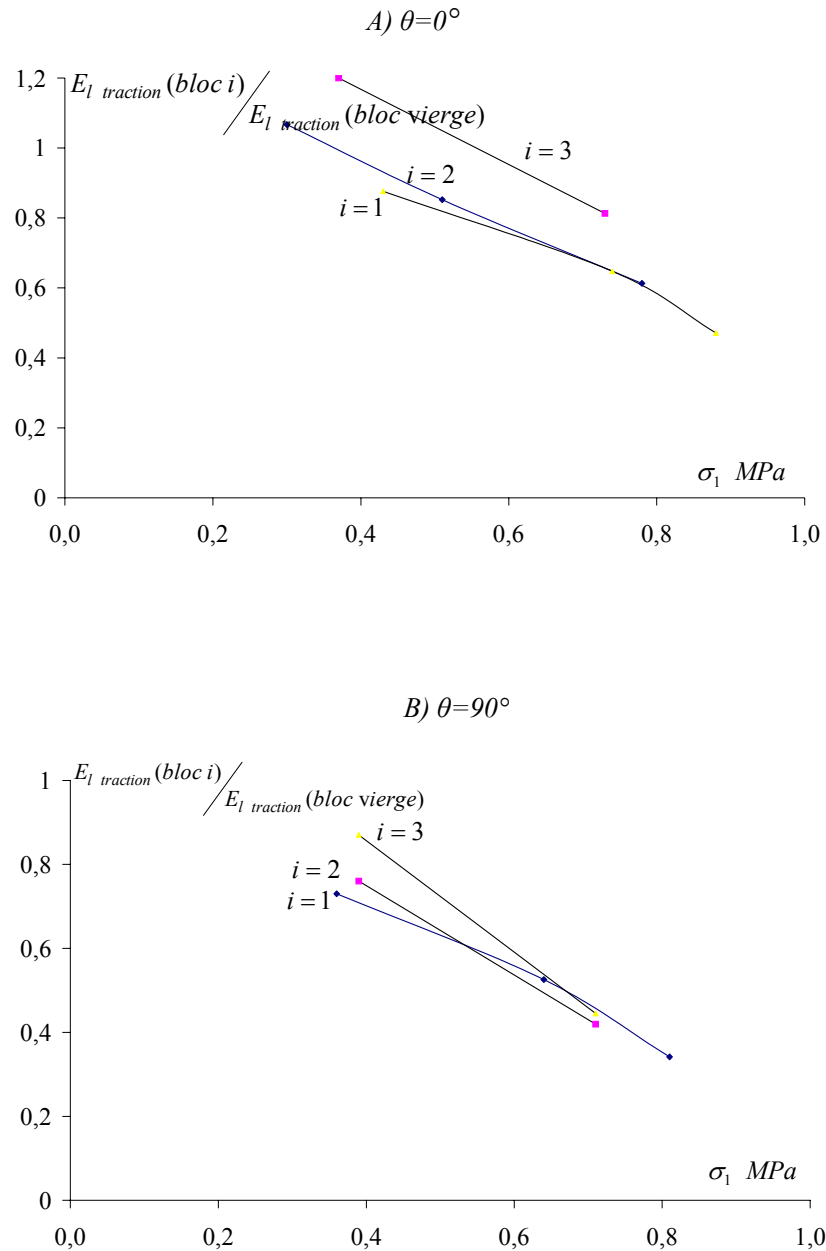


Figure 4.35 : rapports des modules sécants en fonction de la contrainte de traction pour différents angles de carottage

On peut noter que ces modules décroissent fortement en fonction de la contrainte de traction. Pour les deux angles de carottage, on peut remarquer également que les rapports correspondant au bloc 3 sont les plus élevés. Les blocs 1 et 2 ont des valeurs de rapports très proches. Les rapports qui correspondent à  $\theta=90^\circ$  sont plus faibles que ceux correspondant à  $\theta=0^\circ$ .

Les essais effectués sur les blocs pré – endommagés nous ont montré que, les modules sécants décroissent au fur et à mesure que la contrainte axiale augmente. Le pré-endommagement des blocs facilite l'endommagement induit et accélère la rupture lors des essais de traction directe.

## ***Conclusion Générale***

L'étude expérimentale du comportement du grès des Vosges a montré que cette roche est initialement isotrope et que le module longitudinal initial est le même dans le cas d'un essai de compression simple et d'un essai de traction directe. Nous avons montré également que cette roche possède un comportement fragile, et que la résistance à la rupture, les modules initiaux, les modules sécants, et le seuil d'appariation de non linéarités dépendent de la contrainte latérale appliquée.

Les essais préliminaires (sur blocs) dans la presse triaxiale vraie nous ont permis de visualiser les différentes familles de fissurations dominantes. Nous avons pu observer l'existence d'une seule famille de fissurations (bloc C) lorsque nous avons une seule contrainte mineure. En revanche, nous avons remarqué deux familles de fissurations dans le cas de deux contraintes mineures (bloc A et bloc B).

L'étude expérimentale réalisée sur des blocs pré-endommagés (1, 2 et 3) a montré l'évolution importante des paramètres mécaniques en fonction des types de chargement. En effet, les essais de compression simple sur des échantillons pré-endommagés ont mis en évidence la création d'une anisotropie induite dans les blocs, cette anisotropie se manifeste remarquablement sur les modules initiaux (longitudinal et transversal). Ces derniers dépendent fortement de l'angle de carottage (pour la même pression de confinement), cette dépendance diminue avec l'augmentation de la pression de confinement. Au niveau de la résistance à la rupture, il existe une différence majeure entre l'anisotropie de structure et l'anisotropie induite (pré – endommagement), car dans le cas d'une anisotropie de structure, on observe généralement une forte dépendance de la direction d'anisotropie. En revanche dans le cas d'une anisotropie de pré – endommagement, la différence entre les valeurs au pic pour les différents plans d'anisotropie est très faible.

Les valeurs du seuil de la non linéarité pour une pression de confinement donnée sont quasi identiques pour tous les angles de carottage. Ces valeurs augmentent nettement avec l'augmentation de la pression de confinement. Pour un chemin hydrostatique, nous avons constaté que les valeurs du module de compressibilité sont indépendantes de l'angle de carottage (après la fermeture des microfissurations de pré – endommagement).

La comparaison entre blocs nous montre clairement et pour les différents paramètres à comparer, que les deux effets principaux sont :

1) l'influence des familles de microfissurations (les blocs 1 et 3 sont la cible de notre comparaison),

2) l'influence du niveau de contrainte de pré-endommagement (les blocs 2 et 3).

D'une manière générale, les trois blocs donnent une résistance plus importante pour l'orientation à 90. Les valeurs de la résistance à la rupture pour des pressions de confinement supérieur à 20 MPa sont très proches de celles d'un bloc vierge.

La comparaison permet de constater que l'influence du nombre de familles de microfissures sur la résistance à la rupture est faible, nous avons obtenu pour une pression de confinement donnée des valeurs très proches. Elles sont quasiment identiques pour  $P_c=10$  et 20 MPa. La faible différence commence à diminuer au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement jusqu'à  $P_c=20$  MPa, où les deux blocs (1 et 3) ont des valeurs très proches.

On remarque, que le module initial longitudinal reste un bon indicateur de la microfissuration induite lors du pré-endommagement. En effet, les valeurs des rapports de ce module sont nettement moins élevées pour l'orientation de  $\theta=90^\circ$ , cette orientation présente l'état de microfissurations de pré-endommagement le plus important (les microfissures sont perpendiculaire à l'axe de chargement). Au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement, on observe une fermeture progressive de la microfissuration de pré-endommagement, les valeurs de ces modules pour des pressions de confinement de 20 MPa deviennent proches de celles d'un bloc vierge, L'effet des familles de microfissurations est très significatif sur le module longitudinal initial. L'existence de deux familles de microfissurations dans le bloc 1, provoque des déformations initiales très importantes, par rapport au bloc 3 (avec une seule famille de microfissurations).

On peut noter que l'influence des familles de microfissures sur les modules initiaux longitudinaux est nettement plus importante que celle du niveau de la contrainte de pré-endommagement. En revanche, dans le cas de la résistance à la rupture, c'est le niveau de la contrainte de pré - endommagement qui joue le rôle le plus important.

En ce qui concerne le module transversal initial, on remarque que, la différence entre les blocs commence à disparaître à partir d'une faible valeur de pression de confinement. Les valeurs commencent à se rapprocher des valeurs du bloc vierge à cause de la fermeture des microfissures de pré - endommagement transversal. Au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement, l'écart entre les rapports correspondant aux quatre blocs se réduit.

Les essais hydrostatiques ont montré que le bloc 1 présente les valeurs les plus basses des modules de compressibilité initiaux par rapport aux autres blocs. Ce bloc a une

microfissuration dont l'effet est plus important dans la zone de serrage (zone de fermeture des microfissures initiales). Le bloc 1 présente des déformations initiales, nettement plus importantes que celles du bloc 3. Après le dépassement de la zone de serrage, la comparaison montre clairement que la pression de fermeture des microfissures pour le bloc1 (avec deux familles de microfissurations), est moins importante que la pression de fermeture des microfissures avec une seule famille de microfissurations (bloc 2). L'influence du nombre de familles de microfissurations est nettement plus importante sur les modules de compressibilité initiaux que sur le niveau de la contrainte de pré endommagement. Après dépassement de la zone de serrage et dans la partie linéaire, les blocs dégradés présentent des modules presque identiques à ceux du bloc vierge.

Les essais de traction directe effectués sur les blocs pré – endommagés ont montré que les modules sécants décroissent au fur et à mesure que la contrainte axiale augmente. Le pré - endommagement des blocs facilite l'endommagement induit et accélère la rupture lors des essais de traction directe.

Ces bases de données expérimentales peuvent servir à améliorer les modèles d'endommagement existants, ou à développer des nouveaux modèles d'endommagement anisotrope

Il est souhaitable de réaliser un autre type de pré – endommagement afin de créer d'autres types de familles de fissurations en particulier des familles inclinées. Ces familles peuvent se créer par l'application des trois contraintes de pré – endommagement différentes ( $\sigma_v \neq \sigma_h \neq \sigma_H$ ).

## Références bibliographiques

**ALLIROT D. et BOEHLER J. P.** (1979) Évolution des propriétés mécaniques d'une roche stratifiée sous pression de confinement. In Proc. 4th Int. Congr. Rock Mechanics, Montreux, Vol.1, pp. 15-22 Balkema, Rotterdam.

**AMADIE B.** (1954) "Rock anisotropy and the theory of stress measurement" Library of congress cataloguing in publication data ( 1954) pp475.

**BESSINGER BA. COOK NGW** (1996). "Laboratory comparison of rock properties controlling geologic compression- driven extensile fracturing". In: Aubertin M, Hassani F, mitri H, editors proceedings of the Second North Am Rock Mech. Symp. Montreal, 1996.1137-44.

**BIENIASWAKI Z. T.** (1967) "Mechanism of brittle fracture of rock: Part I-theory of the fracture process". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 4:395-406, 1967.

**BIENIASWAKI Z. T.** (1967) "Mechanism of brittle fracture of rock: Part II-experimental studies". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 4:407-433, 1967.

**BIENIASWAKI Z. T.** (1967) "Mechanism of brittle fracture of rock: Part III-fracture in tension and under long – term loading". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 4:425-430, 1967.

**BLUMEL M. BROSCH F-J, FASCHING A.** (1995) "Investigations on fabrics and related mechanical properties of a highly anisotropic gneiss". Proceeding of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1995 ;32(8) :751-61.

**BOUNENNI A.** (2002) "Etude expérimentale de l'effet de l'endommagement sur la perméabilité des roches" thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées,218p

**BRACE W. F** (1978). "Volume changes during fracture and frictional sliding" : a review . Pure Applied Geophysics, 116:603-614, 1978.

**BRACE W. F. et BOMBOLAKIS** (1963) "A note on brittle crack growth in compression": Journal of Geophysical Research, 68:3709-3713, 1963.

**CAI M., KAISER P.K , TAsAKA Y. , MAEJIMA T , MORIOKA H. MINAMI M.** (2004) . "Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations". Int. J. of Rock and Mining Sciences 41 (2004) 833-847.

**CAYEUX L.,** (1929) "Les roches sédimentaires de France" : les roches siliceuses » Mém. Serv. Cart. Géol. France.

**CHAMLEY**, (1990). "Sedimentology. Springer-Verlag", 285 pp. Éditeur : Springer-Verlag (octobre 1990) ASIN : 3540523766.

**CHEN Y. NISHIYAMA H. KUSUDA H. KITA H. SATO T.** (1999) "correlation between microcrack distribution deactivation for brittle materials like concrete and ceramic composites". Int. J. Rock Mech. Min. Sci.. 36:535-541, 1999.

**CHIARELLI A. S. , SHAO J.F , HOTEIT N.** "Modeling of elastoplastic damage behaviour of a claystone". Int. J. of Plasticity 19 (2003) 23-45.

**COJAN & M. RENARD**, (1999) "Sédimentologie" .Dunod, 418 pp. ASIN : 2100043870

**COOK N. G. W.**(1965) "The failure of rock". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 2:389-403, 1965.

**COUSSY O.** (1991) "Mécanique des milieux poreux" , Edition Technip., Paris

**CUXAC P.** (1991): "Propagation et atténuation des ondes ultrasonique dans des roches fissurées et anisotropie ", Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine(INPL) (1991).

**DAVID C. MENÉNDEZ B. DAROT M.** (1999) "Influence of stress – induced thermal cracking on physical properties and microstructure of Peyratte granite" . Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 36(1999) 433-448.

**DONATH F. A.** (1961) "Experimental study of shear failure in anisotropic rocks". Bull. Geol.

**DONATH F. A.** (1963) "Fundamental problems in dynamic structural geology". In the Earth Sciences (Edited by T. W. Donnelly), pp. 83-103. The University of Chicago Press, Chicago.

**DONATH F. A.** (1964) "Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock. In State of stress in the Earth's crust". Judd W. R. (Editor), pp. 281-297. Elsevier, Amsterdam.

**EBERHARDT, E., STEAD, D., STIMPSON, B. & LAJTAI, E.Z.** (1998). "The effect of neighbouring cracks on elliptical crack initiation and propagation in uniaxial and triaxial stress fields". Engineering Fracture Mechanics: 59 (2), 103-115.

**FICHANT S.** (1996) « Endommagement et anisotropie induite du béton de structure. Modélisation approchée". Thèse de doctorat à l'Ecole normale supérieure de Cachan.(1996) pp111 .

**FREDRICH J. T. EVANS B. ET WONG T. F.** (1989) "Micromechanics of the brittle to plastic transition in Carrara marble". Journal of geophysical Research, 94(B4): 4129-4145, 1989.

**GATELIER N.** (2001) "Etude expérimentale et théorique de l'endommagement des roches anisotropes", Thèse de doctorat, Université de Grenoble I



**GATELIER N., PELLET F. ET LORET B** (2002) "Mechanical damage of anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 39,(2002) pp. 335-354.

**GOTTSCHALK R. R. KRONENBERG K. RUSSEL J. E. ET HANDIN J.**( 1990) "Mechanical anisotropy of gneiss: failure criterion and textural sources of direction behaviour". *J. Geophys Res* 1990;95(B13):21613-34.

**GRIGGS D. and MILLER W. B.** (1951) "Deformation of Yule marble" : Part I - Compression and extension experiments on dry Yule marble at 10000 atmospheres confining pressure, room temperature". *Geol. Soc. Am. Bull.* 62, pp. 853-862.

**GUÉGUEN Y. PALCIAUSKAS V.**( 1992) "Introduction à la physique des roches". Hermann,1992.

**HAIED A.** (1995) "Etude expérimentale de la rupture en mode localisé dans un grès", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille(1995).

**HAMMAD A.** (1992) "Etude expérimentale du comportement d'un matériau anisotrope : caractérisation de la rupture et détermination des paramètres élastiques ", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille (1992).

**HARDY H. R.** (1993) "Evolution of in situ stresses in salt using acoustic emission techniques". 7th Symp. On salt,vol.1 pp 49-58.

**HOBBS D. W.** (1960) "The strength and stress - strain characteristics of Oakdale Coal under triaxial compression". *Geol. Mag.* 97, pp. 422-435.

**HOEK E.** (1995) "Rock fracture under static stress conditions". Technical report, Natl. Mech. Eng. Res. Inst., Pretoria, 1995. C.S.I.R Rept. MEG 383.

**HOMAND F. HOUPERT R.** (1989) "Thermally induced microcracking in granites". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.26, pp. 125-134.

**HOMAND F. MOREL E. HENRY J-P. CUXAC P. HAMMADE E.** (1993), "Characterisation of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1993;30(5):527-35.

**IKOGOUS S.** (1990) "Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un grès", Thèse de Doctorat Génie civil : Université de Lille 1 : 1990 ; 523.

**JALBOUT A. SIBAI M. SHAO; J. F.** "Experimental investigation of anisotropic damage in brittle sandstone". *EUROCK* (2004) Salzburg. pp539-544 .

**KARAMIE M. H.** (1998): "Etude expérimentale du comportement poromécanique d'une roche endommageable", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille(1998).

**KEMENY J. M. et COOK N.G.W** ( 1991) "Micromechanics of deformation in rock". In: Shah SP, editor. Toughening mechanism in quasi- brittle materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. pp 155-88.

**KHAZRAIE R.** (1995) “Etude expérimentale et modélisation de l’endommagement anisotrope des roches fragiles”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille(1995).

**KRANZ R. L.** “Microcracks in rocks” (1983): review. *Technophys*, 100: 449-480, 1983

**KWASNIEWSKI M. A.** (1993) Mechanical behavior of anisotropic rocks. In *Comprehensive Rock Engineering*. Vol 1 : Fundamentals. Pergamon Press, Oxford. pp. 285-312.

**LAJATAI EZ.** (1998) “Microscopic fracture processes in granite”. *Rock Mech Rock Eng.* 1998;31(4):237-50.

**LAVROV A. , VERVOOT A. ET WVEVERS M.** (2003) “An anisotropic damage formation in brittle rock: Experimental study by means of acoustic emission and Kaiser effect”. *J. Phy. IV France* 105 (2003).

**LEMAITRE J. CHABOUCHE J-L.**(1978) “Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement”. *J. de Mécanique appliquée*. Vol 2, N° 3, 1978.

**LU Y.F. SHAO JF.** (2002), “Modelling of anisotropic damage in brittle rocks under compression dominated stresses”. *Int. J. Numer. Anal. Mech. Geomech.* . 2002;26 :945-961.

**MARTIN C. D.** (1993) “Stringth Of Massive Lac du Bonnet Grante Around Underground Opening”. Ph.D.thesis, Departement of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, 278pp.

**NASSERI M.H.B. et K. S RAO et RAMAMURTHY T.** (2002) “Anisotropic strength and deformational behaviour of Himalayan schist” . *Int. J. of Rock and Mining Sciences* 4 (2003) 3-23.

**NIANDOU H.** (1994) “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(1994).

**NIANDOU H., SHAO JF., HENRY J-P.**(1997) “Fourmaintraux D. Laboratory investigation of the mechanical behavior of Tournemire shale”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1997;34(1):3-16.

**NIHEI K.T., HILBERT L.B. , COOK N.G.W , NAKAGAWA S. ET MYER L.R.** (2003); “frictional effects on the volumetric strain of sandstone”. *Int. J. of Rock and Mining Sciences* 37 (2000) 121-132.

**PELLEGRINO A.** (1995) “comportement fragile des roches : dégradation des propriétés élastique et anisotropie induite par les contraintes ”, Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées. Paris(1995).

- PERES RODRIGUES F.** (1966) "Anisotropy of granite : modulus of elasticity and ultimate strength ellipsoids, joint systemes, slopes attitude and their correlation". Proceedings of the first Congress ISRM, vol. 1. Lisbon, 1966. p.721-31.
- PERRODON A.** (1966) Géologie du pétrole, bibliothèque de l'ingénieur- géologue. Presses Universitaires de France.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P. E. AND SIEVER R.** (1972) " sand and Sandstone" Springer, Berlin.
- PROTHERO D. , SCHWAB F. ,** ( 2003)"Sedimentary geology (an introduction to sedimentary rocks and stratigraphy)". Freeman & Co, 422 pp. (août 2003)  
ISBN : 0716739054.
- READING H.G. ,** (1996). "Sedimentary environments: processes",. Blackwell Science, 688 pp. ISBN : 0632036273
- RICARD Y. et BERCOVICI D.**(2002) , "Two – phase damage theory and crustal rock failure : the theoretical 'void' limit, and the prediction of experimental data". Geophys. J. int. (2003) 155, 1057-1064.
- SAINT- LEU C. LERAU J. SIRIEYS P.**(1978) "Mécanismes de rupture des schistes de lacauene (Tarn) : influence de la pression isotrope". Bull Minéral 1978 ;101 :437-41(in French).
- SAYEHI M.**(1992): "Etude expérimentales de l'endommagement du grès de fontainbleau", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille(1992).
- SHAO J.F., ZHANG Y., SIBAI M., BURLION N., S.Y. XIE, A. JALBOUT** (2005), "An elastoplastic damage model with chemical degradation for cement pate under compressive stress" Euromech, février 2005, Austria.
- SIBAI M. KONDO D. HENRY J.P et HOMMAND F.** (1993) " Tension beahvior of a granit under thermal induced microcracking". EUROCK (1993) Rorredam pp387-393 .
- SIBAI M.**(1990): "Etude de l'interaction fluide-squelette dans les roches méthodes expérimentales et modélisation", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille(1990).
- SIBAI M., DORMIEUX L., PENSEE V., KONDO D.** (2003) " Effet de la microfissuration en poroélasticité des roches : étude expérimentale et analyse théorique". 16 CFM, Nice, 1-5 septembre, 2003.
- SIBAI M., SHAO J.F., JALBOUT A.** (2004)." Etude de l'instabilité de la jonction en puits branché ", Beyrouth, 2004, conférence international de géotechnique, 737-742, Shahrour I. et all.
- STACEY T. R.** (1981) "A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock" Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstra., Vol. 18, 1981, Pages 469-474.

**STEAD D., EBERHARDT E. SZCZEPANIK Z.**(1999) “Acoustic emission studies on stress-induced damage in sandstone”. Proceedings of the Ninth Congress ISRM, vol. 1. Paris, 1999. p. 681-695.

**SU K. BOUNENNI A.** (1998) “couplage entre la perméabilité et l’endommagement dans les matériaux des sites du Gard de l’Est et de la Vienne”, Rapport intermédiaire, ANDRA, B RP 0 G3S 98 – 021/A, G3S Ecole polytechnique, Palaiseau.

**TANG C. A. , THAM L. G. , LEE P.K.K. , YANG T. H. , et LI L.C.,** (2002) “Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure”. Int. J. of Rock and Mining Sciences 39 (2002) 477-489.

**TUCKER M.** ,( 2001) “Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks”. Blackwell, 262 pp. 262 pages 3rd edition. ASIN : 0632057351.

**WALSH J. B.** (1965) “The effect of cracks on Poisson’s ratio”. Journal of Geophysical Research, 70:5249-5257,1965.

**ZHAO D., SWOBODA G. , LAABMAYAR** (2004) “Damage mechanics and its application for the design of an underground theatre”. Tunnelling and underground space Technology 19 (2004) 567-575.

**ZHAO Y.** (1998), “Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock”. Int. J. of Rock and Mining Sciences 35 (1998) 349-366.



# ANNEXES

**ANNEXE I**  
**ESSAIS MÉCANIQUES**  
**SUR LE BLOC VIERGE**

## I – Annexe I: Bloc Vierge

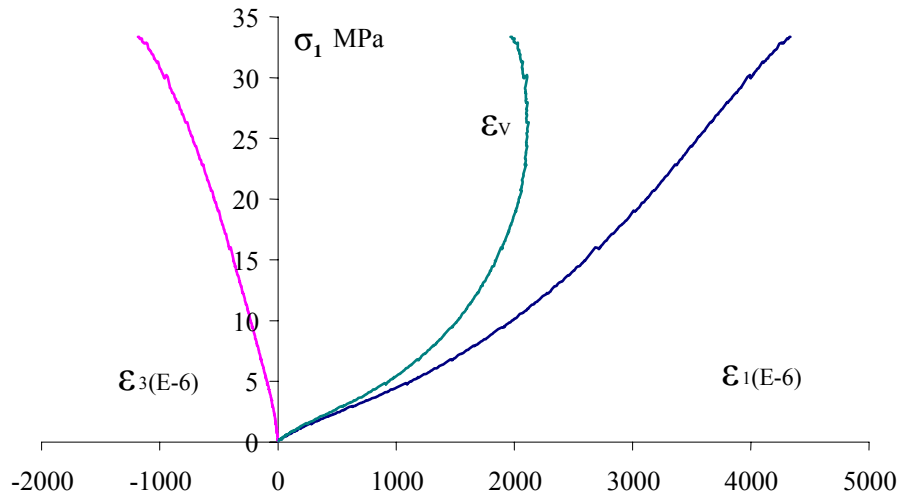
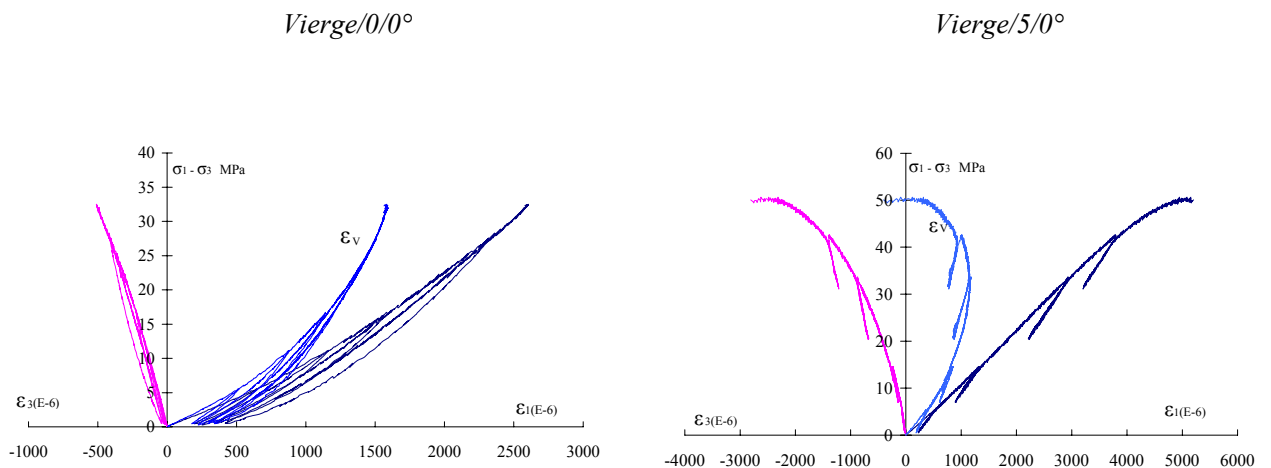


Figure I.1 : essai de compression monotone bloc vierge  $\theta = 90^\circ$



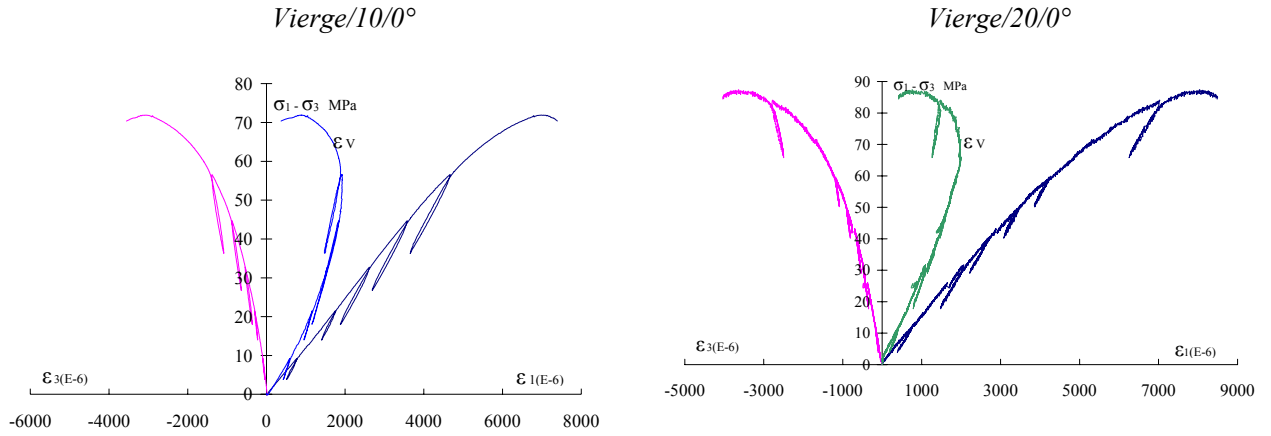


Figure I.2 : Essais de compression simple et triaxial avec cycles de charge – décharge

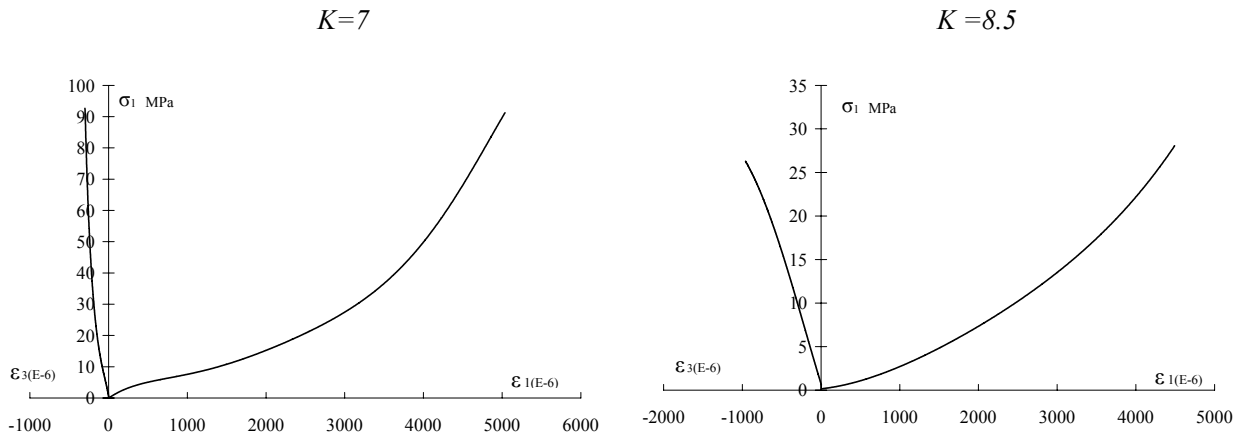


Figure I.3 : Essai proportionnel avec  $K=7$  et  $8.5$

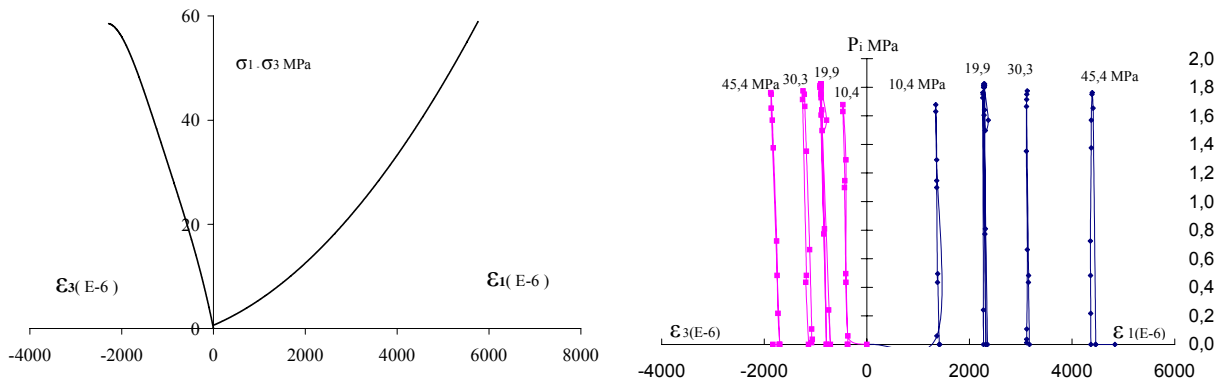
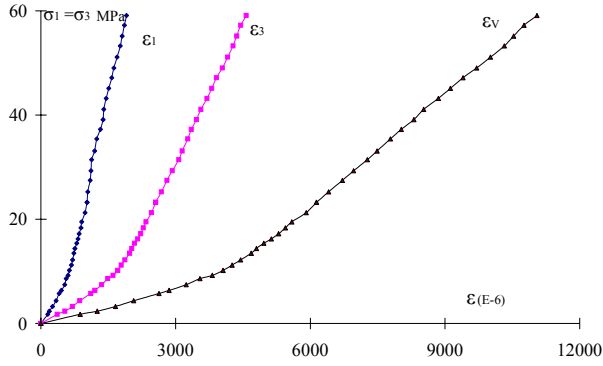


Figure I.4 : Essai triaxial monotone avec montés en pression interstitielle  $P_c = 5$  MPa

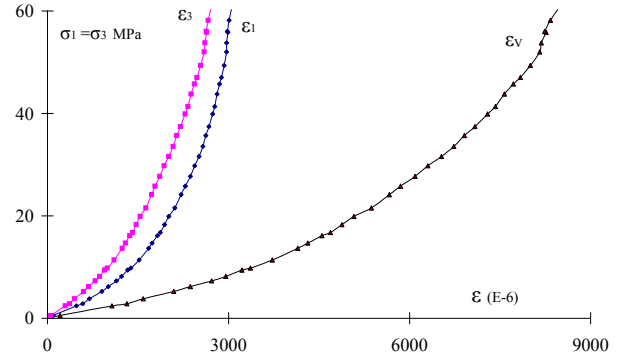


**ANNEXE II**  
**ESSAIS MÉCANIQUES**  
**SUR LE BLOC 1**

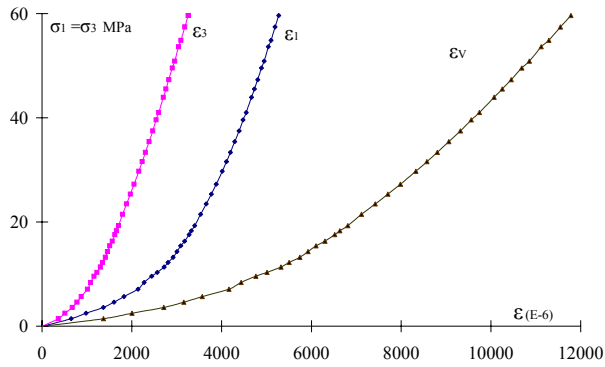
## II- Annexe II : bloc 1



Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $c\theta = 0^\circ$



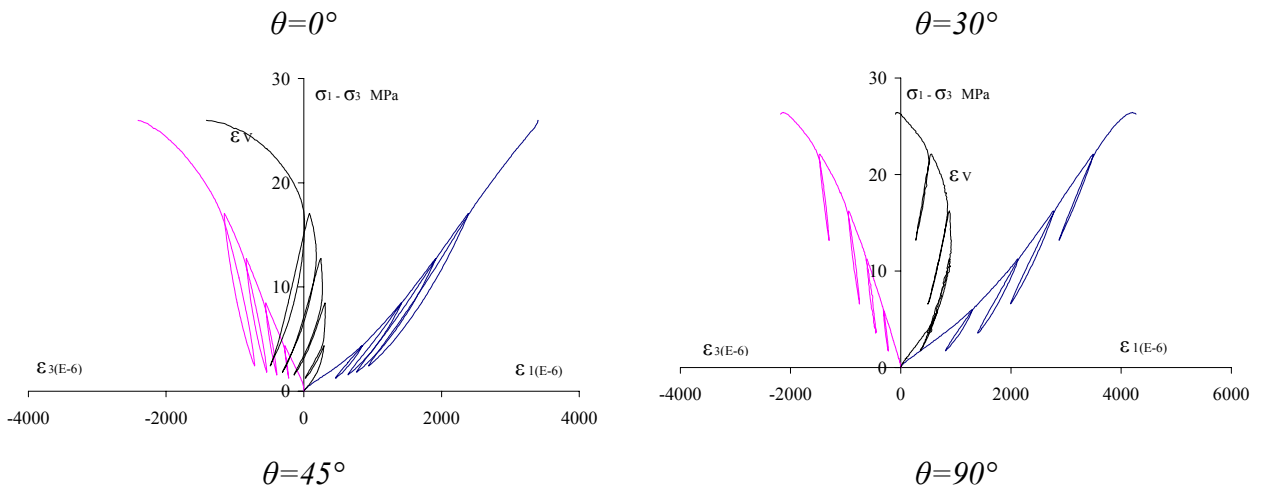
Essai hydrostatique sur un échantillon  $\theta = 30^\circ$



Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta = 90^\circ$

Figure II-1 : Essais hydrostatiques sur différentes orientations de carottage

➤ Essai de compression avec cycles de charge – décharge



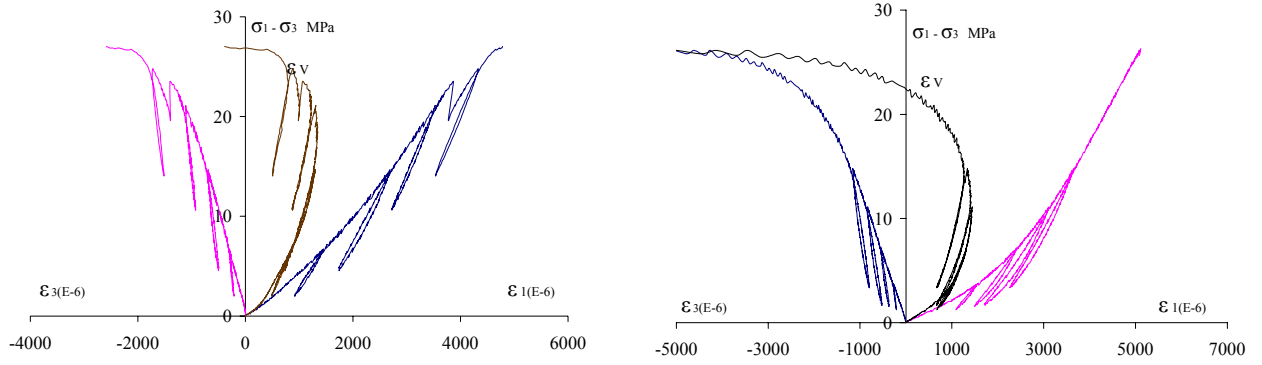
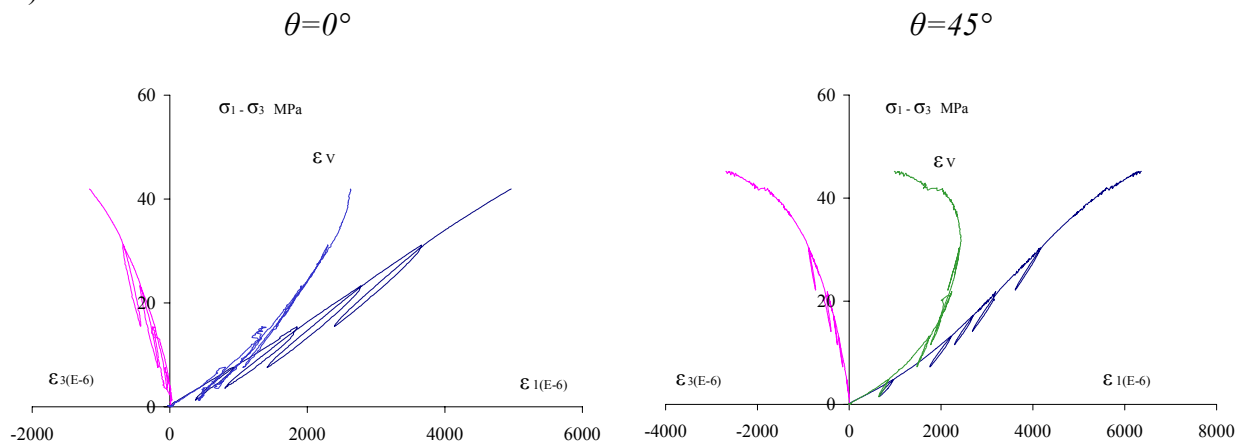
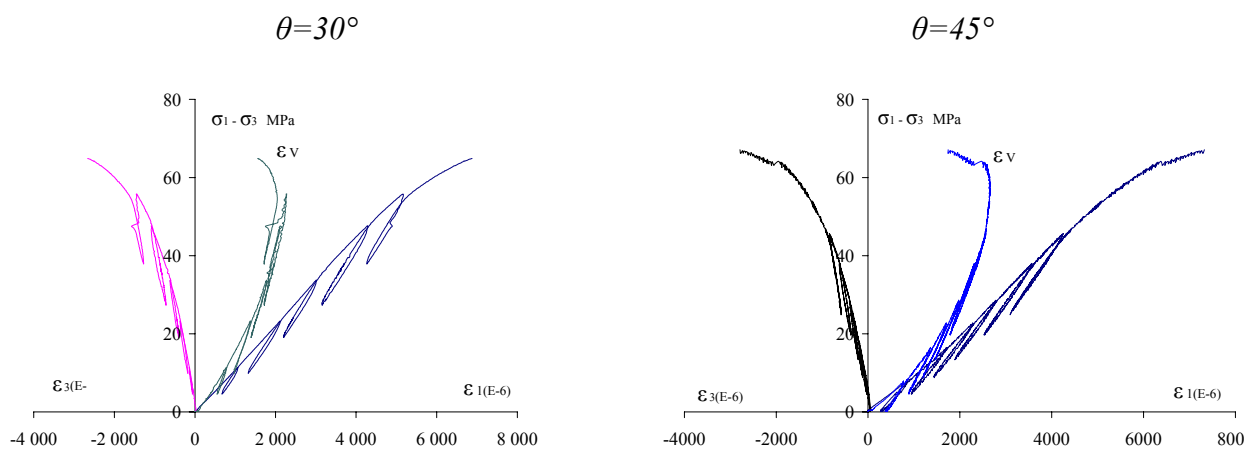


Figure II.2 : Essais de compression simple avec cycles de charge – décharge

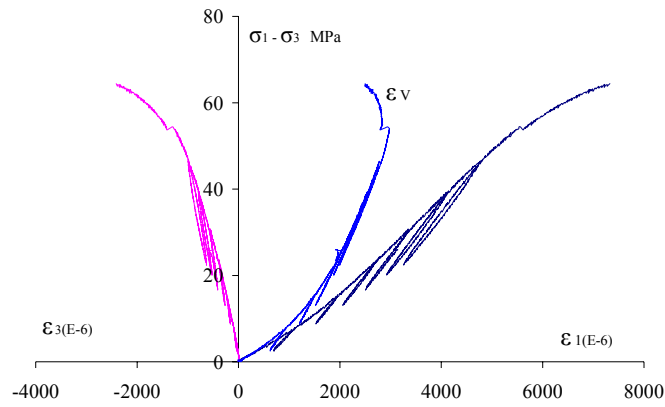
A)  $P_c=5$  MPa



B)  $P_c=10$  MPa

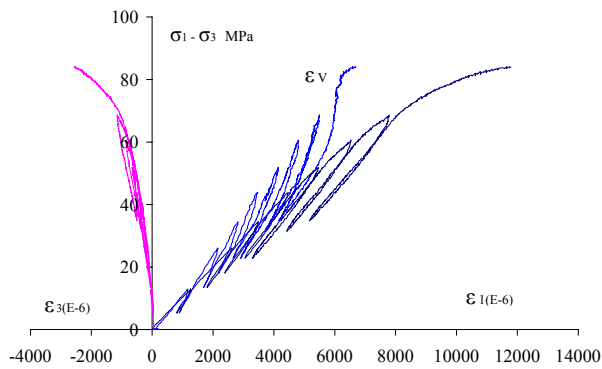


$\theta=90^\circ$

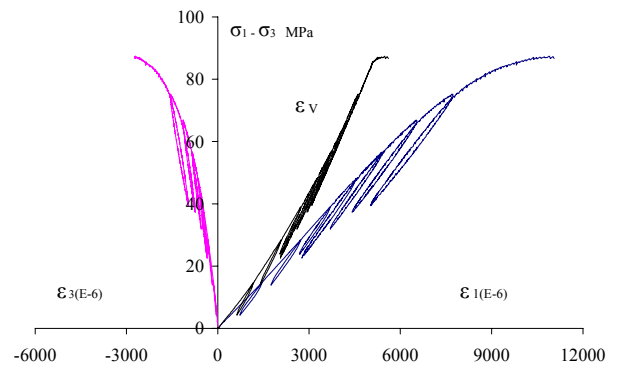


C)  $P_c=20$  MPa

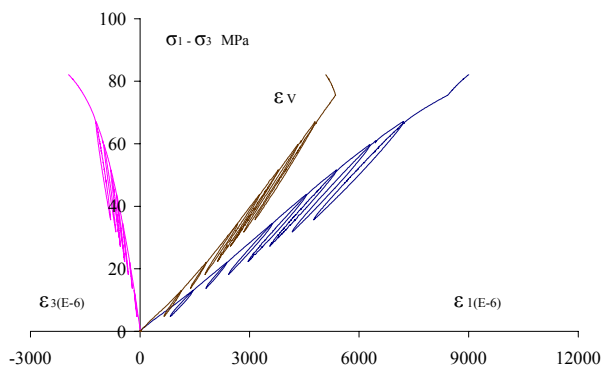
$\theta=0^\circ$



$\theta=30^\circ$



$\theta=45^\circ$



$\theta=90^\circ$

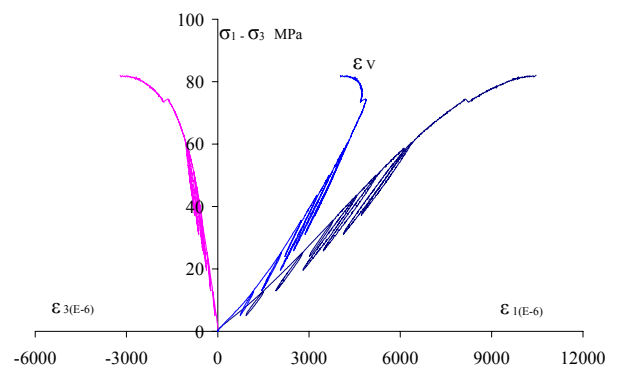


Figure II-3 : Essai de compression triaxial avec cycles de charge – décharge pour différentes pression de confinement et sur différentes orientations de carottage

➤ Essai de traction

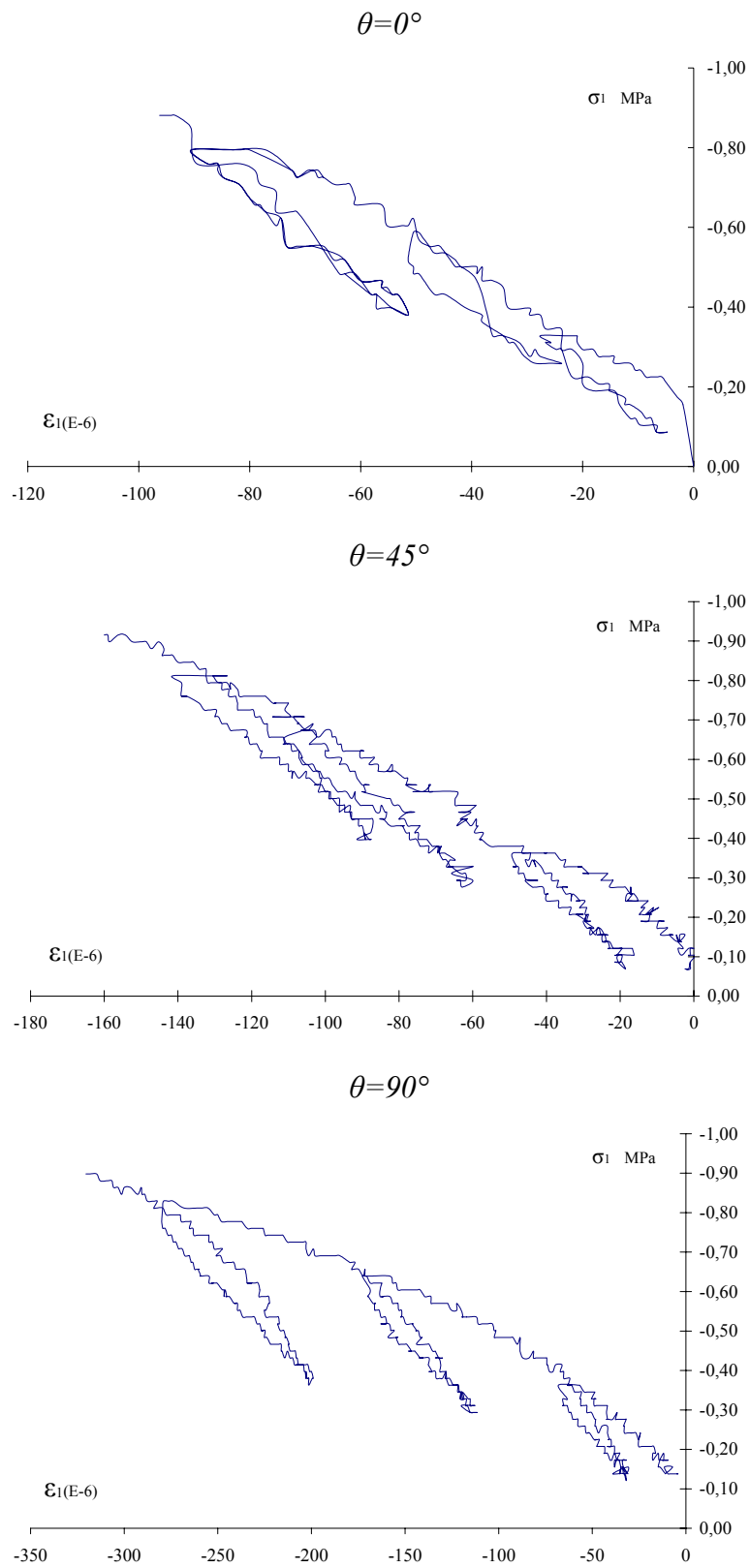
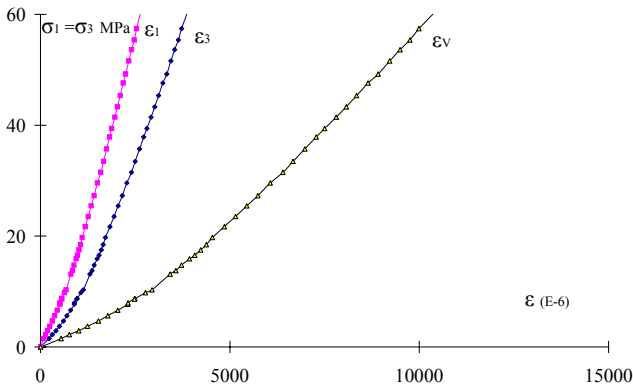


Figure II-4 : courbes lissées d'essais de traction directe

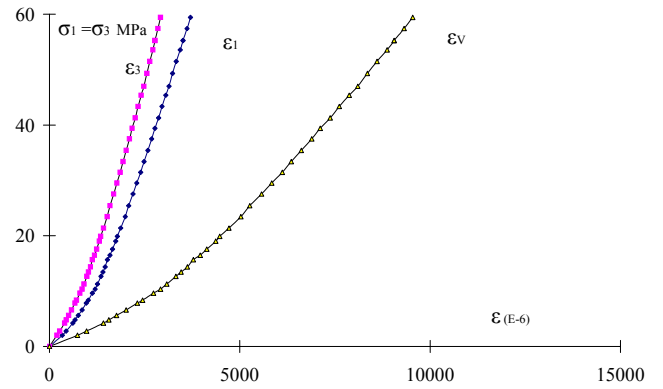
**ANNEXE III**  
**ESSAIS MÉCANIQUES**  
**SUR LE BLOC 2**

### III- Annexe III : Essais sur le bloc 2

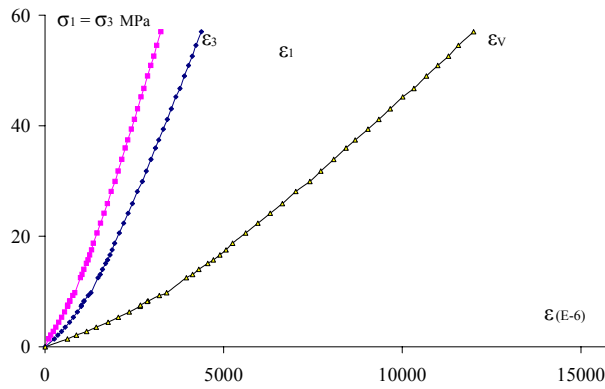
➤ Essai hydrostatique



Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta=0^\circ$



Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta=45^\circ$

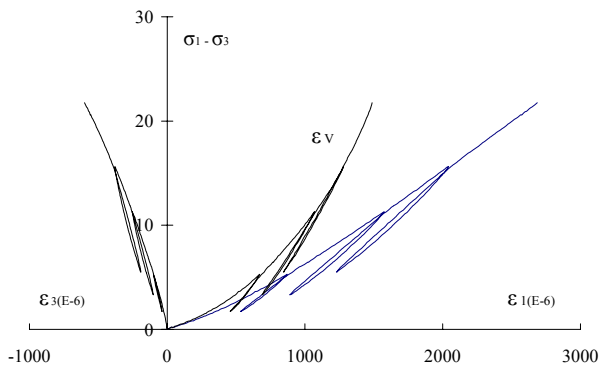


Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta=90^\circ$

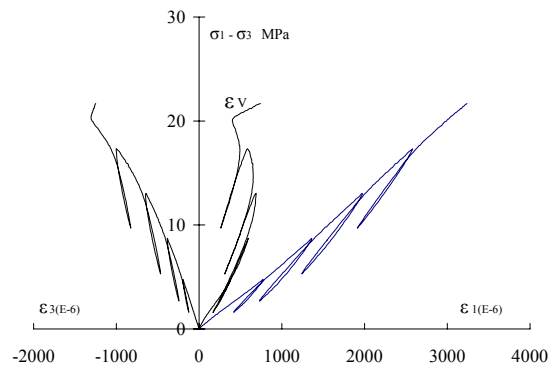
Figure III-1 : Essais hydrostatiques sur différentes orientations de carottage

➤ Essai de compression avec cycles de charge – décharge

$\theta=0^\circ$



$\theta=45^\circ$



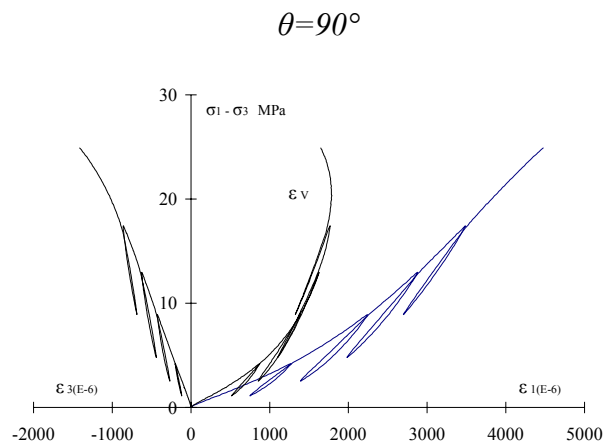
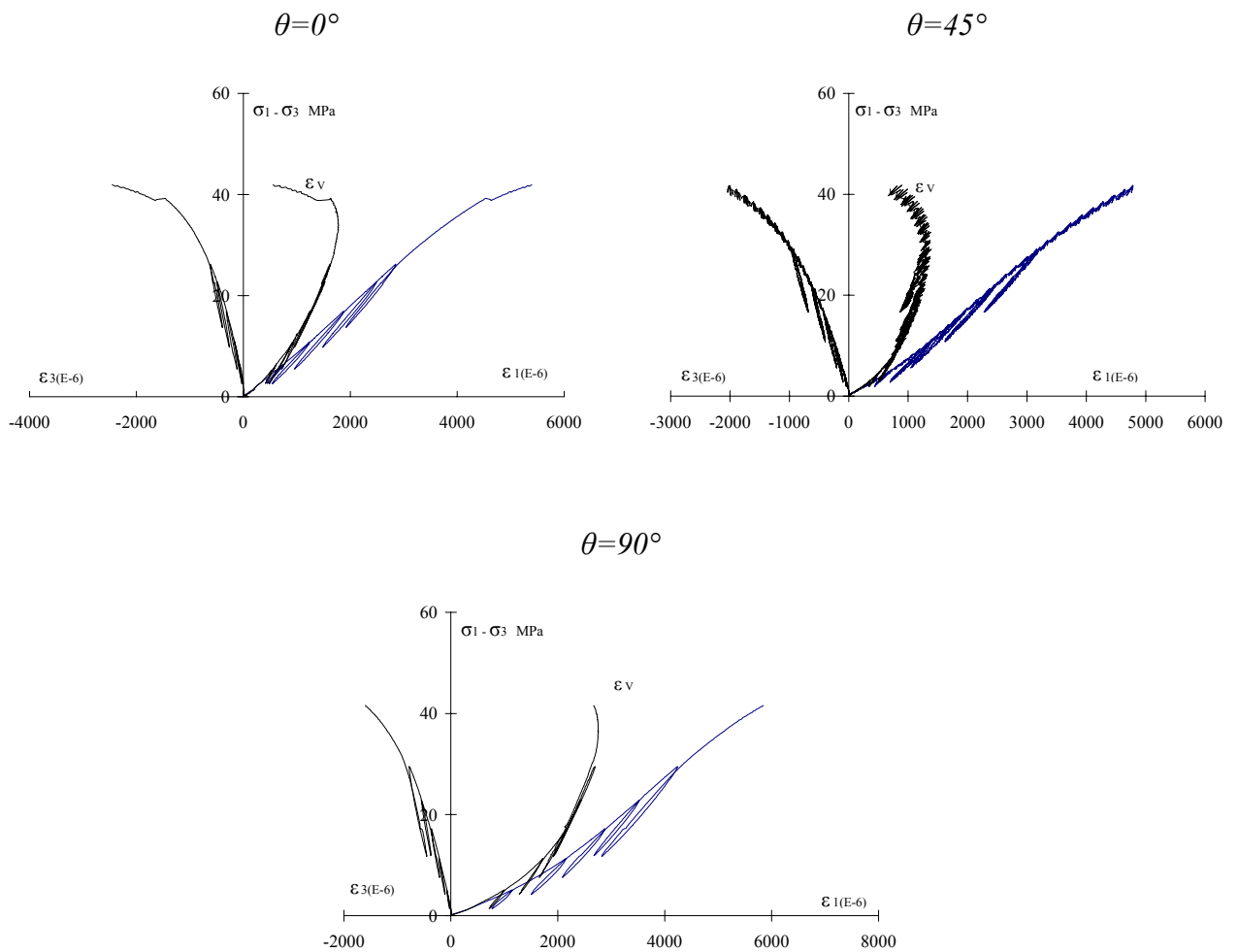


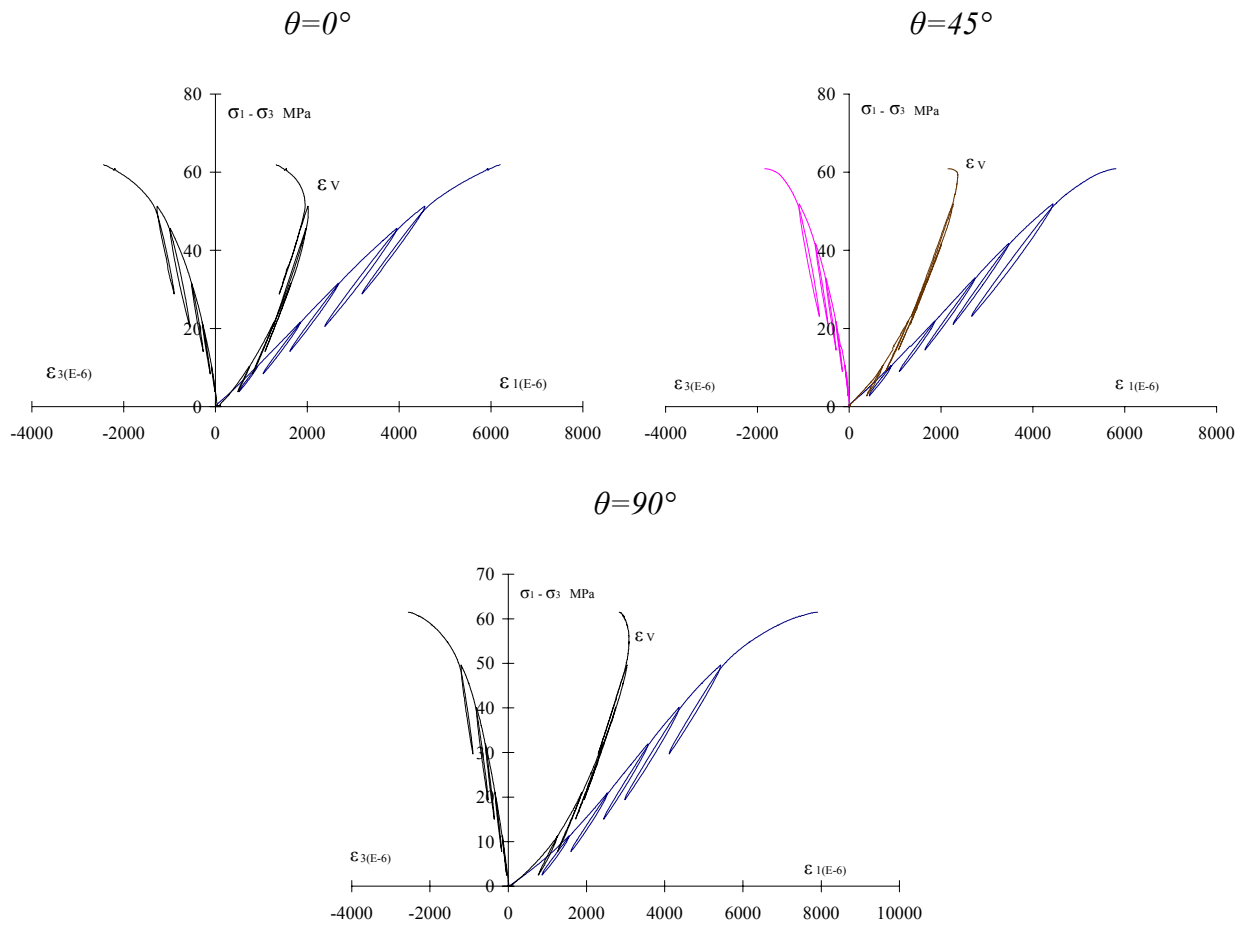
Figure III.2 : Essais de compression simple avec cycles de charge – décharge

A)  $P_c=5$  MPa





B)  $P_c=10$  MPa



C)  $P_c=20$  MPa

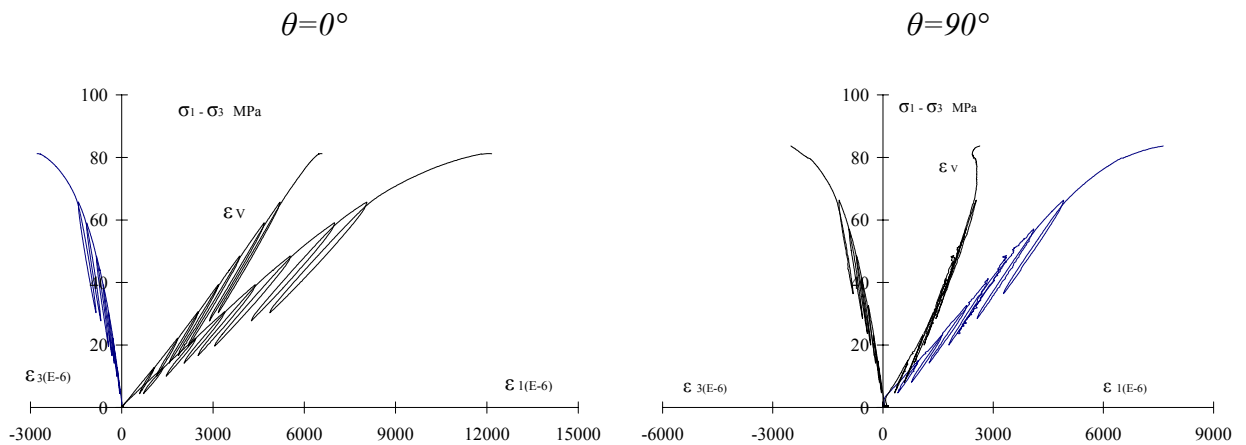
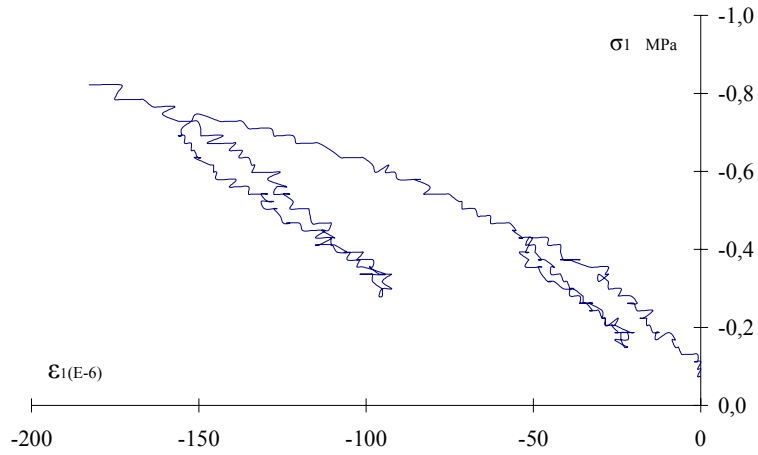


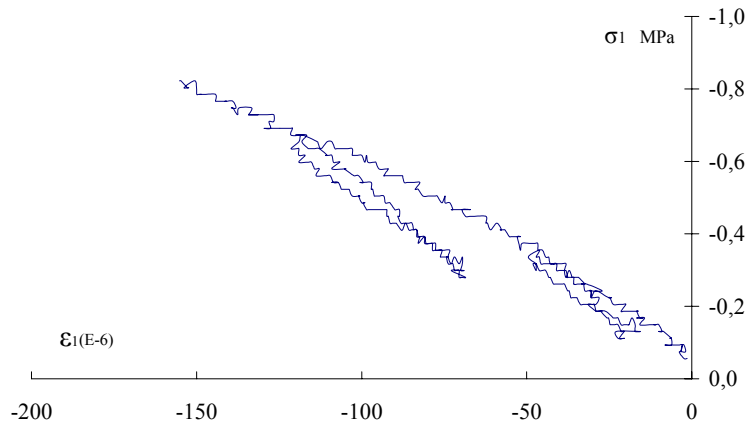
Figure III-3 : Essai de compression triaxiale avec cycles de charge – décharge pour différentes pression de confinement et sur différentes orientations de carottage

➤ Essai de traction

A)  $\theta=0^\circ$



B)  $\theta=45^\circ$



C)  $\theta=90^\circ$

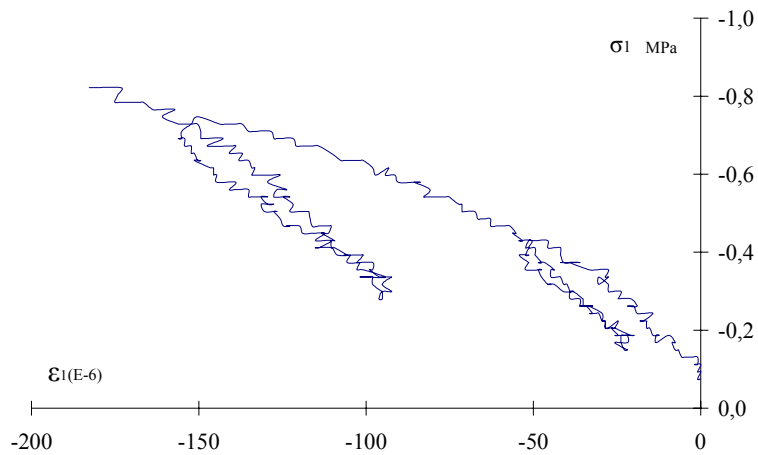
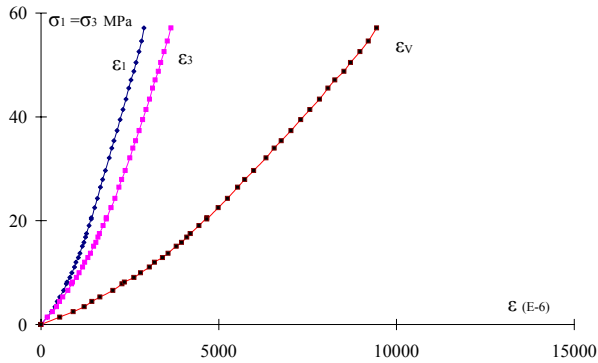


Figure III-4 : courbes lissées d'un essai de traction directe

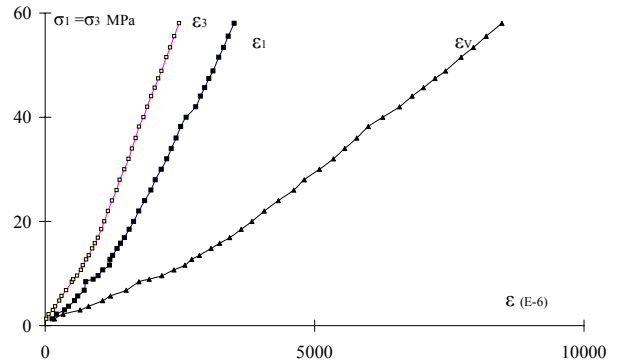
**ANNEXE IV  
ESSAIS MÉCANIQUES  
SUR LE BLOC 3**

## IV Annexe IV : Essais sur le bloc 3

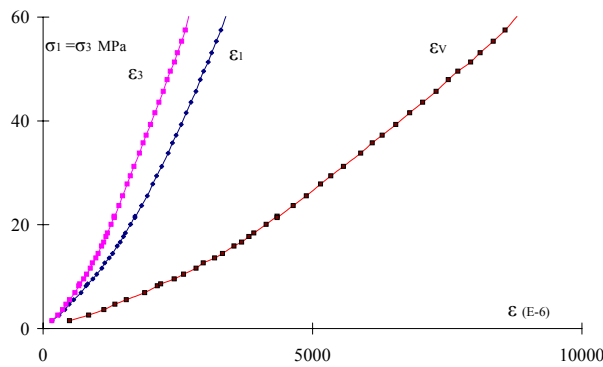
### ➤ Essai hydrostatique



Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta=0^\circ$



Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta=45^\circ$

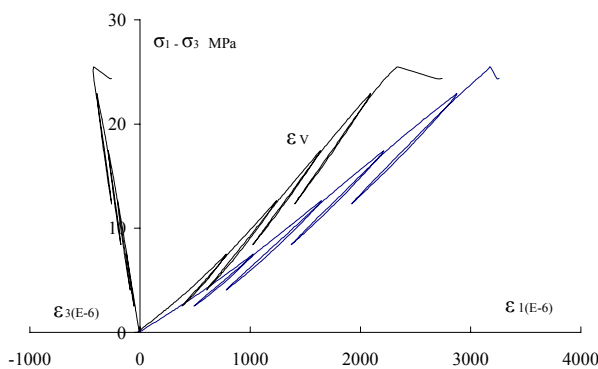


Essai hydrostatique sur un échantillon avec  $\theta=90^\circ$

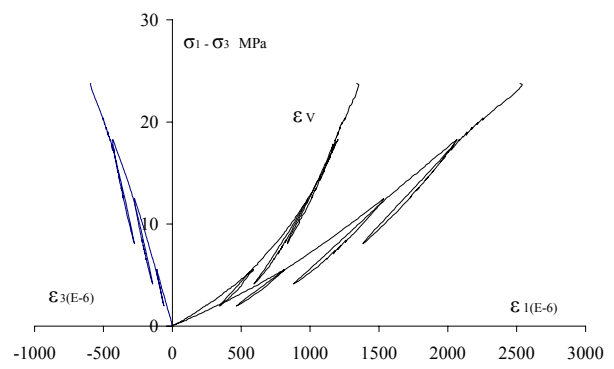
Figure IV.1 : Essai hydrostatique sur différentes orientations de carottage

### ➤ Essai de compression simple avec cycles de charge – décharge

$\theta=0^\circ$



$\theta=45^\circ$



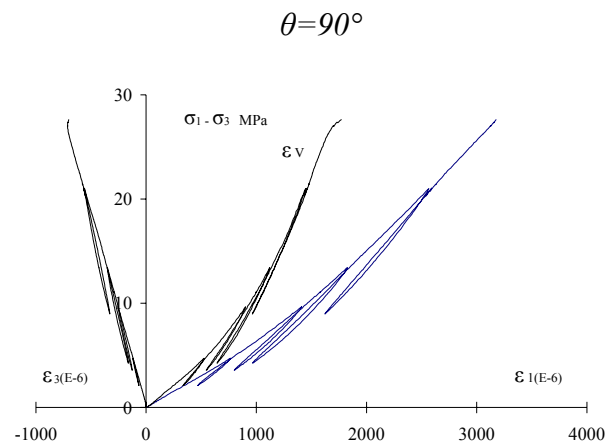
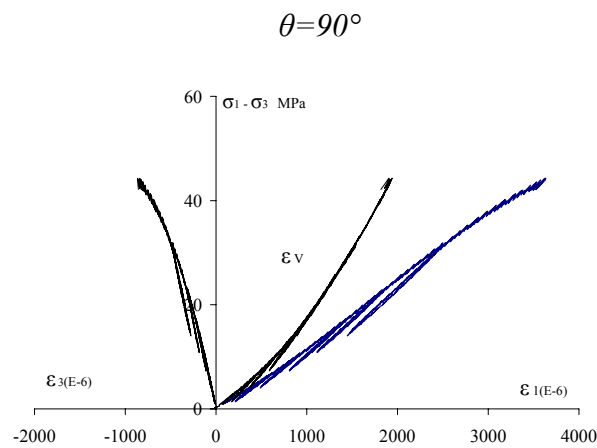
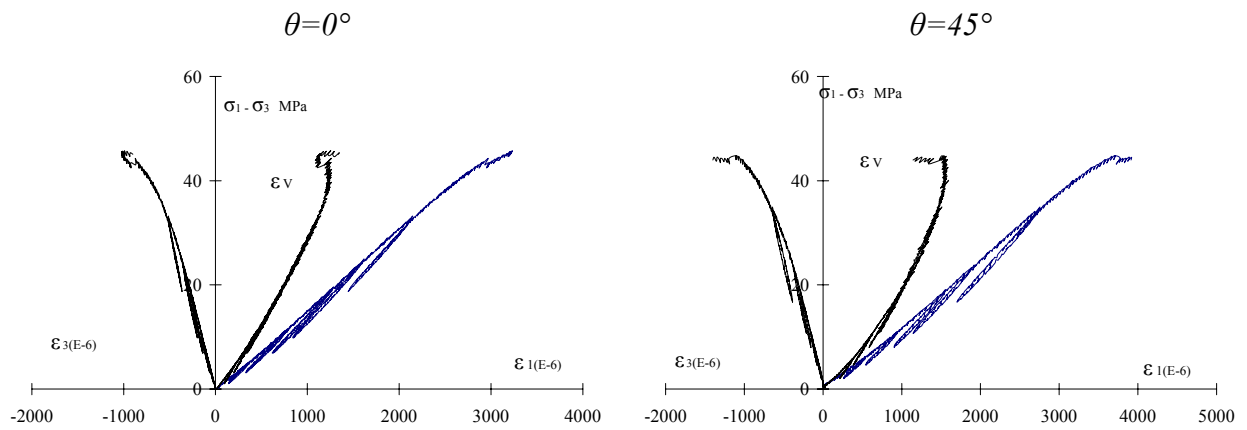


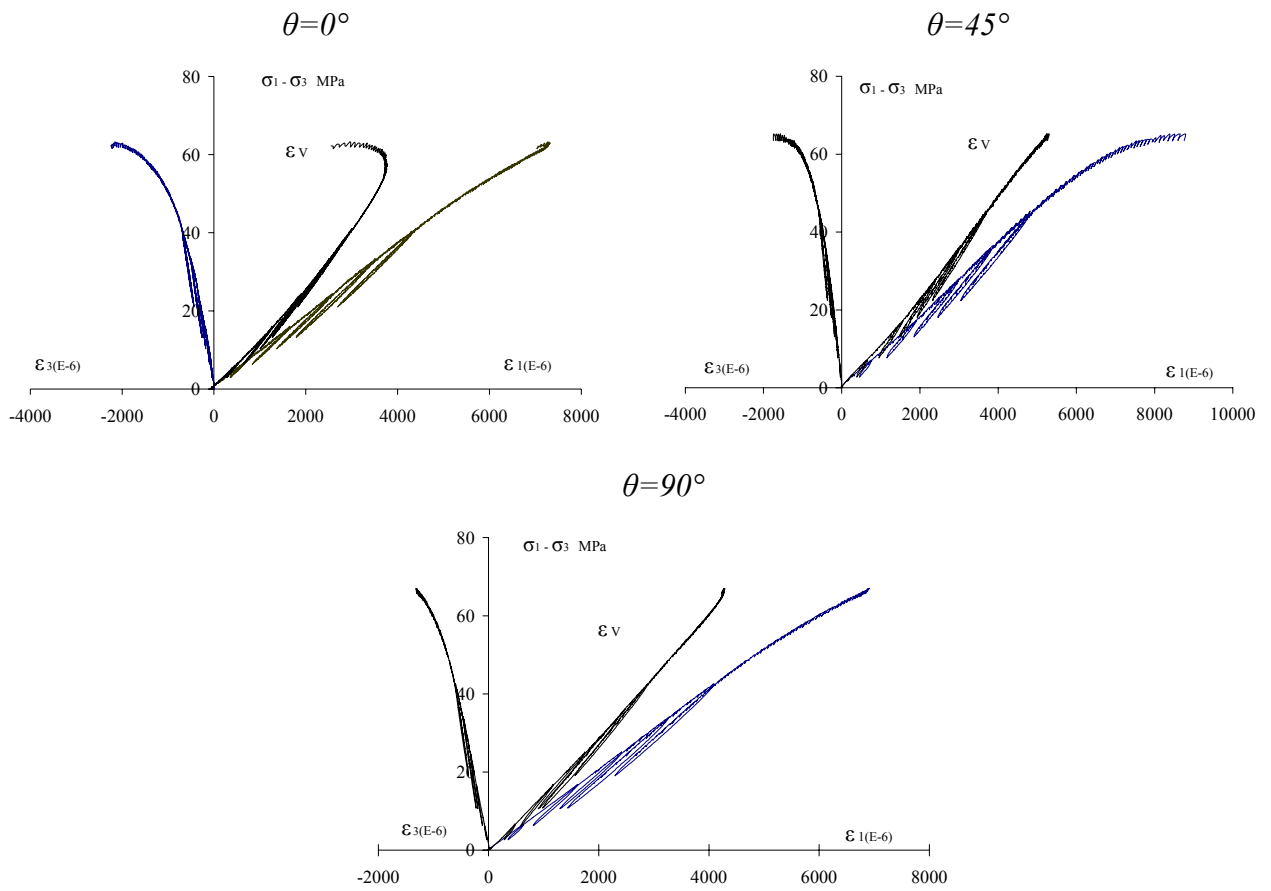
Figure IV.2 : Essais de compression simple avec cycles de charge – décharge

➤ Essai de compression triaxiale avec cycles de charge – décharge

Pc=5 MPa



Pc=10 MPa



Pc=20 MPa

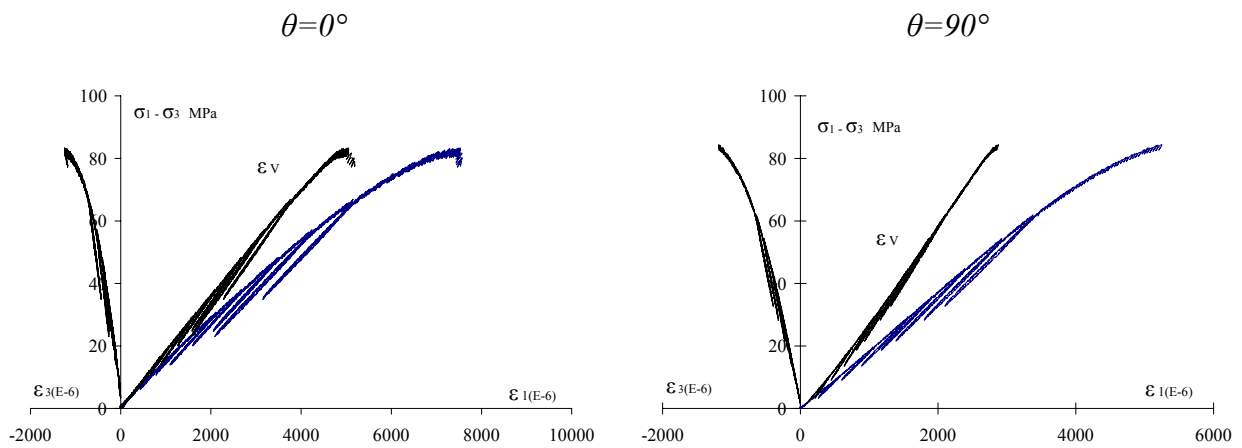


Figure IV.3 : Essai de compression triaxiale avec cycles de charge – décharge pour différentes pression de confinement et sur différentes orientations de carottage

➤ Essai de traction

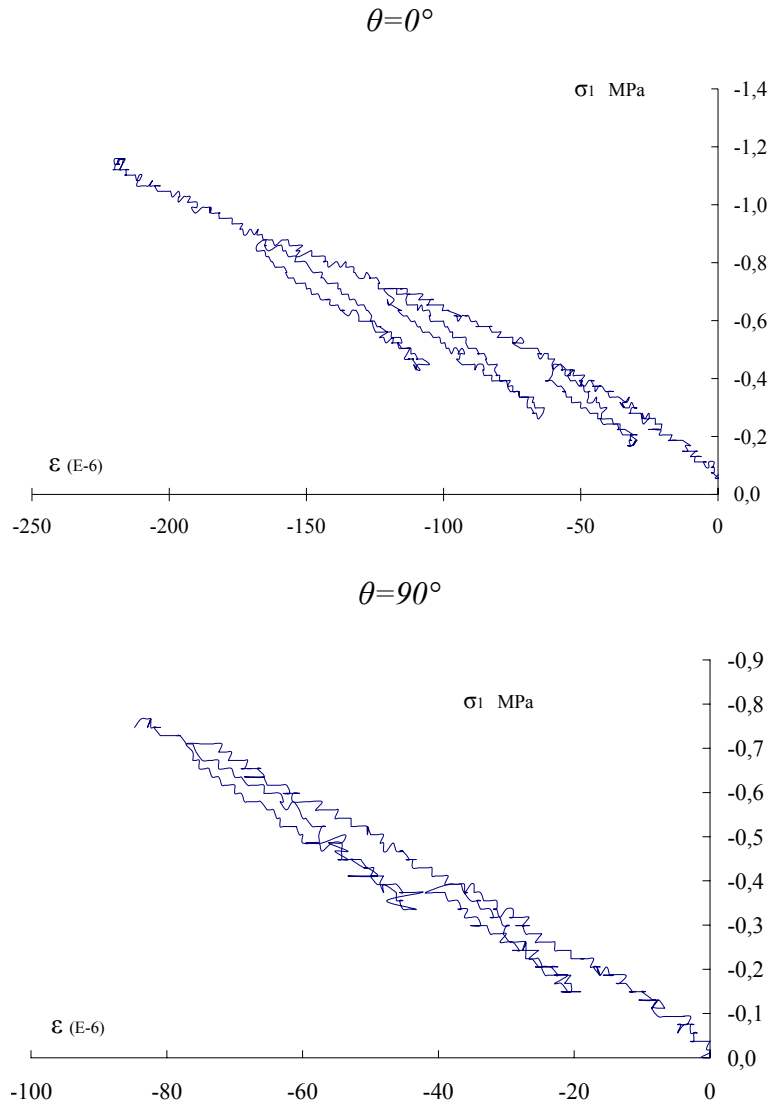


Figure IV-4 : courbes d'essais de traction directe

**ANNEXE V**  
**COMPARAISON DU**  
**BLOC 3**



## V- Annexe V : LES COMPARAISONS DU BLOC3

### ➤ V.1 : Modules initiaux

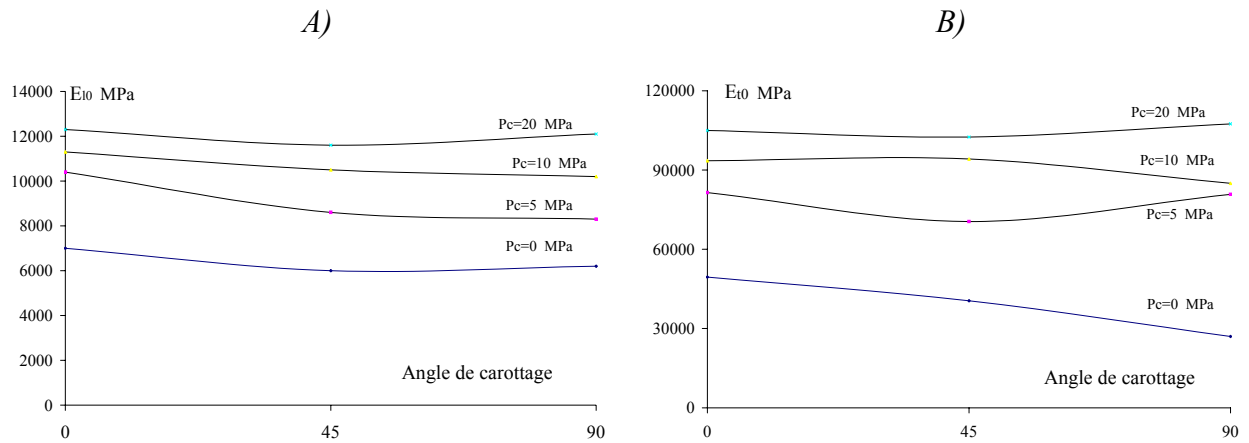
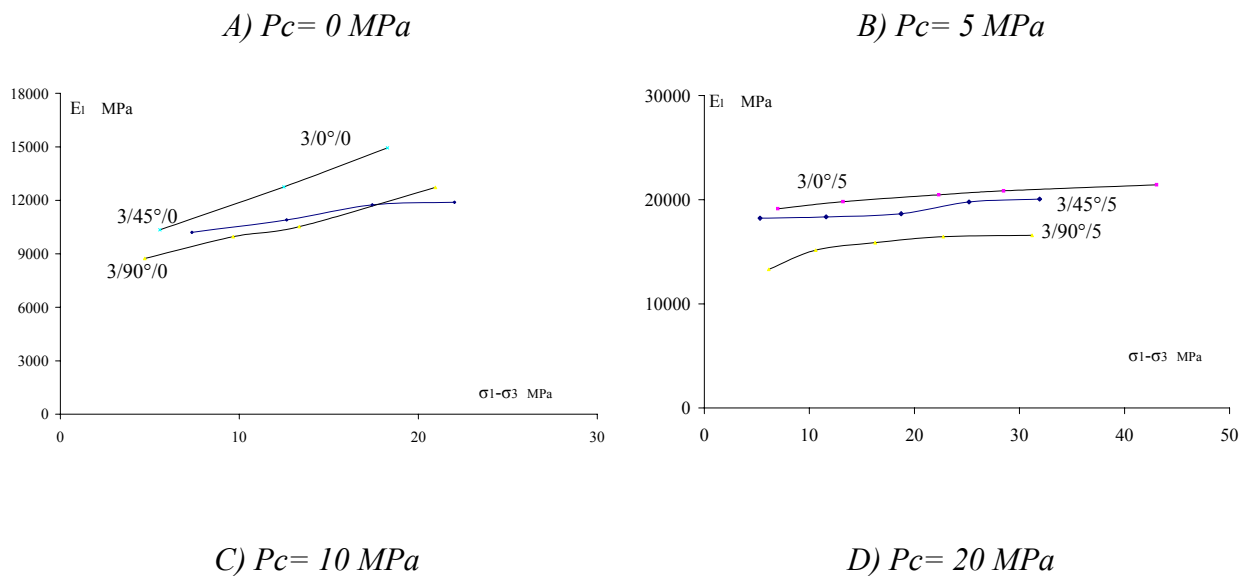


Figure V.1 : Valeurs de  $E_{10}, E_{10}$  pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

### ➤ V.2 : Modules sécants



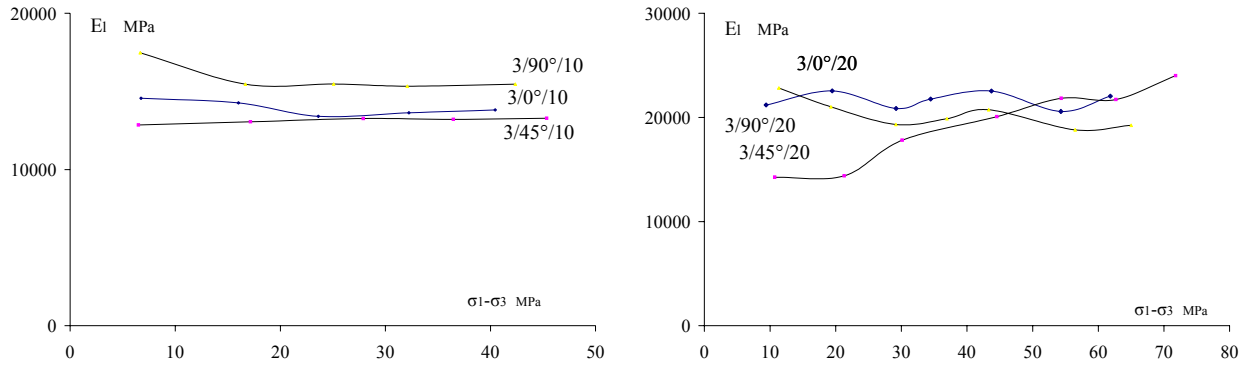


Figure V.2 : Valeurs de  $E_t$  en fonction de la contrainte de déviatorique pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

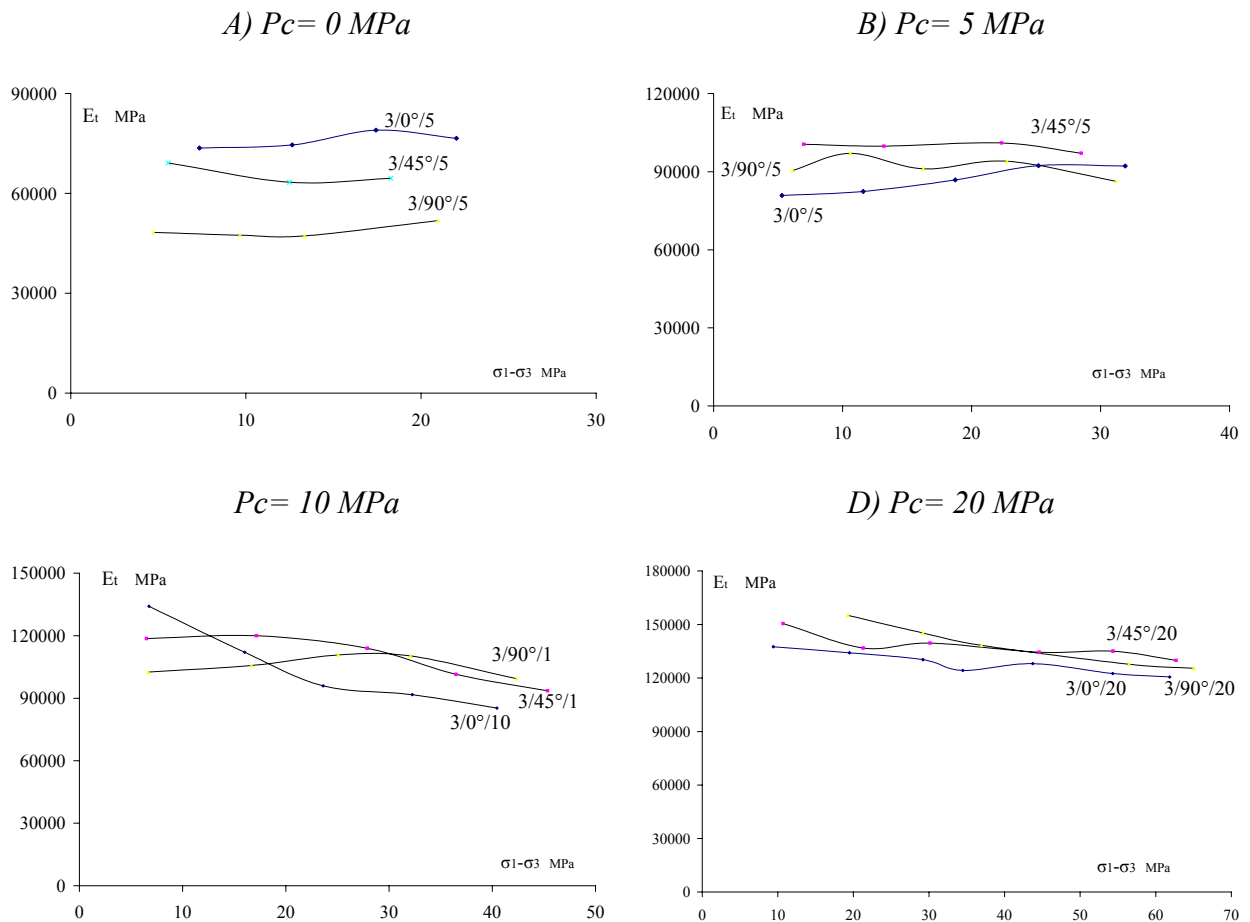


Figure V.3 : Valeurs de  $E_t$  en fonction de la contrainte de déviatorique pour différentes orientations avec différentes valeurs de pression de confinement

➤ V.3 : Résistance à la rupture

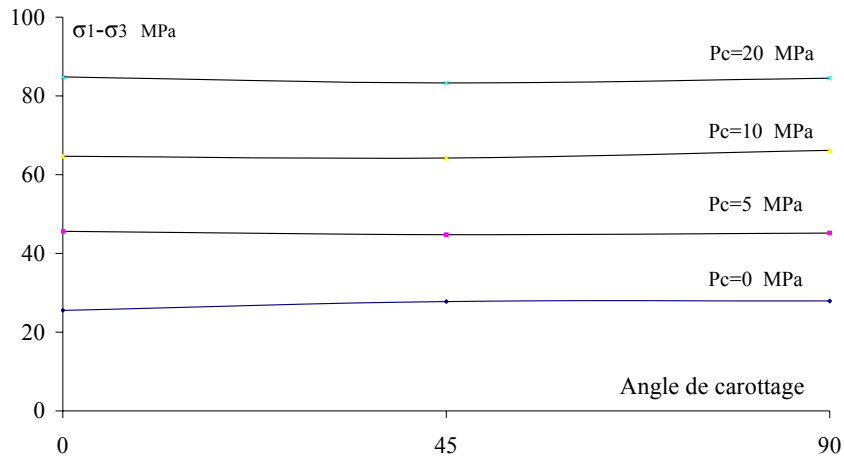


Figure V.4 : Comparaison des valeurs de la résistance à la rupture en fonction de l'orientations se carottage

➤ V.4 : Comparaisons hydrostatiques

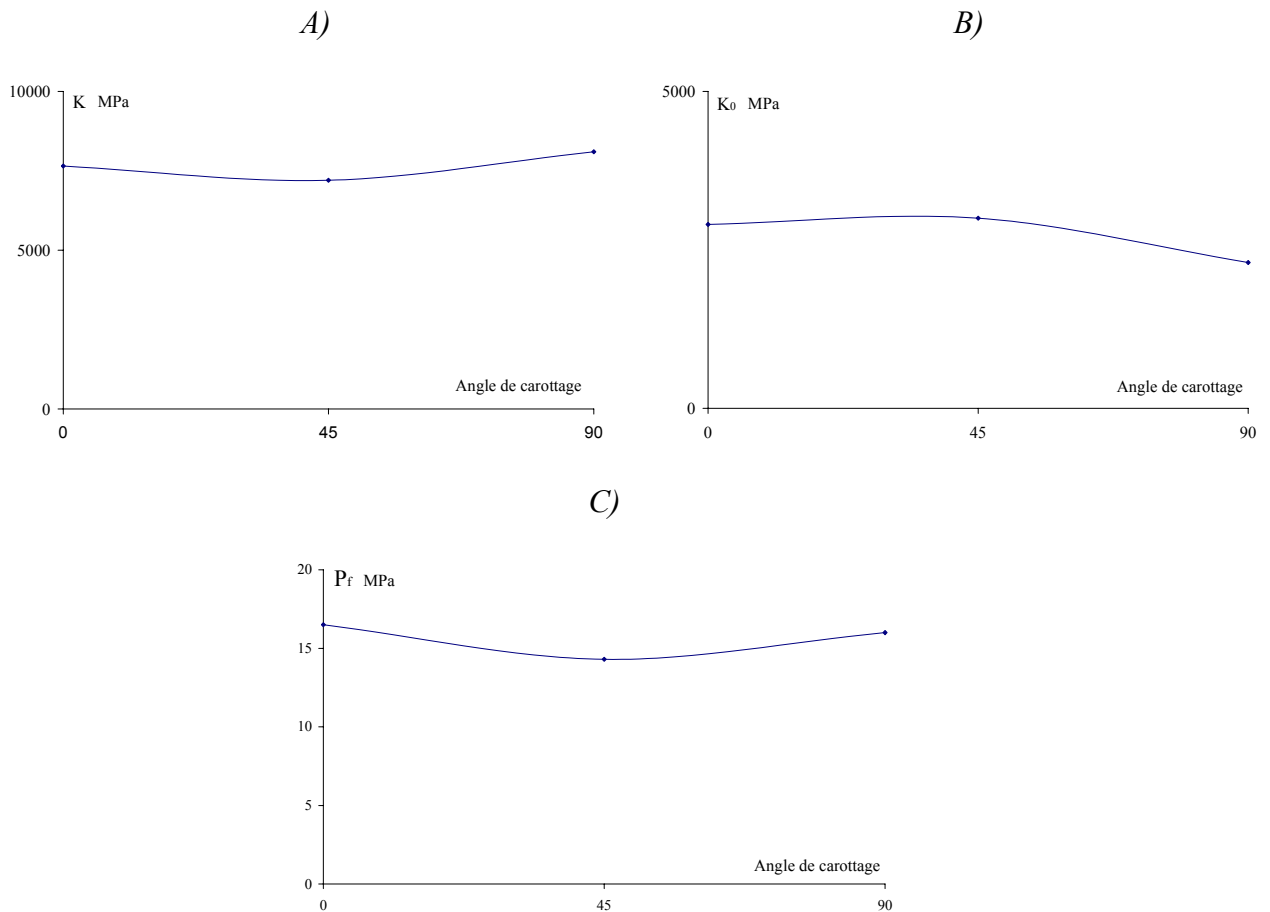


Figure V.5 : Comparaison des paramètres hydrostatiques en fonction de l'angle de carottage  
 A) module de compressibilité B) module de compressibilité initiale  
 C) la pression de fermeture de microfissures

➤ V.5 : Essais de traction

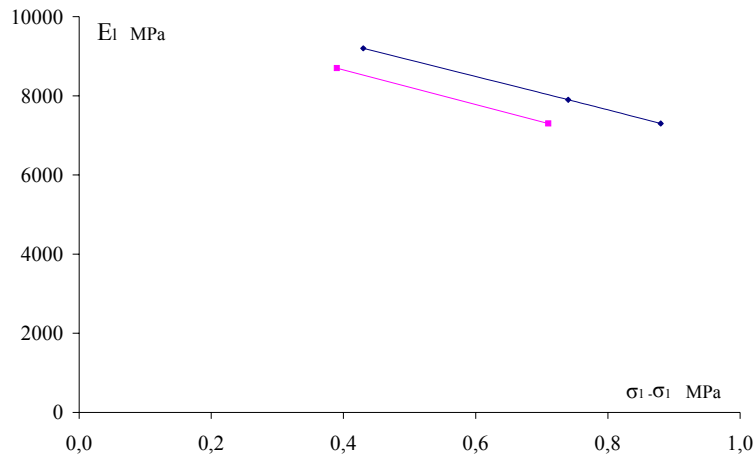


Figure V.6 : Comparaison des modules de sécantes en traction en fonction de la contrainte déviatorique et pour différents orientations de carottage

➤ V.6 : Perte de linéarité et le seuil de dilatance

Tableau V.1 : valeur des seuils du dilatance

	$\theta=0^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=90^\circ$
$P_c=0$ MPa	5,5	4,5	6,3
$P_c=5$ MPa	9,7	11	11,5
$P_c=10$ MPa	14,3	17	16
$P_c=20$ MPa	/	/	/

**ANNEXE VI  
COMPARAISON  
ENTRE BLOCS (LES  
MODULES SECANTS)**

## VI- Annexe VI : LES MODULES SECANTS

### ➤ VI-1 : Modules Longitudinaux Sécants

Pc=0

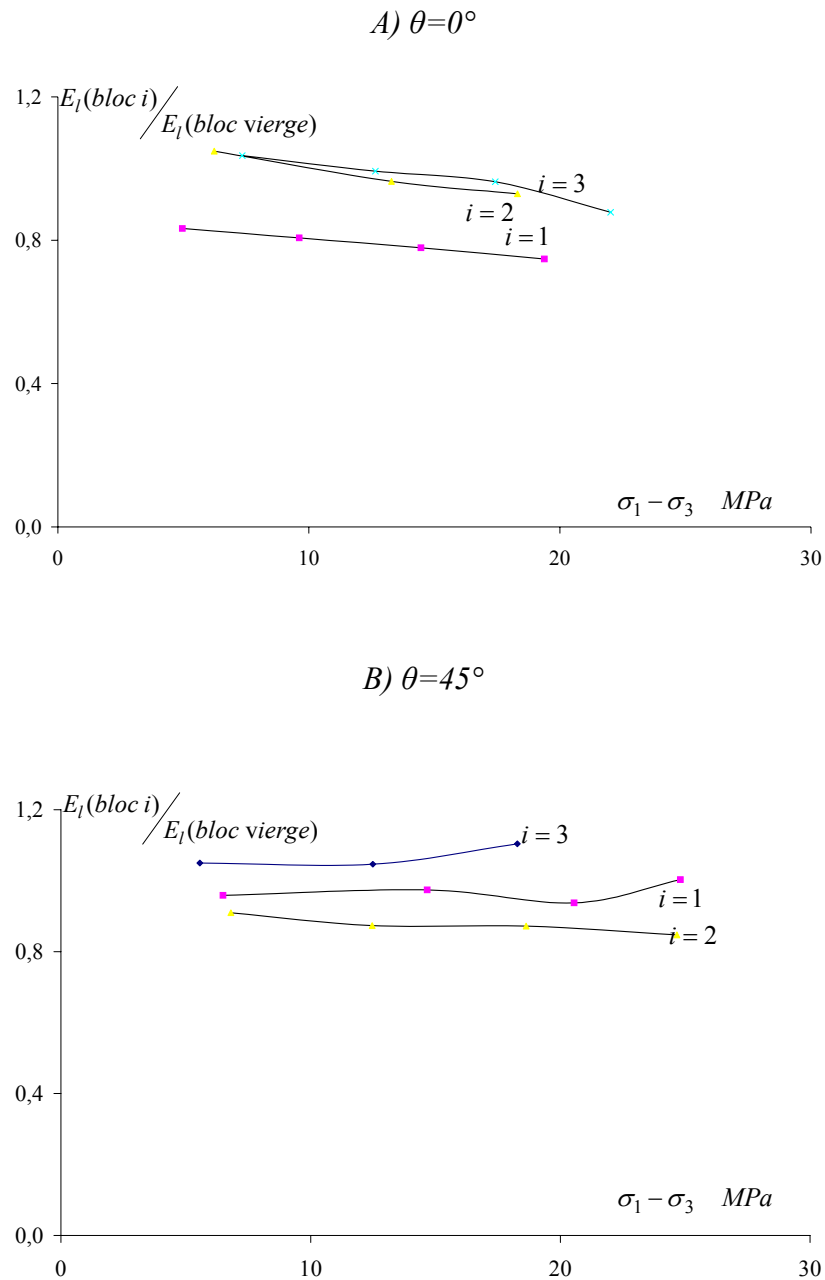


Figure VI.1 : rapport des modules longitudinale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (compression simple)

Pc=5 MPa

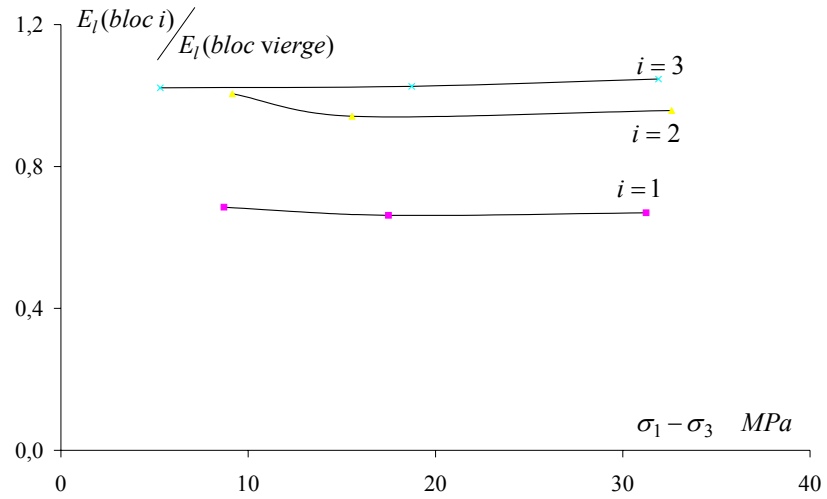
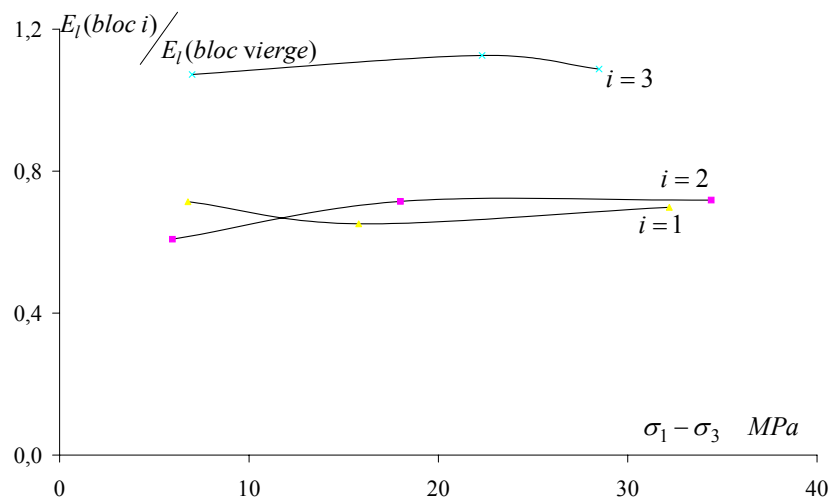
A)  $\theta=0^\circ$ B)  $\theta=45^\circ$ 

Figure VI.2 : rapports des modules longitudinale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs d'angle de carottage (Pc=5 MPa)

Pc=10 MPa

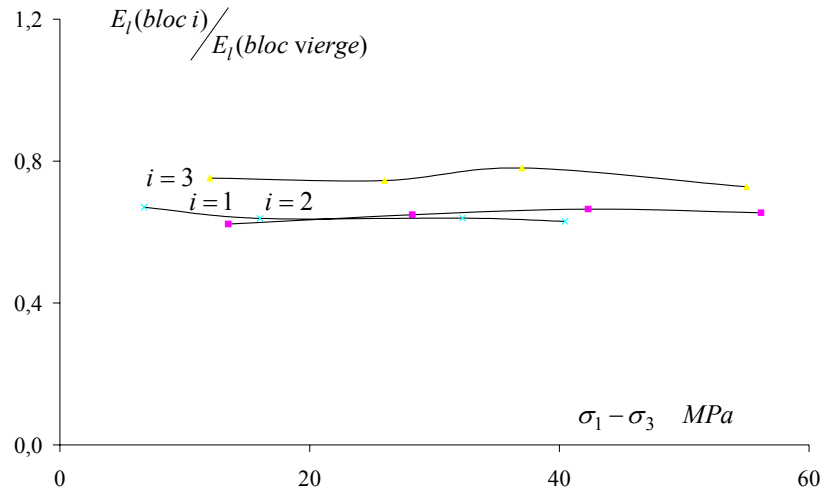
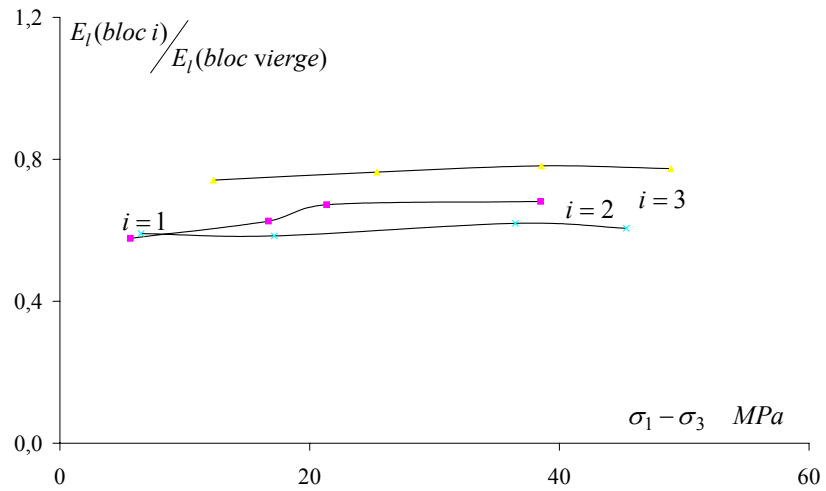
A)  $\theta=0^\circ$ B)  $\theta=45^\circ$ 

Figure VI.3 : rapports des modules longitudinale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (Pc=10 MPa)



Pc=20 MPa

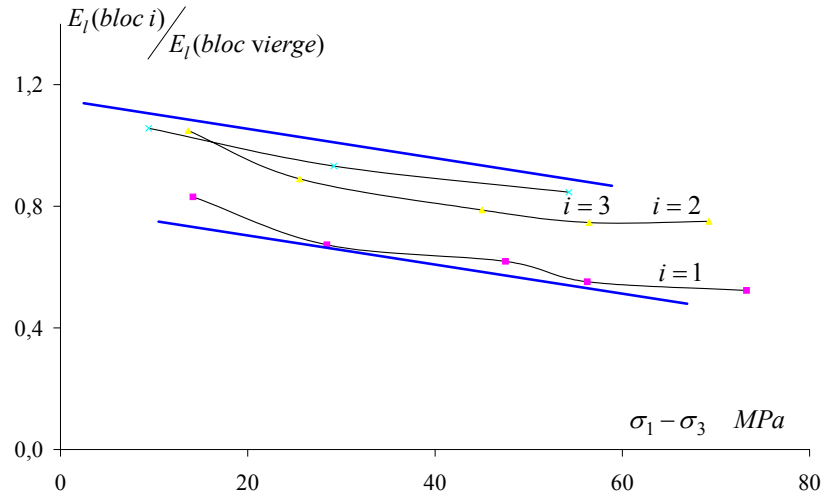
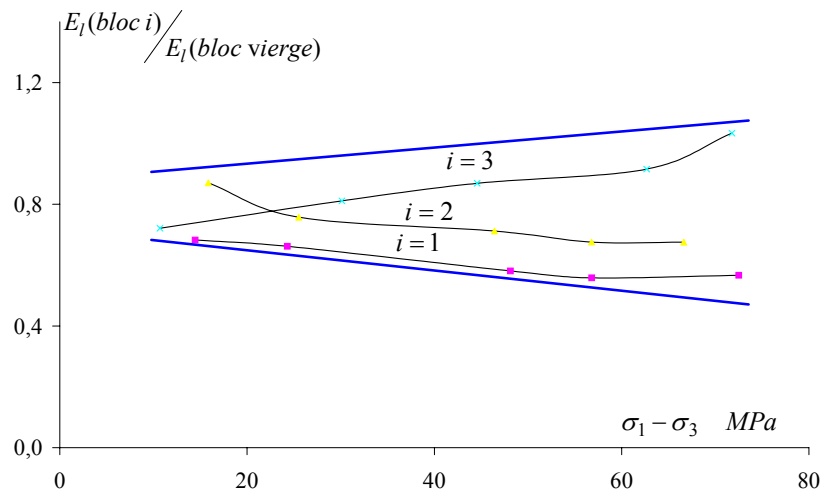
A)  $\theta=0^\circ$ B)  $\theta=45^\circ$ 

Figure VI.4 : rapports des modules longitudinale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (Pc=10 MPa)

## ➤ VI-2 : Modules Transversaux Sécantes

Pc=0 MPa

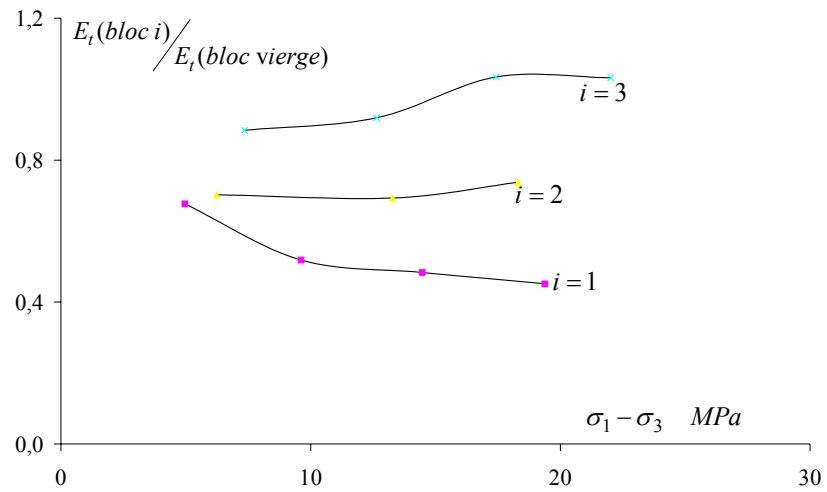
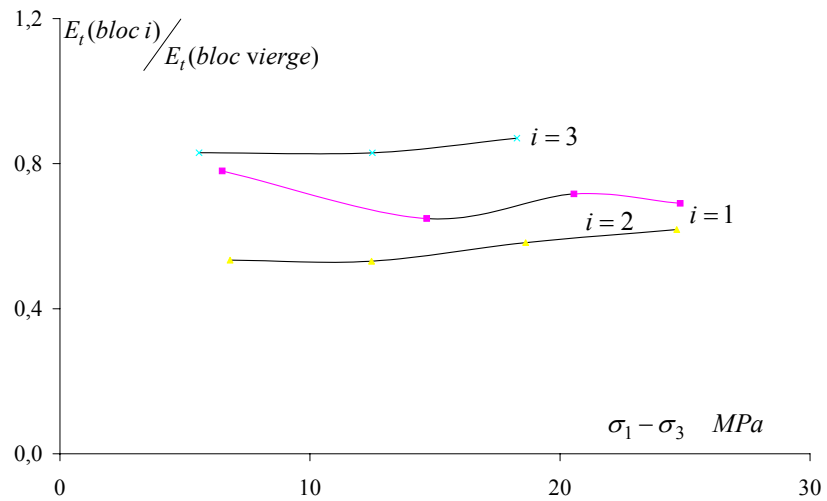
A)  $\theta=0^\circ$ B)  $\theta=45^\circ$ 

Figure VI.5 : rapports des modules transversale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (compression simple)

Pc=5 MPa

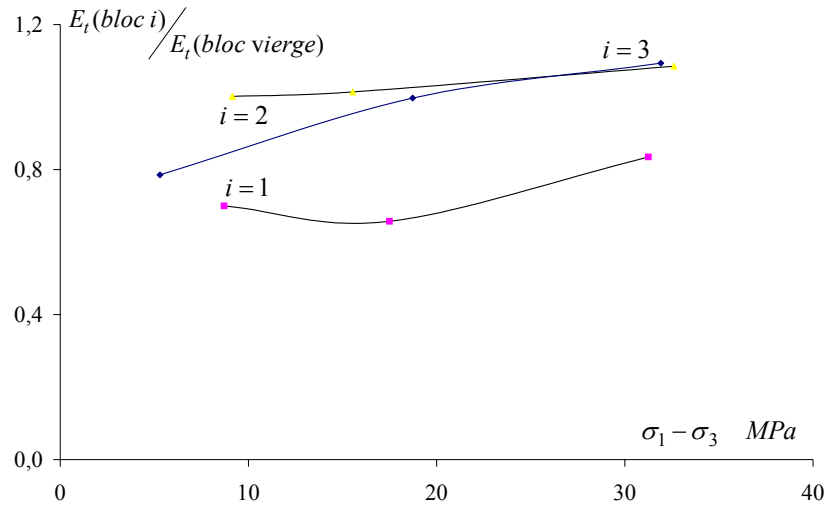
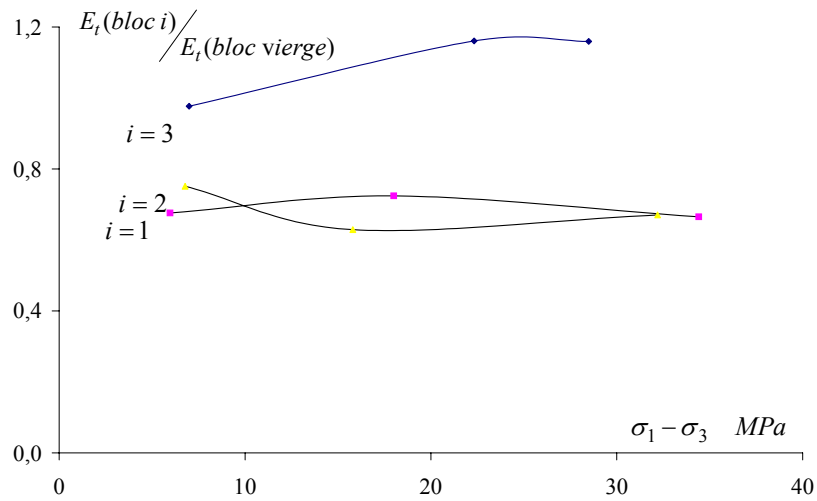
C)  $\theta=0^\circ$ B)  $\theta=45^\circ$ 

Figure VI.6 : rapports des modules transversale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (Pc=5 MPa)

Pc=10 MPa

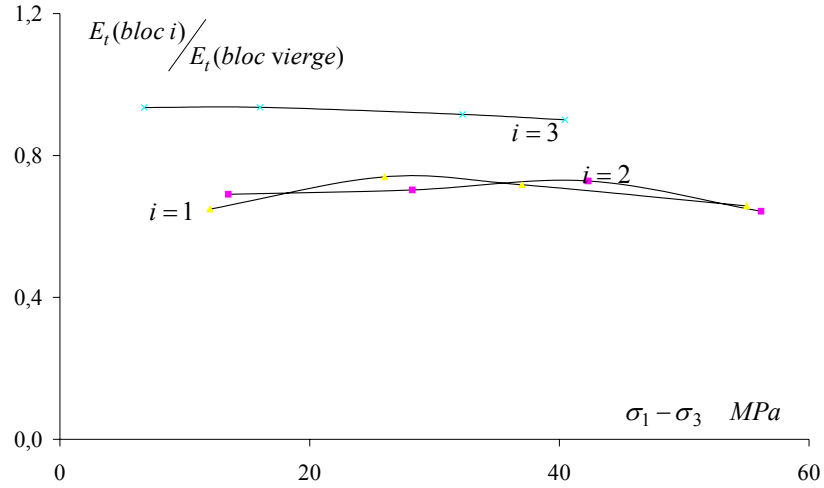
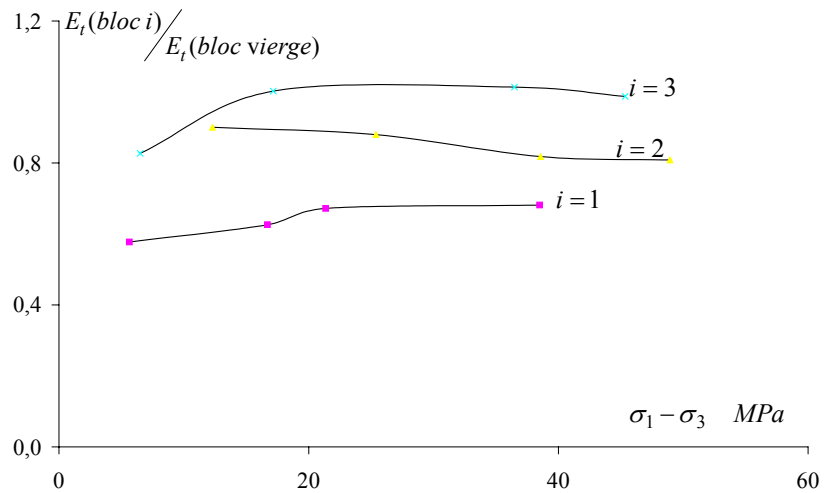
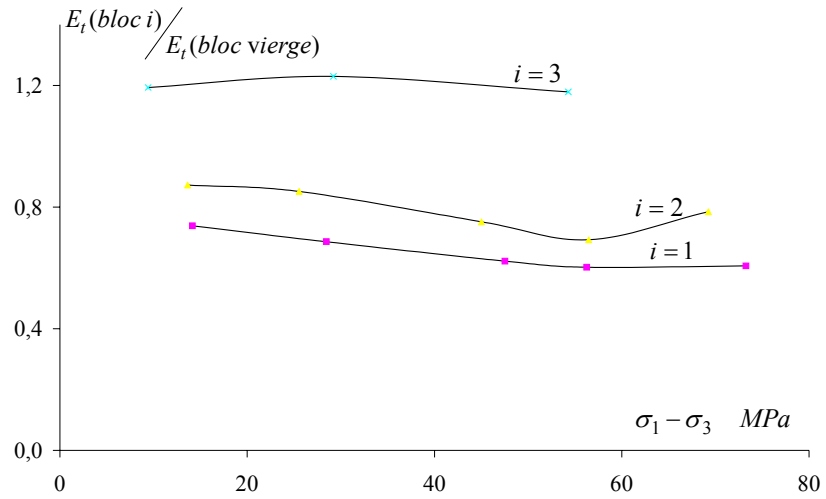
A)  $\theta=0^\circ$ B)  $\theta=45^\circ$ 

Figure VI.7 : rapports des modules transversale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (Pc=10 MPa)

Pc=20 MPa

A)  $\theta=0^\circ$



B)  $\theta=45^\circ$

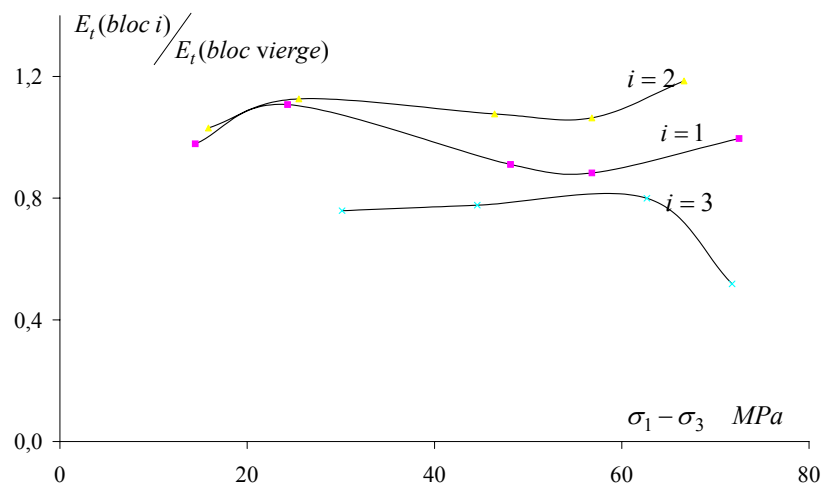


Figure VI.7 : rapports des modules transversale en fonction de la contrainte déviatorique pour différents valeurs de l'angle de carottage (Pc=5 MPa)

**ANNEXE VII  
ETUDE  
MINERALOGIQUE**

## **VII- Annexe VII : ETUDE MINERALOGIQUE**

- *page 181 : Analyse minéralogique*
- *page 182 : Porosité au mercure pour l'échantillon N°1*
- *page 183 : Porosité au mercure pour l'échantillon N°2*









**ANNEXE VIII**  
**PHOTOS**

## VIII- Annexe VIII : PHOTOS



Figure VIII.1 : découpage des blocs



Figure VIII. 2 : des éprouvettes instrumentées avec des jauges

A)

B)



C)



Figure VIII. 3 : la montage des essais de compression A) un essai de compression simple B) une éprouvette montée sur la cellule triaxiale C) la presse hydraulique de triaxial



*Figure VIII. 3 : la montage d'essais de traction*