



HAL
open science

Etude expérimentale de l'effet de l'endommagement sur la perméabilité des roches

Anis Bounenni

► **To cite this version:**

Anis Bounenni. Etude expérimentale de l'effet de l'endommagement sur la perméabilité des roches. Autre. Ecole des Ponts ParisTech, 2002. Français. NNT: . tel-00005690

HAL Id: tel-00005690

<https://pastel.hal.science/tel-00005690>

Submitted on 5 Apr 2004

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

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

THESE DE DOCTORAT
De l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Présentée par

Anis BOUNENNI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

DE
L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité

Structures et Matériaux-Géotechnique

Sujet de thèse

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DE
L'ENDOMMAGEMENT SUR LA PERMEABILITE DES ROCHES

Soutenue à Paris le 24 Mai 2002

Devant le jury composé de :

Marc	BOULON	<i>Rapporteur</i>
Irini	DJERAN-MAIGRE	<i>Rapporteur</i>
Max	COLEMAN	<i>Examineur</i>
Mehdi	GHOUREYCHI	<i>Examineur</i>
Roger	COJEAN	<i>Examineur</i>
Kun	SU	<i>Examineur</i>
Ahmad	POUYA	<i>Directeur de thèse</i>

A mes parents
Ma sœur et mes frères

A WARDA

REMERCIEMENTS

Mes remerciements personnels s'adressent tout d'abord à Monsieur Mehdi GHOREYCHI, alors qu'il était directeur du Groupement pour l'étude des Structures Souterraines de Stockage. Il m'a accueilli au sein du G.3S et m'a permis de travailler sur ce sujet, son aide précieuse m'a permis d'accomplir cette thèse et j'ai pu apprécier son expérience et ses connaissances. De plus, il m'a fait l'honneur et le plaisir de faire partie de mon jury.

Je tiens à remercier Monsieur Ahmad POUYA, Professeur associé à l'UMLV et Ingénieur de recherche au G.3S, d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse.

Jérôme GAOMBALET, avec qui j'ai découvert le G.3S, m'a toujours apporté le soutien nécessaire dans les moments les plus difficiles et m'a montré le bon chemin à suivre. Ses réflexions, ses idées et son aide à la préparation de la soutenance m'ont beaucoup aidé. Je le remercie tout particulièrement.

Je remercie Monsieur Marc BOULON, Professeur à l'université Joseph Fourier à Grenoble, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse ainsi pour le temps qu'il a consacré à la lecture du rapport.

Mes vifs remerciements s'adressent à Madame Irini DJERAN-MAIGRE qui a aimablement accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je lui exprime ma grande reconnaissance pour le temps qu'elle a consacré à la lecture approfondie du rapport et pour l'attention qu'elle a portée à ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Kun SU, qui m'a aidé à bien s'intégrer dans l'équipe de G.3S, il a dirigé mes travaux au début de la thèse et malgré la courte période passée ensemble, il a su me transmettre son savoir-faire.

Mes remerciements vont naturellement vers Monsieur Roger COJEAN, Professeur en titre à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et Monsieur Max COLEMAN, Professeur à l'université de Reading en Angleterre, qui ont accepté d'examiner ma thèse, me fournissant nombre de remarques pertinentes, ainsi que de riches discussions.

Sur le plan expérimental, j'avais un soutien infaillible de la part de Monsieur Serge CHANCHOLE. Qu'il soit remercié ici de m'avoir aidé face aux machines.

Je n'aurais pu mener à bien les essais sans l'aide appréciable des Messieurs Thierry LE GRASSE, René HERBEZ et Daniel THEVAL que je remercie énormément.

Je remercie particulièrement Rose Ouarda HAMZA, pour son soutien continu pendant des longues journées de travail et pour sa participation à la préparation des transparents.

Je remercie également Hanan KHARKHOUR et Ayumi KUROSE pour leur encouragement et pour leur participation à la préparation du pot de la soutenance.

Mes remerciements s'adressent à Fayçal BEN MHAMMED et Habib OUERGHEMMI pour leur aide précieuse apportée à la rédaction du rapport, , Assane TOURE et Malik DIAGNE pour leur soutien.

Que tous les autres membres de G.3S reçoivent ici l'expression de ma gratitude pour leur aide et leur amabilité, notamment Behrooz BAZARGAN, Sophie KEYSER, Liliane QUERU, Philippe COSENZA, Keyvan MALEKI, François COSTE, Laurent MALINSKY, Brice LE CAMPION et Stéphane VAHIDA.

Un grand merci à toute ma famille et tous mes amis en Tunisie, malgré la distance, ils n'ont pas cessé de me soutenir.

Pour terminer, je remercie l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées pour m'avoir permis d'effectuer ce travail de recherche, et plus particulièrement les membres du Collège doctoral.

SOMMAIRE

THESE DE DOCTORAT	1
SOMMAIRE	7
LISTE DES FIGURES	13
LISTE DES TABLEAUX	17
RESUME	19
INTRODUCTION GENERALE	21
CHAPITRE I DEFINITION DES PROBLEMES ET BUTS	23
I. LES DECHETS RADIOACTIFS	23
<i>I.1. Contexte</i>	23
<i>I.2. Stockage des déchets</i>	24
<i>I.3. Les déchets radioactifs à vie longue</i>	24
I.3.1. Problèmes spécifiques aux déchets à vie longue.....	24
I.3.2. Principes de gestion des déchets radioactifs.....	24
I.3.3. Le stockage en souterrain : concept multi-barrières, problème d'étanchéité, risque de diffusion	25
II. PERMEABILITE DES ROCHES	25
<i>II.1. Relation entre la perméabilité et la porosité</i>	26
<i>II.2. Relation entre la perméabilité et l'indice des vides</i>	26
<i>II.3. Influence de la contrainte sur la perméabilité</i>	28
II.3.1. influence de la contrainte moyenne	28
II.3.2. Influence de la pression de pore.....	29
II.3.3. Influence de la contrainte déviatorique.....	29
<i>II.4. Influence de la température sur la perméabilité</i>	31
<i>II.5. Méthodes de mesure de la perméabilité</i>	31
II.5.1. l'expérience de Darcy	32
II.5.2. Etude bibliographique sur les mesures expérimentales de la perméabilité	33
III. ENDOMMAGEMENT DES ROCHES	37
<i>III.1. Méthode d'identification de l'endommagement</i>	38
III.1.1. Méthode mécanique	39
III.1.2. Méthode ultrasonique	39
III.1.3. Autres méthodes d'auscultation.....	39
<i>III.2. Méthode adoptée</i>	40
IV. BUT DE LA PRESENTE ETUDE	41
CHAPITRE II METHODES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	43
I. INTRODUCTION	43

II. METHODES UTILISEES POUR LA MESURE DE LA PERMEABILITE	43
II.1. Méthode de mesure de la perméabilité axiale	43
II.1.1. Méthode en régime permanent	43
II.1.2. Méthode en régime transitoire	45
II.2. Méthode de mesure de la perméabilité latérale	47
II.2.1. Méthode en régime permanent	47
II.2.2. Méthode en régime transitoire	49
II.3. Compressibilité du réservoir	50
III. CARACTERISATION DE LA VARIABLE D'ENDOMMAGEMENT	52
IV. PREPARATION DES ECHANTILLONS	54
V. PREPARATION DE L'EAU D'INJECTION	54
VI. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX UTILISES	55
VI.1. Machine triaxiale	55
VI.2. Les extensomètres	56
VI.3. Injecteur de volume/pression GDS	57
VII. MONTAGE DE L'ESSAI	57
CHAPITRE III EXPERIENCE SUR LE GRES	61
I. ETUDE DE LA PERMEABILITE DU GRES	61
I.1. Validation de l'essai à l'eau	62
I.2. Validation de l'essai au gaz	63
I.3. Constatations	63
I.4. Conclusion	63
CHAPITRE IV MESURE DE LA PERMEABILITE A DIFFERENTES ETAPES DE	
L'ENDOMMAGEMENT DES SILTITES DU GARD	65
I. PROPRIETES DES SILTITES DU GARD	65
I.1. Minéralogie des siltites	65
I.2. Propriétés physiques des siltites du Gard	66
I.3. Etat de saturation et aptitude au gonflement	67
II. PREPARATION DE L'ESSAI	68
II.1. Eprouvettes	68
II.2. Fluide d'injection	70
III. ESSAIS HYDRO-MECANQUES	70
III.1. Procédure de mesure de la perméabilité	70
III.2. Procédure des essais mécaniques	71
III.3. Comportement mécanique des siltites du Gard	73
III.4. Module de Young et coefficient de Poisson	73
III.5. Endommagement et rupture du matériau	75
IV. EVOLUTION DE LA PERMEABILITE	79
IV.1. Essai pulse : courbe « pression du réservoir-temps »	79
IV.2. Paramètres poro-élastiques intervenant dans la simulation des courbes expérimentales	79

<i>IV.3. Condition hydraulique initiale pour la mesure de la perméabilité</i>	82
<i>IV.4. Variation de la perméabilité axiale au cours de l'endommagement</i>	83
IV.4.1. Perméabilité initiale	85
IV.4.2. Mesure de la perméabilité sous un confinement de 2 MPa à différents stades de l'endommagement.....	89
IV.4.3. Mesure de la perméabilité sous une pression de confinement élevée à différents stades de l'endommagement.....	90
IV.4.4. Evolution de la perméabilité sous un chargement mécanique déviatorique	92
IV.4.5. Relation entre la perméabilité axiale et la déformation	92
<i>IV.5. Interprétation des résultats</i>	94
<i>IV.6. Variation de la perméabilité latérale en fonction de l'endommagement</i>	97
IV.6.1. Perméabilité initiale	97
IV.6.2. Evolution de la perméabilité à différents stades de l'endommagement, sous faible pression de confinement	99
IV.6.3. Evolution de la perméabilité sous confinement élevé	100
V. CONCLUSION	100

CHAPITRE V MESURE DE LA PERMEABILITE A DIFFERENTS STADES D'ENDOMMAGEMENT

DES ARGILITES DE L'EST	103
I. PROPRIETES DES ARGILITES DE L'EST	103
<i>I.1. Minéralogie et texture</i>	<i>103</i>
<i>I.2. Aptitude au gonflement-retrait</i>	<i>104</i>
<i>I.3. Propriétés physiques de l'argilite de l'Est</i>	<i>105</i>
II. ESSAI DE PERMEABILITE AXIALE	105
<i>II.1. Préparation à l'essai</i>	<i>105</i>
II.1.1. Eprouvettes.....	105
II.1.2. Fluide d'injection.....	106
<i>II.2. Essais hydro-mécaniques</i>	<i>107</i>
II.2.1. Procédure de mesure de la perméabilité.....	107
II.2.2. Procédure des essais mécaniques.....	108
II.2.3. Module de Young et coefficient de Poisson	109
II.2.4. Module de compressibilité.....	110
II.2.5. Paramètres hydro-mécaniques calculés.....	111
<i>II.3. Evolution de la perméabilité</i>	<i>115</i>
<i>II.4. Nouvelle procédure mise en œuvre pour l'éprouvette E5</i>	<i>115</i>
II.4.1. Module de compressibilité.....	117
II.4.2. Coefficient d'emmagasinement	118
II.4.3. Coefficient de Biot-Module de Biot.....	119
II.4.4. Evolution de la perméabilité.....	121
<i>II.5. Conclusions</i>	<i>125</i>
III. ESSAI DE PERMEABILITE LATERALE	125
<i>III.1. Présentation de l'essai</i>	<i>125</i>
<i>III.2. Module de compressibilité</i>	<i>126</i>
<i>III.3. Evolution de la perméabilité</i>	<i>126</i>
<i>III.4. Endommagement et rupture</i>	<i>127</i>

III.5. Remarques	128
III.6. Conclusions.....	128
III.7. Conclusions Générales	129
CHAPITRE VI EXPERIENCES SUR LA CRAIE.....	131
I. INTRODUCTION.....	131
II. TEXTURE ET COMPORTEMENT DES CRAIES	132
III. INFLUENCE DU DEGRE DE SATURATION EN EAU SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES	134
IV. RECEPTION ET CAROTTAGE DES EPROUVETTES.....	134
V. PREPARATION DU FLUIDE D'INJECTION.....	135
V.1. Mécanisme de l'interaction craie-fluide.....	135
V.1.1. Mécanisme physique, effet de capillarité.....	135
V.1.2. Effets chimiques	135
VI. PROPRIETES PHYSIQUES DE LA CRAIE	136
VI.1. Densité	136
VI.2. Porosité.....	136
VI.3. Teneur en eau de saturation.....	136
VII. PROPRIETES MECANQUES DE LA CRAIE	137
VII.1. Compression simple.....	137
VII.2. Compression déviatorique	138
VIII. PROPRIETES HYDRAULIQUES DE LA CRAIE	139
VIII.1. Essai de perméabilité à l'eau	139
VIII.1.1. Mesure de la perméabilité initiale.....	139
VIII.1.2. Dispositif et procédure expérimentale mis en œuvre	139
VIII.1.3. Résultats	140
VIII.1.4. Calcul de la perméabilité	141
IX. PROPRIETES HYDRO-MECANQUES DE LA CRAIE.....	143
IX.1. Etude de la perméabilité sous compression isotrope	143
IX.1.1. Déroulement de l'expérience.....	143
IX.1.2. Résultats	145
IX.1.3. Observations et remarques	145
IX.1.4. Conclusions.....	146
IX.2. Evolution de la perméabilité avec l'endommagement.....	147
IX.2.1. Essai drainé	147
IX.2.2. Essai non drainé	150
IX.2.3. Essai drainé avec relaxation de contrainte axiale	154
X. EFFETS DU FLUIDE D'INJECTION SUR LE COMPORTEMENT HYDRO-MECANIQUE	158
XI. CONCLUSIONS	160
CHAPITRE VII EFFET DE L'ENDOMMAGEMENT THERMIQUE SUR LA PERMEABILITE.....	161
I. INTRODUCTION.....	161
II. EXPERIENCE SUR LES ARGILITES.....	163

II.1. Principe de la méthode.....	163
II.2. Détermination de la surpression et de la contrainte effective.....	164
II.3. Analyse des résultats.....	167
II.3.1. Mesure de la température.....	167
II.3.2. Variation des vitesses des ondes sonores et de la porosité.....	169
II.3.3. Observation au microscope.....	171
II.3.4. Remarques.....	171
II.4. conclusions.....	173
III. EXPERIENCE SUR LA CRAIE.....	173
III.1. Principe de l'essai.....	174
III.2. Résultats.....	174
III.3. Observations et interprétations.....	174
III.4. Relation endommagement-vitesse des ondes.....	175
III.5. Conclusions.....	179
CONCLUSION GENERALE.....	181
ANNEXES.....	185
ANNEXE 1.....	187
ANNEXE 2.....	189
ANNEXE 3.....	191
ANNEXE 4.....	195
ANNEXE 5.....	197
ANNEXE 6.....	199
ANNEXE 7.....	201
ANNEXE 8.....	203
ANNEXE 9.....	205
BIBLIOGRAPHIE.....	209

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE L'INDICE DES VIDES AU COURS DE LA CONSOLIDATION SOUS CHARGEMENT OEDOMETRIQUE, D'APRES GRUNBERGER 1995.	27
FIGURE I-2 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE AXIALE, AU COURS DE CONSOLIDATION OEDOMETRIQUE, EN CHARGEMENT, D'APRES GRUNBERGER 1995.	27
FIGURE I-3 : SCHEMA DE L'EXPERIENCE DE DARCY REALISEE EN 1856 (D'APRES G. DE MARSILY, 1994).	32
FIGURE I-4 : INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT SUR LA PERMEABILITE DU SEL DE ASSE SPEISESALZ SUR DIFFERENTS ECHANTILLONS (D'APRES PEACH, 1991).....	34
FIGURE I-5 : CONTRAINTE ET CHANGEMENT DE VOLUME ($\frac{\Delta V}{V_0}$) EN FONCTION DE LA DEFORMATION	35
FIGURE II-1 : SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURE DE PERMEABILITE PAR LA METHODE TRANSITOIRE : « ESSAI PULSE ».....	46
FIGURE II-2 : DEBIT LATERAL EN FONCTION DE LA DIFFERENCE DE PRESSION LATERALE SUR UNE EPROUVETTE CYLINDRIQUE DE 60 MM DE DIAMETRE (LA PRESSION DE SORTIE EST MAINTENUE A 10^5 PA).	49
FIGURE II-3 : SCHEMA THEORIQUE D'UN DISPOSITIF LATERAL DE L'ESSAI PULSE.	50
FIGURE II-4 : « VOLUME-PRESSION D'INJECTION » DE GDS PENDANT UN TEST DE COMPRESSIBILITE DU RESERVOIR.....	52
FIGURE II-5 : SCHEMA SIMPLIFIE DE LA CELLULE TRIAXIALE.....	56
FIGURE II-6 : PRESENTATION DES DEUX EXTENSOMETRES AXIAL ET LATERAL.	58
FIGURE II-7 : EXTENSOMETRE LATERAL.	58
FIGURE II-8 : PHOTOGRAPHIE DE L'ENSEMBLE (EPROUVETTE, JAQUETTE ET LES DEUX EXTENSOMETRES) PLACE ENTRE LES DEUX TALONS DE LA CELLULE.....	59
FIGURE III-1 : CORRELATION EXPERIMENTALE ENTRE PERMEABILITE A L'EAU ET PERMEABILITE A L'AIR POUR PLUSIEURS ECHANTILLONS DE GRES DE FONTAINEBLEAU (D'APRES JACQUIN, 1964).....	62
FIGURE IV-1 : EVOLUTIONS DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SILTITES DU GARD EN FONCTION DE LA PROFONDEUR.	66
FIGURE IV-2 : ESSAIS DE REHUMECTATION-DESSICCATION (C.BAUER, 1998) : TENEUR EN EAU EN FONCTION DE LA PRESSION DE SUCCION	67
FIGURE IV-3 : ESSAI DE REHUMECTATION-DESSICCATION (C.BAUER, 1998) : INDICE DES VIDES EN FONCTION DE L'INDICE D'EAU	68
FIGURE IV-4 : SCHEMA D'UN CYCLE DE CHARGES HYDRO-MECANIQUES.....	72
FIGURE IV-5 : COURBE « CONTRAINTE-DEFORMATIONS AXIALE ET LATERALE », EPROUVETTE G3.	74
FIGURE IV-6 : CONTRAINTE-DEFORMATION VOLUMIQUE PENDANT UN ESSAI DE COMPRESSION DEVIATORIQUE SUR L'EPROUVETTE G5.....	76
FIGURE IV-7 : COURBE TYPIQUE DE L'EVOLUTION DE LA PRESSION DU RESERVOIR OBTENUE PENDANT UN ESSAI DE PERMEABILITE : « ESSAI PULSE ».....	79
FIGURE IV-8 : EVOLUTION DES MODULES M , K_0 ET K_s EN FONCTION DU COEFFICIENT DE BIOT b ($K_F = 2000$ MPA, $K = 12700$ MPA, $\phi = 0,09$).....	81

FIGURE IV-9 : EVOLUTION DE LA PRESSION DU RESERVOIR PENDANT UN ESSAI DE PERMEABILITE REALISE SUR L'EPROUVETTE G1 A L'ETAPE 1.A.....	86
FIGURE IV-10 : EVOLUTION DE LA PRESSION DU RESERVOIR PENDANT UN ESSAI DE PERMEABILITE REALISE SUR UNE EPROUVETTE EN ACIER.	87
FIGURE IV-11 : COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION AXIALE ET LATERALE PENDANT UN ESSAI DE COMPRESSION DEVIATORIQUE SUR L'EPROUVETTE G1 (PRESSION DE CONFINEMENT = 45 MPa).	89
FIGURE IV-12 : COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION VOLUMIQUE PENDANT UN ESSAI DE COMPRESSION DEVIATORIQUE SUR L'EPROUVETTE G1 (PRESSION DE CONFINEMENT = 45 MPa).	90
FIGURE IV-13 : COMPARAISON DES COURBES D'EVOLUTION DE LA PRESSION POUR DEUX MESURES DE PERMEABILITE RESPECTIVEMENT A 2 ET A 60 MPa DE CONFINEMENT (EPROUVETTE G3).	91
FIGURE IV-14 : COMPRESSION DEVIATORIQUE : EPROUVETTE G3	93
FIGURE IV-15 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE L'ENDOMMAGEMENT D POUR L'EPROUVETTE G1.....	94
FIGURE IV-16 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE IRREVERSIBLE POUR L'EPROUVETTE G1.....	95
FIGURE IV-17 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE L'ENDOMMAGEMENT D POUR L'EPROUVETTE G3.....	96
FIGURE IV-18 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE IRREVERSIBLE POUR L'EPROUVETTE G3.....	96
FIGURE IV-19 : EVOLUTION DE LA PRESSION DU RESERVOIR PENDANT UN ESSAI DE PERMEABILITE LATERALE REALISE SUR L'EPROUVETTE G4 A L'ETAPE 1.A.....	98
FIGURE IV-20 : EVOLUTION DE LA PRESSION DU RESERVOIR PENDANT UN ESSAI DE PERMEABILITE LATERALE REALISE SUR L'EPROUVETTE G2 A L'ETAPE 1.A.....	99
FIGURE V-1 : GONFLEMENT DES ARGILITES DE L'EST SOUS CONTRAINTE ISOTROPE.....	104
FIGURE V-2 : SCHEMA DE CHARGE DE LA PRESSION D'INJECTION, LA PRESSION DE CONFINEMENT ET LA FORCE APPLIQUE A L'EPROUVETTE E3.	108
FIGURE V-3 : COURBE DE COMPRESSION DEVIATORIQUE SUR L'EPROUVETTE E3 SOUS PRESSION DE CONFINEMENT DE 78 MPa.	110
FIGURE V-4 : ESSAI DE COMPRESSION ISOTROPE SUR L'EPROUVETTE E3 PRESENTANT UN COMPORTEMENT LINEAIRE PAR MORCEAU EN DECHARGE.....	111
FIGURE V-5 : SCHEMA DE CHARGE DE LA PRESSION D'INJECTION, LA PRESSION DE CONFINEMENT ET LA FORCE APPLIQUE A L'EPROUVETTE E5.....	117
FIGURE V-6 : CYCLE DE CHARGE-DECHARGE EN COMPRESSION ISOTROPE SUR L'EPROUVETTE E5.....	118
FIGURE V-7 : COURBES DE SIMULATIONS DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT, ELLES ONT ETE FAITES A L'AIDE DE ANTHYC POUR UNE VALEUR DE PERMEABILITE DE 10^{-20} M ² , LA VALEUR ADOPTEE D'APRES CES COURBES EST 1/S = 5500 MPa.	119
FIGURE V-8 : DEUXIEME CYCLE D'UN CHARGEMENT DEVIATORIQUE SUR L'EPROUVETTE E5 SOUS PRESSION DE CONFINEMENT DE 75 MPa.....	121

FIGURE V-9 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE L'ENDOMMAGEMENT D POUR L'ÉPROUVETTE E5.	123
FIGURE V-10 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE IRREVERSIBLE POUR L'ÉPROUVETTE E5.	124
FIGURE VI-1 : DES PHOTOS PRISES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE MONTRANT LES DIFFERENTES TAILLES DE CaCO_3 CONSTITUANT LA CRAIE. (D'APRES A. LE ROUX, 1973).	132
FIGURE VI-2 : PHOTOS DE LA STRUCTURE INTERNE DE LA CRAIE.	133
FIGURE VI-3 : COURBE DE COMPRESSION SIMPLE PERMETTANT DE DETERMINER LE MODULE DE YOUNG ET LA RESISTANCE DE LA CRAIE.	137
FIGURE VI-4 : COURBE DU COMPORTEMENT DE LA CRAIE LORS D'UN ESSAI TRIAXIAL SOUS UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 2 MPa.	138
FIGURE VI-5 : COURBE DE CONTRAINTE AXIALE EN FONCTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE MONTRANT UN COMPORTEMENT PLASTIQUE PARFAIT SOUS 2 MPa DE PRESSION DE CONFINEMENT.	143
FIGURE VI-6 : CHEMIN DE CHARGE SUIVI LORS DE LA MESURE DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONFINEMENT.	144
FIGURE VI-7 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONFINEMENT, EN CHARGE ET EN DECHARGE, POUR DEUX PRESSIONS D'INJECTION DIFFERENTES.	146
FIGURE VI-8 : UN CYCLE DE CHARGEMENT APPLIQUE POUR LA MESURE DE LA COMPRESSIBILITE DE L'ÉPROUVETTE AU COURS DE L'ENDOMMAGEMENT.	148
FIGURE VI-9 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DU MODULE DE COMPRESSIBILITE AU COURS DE L'ENDOMMAGEMENT D'UNE ÉPROUVETTE DE CRAIE.	149
FIGURE VI-10 : VARIATION DE $\frac{\Delta k}{k_0}$ EN FONCTION DE L'ENDOMMAGEMENT D.	150
FIGURE VI-11 : COURBE DE CONTRAINTE-DEFORMATIONS VOLUMIQUES SUR LA CRAIE EN CONDITION NON DRAINEE.	152
FIGURE VI-12 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE IRREVERSIBLE AU COURS DE L'ENDOMMAGEMENT D'UNE ÉPROUVETTE DE CRAIE.	153
FIGURE VI-13 : UN CYCLE DE CHARGE POUR UN ESSAI TRIAXIAL EN CONDITION NON DRAINEE.	154
FIGURE VI-14 : PRESENTATION DES POINTS DE MESURE DE LA PERMEABILITE PENDANT LE TRAJET DE CHARGEMENT.	156
FIGURE VI-15 : CYCLES DE CHARGE-DECHARGE AVEC MESURES DE PERMEABILITE, SOUS UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 0,5 MPa ET UNE PRESSION D'INJECTION DE 0,3 MPa.	157
FIGURE VI-16 : COURBES DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DES CYCLES EN CHARGE ET EN DECHARGE DE LA CONTRAINTE AXIALE SOUS UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 0,5MPa ET UNE PRESSION D'INJECTION DE 0,3 MPa.	158
FIGURE VII-1 : TEMPERATURE DES ÉPROUVETTES DES ARGILITES DE L'EST A L'ÉTAT INITIAL, AVANT L'ÉCHAUFFEMENT.	168
FIGURE VII-2 : TEMPERATURE D'UNE ÉPROUVETTE DES ARGILITE DE L'EST APRES 60 SECONDES D'ÉCHAUFFEMENT DANS UN FOUR A MICRO-ONDES AVEC UNE PUISSANCE DE 105 W.	169

FIGURE VII-3 : PHOTO DES FISSURES OBSERVEES AU MICROSCOPE D'UNE EPROUVETTE D'ARGILITE DE L'EST APRES UN ECHAUFFEMENT DE SOIXANTE SECONDES AUX MICRO-ONDES.	171
FIGURE VII-4 : VARIATION DES VITESSES DES ONDES EN FONCTION DE LA DUREE D'ECHAUFFEMENT AUX MICRO- ONDES.	175
FIGURE VII-5 : VARIATION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA DUREE D'ECHAUFFEMENT AUX MICRO- ONDES.	175
FIGURE VII-6 : VARIATION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DES VITESSES DES ONDES.	177
FIGURE VII-7 : VARIATION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE L'ENDOMMAGEMENT D.	178
FIGURE VII-8 : PRESENTATION LOGARITHMIQUE DE LA VARIATION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE L'ENDOMMAGEMENT.	178

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU III-1 : RESULTATS DES MESURES DE LA PERMEABILITE AXIALE ET LATERALE, A L'EAU ET AU GAZ	63
TABLEAU IV-1 : PROPRIETES PHYSIQUES DES EPROUVETTES	69
TABLEAU IV-2 : VITESSES DES ONDES ULTRASONORES DANS TROIS DIRECTIONS ORTHONORMEES.	69
TABLEAU IV-3 : RESULTATS MECANIQUES DES SIX EPROUVETTES DES SILTITES DU GARD.....	74
TABLEAU IV-4 : COMPORTEMENT MECANIQUE SOUS COMPRESSION ISOTROPE	77
TABLEAU IV-5 : RESULTATS DE MESURES DE LA PERMEABILITE OBTENUS SUR L'EPROUVETTE G1	84
TABLEAU IV-6 : RESULTATS DE MESURES DE LA PERMEABILITE OBTENUS SUR L'EPROUVETTE G3.....	85
TABLEAU IV-7 : PARAMETRES MESURES ET CALCULES LORS DE L'ESSAI SUR G1.	94
TABLEAU IV-8 : PARAMETRES MESURES ET CALCULES LORS DE L'ESSAI SUR G3.	95
TABLEAU V-1 : PRESENTATION DE QUELQUES PROPRIETES DES EPROUVETTES DES ARGILITES DE L'EST.	106
TABLEAU V-2 : PARAMETRES HYDROMECHANIQUES MESURES LORS D'UN ESSAI SUR L'EPROUVETTE E3.	113
TABLEAU V-3 : PARAMETRES HYDROMECHANIQUES CALCULES A PARTIR DE CEUX MESURES.....	114
TABLEAU V-4 : PARAMETRES HYDROMECHANIQUES MESURES LORS DE L'ESSAI SUR L'EPROUVETTE E5.	120
TABLEAU V-5 : PARAMETRES HYDROMECHANIQUES CALCULES LORS DE L'ESSAI SUR L'EPROUVETTE E5.	120
TABLEAU V-6 : PARAMETRES MESURES ET CALCULES LORS DE L'ESSAI SUR E5.....	122
TABLEAU V-7 : PARAMETRES MESURES ET CALCULES LORS DE L'ESSAI SUR E5.....	123
TABLEAU V-8 : PARAMETRES HYDROMECHANIQUES MESURES LORS D'UN ESSAI SUR L'EPROUVETTE E4.	127
TABLEAU VI-1 : MESURE DES DIFFERENTES PROPRIETES MECANIQUES DE LA CRAIE.....	138
TABLEAU VI-2 : DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DE L'EPROUVETTE AVANT ET APRES LA SATURATION	140
TABLEAU VI-3 : DIFFERENTES CARACTERISTIQUES A L'ETAT INITIAL SATURE ET L'ETAT FINAL APRES L'ESSAI DE PERMEABILITE.	141
TABLEAU VI-4 : MESURE DE LA PERMEABILITE SOUS CHARGE ET DECHARGE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT A DEUX PRESSIONS D'INJECTIONS DIFFERENTES.	145
TABLEAU VI-5 : PARAMETRES MESURES ET CALCULES A DIFFERENTS STADES DE L'ENDOMMAGEMENT.	148
TABLEAU VI-6 : PARAMETRES MESURES ET CALCULES A DIFFERENTS STADES DE L'ENDOMMAGEMENT.	150
TABLEAU VI-7 : MESURE DE LA PERMEABILITE ET DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE IRREVERSIBLE POUR CHAQUE CYCLE DE CHARGEMENT.	153
TABLEAU VI-8 : MESURE DE LA PERMEABILITE AVANT ET APRES RELACHEMENT DE LA CONTRAINTE AXIALE, SOUS UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 0,5 MPA ET UNE PRESSION D'INJECTION DE 0,3 MPA.	156
TABLEAU VI-9 : MESURE DE LA PERMEABILITE AVANT ET APRES RELACHEMENT DE LA CONTRAINTE AXIALE, SOUS UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 0,5 MPA ET UNE PRESSION D'INJECTION DE 0,3 MPA.	157
TABLEAU VI-10 : MESURE DE LA PERMEABILITE AVANT ET APRES RELACHEMENT DE LA CONTRAINTE AXIALE, SOUS UNE PRESSION DE CONFINEMENT DE 0,2 MPA ET UNE PRESSION D'INJECTION DE 0,1 MPA.	159
TABLEAU VII-1 : PRESENTATION DES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DE L'ARGILITE DE L'EST ET DU SILTITE DU GARD PERMETTANT DE CALCULER LA SURPRESSION INTERSTITIELLE ET LA CONTRAINTE EFFECTIVE DANS UN ECHANTILLON LORS D'UN ECHAUFFEMENT THERMIQUE.	167

TABLEAU VII-2 : VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSIQUES DE L'ARGILITE DE L'EST EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES D'ECHAUFFEMENT A SOIXANTE SECONDES.	170
TABLEAU VII-3 : RESULTATS DES MESURES DES VITESSES DES ONDES ET DE LA PERMEABILITE AU GAZ DES ECHANTILLONS DE CRAIE AVANT ET APRES ECHAUFFEMENT AUX MICRO-ONDES.	174
TABLEAU VII-4 : CALCUL DE L'ENDOMMAGEMENT SOUS L'EFFET DES MICRO-ONDES SUR DES ECHANTILLONS DE CRAIE.....	177

RESUME

L'effet de la fissuration des roches sur leurs perméabilités suscite un intérêt croissant en raison de ses conséquences sur la sûreté des stockages des déchets radioactifs, ainsi que ses applications à certains problèmes de prospection pétrolière. Ce mémoire de thèse est consacré à l'étude expérimentale de ce phénomène sur quelques variétés de roches poreuses. La méthode consiste à créer un état de fissuration à différents degrés d'avancement dans la roche et à examiner l'évolution de la perméabilité en fonction de cet état de fissuration ou d'endommagement.

Deux variétés d'argiles, dites de l'Est et du Gard, ont été étudiées pour des applications aux problèmes de stockage des déchets, ainsi qu'une variété de craie provenant de la Mer du Nord pour des applications pétrolières. Auparavant, l'étude du grès de Fontainebleau, dont la perméabilité est connue, nous a servi au calibrage et à la validation de nos méthodes expérimentales.

Les difficultés majeures de l'étude des argilites tiennent à la très faible perméabilité, qui est parfois à la limite de capacités de mesure expérimentale, et à la fragilité de ces matériaux qui ne se prêtent pas à une fissuration diffuse. Nous sommes cependant parvenus à réaliser quelques mesures et montrer par exemple que la perméabilité de ces matériaux peut être multipliée par un facteur 100 pour une déformation volumique irréversible de 4%.

La craie est plus poreuse et plus perméable, elle ne pose pas de problème de mesure de la perméabilité. Mais la difficulté de créer un état d'endommagement diffus dans ce matériau subsiste. Cependant, par des trajets de chargement complexe, nous avons pu dans certains cas faire évoluer l'endommagement et la perméabilité et établir une relation phénoménologique entre ces deux grandeurs.

La création de fissures dans le matériau par endommagement thermique, en exposant le matériau dans un four à micro-ondes, s'est avérée une voie beaucoup plus simple et prometteuse que la voie mécanique. Par ce procédé, nous avons réussi à créer des états d'endommagement diffus à différents degrés d'avancement dans les argilites et dans la craie. L'observation des échantillons endommagés d'argilites par le microscope électronique nous a permis de déterminer l'ordre de grandeur de la taille des micro-fissures. Sur les échantillons de craie endommagés, la mesure de la vitesse acoustique dont nous avons déduit le module de Young d'une part, et la mesure de la perméabilité d'autre part, nous ont permis d'établir une relation simple entre la perméabilité et l'endommagement.

INTRODUCTION GENERALE

Un des principaux problèmes soulevés par le stockage des déchets nucléaires est la sûreté à long terme : il s'agit de quantifier les mouvements des fluides, consécutifs du chargement mécanique et thermique du massif, susceptible d'entraîner les radionucléides vers la biosphère, et aussi d'estimer l'évolution de cette quantité de fluide en fonction de l'état mécanique du massif rocheux.

Une très faible perméabilité est une propriété physique très importante qui fait du massif rocheux un des milieux hôtes potentiellement favorables pour l'enfouissement des déchets nucléaires à grande profondeur.

Pour pouvoir modéliser les mouvements des fluides dans le massif, il est nécessaire de connaître les propriétés de la conductivité hydraulique ou la perméabilité des milieux rencontrés. Or cette perméabilité est elle-même susceptible de changer suite aux sollicitations mécaniques et thermiques du massif qui conduisent à sa fissuration et son endommagement.

L'effet de l'endommagement des roches sur leurs perméabilités intéresse d'autres secteurs industriels. En particulier, l'évolution des propriétés de transfert de la craie en fonction de sa fissuration intéresse l'industrie pétrolière.

Ce travail a été réalisé au sein du Groupement pour l'étude des Structures Souterraines de Stockage (G.3S) à l'Ecole Polytechnique. Son objectif est d'utiliser les méthodes et les outils disponibles pour estimer l'évolution de la perméabilité au cours de l'endommagement de différentes roches.

Pour cela, nous avons procédé à la mesure en laboratoire de la variation de la perméabilité des roches à différents stades de l'endommagement. Les essais ont été réalisés sur quatre roches provenant de quatre sites différents : les grès de Fontainebleau, les siltites du Gard, les argilites de l'Est et la craie de la Mer du Nord.

Ce mémoire comporte deux parties :

La première, à travers une étude bibliographique, rappelle quelques définitions de la perméabilité et de l'endommagement, en insistant sur la mesure de la perméabilité et son évolution en fonction de certains paramètres, et aussi sur différentes méthodes d'identification expérimentale de l'endommagement.

Dans le deuxième chapitre de la première partie, on évoque les différentes méthodes de mesure ainsi que les matériels utilisés au cours de cette étude.

Dans la deuxième partie, sont présentés les essais réalisés sur les différentes roches et les résultats obtenus ; le troisième chapitre constitue un essai d'étalonnage du système expérimental sur le grès de Fontainebleau.

Le quatrième et le cinquième chapitre présentent des essais hydro-mécaniques pour mesurer la perméabilité et son évolution au cours de l'endommagement sur les siltites du Gard et les argilites de l'Est respectivement.

Le sixième et le septième chapitre concernent le couplage de la perméabilité et l'endommagement de la craie. Une méthode d'endommagement par chargement thermique est présentée.

I. LES DECHETS RADIOACTIFS

PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

I.1. Contexte

La production d'électricité d'origine nucléaire est à l'origine de la majeure partie des déchets radioactifs, mais elle n'est pas la seule origine des déchets, 15 % du volume total provenant des activités de recherche, de la médecine et de l'industrie. A cela s'ajoutent les déchets liés aux activités militaires.

Electricité de France produit environ 75 % de son électricité à partir de centrales nucléaires implantées sur tout le territoire français. Comme toute industrie, cette production génère des déchets. De part la spécificité de l'industrie nucléaire, une réglementation très stricte impose aux producteurs et aux acteurs de la gestion des déchets d'origine nucléaire de se préoccuper de la sûreté des installations de stockage provisoire et définitif.

Les déchets nucléaires sont classés en trois catégories définies selon la demi-vie des radioéléments présents dans les déchets, l'intensité et le type de rayonnement émis :

Catégorie A : déchets de faible et moyenne activité, demi-vie maximale des radioéléments 30 ans, période de sûreté réglementaire 300 ans, 90 % du volume total des déchets, 3 % de la radioactivité totale produite par les réacteurs. Ces déchets sont dits technologiques car essentiellement constitués d'outils de manutention, des gants, blouses, bottes et filtres.

Catégorie B : radioactivité moyenne à faible, déchets à vie longue (> 10000 ans). Essentiellement composés d'émetteur alpha. Il s'agit à titre d'exemple des gaines à zircaloy irradiées (contenant le combustible nucléaire).

Catégorie C : déchets à haute activité, de vie courte à moyennement longue (1 an à > 5000 ans). Ces déchets proviennent du combustible irradié après retraitement et concentration. Ils sont constitués en majorité d'émetteurs gamma et bêta très exothermiques.

I.2. Stockage des déchets

En France, les déchets de catégorie B et C sont entreposés dans des installations réservées à cet effet, ils ne feront pas l'objet d'un stockage définitif avant plusieurs décennies, en attendant la recherche d'un site géologique profond prévu à l'horizon 2015 conformément à la loi du 30 décembre 1991. Plusieurs projets sont actuellement en cours.

Seuls les déchets de faible et moyenne activité de catégorie A bénéficient d'une réglementation pour leur stockage définitif. Le stockage dit de surface est l'option retenue pour cette catégorie.

I.3. Les déchets radioactifs à vie longue

Les déchets de haute activité résultent du retraitement des combustibles usés, et les déchets alpha proviennent principalement des boues de retraitement et des gaines de combustibles. Ces déchets ne représentent que 10 % environ du volume total des déchets, mais ils concentrent 90 % de la radioactivité. De plus, certains d'entre eux resteront radioactifs pendant plusieurs centaines de milliers d'années.

I.3.1. Problèmes spécifiques aux déchets à vie longue

Les déchets de haute activité sont les moins volumineux, mais ils représentent l'essentiel de la radioactivité engendrée par la production de l'électricité nucléaire. Ils contiennent une proportion importante de radioéléments de courtes et de longues périodes se chiffrant parfois en millions d'années.

I.3.2. Principes de gestion des déchets radioactifs

L'objectif fondamental de la gestion des déchets radioactifs est de protéger les générations actuelles et futures contre les risques possibles provoqués par les radioéléments.

La stratégie actuelle en matière de gestion des déchets radioactifs revient à concentrer les produits dangereux et à les confiner à l'abri des activités humaines par diverses barrières de protection. La qualité de ce confinement dépend de la capacité de ces barrières à retenir les radionucléides. Une séquence type de la gestion des déchets est faite des étapes suivantes :

- Collecte des déchets et tri par catégorie.
- Traitement (réduction de volume, incinération, décontamination...).
- Conditionnement.
- Entreposage (en attente de stockage définitif).
- Stockage définitif.

1.3.3. Le stockage en souterrain : concept multi-barrières, problème d'étanchéité, risque de diffusion

La solution longuement admise est d'isoler les déchets de haute activité dans les couches géologiques profondes. Le concept multi-barrières adopté consiste à interposer entre la biosphère et les déchets radioactifs une succession d'ouvrages de confinement. La dernière barrière est constituée de la formation géologique.

Toutes les formations géologiques ne sont pas appropriées pour devenir des « roches hôtes » de déchets nucléaires de haute activité. Les formations retenues répondent à un certain nombre de critères précis, favorables à la sûreté ou à une faisabilité technique. ***Un de ces critères est la faible perméabilité*** du milieu géologique : la remontée des radionucléides à la surface est en partie liée au mouvement des eaux souterraines.

L'eau peut être le facteur principal de contamination de l'environnement. Il s'agit, par ce concept de barrières interposées, de réduire la probabilité de mise en contact entre la biosphère les déchets par l'intermédiaire de fluides notamment de l'eau. Dans une logique de concept de sécurité redondante, chacune des barrières fait l'objet d'une étude propre indépendamment du rôle des autres barrières.

II. PERMEABILITE DES ROCHES

La perméabilité est un critère important dans plusieurs domaines de recherche ; elle intéresse les mécaniciens des sols, les hydrogéologues, les géochimistes... Ainsi, on peut rencontrer la notion de perméabilité relative ou intrinsèque, conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité et par suite plusieurs formules de calcul et différentes unités correspondantes.

Dans ce mémoire, c'est la notion de *perméabilité intrinsèque* qui est utilisée. La perméabilité se rapporte au milieu poreux indépendamment des caractéristiques du fluide. Elle n'est définie qu'à l'échelle macroscopique, sa formule est déduite de la loi de DARCY et sa dimension est celle d'une surface [L²], [G. De Marsily, 1994].

La perméabilité mesure la facilité avec laquelle un fluide traverse une roche. C'est probablement le paramètre physique le plus important [Y. Gueguen, V. Palciauskas, 1992].

Plusieurs expériences ont été réalisées par les chercheurs, sur différents types des roches pour définir et mesurer la perméabilité, elle dépend de plusieurs paramètres.

Dans ce paragraphe quelques définitions de la perméabilité seront données, son évolution et sa caractérisation en fonction d'autres paramètres à travers des travaux expérimentaux

réalisés dans le cadre d'autres recherches et rencontrés tout au long d'une étude bibliographique seront également évoquées.

II.1. Relation entre la perméabilité et la porosité

L'évolution de la perméabilité est très sensible à la porosité. En effet, la perméabilité dépend du nombre, de la géométrie, de la taille et surtout de l'interconnectivité des vides laissés entre les grains [Brown K., 1994]. En général, *la perméabilité diminue avec la diminution de la porosité.*

La formule empirique la plus connue pour relier perméabilité et porosité est celle de KOSENY-CARMAN [De Marsily, 1994]

$$k = \frac{\phi^3}{5S^2(1-\phi)^2}$$

où S est la section exposée au fluide

ϕ est la porosité totale.

II.2. Relation entre la perméabilité et l'indice des vides

De nombreuses mesures de perméabilité ont été effectuées avec différents gradients de pression de fluide et pour différentes valeurs d'indices des vides. On peut citer en particulier Grunberger [1995], qui a réalisé des essais similaires sur l'argile. Les valeurs de la perméabilité mesurées sont représentées en fonction de l'indice des vides sur la figure I-1.

Ces résultats sont confirmés lors des essais de compaction réalisés sur l'argile par [Grunberger, 1995] et [Djéran-Maigre et al., 1995]. Plusieurs mesures de perméabilité ont été effectuées pour chaque degré de compaction qui correspond à une valeur d'indice des vides, et elles sont représentées en fonction de la contrainte verticale sur la figure I-2.

Des études expérimentales ont été menées par Nagaraj et al. [1994], dans le but de déterminer la valeur de la perméabilité et son évolution en fonction de l'indice des vides. Des différents sols à base d'argile sont utilisés. Les échantillons sont soumis à des charges-décharges de pression de consolidation de 200 KPa, 400 KPa, et 800 KPa. A chaque pression, après la réalisation de l'équilibre, des tests de perméabilité axiale sont réalisés.

En effet, la valeur de la perméabilité est influencée par la modification de l'indice des vides. La pression de consolidation influence la magnitude de la perméabilité. *La perméabilité décroît avec la décroissance de l'indice des vides.*

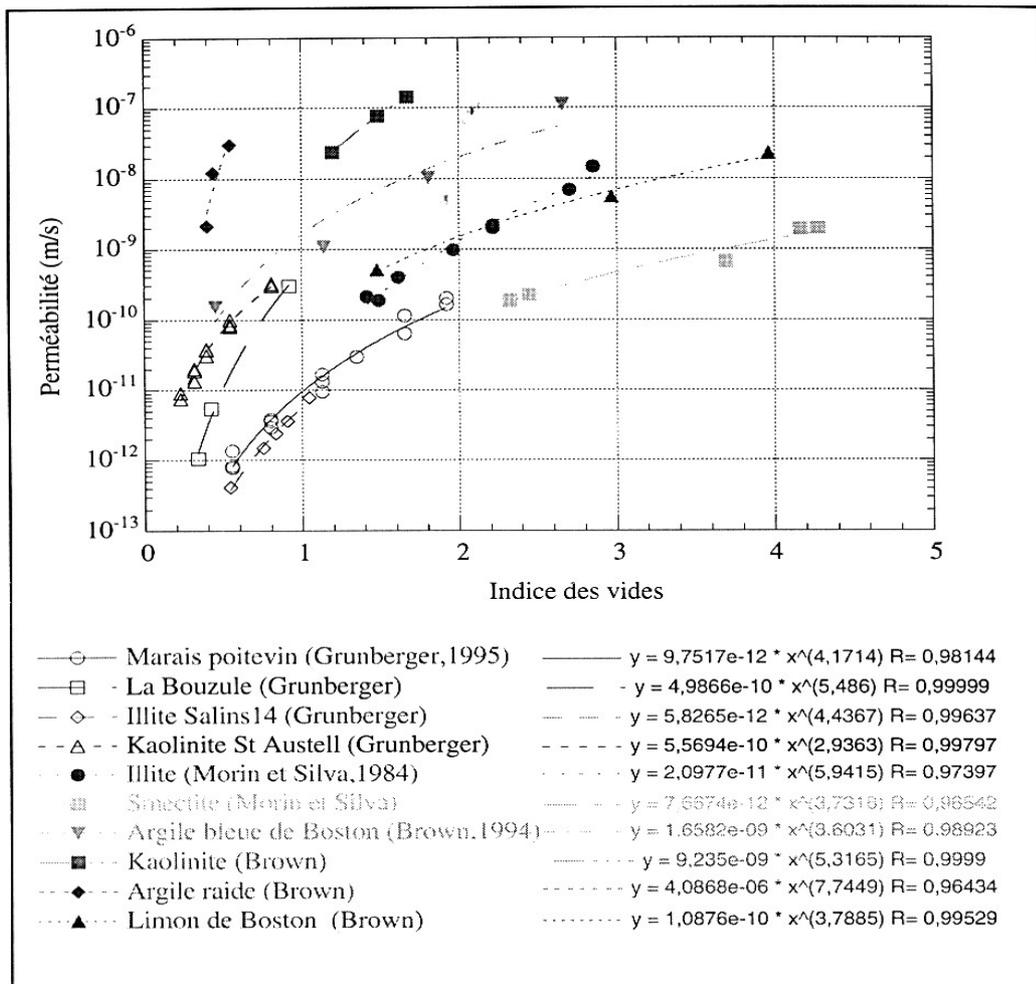


Figure I-1 : Evolution de la perméabilité en fonction de l'indice des vides au cours de la consolidation sous chargement oedométrique, d'après Grunberger 1995.

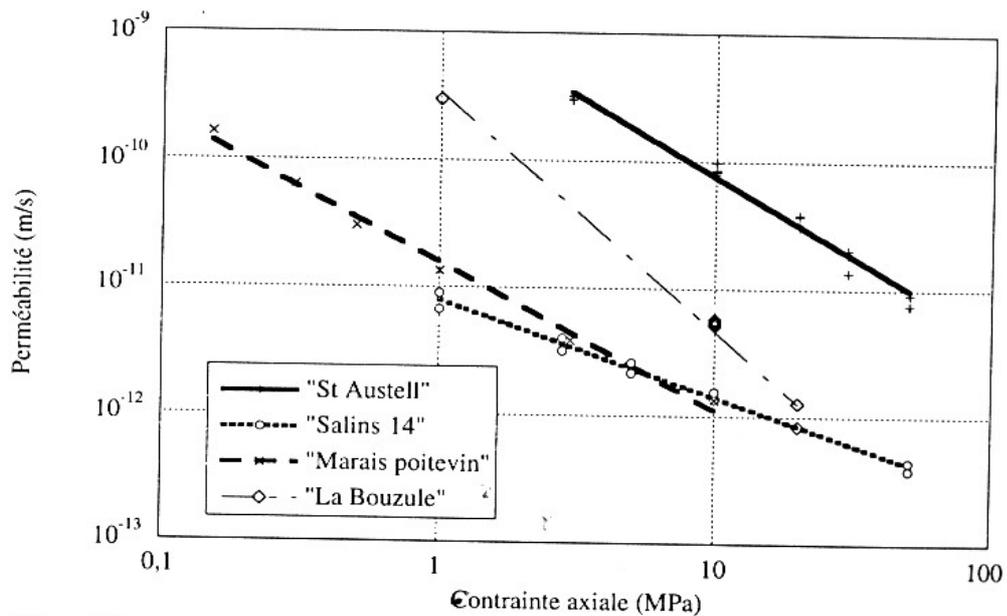


Figure I-2 : Evolution de la perméabilité en fonction de la contrainte axiale, au cours de consolidation oedométrique, en chargement, d'après Grunberger 1995.

II.3. Influence de la contrainte sur la perméabilité

On peut distinguer deux types d'évolution pour la perméabilité sous sollicitations mécaniques : la variation de la perméabilité sous l'effet de la compaction, et la variation sous l'effet de l'endommagement. Ces deux variations correspondent à deux états de consolidation du matériau différents. En effet, l'argile par exemple étant un matériau poreux, sa compaction sous l'effet de la contrainte moyenne conduit a priori à la diminution de la porosité et consécutivement, de la perméabilité. La compaction est le phénomène principal pour les argiles faiblement consolidées. L'endommagement se produit en revanche sur les argiles consolidées ; Il peut conduire à une augmentation de 1 à 2 ordres de grandeur de la perméabilité pour les matériaux présentant un endommagement diffus. On peut donc penser qu'a priori le premier type d'évolution présente peu d'intérêt dans le contexte de cette étude. Mais la diminution de la porosité sous l'effet de la contrainte moyenne est en partie réversible (élastique) pour quelques types de roches. On peut en déduire que la diminution de la contrainte moyenne conduit à une légère augmentation de la perméabilité.

II.3.1. influence de la contrainte moyenne

L'effet de la contrainte moyenne sur la perméabilité a été étudié pour plusieurs géomatériaux. Les mesures effectuées révèlent une diminution de la perméabilité lorsque la pression de confinement augmente [Reynolds et Gloyne, 1961 ; Lai, 1971 ; Sutherland et Cave, 1980 ; Le Guen, 1991].

Peach [1991] et Le Guen [1991] ont montré que cette diminution de la perméabilité est d'abord instantanée avant de se poursuivre dans le temps. Brace et al. [1968] ont par exemple fait la même étude sur le granite de Westerly. Ils ont observé une très grande décroissance de la perméabilité avec la pression de confinement. La perméabilité chute, environ, de deux ordres de grandeur. Deux effets principaux permettent d'expliquer cette décroissance fortement non linéaire : d'une part la fermeture progressive des fissures qui restreint le volume accessible au fluide de pore, d'autre part la modification de la géométrie du réseau tridimensionnel de fissures qui affecte la connectivité et perturbe les trajets d'écoulement du fluide dans la roche. La décroissance de la perméabilité avec la pression de confinement n'est pas une caractéristique spécifique des roches cristallines ; elle est aussi observée dans les roches sédimentaires. L'ampleur de la variation de la perméabilité avec la pression externe appliquée à la roche dépend principalement des propriétés structurales et topologiques des réseaux poreux. Elle semble aussi être influencée par certains paramètres tels que le teneur en minéraux argileux et la consolidation de la roche.

D'après des études réalisées par Su Kun [1997], l'augmentation de la pression de confinement ne fait que diminuer la perméabilité. Par ailleurs, l'auteur a comparé d'autres résultats effectués sur le granodiorite sain de la Vienne, dont la porosité et la perméabilité initiale sont très faibles, et il montre que pour différentes pressions de confinement il n'y a pas d'effet significatif sur la variation de la perméabilité.

En résumé, *la perméabilité diminue avec l'augmentation de la pression de confinement*, néanmoins, pour des porosités initiales très faibles, l'effet de la pression de confinement est également très faible.

II.3.2. Influence de la pression de pore

Comme pour la pression de confinement, l'application d'une pression de fluide au sein du volume poreux de la roche a pour effet de déformer l'assemblage des minéraux. Mais s'agissant d'une pression interne, la conséquence en est une dilatation des pores ou des fissures. La pression de pores et la pression de confinement ont des effets antagonistes sur la déformation du réseau poreux, et donc sur l'évolution des propriétés hydrauliques. Expérimentalement, on constate une décroissance de la perméabilité avec la pression de confinement à pression de pore donnée, et *une augmentation de la perméabilité avec la pression de pores lorsque la pression de confinement est constante*.

II.3.3. Influence de la contrainte déviatorique

Après avoir examiné comment se comportait la perméabilité pour des roches soumises à des conditions de pression de confinement, il est intéressant d'étudier à présent l'influence d'une contrainte déviatorique sur les propriétés hydrauliques des roches.

Pour cette étude, des essais triaxiaux sont réalisés. La perméabilité est mesurée pour différents états de contrainte. Lorsque l'échantillon est soumis à une contrainte déviatorique supérieure au seuil de dilatance irréversible correspondant à l'initiation des microfissures, la perméabilité augmente de manière significative, voire de plusieurs ordres de grandeur [Lai, 1971 ; Le Guen, 1991 ; Peach, 1991 ; Stormont et Deamen, 1992].

Les données expérimentales concernant l'évolution de la perméabilité sous l'effet de l'endommagement sont plutôt rares.

Keaney *et al.* [1998] ont réalisé une série d'expériences sur un grès pour étudier l'évolution de sa perméabilité sous différents états de contraintes. La perméabilité axiale d'une éprouvette est mesurée par la méthode du "Pulse test" sous différentes pressions de

confinement et contraintes axiales. Ces auteurs trouvent que la perméabilité de l'éprouvette, de même que son coefficient d'emménagement, diminuent avec la compaction mais augmentent rapidement avec la fissuration parallèle à l'axe de la compression. La perméabilité de l'éprouvette peut croître jusqu'à un ordre de grandeur avant la rupture fragile de l'éprouvette.

Des résultats analogues ont été obtenus lors d'expériences réalisées au G.3S sur l'argilite de l'Est. Su et Bounenni [1998], et Coste et Bounenni [1999] ont étudié l'évolution de la perméabilité de cette argile sous sollicitations mécaniques cycliques. Les éprouvettes ont été soumises à des cycles de charge-décharge de la pression de confinement et de la contrainte déviatorique axiale afin de créer un état d'endommagement diffus dans l'éprouvette, dont la perméabilité est susceptible d'être plus grande.

L'évolution de la perméabilité du sel gemme sous sollicitations mécano-chimiques a été étudiée par Cosenza et Ghoreychi [1997]. Bien que les phénomènes mis en jeu dans le sel gemme (solution-précipitation, cicatrisation, ...) soient différents de ceux rencontrés dans les argiles, ce travail présente une approche intéressante s'inspirant de travaux plus généraux [Dienes 1982, Gravilenko et Guéguen 1989, Guéguen et Palciauskas 1992, Le Ravalec et Guéguen 1994] pour modéliser l'évolution de la perméabilité sous sollicitations mécaniques.

Suivant les géomatériaux et les constituants qui les forment et surtout de leur résistance, d'abord une pression de confinement suffisante, puis une force déviatorique sont appliquées.

Les essais réalisés par Su K. [1997] sur le granodiorite, consistent à appliquer, sur un échantillon sous compression isotrope, trois cycles de charge-décharge d'une force déviatorique au cours desquels des mesures de perméabilité sont réalisées. Il n'existe pas de tendance nette de l'évolution de la perméabilité en fonction de la contrainte déviatorique au cours de deux premiers cycles. Pour le troisième cycle, la perméabilité augmente légèrement. Quoique, afin de faire apparaître des phénomènes plus significatifs, Su affirme qu'il faut dépasser un certain seuil de déformation volumique irréversible. Pour le matériau sain, la perméabilité est indépendante de la contrainte déviatorique lorsqu'il n'y a pas d'endommagement. *Au-delà du seuil d'endommagement, la perméabilité augmente avec la contrainte déviatorique.*

II.4. Influence de la température sur la perméabilité

Khemissa [1998] a mené des études qui avaient pour but la détermination de la perméabilité de l'argile sous contrainte et sous température. Sa méthode est basée sur la mesure en fonction du temps de la quantité d'eau qui traverse l'éprouvette.

Une pression de confinement de 5 MPa est appliquée, l'éprouvette est soumise à un gradient de pression interstitielle résultant de l'application, à une température donnée, d'une pression différentielle. L'opération est répétée pour plusieurs valeurs de gradient de pression interstitielle et de température.

Un débit d'eau est mesuré pour chacune des opérations réalisées et une valeur de la perméabilité en est déduite.

L'influence de la température sur la valeur de la perméabilité est considérable, celle du gradient de pression interstitielle peut être considérée comme négligeable.

Une diminution importante de la viscosité de l'eau interstitielle est traduite par une forte augmentation de la perméabilité de l'argile ; la valeur de la perméabilité déterminée à 130°C est dix fois supérieure à celle déterminée à 20°C.

D'après Gueguen et Palciauskas [1992], la température agit sur la perméabilité via deux processus distincts : la microfissuration et la dissolution recristallisation. La microfissuration thermique résulte soit d'une dilatation différentielle des cristaux, soit de l'existence d'un fort gradient de température. Un accroissement important de la perméabilité peut en résulter, fonction de la densité et de la géométrie des fissures introduites. Pour les processus de dissolution recristallisation, à grande échelle, la circulation des fluides réalise des transferts des zones de solubilité élevée vers les zones de solubilité réduite. A l'échelle locale, le bilan des effets de température est complexe et dépend de chaque situation.

II.5. Méthodes de mesure de la perméabilité

Dans cette partie, nous donnerons les définitions de base des grandeurs auxquelles nous ferons référence dans la suite de ce travail. Puis nous donnerons des exemples des différentes études expérimentales faites par d'autres auteurs concernant les méthodes de mesure de la perméabilité.

II.5.1. l'expérience de Darcy

Bien que le processus d'écoulement de fluides dans les milieux poreux aient intéressé les physiciens depuis fort longtemps, la notion de perméabilité doit son origine à Henri Darcy qui en 1856 définit pour la première fois cette grandeur dans un article intitulé « Les fontaines publiques de la ville de Dijon ». Dans une expérience restée célèbre, Darcy mesurait le débit de fluide recueilli après percolation d'eau à travers une colonne de sable (figure I-3).

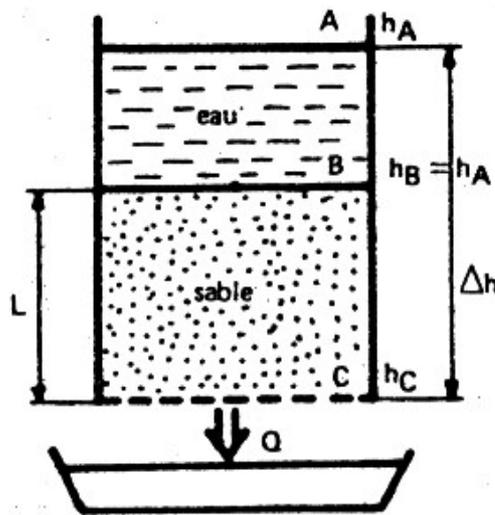


Figure I-3 : Schéma de l'expérience de Darcy réalisée en 1856 (d'après G. De Marsily, 1994).

En faisant varier les paramètres de l'expérience, il déduisit la loi phénoménologique suivante :

$$Q = -K_m A \frac{\Delta h}{L}$$

Q : le débit volumique du fluide.

Δh : la perte de charge de l'eau entre le sommet et la base du massif sableux.

K_m : une constante dépendant du milieu poreux, baptisée coefficient de perméabilité par les hydrogéologues.

A et L sont respectivement la section et l'épaisseur du massif sableux.

Soit U la vitesse fictive de fluide à la sortie du massif : $U = \frac{Q}{A}$, elle est appelée vitesse de filtration. De plus si on note $i = \frac{\Delta h}{L}$: la perte de charge par unité de longueur du milieu poreux traversé, dénommé encore gradient hydraulique, on obtient l'expression la plus simple de la loi de Darcy $U = K_m i$, [De Marsily, 1994].

La constante de perméabilité K_m dépend des propriétés des milieux poreux et de celles du fluide. Pour cette étude, on utilise la notion de *perméabilité intrinsèque* k indépendante des caractéristiques des fluides et tel que $K_m = \frac{k}{\mu}$ avec μ la viscosité dynamique du fluide. La perméabilité k est une propriété intrinsèque du milieu poreux dont la dimension est homogène à une surface.

II.5.2. Etude bibliographique sur les mesures expérimentales de la perméabilité

La connaissance de la perméabilité des roches aussi bien à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle du terrain est un thème de recherche majeur ; nombreuses études expérimentales et théoriques ont été consacrées à ce sujet. Un article de synthèse très complet [Brace, 1980] permet de se faire une idée de l'énorme variabilité du paramètre perméabilité dans les roches.

II.5.2.a. Effets d'échelle :

Dans cet article, Brace présente une compilation de données de perméabilité mesurées aussi bien en laboratoire qu'in situ. En laboratoire, par exemple, l'intervalle de variation de la perméabilité se situe environ entre 10^{-23} m² et 10^{-10} m². Près de 13 ordres de grandeurs séparent les roches les plus perméables (les sables et les grès peu consolidés) des roches les moins perméables (les roches métamorphiques ou cristallines non fracturées), ce qui est énorme.

Brace souligne que lorsqu'un échantillon testé en laboratoire est représentatif de la formation d'où il a été extrait, l'accord entre les perméabilités mesurées à différentes échelles est acceptable (les perméabilités varient dans un rapport de 1 à 10). Ce n'est pas le cas en général pour les roches cristallines comme par exemple les granites, affectés des systèmes de fractures ouvertes. La représentativité des mesures sur des échantillons de petites dimensions en laboratoire n'est par conséquent pas assurée pour la perméabilité. Brace a par exemple

constaté que pour certaines roches cristallines, la perméabilité à l'échelle de la formation rocheuse est 1000 fois supérieure à celle mesurée en laboratoire.

II.5.2.b. Exemples de mesure en laboratoire

Les essais de Peach J.C. [1991] réalisés sur le sel de Asse Speisesalz en Allemagne donnent une relation entre la perméabilité et le changement de volume, et la perméabilité en fonction de la pression de confinement. (figure I-4)

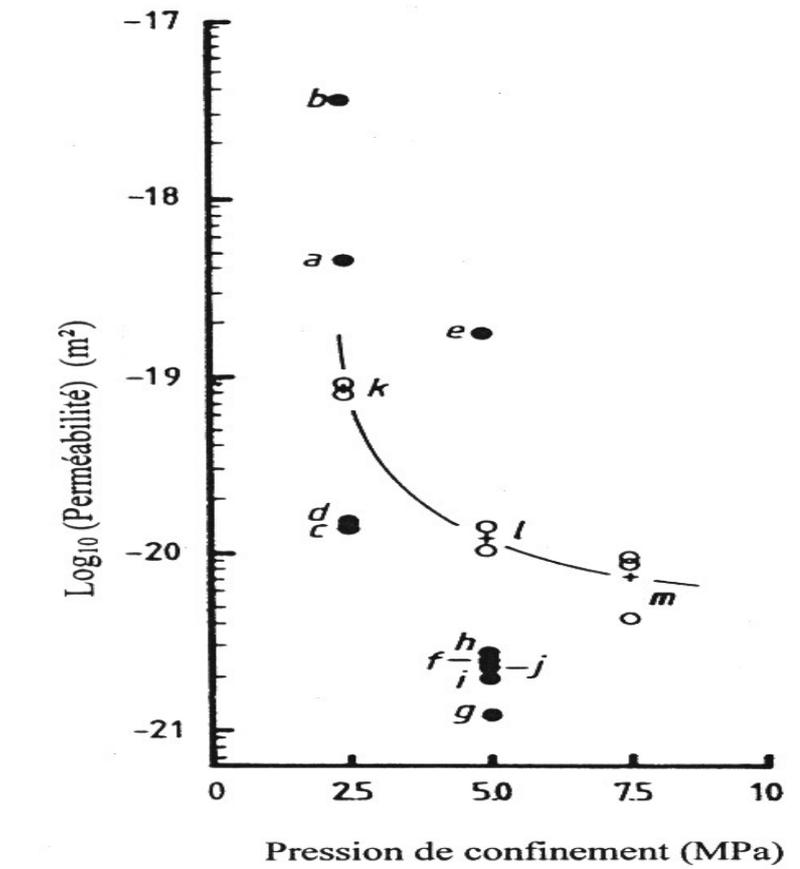


Figure I-4 : Influence de la pression de confinement sur la perméabilité du sel de Asse Speisesalz sur différents échantillons (d'après Peach, 1991)

Les expériences ont été faites avec une machine triaxiale modifiée pour permettre de mesurer le changement de volume en cours de l'essai. Ce changement de volume est mesuré en utilisant un potentiomètre linéaire pour enregistrer le déplacement du piston, la pression est mesurée à l'aide des jauges placées sur l'échantillon.

Les essais réalisés sur cette machine sont des essais de compression axisymétrique sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 70 mm et de hauteur 150 mm (ou respectivement 50 et 125 mm).

Peach réalise les mesures de perméabilité au gaz en injectant de l'Argon, les essais se déroulent à température ambiante.

Au cours d'un chargement déviatorique jusqu'à 45 MPa, une déformation d'environ 10% et une augmentation de perméabilité d'environ 4 ordres de grandeur ont été enregistrées. (figure I-5).

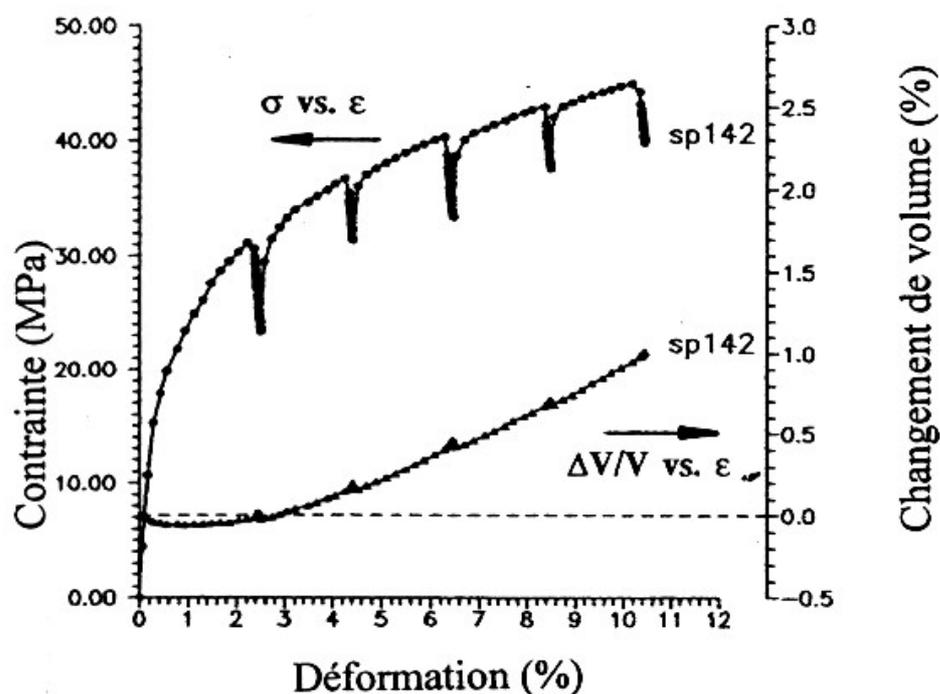


Figure I-5 : Contrainte et changement de volume ($\Delta V/V_0$) en fonction de la déformation (V_0 : volume initial de l'échantillon).

L'arrêt de chargement à 2% de déformation est fait pour déterminer la perméabilité. Les conditions de l'essai : $P_{\text{confinement}} = 5 \text{ MPa}$, $P_{\text{fluide}} = 1,5 \text{ MPa}$, échantillon sec, température ambiante et vitesse de déformation = $\dot{\epsilon} = 3.10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pendant la charge.

II.5.2.c. Exemples de mesure *in situ*

Les travaux de Cosenza Ph. [1996] consistaient à réaliser des essais de mesure de perméabilité *in situ* dans un sel non endommagé par l'excavation d'un ouvrage souterrain.

Le site choisi pour l'essai a été celui de la mine d'Amélie aux Mines de Potasse d'Alsace. Une chambre d'essai d'une hauteur de 75 cm a été créée dans un forage de diamètre égal à 146 mm, cette chambre est limitée de part et d'autre par deux chambres d'étanchéité remplies de résine.

Il s'agit d'injecter du gaz d'abord, pour mesurer la perméabilité initiale, le gaz utilisé pour ces essais est l'azote.

Au début de l'essai, la pression dans la chambre d'essai est imposée égale à une pression de référence donnée. Le principe du système d'injection de gaz consiste à transférer dans la chambre d'essai une masse de gaz connue chaque fois que la pression de la chambre atteint une valeur limite basse.

La deuxième étape consiste à mesurer la perméabilité à la saumure. Elle est obtenue en mesurant dans le temps le volume du fluide injecté dans la chambre pour maintenir une pression constante.

Enfin, une deuxième mesure de perméabilité au gaz est effectuée, de la même façon que la première, afin de comparer les deux valeurs et d'observer l'effet de la percolation de la saumure sur la perméabilité au gaz.

Les résultats obtenus dans la première et la deuxième étape donnent une valeur de perméabilité de 10^{-21} m², par contre pour la troisième étape, le gaz pénètre beaucoup plus difficilement, la présence de la saumure dans le massif entraîne une baisse du débit massique du gaz, ce qui confirme l'effet de la pression capillaire consécutif à la taille très faible des pores dans le sol.

Une autre méthode de détermination des propriétés hydrauliques des sols in situ est le test de pénétration de piézocone réalisée par Chung et al. [1999]. Un pénétromètre piézocone est enfoncé dans le sol à la profondeur voulue et un test de dissipation d'eau est réalisé. Pour obtenir les propriétés hydrauliques, il suffit d'analyser les résultats des tests de dissipation d'eau dans les pores. Cette procédure est méthodiquement simple et présente des valeurs de perméabilité relativement sûres comparée à d'autres méthodes. Cependant, elle reste une nouvelle méthode qui mérite beaucoup d'amélioration.

Le pénétromètre piézocone est introduit dans le sol avec une vitesse de 2 cm/s. Ainsi le mécanisme est contrôlé en déformation avec un drainage partiel. Par conséquent, l'excès de pression de pore durant la pénétration de piézocone est une fonction de la perméabilité du sol. Ainsi, avec une théorie qui prend en compte le couplage du solide et de flux d'eau, Chung peut déterminer la perméabilité du sol à partir de l'enregistrement des pressions de pore durant le test de pénétration du piézocone.

D'autres mesures de perméabilité in-situ ont été réalisées sur l'argile en utilisant un piézomètre. Les essais étaient visés pour établir la variation de la perméabilité axiale et latérale avec la profondeur. [Leroueil S. et al. 1992, Little J.A. et al. 1992].

III. ENDOMMAGEMENT DES ROCHES

L'endommagement est un état du matériau qui a subi, d'une façon ou d'une autre, un ensemble de sollicitations lui faisant modifier ses caractéristiques.

Dans cette étude, on s'intéresse à l'application de ces sollicitations sur différentes roches et aux modifications qu'elles peuvent induire sur la perméabilité.

La perméabilité de la roche peut être modifiée dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution selon que les sollicitations conduisent à une création de fissures ou à un écrasement des pores (phénomène de pore collapse). Dans le premier cas, on aura une augmentation de l'espace poreux (de la porosité interconnectée) susceptible de faire circuler le fluide, d'où l'augmentation de la perméabilité. Dans le deuxième cas, au contraire, on aura une diminution de cet espace, par suite une diminution de la perméabilité.

Les ouvrages souterrains, destinés au stockage des déchets radioactifs, sont soumis à des sollicitations pouvant créer une fissuration de la paroi et modifier les caractéristiques du massif au voisinage de l'ouvrage en induisant des microfissures dans la roche.

Dans cette partie, on présente une étude bibliographique donnant une description de l'endommagement et quelques méthodes utilisées pour son identification.

Pour décrire l'endommagement, Lemaître et Chaboche [1988] se basent sur la notion des discontinuités surfaciques pour les microfissures ou volumique pour les cavités. Les causes initiales de ce phénomène sont les mouvements et l'accumulation des dislocations dans les métaux, les modifications des liaisons intermoléculaires dans les matériaux organiques et les microdécohésions dans les minéraux.

Plusieurs mécanismes d'endommagement sont distingués :

- l'endommagement plastique ductile, qui accompagne les grandes déformations plastiques des métaux à la température ambiante et peu élevée ;
- l'endommagement viscoplastique fragile (ou de fluage), fonction du temps qui, pour les métaux à une température moyenne à élevée, correspond aux décohésions intergranulaires accompagnant les déformations viscoplastiques ;

- l'endommagement de fatigue (ou de microplasticité) dû à la répétition des contraintes et que l'on repère en fonction du nombre de cycles.
- l'endommagement macrofragile qui peut être provoqué par des sollicitations monotones sans déformations irréversibles appréciables, c'est le cas du béton par exemple.

L'endommagement est défini aussi par la détérioration progressive de la cohésion de la matière sous l'action de sollicitations monotones ou répétées pour conduire à la rupture de l'élément de volume, [Lemaître J., Chaboche J.L., 1988].

Des essais de compression et d'extension sur le sel gemme ont été réalisés par Thorel L. et Ghoreychi M. [1996]. Ils définissent le seuil d'initiation de l'endommagement par la limite de linéarité de la courbe contrainte moyenne en fonction de la déformation volumique et ils montrent qu'il est plus faible en extension qu'en compression. Ce résultat a été constaté sur plusieurs types de roches.

L'endommagement est considéré comme un phénomène de détérioration progressive du matériau soumis à des chargements et conduisant à la rupture, il se traduit physiquement par l'apparition des défauts d'ordre microscopique (micro-fissures ou micro-vides) au sein de la matière. Ces micro-défauts ont une influence sur le comportement du matériau, se traduisant notamment par une dégradation de certaines propriétés macroscopiques, comme par exemple, le module de Young, [Lemaître J., Dufailly J., 1977].

III.1. Méthode d'identification de l'endommagement

L'endommagement est très difficile à qualifier, ce résultat est affirmé par plusieurs chercheurs ayant essayé de l'identifier. Une façon de procéder pour évaluer l'endommagement est de mesurer la surface ou le volume de vide créé à l'intérieur du matériau à la suite des sollicitations appliquées. Dans les essais réalisés pour cette étude, on a évalué l'effet de l'endommagement (créé par un chargement déviatorique) sur les propriétés mécaniques de la roche (module de Young, module de compressibilité, coefficient d'emmagasinement...) et sur sa perméabilité.

Dans le paragraphe qui suit, quelques méthodes d'identification de l'endommagement sont présentées.

III.1.1. Méthode mécanique

Il n'y a pas de méthodes permettant d'accéder directement à la mesure de l'endommagement. Toutefois la mesure de caractéristiques mécaniques de la roche permet l'évaluation de l'endommagement.

Au laboratoire, plusieurs types d'essais hydro-mécaniques peuvent être réalisés afin de déterminer la valeur de quelques paramètres comme la perméabilité, le module d'Young et la compressibilité de la roche au cours des sollicitations. D'autres paramètres peuvent également être évalués (coefficient et module de Biot, coefficient de Skempton, module de compressibilité). L'enregistrement de l'évolution de ces paramètres pendant l'expérience permet de caractériser l'évolution de l'endommagement [Coste F., Bounenni A.,1999].

Nouailhas D. [1981], a étudié l'endommagement plastique à travers une étude expérimentale. Il montre qu'un matériau soumis à des grandes déformations plastiques, s'endommage progressivement jusqu'à la rupture. Un moyen d'accéder à la détermination de l'endommagement plastique est d'utiliser le couplage élasticité-endommagement. C'est ainsi que des variations de module d'élasticité, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement permettent de mettre en évidence l'anisotropie induite par endommagement.

III.1.2. Méthode ultrasonique

C'est une méthode qui consiste à soumettre l'éprouvette à un signal particulier d'une onde sonore et à enregistrer la réponse. Selon l'état du matériau, l'onde change de vitesse ; la propagation des ondes est perturbée par les discontinuités. Ainsi, plus il y a de création de fissures plus la propagation des ondes est perturbée, et la vitesse des ondes diminue. A chaque étape de chargement, l'échantillon est soumis à une onde permettant l'identification de l'endommagement, [Su K., Bounenni A. 1998].

III.1.3. Autres méthodes d'auscultation

Par ailleurs et à travers quelques études bibliographiques, on a constaté d'autres méthodes d'identification de l'endommagement.

III.1.3.a. Observation au microscope

L'observation au microscope apporte des informations sur l'évolution et la nature de la fissuration. De plus elle ne peut pas être facilement réalisée au cours d'un chargement et ne considère que la surface d'un échantillon ou, dans le cas d'un matériau plus au moins translucide tel que le sel, une profondeur proche de la surface.

Autres que les observations simples au microscope optique, il y a les microscopes électroniques environnementaux, qui peuvent apporter des informations plus précises et nettes sur la fissuration. Dans la présente étude, on a eu recours au microscope environnemental pour évaluer la nature et la taille de la fissuration (chapitre VII).

III.1.3.b. Emission acoustique

Cette méthode consiste à enregistrer les ondes acoustiques émises au cours de la fissuration de la roche. Cet enregistrement se fait à l'aide de transducteurs piézo-électriques.

Hardy [1988, 1993] utilise cette méthode pour étudier les phénomènes de dissolution-recristallisation à une interface solide-liquide, les émissions acoustiques enregistrées sont détectables lors des réactions chimiques dans les milieux aqueux. Hardy montre aussi que l'émission acoustique cesse lorsque le déviateur des contraintes est réduit ; il y a absence d'émission acoustique pour une contrainte inférieure à la contrainte précédemment atteinte.

Hunsche [1993] montre qu'il n'y a pas d'émission acoustique au cours d'un chargement isotrope et ne se développe qu'au cours d'un chargement déviatorique.

III.2. Méthode adoptée

Dans le présent travail, nous avons adopté une méthode de caractérisation de l'endommagement à partir de l'évolution du module de compressibilité de la roche. En effet, nous avons adopté le modèle d'endommagement de Lemaître-Chaboche [1988], qui définit, dans le cas isotrope, la variable d'endommagement D par la variation du module de Young :

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad \text{où} \quad \tilde{E} \text{ est le module de Young du matériau endommagé et } E \text{ celui du matériau sain.}$$

Or, dans le cas d'un chargement déviatorique axial en compression sur une éprouvette cylindrique, l'endommagement par fissuration affecte plutôt les modules d'élasticité dans les directions latérales, et le module d'élasticité axial ne varie pas beaucoup. Nos méthodes expérimentales permettent de mesurer les déformations axiales, donc le module axial, et les déformations volumiques, donc le module de compressibilité du matériau. Comme la déformation volumique comprend les déformations latérales, la variation du module de compressibilité intègre l'endommagement et l'évolution des modules d'élasticité dans les directions latérales. Ainsi, si nous adoptons une approximation isotrope de l'endommagement, (et nos méthodes expérimentales ne permettent pas d'aller beaucoup plus loin), c'est la variation du module de compressibilité qui est plus apte à représenter l'endommagement du matériau.

En négligeant la variation du coefficient de Poisson du matériau, on trouve, dans le modèle de Lemaître-Chaboche :

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} = 1 - \frac{\tilde{K}}{K} = -\frac{\Delta K}{K}$$

On a donc adopté partout dans ce travail, comme définition de la variable d'endommagement :

$$D = -\frac{\Delta K}{K}$$

où K est le module de compressibilité du matériau.

IV. BUT DE LA PRESENTE ETUDE

La formation géologique souterraine joue un rôle très important dans le stockage des déchets radioactifs en profondeur.

Les infiltrations des eaux souterraines à travers la barrière géologique sont les premières responsables de migration des radioéléments jusqu'à la surface et la biosphère.

La faible perméabilité est donc l'un des critères les plus importants à prendre en compte pour le choix de la formation géologique susceptible de stocker des déchets de haute activité et d'une longue durée de vie.

Cette étude illustre un ensemble d'expérimentations effectuées en laboratoire sur différents types de roches.

Les efforts ont été concentrés sur les deux sites étudiés pour un éventuel stockage souterrain : le site de l'Est et le site du Gard. Ainsi une grande partie de ces études est réalisée sur les matériaux provenant de ces deux sites à savoir respectivement les argilites de l'Est et les siltites du Gard.

Pendant le creusement, la roche est endommagée, il y a création de fissures. La perméabilité est affectée ainsi que plusieurs autres caractéristiques de la formation géologique.

Donc à partir d'un échantillon sain, on va reproduire, avec des sollicitations mécaniques, un état de fissuration proche de celui de la roche in situ après excavation. Des mesures de perméabilité à différentes étapes de chargement sont réalisées.

Les buts de ce travail de thèse sont :

- De déterminer l'influence de l'endommagement sur la perméabilité pour les argilites de l'Est et les siltites du Gard.
- De déterminer l'évolution de la perméabilité à différentes étapes de différents types de chargement sur la craie.
- De déterminer l'évolution de la fissuration et de la perméabilité de différents matériaux sous sollicitation thermique.
- D'évaluer l'effet d'émission des micro-ondes sur l'endommagement et la perméabilité de différents types de matériaux.

EXPERIMENTAUX

I. INTRODUCTION

Les appareils et les méthodes utilisés dans le programme expérimental sont assez performants pour permettre des trajets de chargement complexes et la mesure simultanée de différentes grandeurs.

Le programme est basé autour d'un appareil triaxial conçu dans le laboratoire de G.3S. Toutes les expériences ont été réalisées au G.3S.

Les principales mesures effectuées dans cette étude sont celles de la perméabilité et de la compressibilité avec différentes méthodes. Dans cette partie, seront décrit l'ensemble des appareils utilisés ainsi que les différents dispositifs et méthodes de mesure.

II. METHODES UTILISEES POUR LA MESURE DE LA PERMEABILITE

II.1. Méthode de mesure de la perméabilité axiale

Il y a une grande variabilité dans la perméabilité des roches ; pour les roches dites imperméables, telles que le sel gemme, l'argile ou le granite (à l'échelle matricielle), la perméabilité est de l'ordre de 10^{-21} m², tandis que pour les roches réputées perméables, on peut trouver une perméabilité supérieure à 10^{-14} m². Deux méthodes de mesure de perméabilité se présentent

II.1.1. Méthode en régime permanent

Lorsque la perméabilité est relativement facilement mesurable, par exemple supérieure à 10^{-19} m², la mesure en régime permanent est utilisée. Cette méthode consiste à imposer une pression de fluide (eau ou gaz) constante sur l'une des deux extrémités de l'éprouvette et le récupérer de l'autre. Cette pression est maintenue constante à travers un réservoir de grand

volume contenant du fluide en pression. La quantité (masse ou volume) du fluide sortant de l'éprouvette est mesurée.

La pression d'injection est mesurée à l'aide d'un capteur de pression et la différence de la pression entre les extrémités de l'éprouvette à l'aide d'un capteur différentiel, or les capteurs différentiels disponibles n'ont pas une résolution suffisante pour permettre de mesurer une très faible différence de pression, par exemple inférieure à 10^{-3} MPa, c'est pourquoi, on préfère utiliser un tube en U rempli à moitié d'eau pour mesurer la différence de pression. Chaque branche de tube en U est reliée à l'extrémité correspondante de l'éprouvette.

La différence de hauteur des deux colonnes d'eau du tube indique la différence de pression, [Su K. et Bounenni A., 1998].

II.1.1.a. Mesure à l'eau

lorsqu'on utilise de l'eau pour mesurer la perméabilité, et en admettant que la compressibilité de l'eau est négligeable, la perméabilité est calculée par la relation suivante :

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\Delta P \cdot S \cdot \rho} \quad [\text{m}^2] \quad (1)$$

avec Q : débit traversant l'éprouvette, [kg/s]

ρ : masse volumique de l'eau, [kg/m³]

μ : viscosité dynamique de l'eau, [Pa.s], (à T = 20°C, $\mu = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Pa.s)

L : hauteur de l'éprouvette, [m]

S : section de l'éprouvette, [m²]

ΔP : différence de pression entre les deux extrémités de l'éprouvette, [Pa].

II.1.1.b. Mesure au gaz

La mesure au gaz de la perméabilité est beaucoup plus sensible et différente de celle à l'eau, le gaz est très compressible.

En supposant que la loi de Darcy est valable localement et en appliquant l'équation de conservation de la masse dans le cas du régime permanent et unidimensionnel, on peut déduire, après calcul (annexe 1), que la perméabilité s'écrit sous la forme :

$$K = \frac{2P_0 \cdot L \cdot \mu}{(P_2^2 - P_1^2) \cdot S} \cdot Q_v \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

avec P_0 : pression atmosphérique (de référence), [Pa]

P_1 et P_2 : pressions imposées respectivement aux extrémités de l'éprouvette, [Pa]

L : longueur de l'éprouvette, [m]

S : section de l'éprouvette, [m²]

μ : viscosité dynamique, [Pa.s]

Q_v : flux volumique, [m³.s⁻¹]

II.1.2. Méthode en régime transitoire

Dans le cas où la perméabilité est très petite, inférieure à 10^{-19} m², les mesures en régime permanent ne seront plus faciles à réaliser. Une méthode en régime transitoire dite « essai pulse » généralement utilisée. L'appellation correspond à la traduction du terme anglais « pulse test ». Cette méthode consiste à imposer sur l'une ou les deux extrémités de l'éprouvette une pression provenant d'une masse de gaz ou d'eau contenue dans un réservoir. Au fur et à mesure de la pénétration de la masse fluide dans l'éprouvette, la pression dans le réservoir décroît. En connaissant les caractéristiques du fluide et la compressibilité du réservoir, la courbe de la pression dans le réservoir en fonction du temps permet de caractériser la perméabilité de l'éprouvette, moyennant certaines hypothèses sur l'écoulement.

On illustre, sur la figure II-1, la connexion des différents éléments de mesure. Le volume du réservoir dans lequel on mesure la décroissance de la pression dans le temps est constitué des éléments de tuyauterie hydraulique désignés sur la figure II-1 par les portions FC, CB, GA et le volume des pores du talon poreux ou du diffuseur poreux. Pendant l'essai pulse, l'évolution de la pression dans le réservoir est mesurée par le capteur de pression H et par l'injecteur de volume/pression GdS dont la précision est importante (quelques dizaines de mm³)

Le rôle de l'accumulateur est d'imposer une pression constante. Les robinets B et C étant fermés et en réglant le détendeur D, le fluide dans l'accumulateur est soumis à une pression. Ensuite les robinets A et B sont ouverts, on vérifie si la pression affichée par l'injecteur GdS correspond bien à la pression d'injection désirée et on ferme le robinet E. Enfin, le robinet C est ouvert rapidement, ainsi une pression sur la surface d'injection de l'éprouvette est imposée. Aussitôt après, on ferme le robinet B. Cette configuration est gardée pendant environ 300 secondes. De cette façon, une décroissance de la pression en fonction du temps est enregistrée au niveau de l'injecteur, et c'est cette décroissance qui donne, après analyse, la valeur de la perméabilité.

L'interprétation des résultats de l'essai se fait à l'aide du code ANTHYC. Ce code a été développé pour la modélisation des couplages entre les comportements mécaniques et les phénomènes de transfert en milieux poreux.

Une version de ce code, utilise une méthode basée sur les Volumes Finis (la méthode des éléments finis a également été implantée dans une version plus récente). Cette méthode, très utilisée en mécanique des fluides, et pour l'étude des phénomènes de transfert dans les géomatériaux, est bien adapté à l'étude des milieux poreux, soumis à des interactions entre les processus de transfert et le comportement mécanique. Le code a été développé avec le souci de rester très général, de manière à pouvoir traiter les différents couplages, non linéarités et anisotropies éventuelles. Ce code a déjà été validé, et utilisé dans le cas des couplages thermo-hydro-chimico-mécaniques en deux dimensions en milieux poreux saturés (biphasé). Une autre version traitant le cas de deux phases fluides sera bientôt opérationnelle (milieu non saturé), en 2D et en 3D.

Dans cette étude, le code ANTHYC est utilisé pour établir les abaques donnant la pression du réservoir d'injection en fonction du temps pour différentes perméabilités.

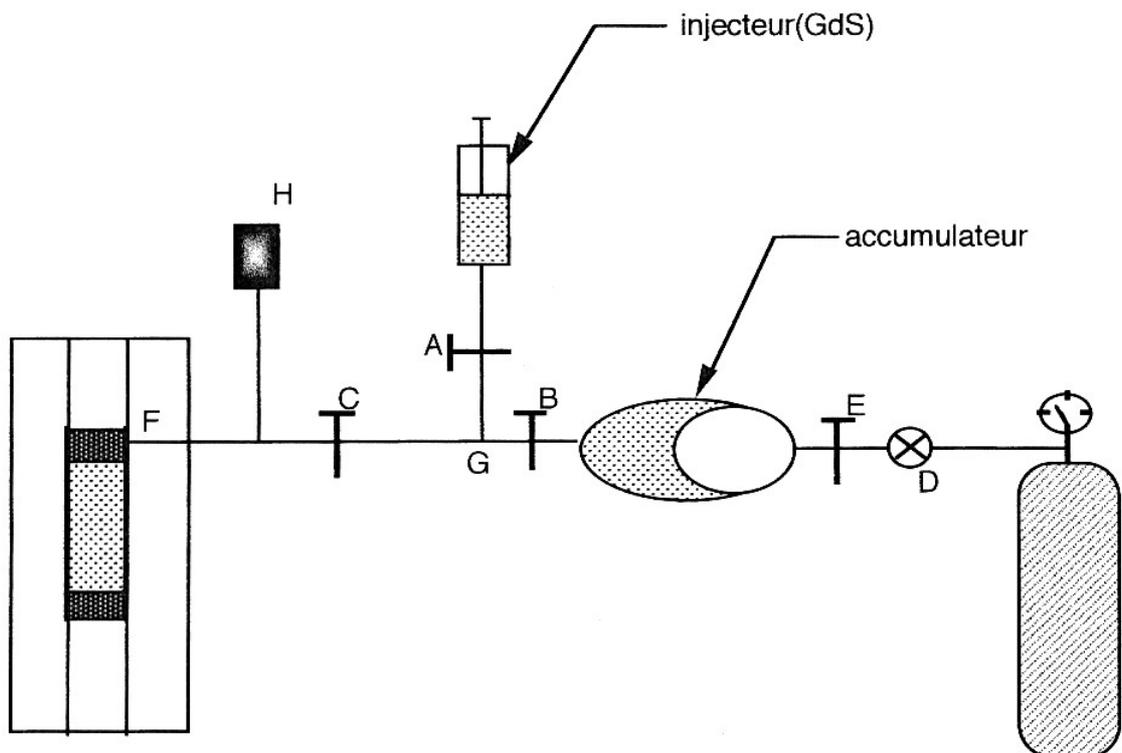


Figure II-1 : Schéma du dispositif de mesure de perméabilité par la méthode transitoire : « Essai pulse »

A, B, C et E sont les robinets du circuit.

D est un détendeur.

H est un capteur de pression.

A partir de ces abaques et de la courbe déterminée expérimentalement, on peut ajuster avec une bonne approximation la valeur de la perméabilité.

Les considérations théoriques, les modélisations numériques et la validation des calculs numériques sont données dans l'annexe 3.

II.2. Méthode de mesure de la perméabilité latérale

Les perméabilités axiale et latérale sont mesurées par des dispositifs expérimentaux différents. La mesure de la perméabilité latérale présente des grandes difficultés surtout pour ce qui concerne l'étanchéité du système.

Une méthodologie est mise au point permettant de mesurer la perméabilité latérale au cours des chargements mécaniques.

II.2.1. Méthode en régime permanent

Cette méthode consiste à imposer une différence de pression de fluide sur les portions de la surface latérale couverte par les diffuseurs. L'étanchéité du système est difficilement assurée. Un moule a spécialement été conçu pour pouvoir construire la jaquette en présence des diffuseurs et des tuyaux d'injection.

II.2.1.a. Mesure à l'eau

En admettant que la compressibilité de l'eau est négligeable, le débit volumique traversant l'éprouvette s'écrit sous la forme : [Collins R.E., 1952]

$$Q = \frac{k \cdot \Delta P \cdot L}{\mu}$$

avec Q : débit volumique, [m³/s]

ΔP : différence de la pression entre les deux diffuseurs, [Pa]

Alors la perméabilité s'écrit :

$$k = \frac{Q \cdot \mu}{\Delta P \cdot L} \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

II.2.1.b. Mesure au gaz

Le même dispositif est utilisé. Au lieu d'injecter de l'eau, on injecte de l'azote. Pour l'interprétation des résultats, une méthode numérique est utilisée. Avec le code de calcul « ANTHYC », on établit une courbe de débit volumique de gaz en fonction de la pression d'injection pour un matériau de perméabilité connue ($k_{ref} = 10^{-14} \text{ m}^2$). D'après les résultats, on a une courbe de débit qui varie linéairement avec la pression d'injection. Dans la gamme des pressions qui nous intéresse, c'est à dire, une très faible pression d'injection, la relation obtenue entre le débit et la différence de pression à partir de la courbe de la figure II-2 est :

$$Q_{ref} = -0,13 + 3,74 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta P$$

Comme le débit varie linéairement en fonction de la perméabilité, on a donc la relation suivante :

$$\frac{Q_{mesuré}}{Q_{ref}} = \frac{k}{k_{ref}}$$

une relation entre la perméabilité et le débit est alors obtenue :

$$k = \frac{Q_{mesuré}}{Q_{ref}} k_{ref}$$

$$k = \frac{Q_{mesuré}}{-0,13352 + 3,7443 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta P} \cdot 10^{-14} \quad [\text{m}^2]$$

$Q_{mesuré}$ est le débit mesuré en $[\text{cm}^3/\text{min}]$, (unité donnée par le débitmètre),

[Su K. et Bounenni A., 1999].

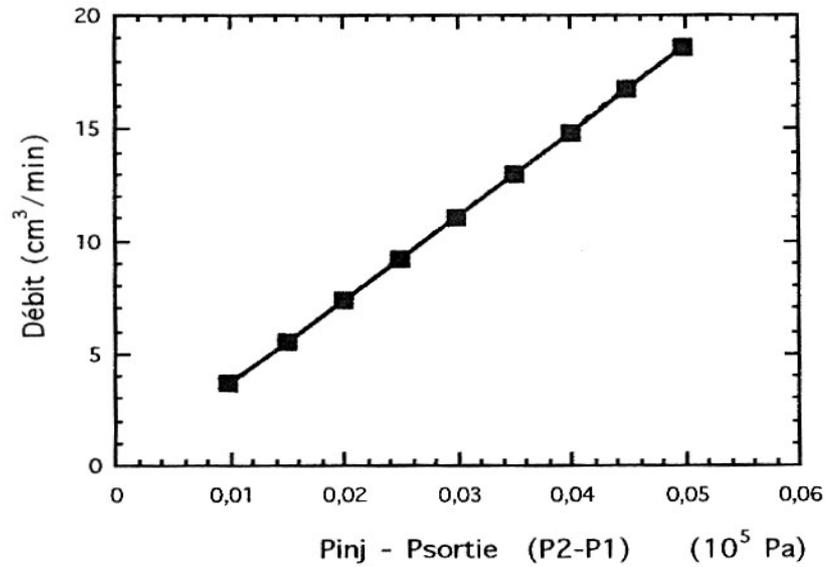


Figure II-2 : Débit latéral en fonction de la différence de pression latérale sur une éprouvette cylindrique de 60 mm de diamètre (la pression de sortie est maintenue à 10^5 Pa).

II.2.2. Méthode en régime transitoire

Lorsque la mesure de débit en régime permanent s'avère pratiquement impossible, la méthode adaptée est celle de l'essai pulse, dont le principe est décrit dans le paragraphe précédent.

La figure II-3 montre le dispositif expérimental pour mesurer la perméabilité latérale par la méthode de l'essai pulse.

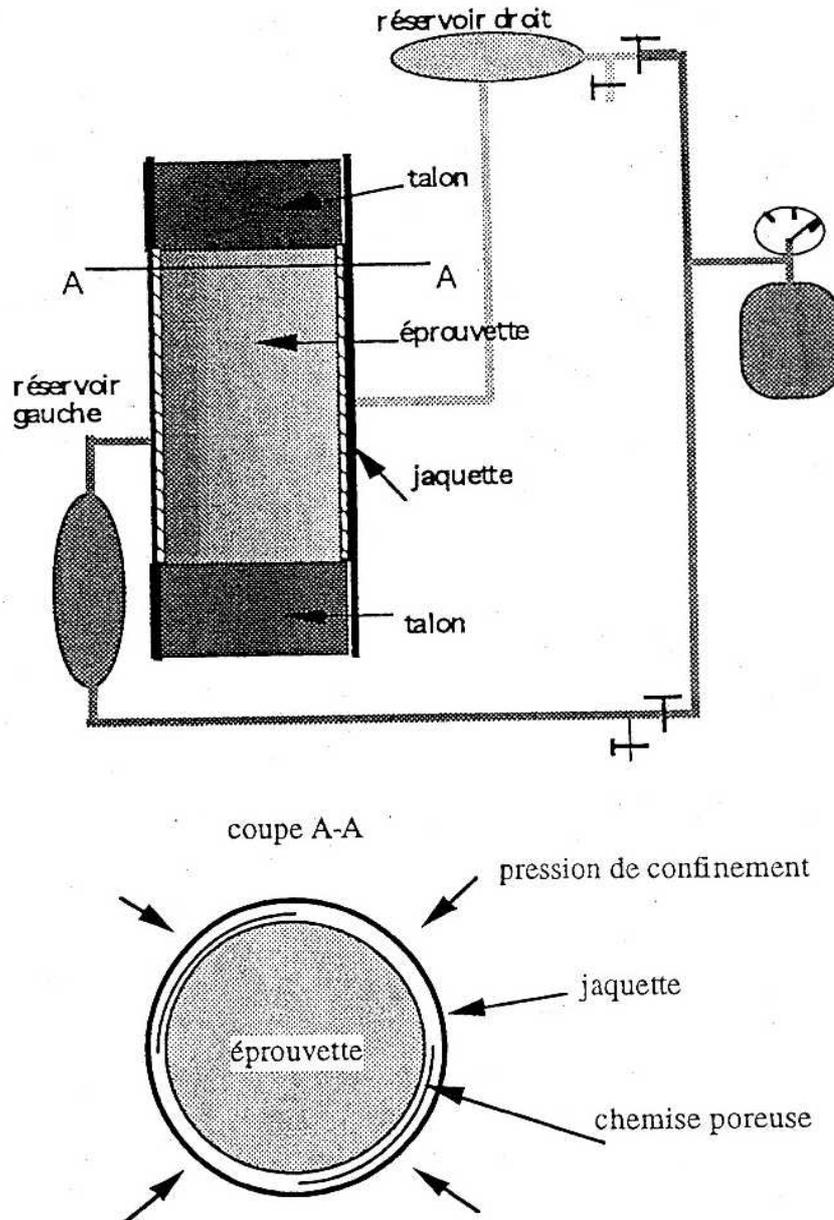


Figure II-3 : Schéma théorique d'un dispositif latéral de l'essai pulse.

La coupe A-A montre bien les diffuseurs (chemise poreuse) qui sont installés symétriquement sur le quart du périmètre de l'éprouvette, l'ensemble est maintenu avec la jaquette et la pression de confinement.

II.3. Compressibilité du réservoir

En plus de l'affichage de la pression pendant la mesure du pulse test, le contrôleur de volume/pression GDS permet aussi de caractériser la compressibilité du réservoir (coefficient d'emmagasinement du réservoir) ; pour cela un injecteur est utilisé pour imposer un trajet de

charge-décharge de la pression d'injection entre 0 et 1,5 MPa pendant un temps relativement court.

La compressibilité du réservoir a un rôle important dans la précision de la mesure de l'essai pulse. Plus la valeur de la compressibilité est petite plus la pression du réservoir est sensible à la pénétration du fluide dans l'éprouvette et meilleurs sont les résultats. Donc pour avoir des bons résultats, il faut diminuer la compressibilité du réservoir, pour cela la longueur des tuyaux impliqués dans le volume du réservoir est réduite au maximum. Par ailleurs, des précautions ont été prises pendant le remplissage des tuyaux et le montage de l'éprouvette pour s'assurer de la saturation en eau de tout le circuit. En fait, à chaque montage de l'éprouvette, il y a toujours inévitablement un peu d'air qui se piège à l'intérieur du système en quantité variable d'un essai à l'autre et ceci malgré toutes les précautions prises pendant le montage. Il s'avère donc que la compressibilité du réservoir varie, elle aussi, d'un essai à l'autre.

A chaque essai, la compressibilité du réservoir est mesurée en présence de l'éprouvette, la présence de celle-ci est supposée sans influence sur la mesure de la compressibilité du réservoir ; à l'aide de l'injecteur GdS, une montée en pression est appliquée puis une descente à une vitesse maximale, le robinet B (figure II-1) reste fermé pendant le test, la durée d'un cycle de charge-décharge est d'environ 30 secondes.

Pendant un test de compressibilité du réservoir, la pression et le volume de GdS sont enregistrés. On représente sur la figure II-4 la courbe donnant le volume de GdS en fonction de la pression de GdS. On constate qu'à la fin du cycle charge-décharge, le volume d'injection affiche un volume inférieur à celui affiché au départ. Cela signifie que pendant le cycle charge-décharge une quantité du fluide est sortie du réservoir, cette quantité est de l'ordre de 100 mm^3 ; elle correspond à la pénétration du fluide dans l'éprouvette et à la déformation irréversible du réservoir au niveau des interfaces des talons.

Par ailleurs, toute fuite au niveau des différentes connexions des tuyaux dans la chaîne de mesure, que ce soit entre les tuyaux et les talons poreux ou entre les talons poreux et l'éprouvette, peuvent être exclues ou négligeables car les tests d'étanchéité effectués auparavant sur le système n'ont relevé aucune fuite détectable pour une période de l'ordre de 24 heures. Mais s'il y a une fuite à l'intérieur de la cellule, on doit constater une augmentation rapide de la pression interstitielle, car la pression de confinement est toujours plus élevée que la pression d'injection.

La décroissance de la pression pendant la mesure de l'essai pulse est en générale faible ($< 0,1 \text{ MPa}$). La compressibilité du réservoir est mesurée pour une valeur de pression proche de la pression d'injection. Ainsi, pendant le test de compressibilité, l'influence de la pénétration du fluide dans l'échantillon est négligée à condition que le cycle charge-décharge soit le plus rapide possible et que la perméabilité de l'éprouvette soit faible.

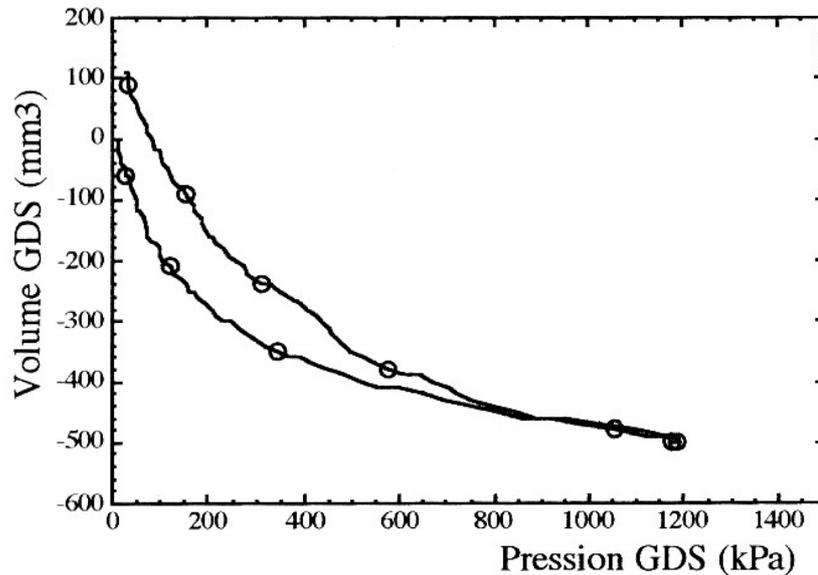


Figure II-4 : « Volume-pression d'injection » de GDS pendant un test de compressibilité du réservoir.

III. CARACTERISATION DE LA VARIABLE D'ENDOMMAGEMENT

Soit la variable d'endommagement de Lemaître et Chaboche définie comme suit :

$D = 0$ correspond à l'état non endommagé ou vierge

$D = 1$ correspond à l'élément de volume rompu en deux parties

$0 < D < 1$ caractérise l'état d'endommagement.

D étant un endommagement isotrope constitué de fissures et cavités dont l'orientation est distribuée uniformément dans toutes les directions ; le scalaire D caractérise complètement l'état de dommage.

Dans le cas unidimensionnel, si F est la force appliquée sur une section S de l'élément de volume représentatif, $\sigma = \frac{F}{S}$ est la contrainte usuelle qui satisfait les équations d'équilibre.

En présence d'un endommagement isotrope de mesure D , la section résistante effective est :

$$\tilde{S} = S - S_D = S(1 - D)$$

avec S_D la surface endommagée.

Si l'on pose, par définition de la contrainte effective (ne pas confondre avec la contrainte effective au sens de Terzaghi) :

$$\tilde{\sigma} = \sigma \frac{S}{\tilde{S}} \quad \text{soit} \quad \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad \tilde{\sigma} \geq \sigma$$

La loi d'élasticité linéaire unidimensionnelle d'un matériau endommagé s'écrit :

$$\varepsilon_e = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1 - D)E}$$

E étant le module de Young : module d'élasticité du matériau vierge.

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1 - D)} = E\varepsilon_e$$

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon_e$$

soit $\tilde{E} = (1 - D)E$ le module d'élasticité du matériau endommagé
ce qui donne :

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}$$

Or le module de compressibilité du matériau vierge s'écrit sous la forme :

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \Rightarrow \quad E = 3(1 - 2\nu)K$$

Soit \tilde{K} le module de compressibilité du matériau endommagé :

$$\tilde{K} = \frac{\tilde{E}}{3(1 - 2\tilde{\nu})} \quad \Rightarrow \quad \tilde{E} = 3(1 - 2\tilde{\nu})\tilde{K}$$

En supposant que le coefficient de Poisson est inchangé avant et après l'endommagement, on présente la variable d'endommagement sous la forme :

$$D = 1 - \frac{\tilde{K}}{K} \quad (4)$$

IV. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les éprouvettes utilisées sont cylindriques avec un diamètre de 60 mm et une hauteur de 120 mm. Pendant le carottage, le refroidissement est assuré à l'air, aucun liquide de lubrification n'est utilisé pour éviter toute perturbation pouvant atteindre les caractéristiques initiales des éprouvettes et les mesures de la perméabilité.

Il est important de chercher à obtenir un bon état de surface, mais surtout il faut veiller à ce que les faces planes soient bien perpendiculaires à la génératrice du cylindre. Si les surfaces terminales de l'éprouvette ne sont pas d'équerre par rapport à l'axe cylindrique, ou si elles ne sont pas parfaitement parallèles, il peut y avoir un défaut d'alignement lors du montage ainsi qu'un contact imparfait entre l'éprouvette et les talons amont-aval dans la cellule. Ceci est à éviter absolument car il peut en résulter une hétérogénéité du champ de contraintes dans l'échantillon.

Enfin, les éprouvettes ont été conditionnées dans un emballage de papier aluminium, qui a ensuite été recouvert de paraffine. Elles ont été placées dans une chambre froide à une température de 8°C environ.

V. PREPARATION DE L'EAU D'INJECTION

Il est préférable d'utiliser l'eau comme fluide d'injection pour mesurer la perméabilité. Dans le cas d'un gaz, l'interprétation sera plus compliquée en présence de deux phases fluides (théorie du milieu non saturé).

Le matériau étant a priori saturé, l'eau qui se trouve à l'intérieur de l'éprouvette a sûrement une composition chimique différente de celle de l'eau distillée. Pour cette raison, il a fallu utiliser une eau dont la composition chimique se rapprochait au mieux de celle de l'eau présente dans le matériau en place. Vu que la teneur en eau de certains matériaux ainsi que leurs perméabilités sont très faibles, il est impossible d'extraire une quantité suffisante d'eau à partir de ce matériau pour l'utiliser ensuite comme fluide d'injection.

Une eau a été préparée spécialement : 5 litres d'eau distillée et 2 Kg de matériau broyé sont mélangés sous vide. Ce mélange est remué régulièrement pendant plusieurs jours. Le produit

mélangé est filtré plusieurs fois avec du papier Joseph jusqu'à l'obtention d'un fluide clarifié et sans dépôt.

Ainsi, on obtient une eau jugée proche chimiquement de la composition de l'eau interstitielle du matériau et que l'on peut utiliser comme fluide d'injection sans risque de réaction chimique majeure susceptible d'agir sur le matériau et sur l'écoulement du fluide à l'intérieur de l'éprouvette. Avec cette procédure, quelques litres de fluide d'injection ont été préparés.

❖ **Méthode de saturation :** il est important que les éprouvettes soient saturées au moment de l'injection de l'eau, sinon dans le cas contraire l'éprouvette sera dans un état désaturé, la présence d'une petite quantité d'air à l'intérieur de l'éprouvette pose un grand problème de circulation d'eau. Donc la saturation de l'éprouvette est indispensable avant le début de l'essai.

La méthode utilisée est celle de la saturation par capillarité ; l'éprouvette est mise dans un récipient d'eau, seulement la base de l'éprouvette (environ 2 cm) est immergée dans l'eau, le reste de l'éprouvette sera saturée par capillarité. Si le matériau présente une faible perméabilité, cette opération se réalise sous vide.

VI. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX UTILISES

Les propriétés essentielles que l'on a mesurées au laboratoire au cours des chargements mécaniques sont la perméabilité, les déformations et les modules de compressibilité.

Pour étudier ces propriétés physiques, différents dispositifs de mesure sont utilisés :

VI.1. Machine triaxiale

Tous les essais ont été réalisés sur une machine conçue spécialement pour effectuer des essais uniaxial et triaxial sur les roches et les bétons, avec une attention particulière pour les études du comportement après rupture.

La cellule (figure II-5) a été conçue par G.3S, elle est installée sur une presse MTS (Mechanics Testing System) de 1500 KN et de rigidité 10^9 N/m. Un système d'asservissement hydraulique précis de la pression de confinement qui permet d'atteindre 100 MPa. Deux circuits hydrauliques, reliés aux talons perforés en bas et en haut de l'éprouvette, qui servent à injecter et récupérer l'eau interstitielle. Une plaque chauffante qui peut atteindre la température de 200°C et un circuit de refroidissement. Enfin, un capteur de force qui

enregistre la force appliquée par le piston en haut de l'éprouvette. En bas du piston, il y a un système rotule qui assure une bonne répartition uniforme de la force axiale sur l'éprouvette.

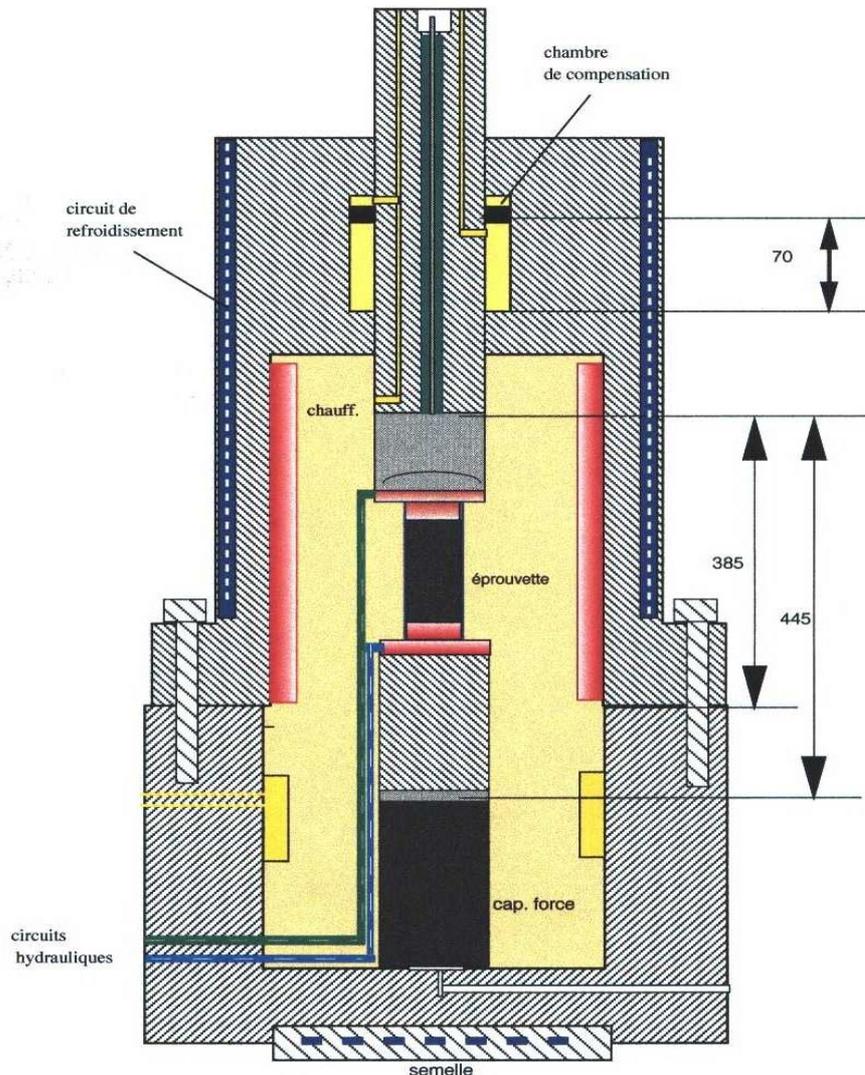


Figure II-5 : Schéma simplifié de la cellule triaxiale.

VI.2. Les extensomètres

Les mesures de déformation axiale et latérale sont nécessaires pour déterminer les constantes élastiques, comme le module d'Young et le coefficient de Poisson, ainsi que les déformations anélastiques qui précèdent la rupture. La déformation volumique anélastique est spécialement importante parce qu'elle permet une mesure sensible de la microfissuration et par suite de l'endommagement.

Les mesures de déformations sont aussi utilisées pour piloter les essais. La déformation latérale est utilisée pour contrôler les tests dans lesquels le comportement contrainte-

déformation doit être mesuré dès le début de la microfissuration jusqu'au-delà de la contrainte de rupture. Pour les tests de compression, les microfissures sont créées dans le sens axial et leurs ouvertures contribuent considérablement à la déformation latérale.

On utilise deux extensomètres axial et latéral placés directement sur l'ensemble éprouvette-jaquette à l'intérieur de la cellule. L'extensomètre axial est fixé sur un support permettant de mesurer le déplacement relatif des épontes, tandis que l'extensomètre latéral entoure le périmètre de l'éprouvette par une chaînette, et mesure la variation circonférentielle de l'éprouvette. Ces deux extensomètres ont une résolution meilleure que 10^{-6} en déformation et fonctionnent sans dérive à haute pression qui peut atteindre 100 MPa (et à température élevée, 200°C). (Figure II-6 et II-7).

VI.3. Injecteur de volume/pression GDS

C'est un contrôleur digital pour la régulation précise et la mesure des changements de pression et de volume d'un liquide.

Le GDS permet de générer, mesurer et d'enregistrer la pression de liquide et le changement de volume.

Cet instrument a plusieurs utilisations. En général, il est utilisé comme une source de pression constante, une jauge pour le changement de volume ou encore comme un système de mesure de pression de pore.

L'injecteur de volume/pression se présente sous la forme d'un cylindre et un piston se déplaçant à l'intérieur comme un système vis-écrou. Le piston est activé par un moteur à pas et une boîte à vitesse et qui se déplace rectilignement dans le cylindre.

L'injecteur GDS est relié directement à un ordinateur, il y envoie et reçoit les informations (pression, volume).

VII. MONTAGE DE L'ESSAI

Les éprouvettes utilisées pour les expériences, réalisées avec la presse 1500 kN, sont cylindriques ayant un diamètre de 60 mm et une hauteur de 120 mm. Après la saturation, l'éprouvette est placée dans une jaquette en viton d'épaisseur 1,6 mm, de diamètre légèrement supérieur à celui de l'éprouvette pour pouvoir rentrer dedans et avoir un bon ajustement et une hauteur de 140 mm, dix millimètres dépassent l'éprouvette de chaque côté pour assurer l'encastrement de la jaquette dans les deux talons poreux de la cellule et augmenter l'étanchéité au moment de l'injection de l'eau. L'ensemble (éprouvette + jaquette) est installé dans la cellule et on fixe dessus les deux extensomètres.

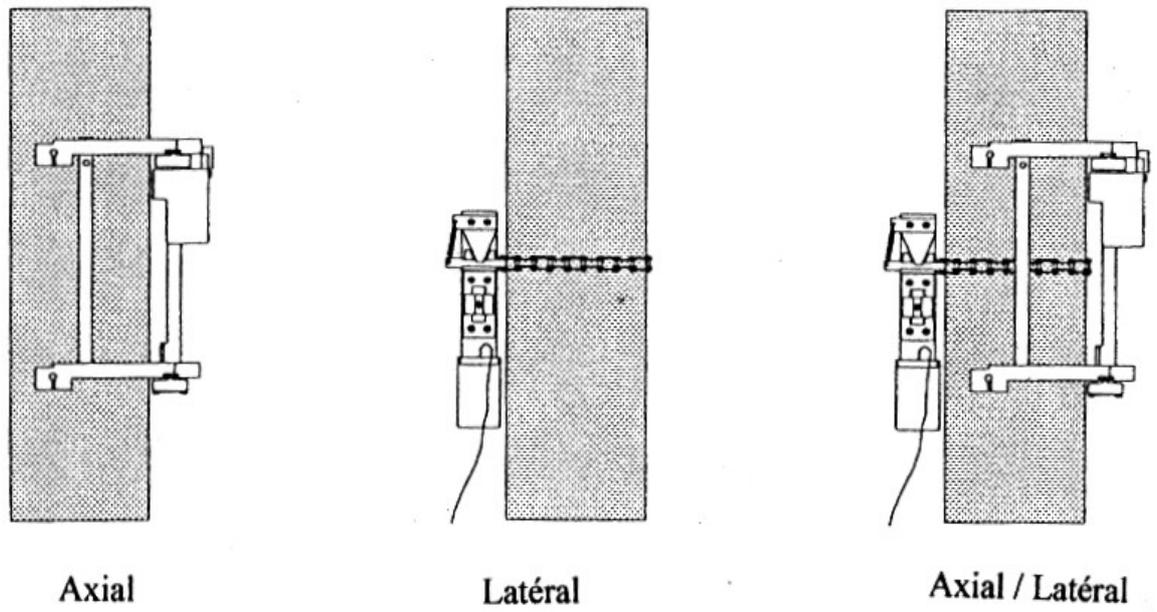


Figure II-6 : Présentation des deux extensomètres axial et latéral.

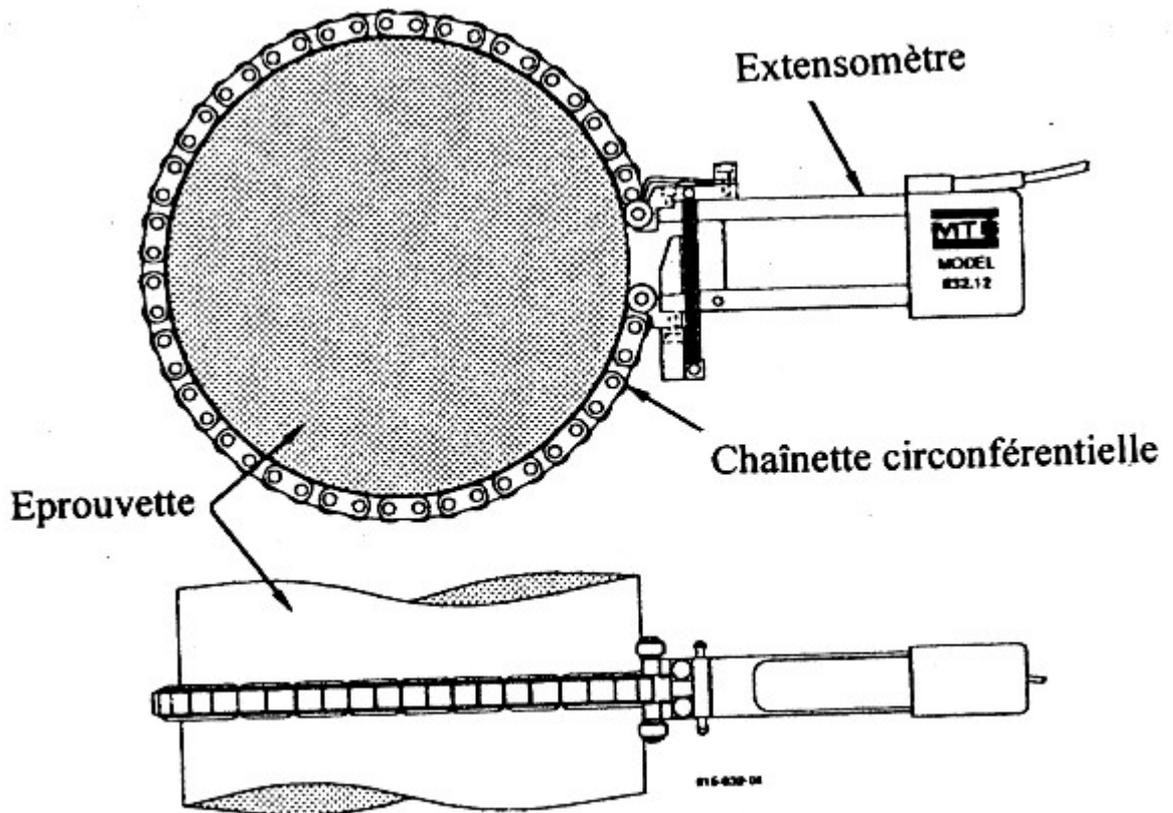


Figure II-7 : Extensomètre latéral.

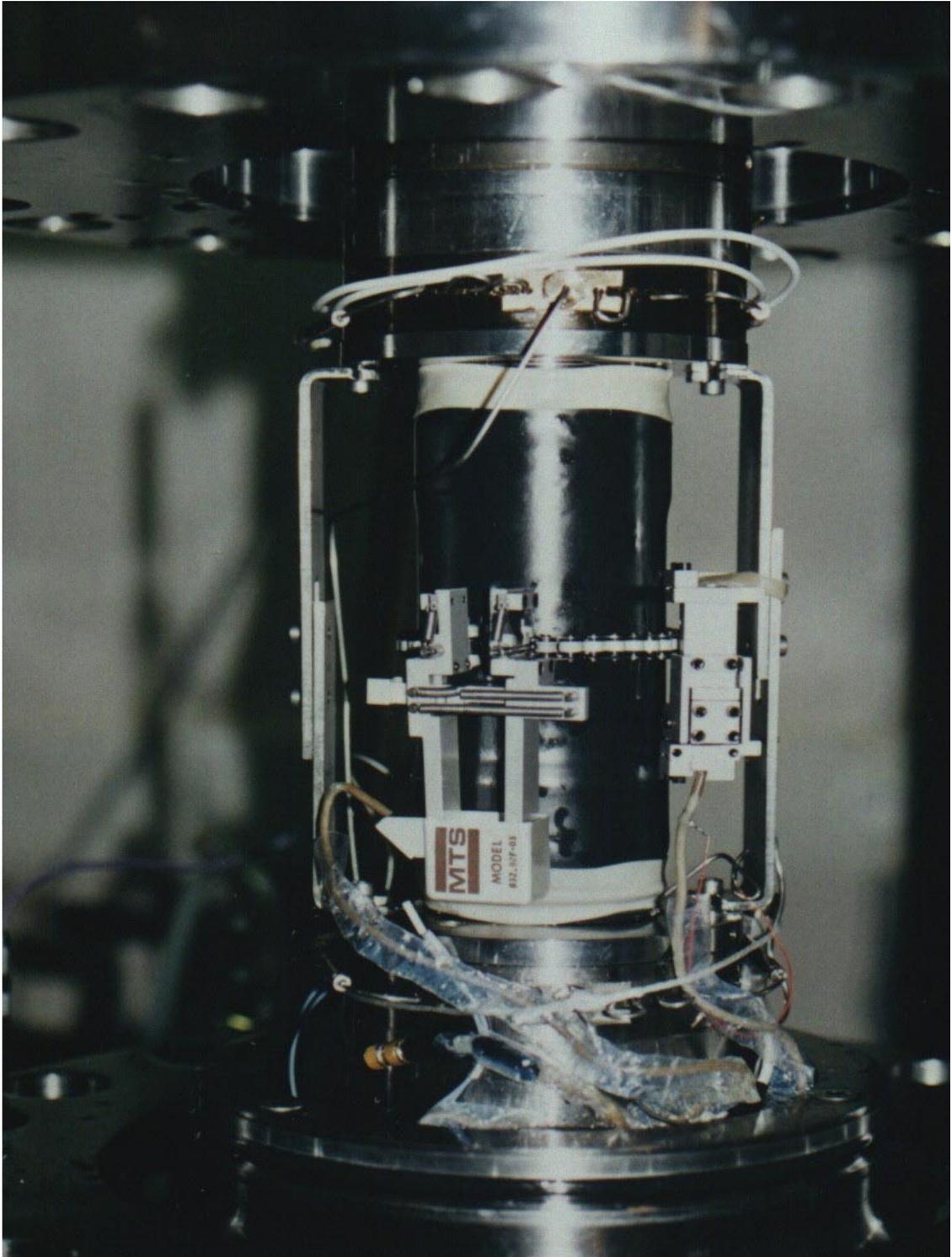


Figure II-8 : Photographie de l'ensemble (éprouvette, jaquette et les deux extensomètres) placé entre les deux talons de la cellule.

I. ETUDE DE LA PERMEABILITE DU GRES

La première application expérimentale qu'on a réalisée au début de l'étude est la mesure de la perméabilité du grès de Fontainebleau dont on connaît a priori la valeur, cela dans le but de s'assurer d'une part du bon fonctionnement du système de mesure et d'autre part de la validation des différentes méthodes de mesure de la perméabilité. Les mesures effectuées sont des mesures des perméabilités axiale et latérale en injectant deux fluides différents (l'eau et le gaz) à différentes pressions de confinement.

Toutes les expériences ont été réalisées sur des échantillons ayant, à peu près, une porosité de 10%.

Pour étudier l'influence de la nature du fluide de pore sur la perméabilité, Jacquin [1964] a effectué plusieurs essais sur le grès de Fontainebleau. Ces essais consistent à mesurer la valeur de la perméabilité de ce grès en injectant deux fluides différents qui sont l'air et l'eau. D'après la loi de Darcy, la perméabilité intrinsèque a été définie comme une propriété indépendante des caractéristiques du fluide de pore.

Pour un grand nombre d'échantillons de grès de Fontainebleau, Jacquin a présenté des résultats comparatifs des mesures de perméabilité à l'eau et à l'air. La gamme de porosité des échantillons est très large : entre 5% et 10% ; il en est de même pour les perméabilités qui varient entre $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ et $8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$. Les résultats sont présentés sur la figure III-1 suivante :

Figure III-1 : Corrélation expérimentale entre perméabilité à l'eau et perméabilité à l'air pour plusieurs échantillons de Grès de Fontainebleau (d'après Jacquin, 1964).

Une bonne corrélation linéaire est obtenue entre la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau, (figure III-1). On note que la perméabilité intrinsèque est la même pour les deux fluides utilisés. Toutefois ce résultat ne doit pas être généralisé à toutes les roches sans une vérification spécifique.

I.1. Validation de l'essai à l'eau

Dans cette partie, les essais sont effectués sur des échantillons a priori saturés au départ, les perméabilités ont été mesurées en suivant la méthode en régime permanent. Une fois en place dans la cellule et entouré par la jaquette, l'échantillon est mis sous pression de confinement ; une petite pression est nécessaire pour maintenir l'étanchéité du système, autrement dit pour empêcher l'infiltration du fluide d'injection entre l'échantillon et la jaquette. Ensuite une pression d'eau de valeur équivalente à un mètre d'eau (10^4 Pa) est injectée.

Sous différentes pressions de confinement et à chaque pression d'eau injectée, une mesure de la quantité d'eau sortante est effectuée durant un intervalle de temps fixé.

Par la suite, et à l'aide des relations déjà indiquées au chapitre précédent on détermine les valeurs de la perméabilité. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-après.

I.2. Validation de l'essai au gaz

Dans ce cas, l'expérience est réalisée sur un échantillon sec ; l'échantillon est mis dans l'étuve à 120°C pendant 48 heures. Avec la même procédure que pour l'essai à l'eau, l'échantillon est mis dans la cellule avec la jaquette et sous pression de confinement, puis on injecte une pression de gaz (azote). La pression d'injection varie entre 30 et 50 cm de colonne d'eau (3.10^3 et 5.10^3 Pa). Les perméabilités sont calculées et présentées dans le tableau III-1 suivant :

Pression de confinement (MPa)	Perméabilité axiale (m^2)		Perméabilité latérale (m^2)	
	gaz	eau	gaz	eau
2	$1,40 \cdot 10^{-14}$	$1,40 \cdot 10^{-14}$	$2,50 \cdot 10^{-15}$	$1,60 \cdot 10^{-14}$
20	$1,40 \cdot 10^{-14}$	$7,57 \cdot 10^{-15}$	$2,50 \cdot 10^{-15}$	$1,30 \cdot 10^{-14}$

80	$1,40 \cdot 10^{-14}$	$3,47 \cdot 10^{-15}$	$2,50 \cdot 10^{-15}$	$9,54 \cdot 10^{-15}$
----	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Tableau III-1 : Résultats des mesures de la perméabilité axiale et latérale, à l'eau et au gaz effectuées sur le grès de Fontainebleau.

I.3. Constatations

La perméabilité du grès au gaz, axiale et latérale, est absolument constante sous les différentes pressions de confinement. Par contre celle à l'eau présente quelques différences ; elle décroît en fonction de la pression de confinement.

Les perméabilités axiale et latérale à l'eau sont presque identiques, ce qui signifie que les propriétés hydrauliques du grès de Fontainebleau sont isotropes. Mais en même temps, sachant a priori que la perméabilité du grès de Fontainebleau est isotrope, ce résultat permet de valider notre méthode de mesure de la perméabilité latérale.

La perméabilité axiale au gaz est proche de celle à l'eau.

I.4. Conclusion

La perméabilité du grès a été mesurée, à l'eau et au gaz, sans difficulté remarquable.

Les valeurs de perméabilité trouvées sont proches de celles figurants dans la littérature.

Ces expériences nous ont donc permis de tester et de valider nos méthodes expérimentales.

Toutefois, le grès de Fontainebleau étant un matériau particulier et assez perméable, on a apporté des améliorations aux dispositifs expérimentaux au niveau de l'étanchéité du système et de la diffusion de la pression d'injection, afin de pouvoir réaliser des expériences sur d'autres roches, nettement moins perméables.

Chapitre IV

**MESURE DE LA PERMEABILITE A
DIFFERENTES ETAPES DE
L'ENDOMMAGEMENT DES SILTITES DU
GARD**

Avant de commencer cette étude sur les siltites du Gard, un ensemble de données a été rassemblé sur les caractéristiques minéralogiques, physiques, acoustiques et thermiques de ces matériaux. Au cours des dernières années au laboratoire de G.3S un programme d'études et de recherches a été réalisé sur le comportement thermo-hydo-mécanique des siltites du Gard.

Les propriétés mécaniques d'une roche argileuse ne dépendent pas uniquement de la quantité et de la nature de l'argile présente. Les différentes mesures ont montré que la structure et la texture du matériau conditionnent ses propriétés.

I. PROPRIETES DES SILTITES DU GARD

I.1. Minéralogie des siltites

Il s'agit d'un dépôt sédimentaire marin vieux d'une centaine de million d'années, la couche silteuse étudiée se trouve à une profondeur voisine de 650 m. Ses trois principaux constituants sont : le quartz, les argiles et les carbonates.

Bien que d'une relative homogénéité, on peut distinguer une première zone comprise entre 380 et 480 m de profondeur (zone A) caractérisée par l'alternance de silts argileux et de grés fin argileux et une seconde zone de silts argileux plus homogène comprise entre 480 et 760 m de profondeur (zone B). Les carottes étudiées proviennent de la zone

Les teneurs en carbonates déterminées par la technique du calcimètre Bernard ont donné une valeur moyenne de 21%.

La diffraction aux rayons X a montré que les carbonates sont constitués principalement de calcite ; les argiles sont essentiellement des interstratifiés illites/smectites avec des fortes proportions de smectites.

La proportion d'argile est estimée de 25 à 40% environ, celle du Quartz est de 30 à 50%. (C. Bauer, 1998).

I.2. Propriétés physiques des siltites du Gard

Les valeurs de la densité naturelle (ρ_{nat}) sont comprises entre 2,36 et 2,58 la valeur moyenne est de 2,5.

Les teneurs en eau naturelle (w) sont comprises entre 2,1 et 8,4% avec une moyenne de 4,3%.

La densité des grains (ρ_{grains}) est en moyenne de 2,7. Elle est mesurée à l'aide d'un pycnomètre à hélium.

La porosité est déduite des mesures de densité, sa valeur est de 7 à 10% environ dans la zone étudiée (plus profonde que 480 m de profondeur).

D'une manière globale, on observe une augmentation de la densité associée à une diminution de la teneur en eau en fonction de la profondeur. Cela se traduit également par une

diminution de la porosité et donc par une forte compaction avec la profondeur. L'évolution de ces différentes propriétés est représentée sur la figure IV-1 :

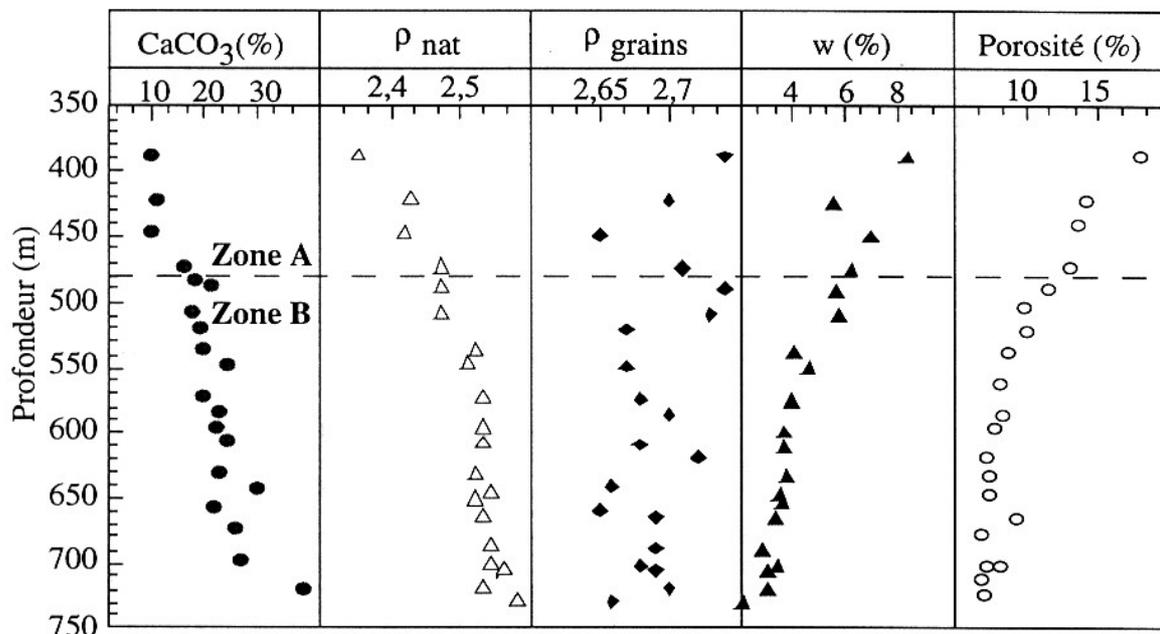


Figure IV-1 : Evolutions des propriétés physiques des siltites du Gard en fonction de la profondeur.

I.3. Etat de saturation et aptitude au gonflement

Des essais de réhumectation-dessiccation ont montré que les échantillons issus de la zone supérieure A présentent une aptitude au gonflement non négligeable et peuvent être partiellement désaturés et les échantillons de la zone B sont quasi insensibles à l'eau et se révèlent être proches de la saturation. Les évolutions de la teneur en eau en fonction de la pression de succion appliquée sont données sur la figure IV-2 et témoignent de l'aptitude ou l'inaptitude au gonflement des différents niveaux, selon le niveau considéré. La représentation dans le plan {indice des vides ; indice d'eau} permet de resituer les échantillons testés au laboratoire par rapport à la droite de saturation (figure IV-3). Alors que ceux issus de la zone B sont saturés ou très proches de la saturation, ceux issus de la zone A apparaissent légèrement désaturés. (C.BAUER, 1998).

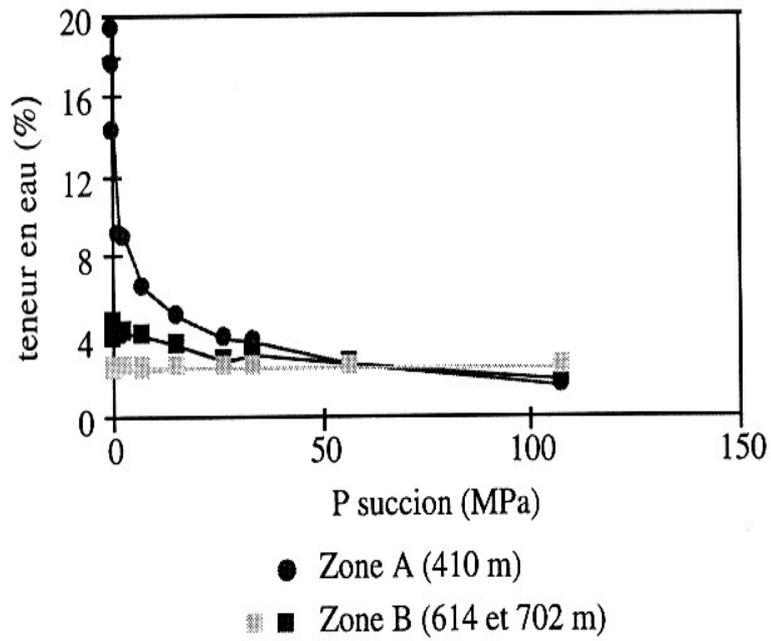
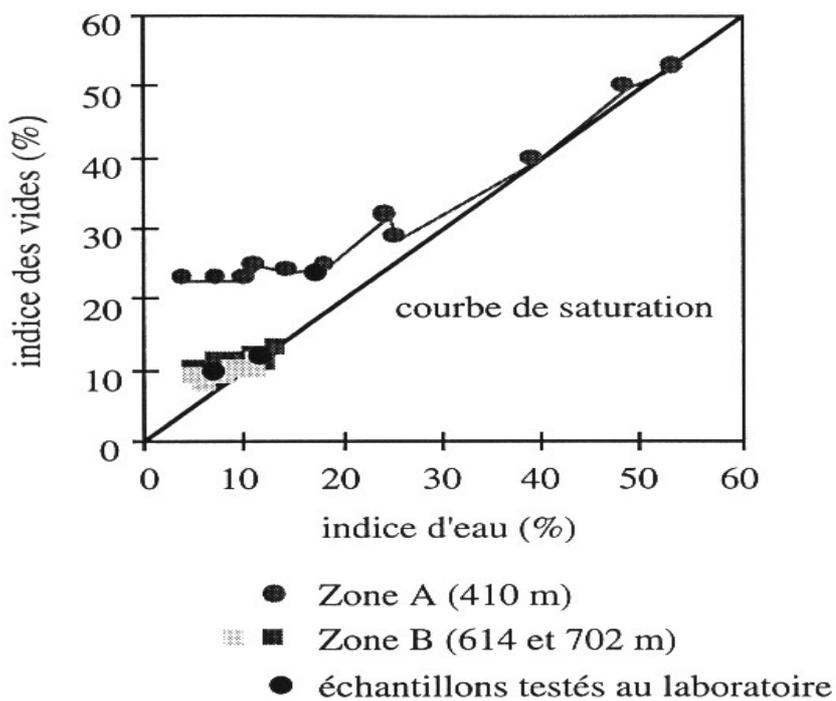


Figure IV-2 : Essais de réhumectation-dessiccation (C.Bauer, 1998) : Teneur en eau en fonction de la pression de succion



$$\text{Indice des vides} = V_v/V_s, \quad \text{Indice d'eau} = V_{\text{eau}}/V_s$$

Figure IV-3 : Essai de réhumectation-dessiccation (C.Bauer, 1998) : Indice des vides en fonction de l'indice d'eau

II. PREPARATION DE L'ESSAI

II.1. Eprouvettes

Les éprouvettes proviennent d'une profondeur comprise entre 500 et 700 m. Des différentes études antérieures réalisées au laboratoire sur cette roche confirment que d'une manière générale les siltites du Gard ont un aspect homogène et isotrope et se trouvent dans un état naturel saturé. Dans le tableau IV-1, on donne quelques informations relatives à chaque épreuve.

Avant de commencer les essais d'endommagement et de perméabilité, plusieurs mesures préliminaires sont effectuées : le poids, les dimensions et les vitesses des ondes. Les mesures des vitesses des ondes ultrasonores sur les éprouvettes ont été réalisées dans plusieurs directions : une direction axiale et deux directions orthogonales appartenant à un plan perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette. Les résultats sont présentés dans le tableau IV-2.

Eprouvettes	Cote (m)	γ : masse volumique (g/cm ³)	ϕ : porosité (%)	w : teneur en eau (%)
G1	671,5	2,54	8,9	3,65
G2	671,65	2,53	8,91	3,65
G3	521	2,4	3,83	1,62
G4	521,125	2,5	3,98	1,62
G5	757,44	2,55	8,27	3,35
G6	757,57	2,56	8,3	3,35

Tableau IV-1 : Propriétés physiques des éprouvettes

γ : Masse volumique

ϕ : Porosité (en supposant que le matériau est saturé)

w : Teneur en eau.

Eprouvettes	Axiale		Latérale 1		Latérale 2	
	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _S (m/s)
G1	3973	2123	4317	-	4286	2214
G2	3785	2037	4054	2142	4137	2142
G3	2956	1878	2678	1617	2459	1591
G4	2040	-	2068	1214	1960	1260
	1581*	-	1367*	-	1252*	-
G5	3947	2139	4252	2173	4082	2173
G6	3973	2123	4317	-	4285	2214

* Mesurées après essais mécaniques.

Tableau IV-2 : Vitesses des ondes ultrasonores dans trois directions orthonormées.

V_p et V_s sont respectivement les vitesses des ondes de compression et de cisaillement.

Remarque : Les vitesses des ondes sur l'éprouvette G4 sont mesurées à l'état initial et après chargement déviatorique. Une diminution des vitesses après les chargements est enregistrée, elle est due à la création des fissures et à l'endommagement de l'éprouvette. Cette idée sera mieux développée dans le dernier chapitre de ce mémoire.

II.2. Fluide d'injection

A l'état naturel, les siltites du Gard sont supposés saturés. Il est donc préférable d'utiliser l'eau comme fluide d'injection pour mesurer la perméabilité. Dans le cas d'un gaz, l'interprétation sera plus compliquée en présence de deux phases fluides (la théorie du milieu non saturé).

III. ESSAIS HYDRO-MECANIKES

La réalisation des essais hydro-mécaniques présente beaucoup de difficultés ; chaque essai se réalise en suivant un chemin de charge bien précis. Il est nécessaire aussi d'adopter une méthodologie permettant d'obtenir le maximum d'informations pendant la durée d'un essai.

III.1. Procédure de mesure de la perméabilité

En s'appuyant sur un chemin de charge bien défini pour chacune des éprouvettes, les mesures de la perméabilité s'effectuent à certains stades de l'essai mécanique. Que ce soit une contrainte isotrope ou déviatorique, le chargement mécanique demeure constant pendant les mesures de la perméabilité.

D'après des études antérieures, on considère que le siltite du Gard a une très faible perméabilité (inférieure à 10^{-19} m^2). Ainsi, d'après le paragraphe (II.1.2) du deuxième chapitre c'est la méthode en régime transitoire que l'on a utilisé : méthode de l' "essai pulse".

Pour l'étude des siltites du Gard, seule la perméabilité à l'eau a été employée, on a choisi de réaliser des essais pulse courts d'une durée de 5 minutes.

Afin d'assurer l'étanchéité de certaines surfaces de l'éprouvette et de tout le système, il est nécessaire que la pression de confinement pendant l'essai hydraulique dépasse d'au moins de 0,5 MPa la valeur de la pression d'injection.

III.2. Procédure des essais mécaniques

Pour les essais mécaniques, des chemins de charge sont imposés, ils permettent de collecter un maximum d'informations sur l'éprouvette. Ces chemins de charge sont décrits plus loin. En vue des résultats obtenus après chaque essai, des améliorations peuvent être apportées ; donc des changements peuvent intervenir sur le trajet de charge.

Cette méthode est mise au point pour les essais mécaniques dont le but est d'étudier le couplage perméabilité-endommagement. Le principe de la méthode consiste à soumettre chaque échantillon à un trajet de charge varié : compression isotrope et compression déviatorique.

Des injections d'eau sont effectuées à différentes étapes du chargement mécanique ; ces essais permettent de mesurer les perméabilités initiales ainsi que sa variation éventuelle au cours d'un essai mécanique. Le chargement déviatorique s'effectue par le pilotage du taux de déplacement latéral. De cette façon, on peut contrôler la propagation des fissures et éviter ainsi autant que possible la rupture fragile, caractéristique des Siltites du Gard.

Entouré par une jaquette étanche et mis en place dans la cellule, l'échantillon est soumis à une contrainte isotrope de 2 MPa. Ensuite, une mesure de perméabilité est établie selon la procédure de l'essai pulse. La valeur de la perméabilité mesurée à ce stade correspond à la perméabilité initiale pour le premier cycle de chargement mécanique.

Ensuite l'éprouvette est soumise à un cycle de charge-décharge de compression isotrope jusqu'à 70 MPa (valeur volontairement nettement plus élevée que l'état de contrainte en place) avec une vitesse de chargement de 0,3 MPa/s. Dans cette partie de chargement, on peut étudier le comportement mécanique du matériau en compression isotrope. L'anisotropie initiale ou induite des propriétés élastiques peut être caractérisée par ce trajet de chargement.

Puis de nouveau une pression isotrope de confinement est imposée à l'échantillon. C'est une pression fixée et jugée suffisante pour empêcher la rupture fragile. Cette pression est maintenue constante tout au long de l'application de la contrainte déviatorique. A ce niveau de contrainte isotrope, et avant d'appliquer la force axiale, une mesure de l'essai pulse est effectuée. La perméabilité à ce stade correspond à la perméabilité sous contrainte isotrope.

La compression isotrope étant maintenue constante, une compression déviatorique est appliquée tout en imposant un taux de déformation latérale. Le pilotage de l'avancement de l'essai se fait donc par la déformation latérale, de cette façon on peut contrôler au mieux l'endommagement de l'échantillon et éviter la rupture fragile. A un certain niveau de contrainte déviatorique, au moment où on suppose qu'un endommagement a été créé (microfissuration) une mesure de l'essai pulse est réalisée. A cette étape de l'essai, la perméabilité est déterminée sous un chargement déviatorique.

La pression de confinement est toujours appliquée, la force déviatorique est déchargée. Dans l'étape qui suit, l'échantillon se trouve seulement sous contrainte isotrope, on effectue un essai pulse qui servira à comparer les deux valeurs de perméabilité, avant et après le chargement déviatorique (éventuellement entraînant l'endommagement).

A la fin, la pression de confinement est déchargée, l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte.

Toutes les étapes décrites précédemment sont représentées sur la figure IV-4 qui illustre, en fonction du temps, l'évolution de la pression d'injection, de la pression de confinement et de la force déviatorique pendant un cycle de chargement hydro-mécanique. Ce cycle de chargement est répété au moins trois fois sur chaque échantillon.

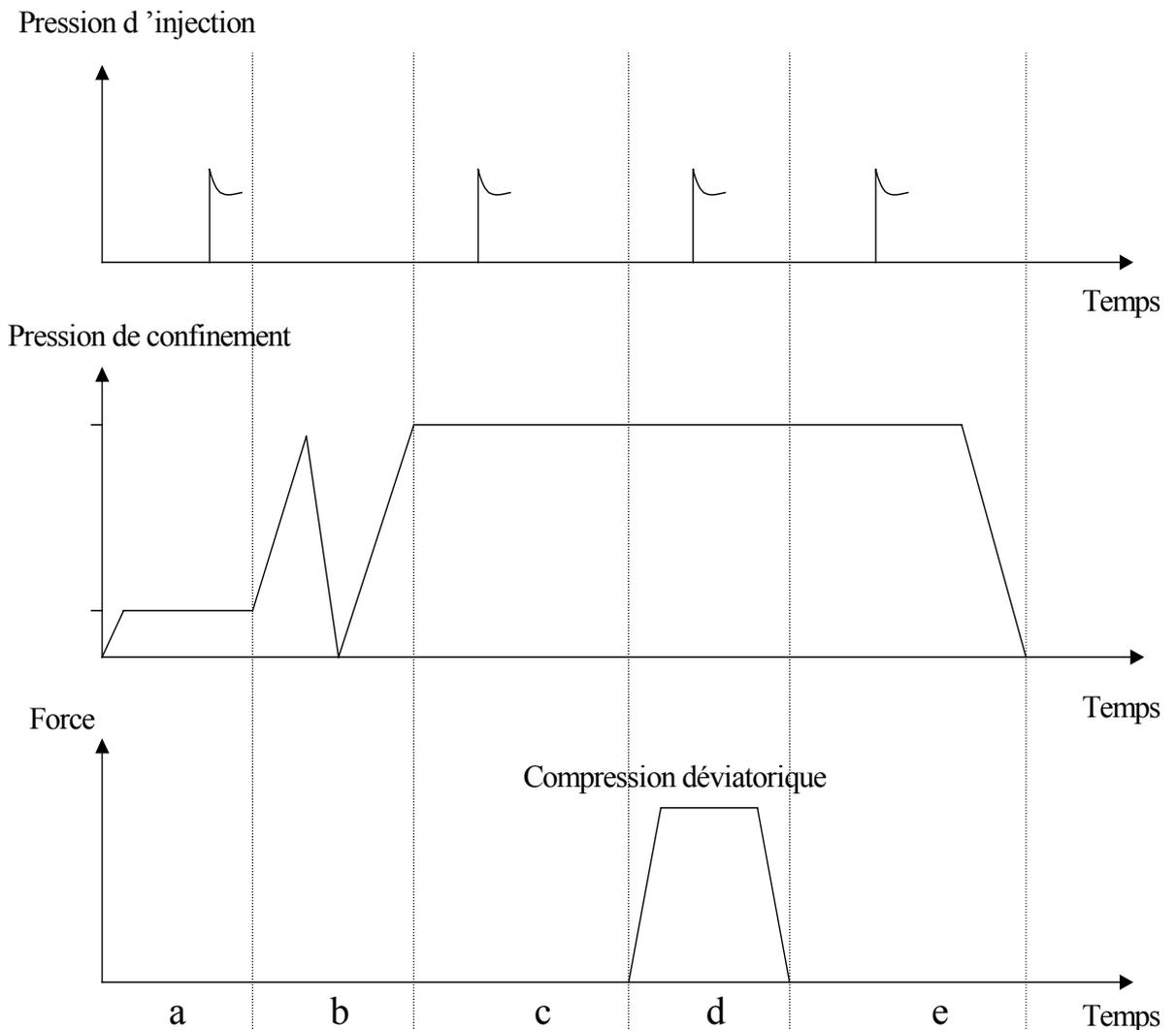


Figure IV-4 : Schéma d'un cycle de charges hydro-mécaniques.

III.3. Comportement mécanique des siltites du Gard

La première question qui vient à l'esprit lors d'un essai hydro-mécanique concerne la nature du drainage : l'éprouvette se trouve-t-elle dans un état drainé ou non drainé ?

Tout dépend de la convention dans laquelle le système a été utilisé, la durée de l'essai et le mécanisme du circuit adopté.

La durée de chaque essai hydro-mécanique couplé est environ de deux jours, chaque cycle de chargement mécanique (isotrope ou déviatorique) s'effectue pendant un temps relativement court (30 minutes environ). Pendant ce temps, le robinet C est fermé (figure II-1), mais il demeure dans le circuit entre le robinet C et le talon du piston de la cellule, un certain volume de fluide ; or le coefficient d'emménagement de tuyau contenant ce fluide n'est pas nul, donc l'eau dans l'éprouvette peut sortir de celle-ci lorsque la pression interstitielle est supérieure à celle du réservoir. Il est donc difficile de se prononcer sur la

condition aux limites du drainage de l'éprouvette, car la vitesse du chargement est relativement grande par rapport au temps caractéristique de diffusion hydraulique de l'éprouvette qui vaut environ plusieurs semaines pour les siltites du Gard.

Pendant les essais mécaniques, on considère donc que la condition hydraulique est plutôt du type non drainé, et c'est sous cette hypothèse que les résultats expérimentaux seront interprétés.

III.4. Module de Young et coefficient de Poisson

La figure IV-5 représente une courbe typique de contrainte-déformation au cours d'un essai de compression déviatorique réalisé sur l'éprouvette G3 sous une pression de confinement de 60 MPa. Les valeurs du module de Young et du coefficient de Poisson sont respectivement égales à 3,7 GPa et de 0,22. La contrainte axiale déviatorique maximale est de 70 MPa. Les valeurs des contraintes axiales des autres éprouvettes, toujours sous un confinement de 60 MPa, sont de l'ordre de 70 MPa. Le tableau IV-3 présente les valeurs des principales caractéristiques mécaniques obtenues sur les six éprouvettes. Le module de compressibilité non drainé de la roche K est déterminé en imposant une compression isotrope à vitesse rapide compte tenu de la faible perméabilité des siltites, la pression interstitielle n'a pas le temps de se dissiper à l'intérieur de l'éprouvette et on accède ainsi au module de compressibilité non drainé. Mais la présence des talons poreux crée, avec le temps, une condition de type drainé sur les extrémités de l'éprouvette, ainsi en enregistrant les déformations différées dues à la dissipation des pressions interstitielles, on retrouve une valeur du module de compressibilité proche de celle du module drainé.

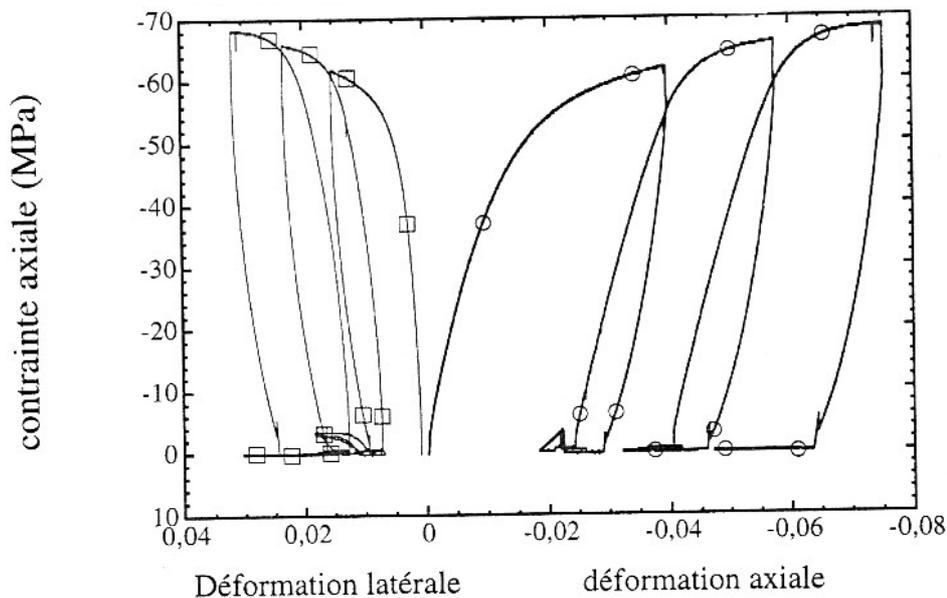


Figure IV-5 : Courbe « contrainte-déformations axiale et latérale », éprouvette G3.

N° de l'éprouvette	N° de carottage	P _c (MPa)	E (MPa)	ν	R déviatorique (MPa)	K : module de compressibilité (MPa)	Essai de perméabilité
G1	MAR06435	45	7000	0,4	73	16000	axiale
G2	MAR06435	90					
G3	MAR08277	60	3700	0,22	68	15000	axiale
G4	MAR08277	55	7326	0,22	84		latérale
G5	MAR06817	20	7092	0,46	54	6700	axiale
G6	MAR06817	60	10072	0,13	76	12700	latérale

Tableau IV-3 : Résultats mécaniques des six éprouvettes des siltites du Gard.

R : Résistance maximale en contrainte axiale déviatorique.

P_c : Pression de confinement.

E : Module de Young.

ν : Coefficient de Poisson.

Les études expérimentales antérieures réalisées sur le même type de roche provenant de la même profondeur montrent que la résistance à la compression uniaxiale est de 70 MPa en moyenne, et que la résistance triaxiale augmente significativement en fonction de la contrainte latérale. Les valeurs obtenues pour cette étude sont un peu plus faibles.

D'après les données fournies sur les emballages des carottes, les échantillons ont été prélevés au mois de mai 1995, c'est à dire près de 4 ans avant le début de l'étude. Pendant ce temps, ils ont été conservés dans des tubes en PVC spécialement conçus. Il est tout à fait probable que les échantillons avaient subi une perte d'eau. A l'état saturé, la teneur en eau peut être modifiée lorsque l'échantillon est soumis à un environnement hygrométriquement différent, à condition toutefois que le matériau présente une aptitude au gonflement, ce qui n'est pas le cas des siltites de Gard à l'horizon étudié ; ceci a été vérifié au cours des essais réalisés et aucune variation de volume n'a été observée. On confirme donc que la prise d'eau

par l'échantillon est attribuée à une désaturation partielle de l'échantillon, du moins superficielle.

Une étude minéralogique permettrait de vérifier si la texture des siltites a été modifiée tout au long des années écoulées. Si c'est le cas et si cela est responsable de la baisse de la résistance, alors les résultats peuvent avoir une conséquence au niveau de la résistance à long terme des siltites.

Les essais hydro-mécaniques peuvent aussi modifier la teneur en eau, puisqu'il y a toujours contact entre l'eau et la surface de l'éprouvette par laquelle l'injection aura lieu. Au cours de l'essai pulse, pour la mesure de la perméabilité, une faible quantité d'eau est introduite dans l'éprouvette et par conséquent la teneur en eau augmente légèrement. De plus, le poids de l'éprouvette est contrôlé avant et après l'essai ; il augmente de 2 à 4 grammes (environ 1% de son poids initial) pendant un essai qui dure environ 3 à 4 jours.

III.5. Endommagement et rupture du matériau

Les essais de compression triaxiale sont réalisés d'abord sous contrainte isotrope, puis sous chargement déviatorique de compression. Ces expériences, avec trajets de chargement variés, ont été réalisées en vue de déterminer le comportement hydro-mécanique des siltites du Gard, en particulier l'initiation et l'évolution de l'endommagement et de la rupture.

Dans ce but, des mesures de déformations axiales et latérales sont effectuées sur l'éprouvette au cours du chargement, grâce aux deux extensomètres capables de supporter la pression et au besoin la température et qui sont placés directement sur l'éprouvette. Ceux-ci ont permis de mesurer avec une grande précision et sans dérive, les variations de la hauteur et du périmètre de l'éprouvette.

L'initiation de l'endommagement est caractérisée par la perte de linéarité de la courbe « contrainte-déformation volumique » ; les résultats montrent qu'elle correspond à environ 25% de la contrainte déviatorique à la rupture. Comme il est montré sur la figure IV-5, la pente « contrainte axiale-déformation axiale » est pratiquement constante dans différents cycles de charge-décharge quelle que soit la pression de confinement appliquée. On peut ainsi considérer que l'endommagement n'a pas d'effet marqué sur le module de Young du matériau dans la direction axiale.

Les cycles charge-décharge mettent en évidence l'apparition de déformations axiales et latérales irréversibles dès l'application d'un chargement déviatorique, même faible. Des boucles d'hystérésis apparaissent au cours des cycles ; ce phénomène est attribué au comportement visqueux et/ou plastique et au phénomène de frottement entre les particules

argileuses des siltites du Gard. Des déformations volumiques irréversibles, traduisant une dilatance (augmentation de volume), sont observées au-delà d'un certain seuil de contrainte déviatorique. Ce phénomène traduit l'endommagement (la micro-fissuration) du matériau (figure IV-6).

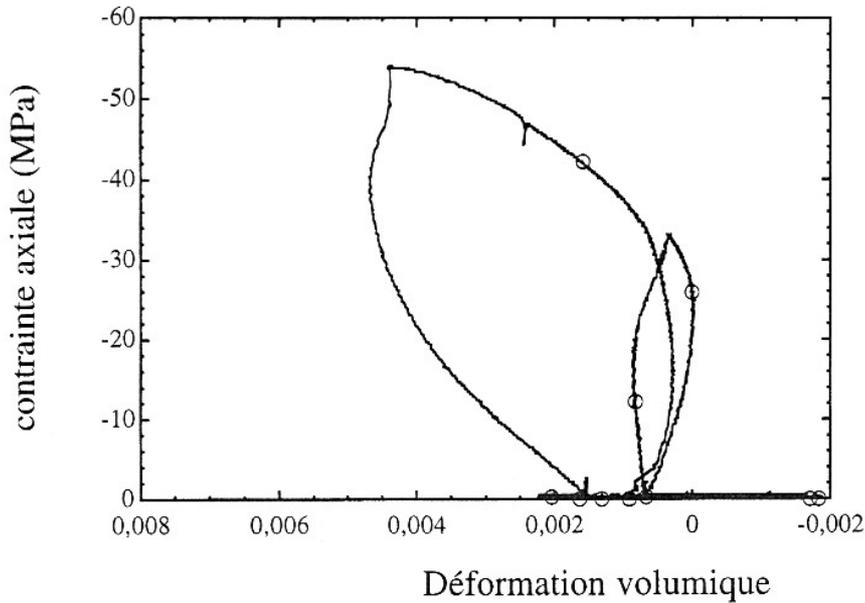


Figure IV-6 : Contrainte-déformation volumique pendant un essai de compression déviatorique sur l'éprouvette G5.

Sur la courbe « contrainte-déformation volumique » il y a un point où le volume de l'éprouvette est minimal, ce point correspond au : seuil de contractance-dilatance. Au-delà de ce seuil, le volume de l'éprouvette augmente avec l'augmentation de la contrainte déviatorique. Pour les échantillons étudiés des siltites du Gard, la contrainte déviatorique correspondant à ce seuil est d'environ 50% de la résistance en contrainte déviatorique.

Il est intéressant de noter que la décharge effectuée juste après le seuil de contractance-dilatance n'a occasionné aucune déformation volumique irréversible (figure IV-6). Cela signifie que le volume créé par la fissuration est très faible et non visible sur la courbe « contrainte-déformation volumique ». Mais en effectuant une décharge au-delà de ce seuil, on constate une déformation volumique irréversible.

Le tableau IV-4 présente l'évolution du comportement mécanique en compression isotrope, à différents stades de l'endommagement. Ce dernier est caractérisé par la déformation volumique irréversible mesurée après la décharge de la contrainte axiale. On

constate que la pente « pression-déformation » décroît significativement en fonction de l'endommagement.

Cycle	ε_v^{irr}	$\frac{\Delta P}{\varepsilon_{ax}} (MPa)$	$\frac{\Delta P}{\varepsilon_{lat}} (MPa)$	K (MPa) Module de compressibilité
0	0	42250	53570	16400
1	0	50000	56600	18070
2	0,01	42800	42800	14266
3	-0,01	34700	27300	9796
4	0,02	36100	32600	11229

Tableau IV-4 : Comportement mécanique sous compression isotrope à différents stades de l'endommagement.

ε_v^{irr} : déformation volumique irréversible mesurée après la décharge de la contrainte déviatorique.

$\frac{\Delta P}{\varepsilon_{ax}}$ et $\frac{\Delta P}{\varepsilon_{lat}}$: représentent les pentes « pression-déformations »

La rupture des siltites du Gard sous un confinement de 20 MPa se manifeste plutôt d'une manière fragile ; elle s'accompagne de formation d'un plan de glissement (localisation de la déformation) et la fissuration n'est donc plus homogène dans l'éprouvette. De cette manière la déformation après la rupture se localise sur cette bande de cisaillement. Ainsi, dans le tableau IV-4, au-delà de trois cycles, la baisse du module de compressibilité est principalement due à l'écrasement du matériau au niveau de la bande de cisaillement. Lorsque la rupture est localisée, la déformation volumique mesurée est dominée par la déformation localisée sur la bande de cisaillement. A part les éprouvettes G3 et G4, toutes les autres ont été accompagnées d'une rupture localisée, même sous une pression de confinement très élevée de 60 MPa. Ce fait témoigne de la grande fragilité de la rupture des matériaux du Gard (rupture particulièrement fragile).

Remarques

- Des études antérieures montrent qu'un matériau comme le granite, classiquement considéré comme un matériau fragile, peut avoir un mode de rupture du type « fissuration homogène » sans formation de bandes de cisaillement lorsque les essais mécaniques sont réalisés sur des presses très rigides et avec contrôle de la vitesse de déformation latérale. Pourtant, sous ces mêmes conditions la fissuration dans les siltites du Gard n'est pas diffuse, mais elle est généralement localisée sur une bande.

- G3 et G4 sont deux éprouvettes qui ont des teneurs en eau deux fois plus faible que les autres éprouvettes de siltites du Gard (tableau IV-1). Le tableau IV-2 présente la mesure des vitesses des ondes ultrasonores sur les éprouvettes étudiées. Les éprouvettes G3 et G4 ont des vitesses inférieures aux valeurs moyennes ; ceci pourrait correspondre à un éventuel séchage dû au conditionnement des carottes. D'après la différence du mode de rupture de ces deux éprouvettes, on peut penser que la teneur en eau influence le processus de fissuration et le mode de rupture ; plus la teneur en eau est élevée, plus le mode de rupture s'approche de la bande de cisaillement. Cette remarque sur le comportement peut être vérifiée sur plusieurs éprouvettes ayant une teneur en eau initiale identique et soumises à différents degré de dessèchement. Une étude plus approfondie s'avère nécessaire afin de confirmer cette remarque.

IV. EVOLUTION DE LA PERMEABILITE

IV.1. Essai pulse : courbe « pression du réservoir-temps »

Dans chaque essai hydro-mécanique, plusieurs courbes « pression du réservoir-temps » sont obtenues.

La figure IV-7 présente une courbe typique. Sur cet exemple, la pression d'injection est d'environ 1,1 MPa. L'allure de la courbe et l'amplitude de la décroissance de la pression permettent de caractériser la perméabilité, moyennant certaines hypothèses dont la parfaite saturation de l'échantillon.

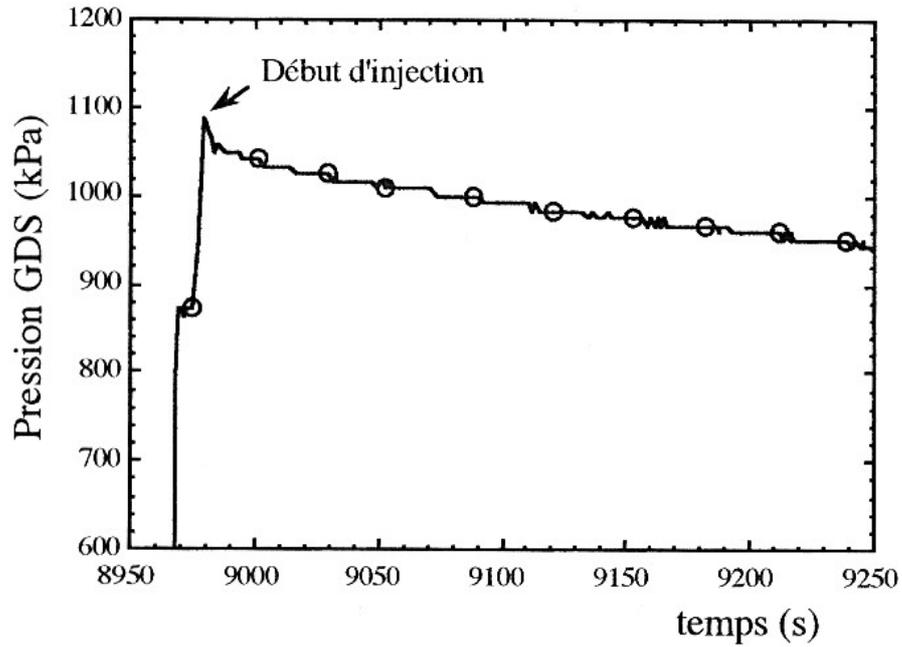


Figure IV-7 : Courbe typique de l'évolution de la pression du réservoir obtenue pendant un essai de perméabilité : « essai pulse »

IV.2. Paramètres poro-élastiques intervenant dans la simulation des courbes expérimentales

Tous les résultats sont interprétés à l'aide d'un calcul couplé effectué avec le code « ANTHYC ». Pour la simulation numérique, il existe quatre paramètres à définir à savoir E_0 , ν_0 , M et b qui sont respectivement le module de Young drainé, le coefficient de Poisson drainé, le module de Biot et le coefficient de Biot. Dans la théorie de la mécanique des milieux poro-élastiques, on a les relations suivantes :

$$K = K_o + b^2 M \quad (1)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\phi}{K_f} + \frac{b - \phi}{K_s} \quad (2)$$

$$b = 1 - \frac{K_o}{K_s} \quad (3)$$

Où K_s et K_f sont respectivement le module de compressibilité du solide et du fluide, ϕ est la porosité.

Dans les trois expressions ci-dessus, il y a trois inconnues qui sont M , K_s et K_o en supposant que la valeur du coefficient de Biot est connue. Tandis que les paramètres K_f et ϕ sont connus et le module de compressibilité en condition non drainée K est déterminé classiquement par l'essai mécanique.

Après résolution du système précédent on trouve :

$$M = \frac{\chi - \sqrt{\chi^2 - 4b^2\phi K K_f}}{2b^2\phi} \quad (4)$$

$$K_o = K - \frac{\chi - \sqrt{\chi^2 - 4b^2\phi K K_f}}{2\phi} \quad (5)$$

$$K_s = \frac{K}{1-b} - \frac{\chi - \sqrt{\chi^2 - 4b^2\phi K K_f}}{2\phi(1-b)} \quad (6)$$

avec $\chi = \phi(K - K_f) + bK_f(1 + \phi)$

Ensuite, calculant la valeur de K_o , les paramètres E_o et ν_o peuvent être déterminés.

Dans les relations (2) et (4) le module de Biot, M , varie en fonction de la valeur du coefficient de Biot, b . Ce dernier coefficient est très difficile à caractériser pour un matériau de si faibles perméabilité et teneur en eau. Dans une étude antérieure, une valeur estimative de 0,4 a été retenue pour le coefficient de Biot. Plusieurs études expérimentales sont réalisées et devraient encore permettre de mieux évaluer ce paramètre (voir chapitre V).

La figure IV-8 illustre l'évolution du module de Biot (M) en fonction du coefficient de Biot (b). Les autres paramètres sont issus des mesures expérimentales effectuées sur les siltites du Gard. Le module M varie peu avec le coefficient b . On a choisi pour le coefficient b une valeur de 0,4. A priori, il n'y a pas de preuves expérimentales pour confirmer ce choix. Mais on n'a pas d'autre option que de choisir une valeur a priori raisonnable. (Ce choix repose d'une part sur l'inégalité $K_s > K > K_o > 0$ et d'autre part sur le fait que $K_s < 40$ GPa : valeur correspondante à un quartzite. Par ailleurs, les modules de cisaillement drainé et non drainé sont les mêmes. Enfin, les valeurs du module de compressibilité non drainé et de la porosité

sont connues. Ces contraintes imposent une plage de variation du coefficient de Biot relativement restreint, en dehors de laquelle, toutes les conditions citées ne sont pas respectées).

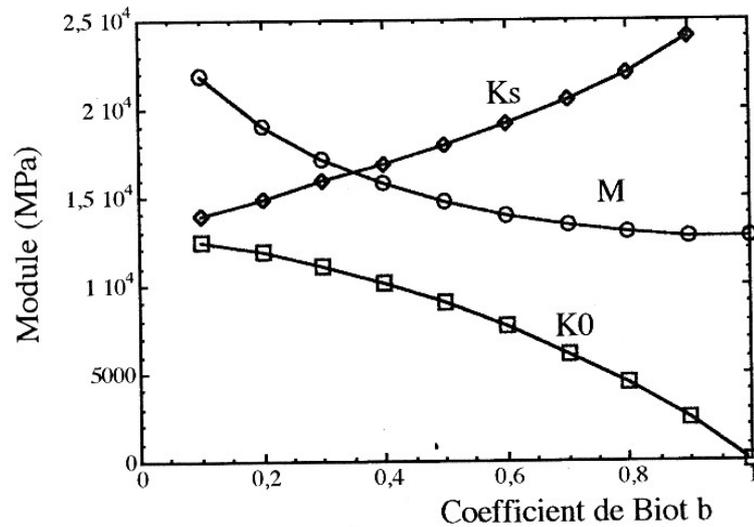


Figure IV-8 : Evolution des modules M , K_0 et K_s en fonction du coefficient de Biot b ($K_f = 2000$ MPa, $K = 12700$ MPa, $\phi = 0,09$)

Hypothèse 1 : il est évident qu’au cours de l’endommagement du matériau, les paramètres poroélastiques varient. Donc pour avoir des résultats précis, il faut prendre en compte cette variation des paramètres et on doit, pour chaque mesure de la perméabilité, définir les valeurs des paramètres poroélastiques. Par ailleurs, la mesure des coefficients b et M au cours de l’endommagement est difficile. Ainsi de nombreux paramètres restent non déterminés, mais on tentera de les déterminer plus loin pour les argilites de l’Est.

Donc, pour l’interprétation des mesures de l’essai pulse d’une éprouvette, au lieu de varier les paramètres poroélastiques pour chaque mesure, on les fixe en se basant sur des études antérieures réalisées à G3S. On considère que ces paramètres sont constants tout au long de l’endommagement.

IV.3. Condition hydraulique initiale pour la mesure de la perméabilité

Dans les expériences réalisées, il est important de savoir dans quelle condition et sous quelle pression l’eau se trouve à l’intérieur de l’éprouvette surtout après changement de contraintes ; car toute modification de la contrainte totale engendre une modification de la pression interstitielle. En condition non drainée, le rapport de la variation de la pression des

pores sur la variation de la contrainte totale moyenne est défini par le coefficient de Skempton :

$$B_s = \frac{\Delta P}{\Delta \sigma_m} \quad (7)$$

$$B_s = \frac{Mb}{K_o + b^2 M} = \frac{Mb}{K} \quad (8)$$

Pour les siltites du Gard on prend les valeurs suivantes :

$$M = 12700 \text{ MPa}$$

$$b = 0,4$$

$$K_o = 10200 \text{ MPa}$$

$$\text{Alors } B_s = 0,4$$

Avant de mesurer la perméabilité dans la cellule triaxiale, on impose une contrainte totale (pression de confinement isotrope et uniforme) sur l'éprouvette. Cette contrainte permet d'assurer d'une part l'étanchéité de certaines surfaces de l'éprouvette et, d'étudier l'influence de la contrainte moyenne sur la perméabilité.

Pendant le chargement mécanique, l'éprouvette n'est pas en condition non drainée, la pression à l'intérieur n'est pas uniforme car la surface soumise à l'injection est connectée à l'extérieur, et certaines surfaces sont soumises à une condition proche du débit nul. Cette situation complique davantage l'interprétation de l'essai pulse. Puisque l'éprouvette a une très faible perméabilité, il faut attendre un certain temps (une période pouvant aller de quelques jours à plusieurs semaines) avant de pouvoir établir une pression interstitielle uniforme dans une éprouvette sous contraintes. Ce temps nécessaire à l'établissement d'une pression initiale uniforme n'est pas compatible avec l'avantage principal de la méthode pulse test, qui est de pouvoir déterminer la perméabilité pendant un temps relativement court.

On est contraint, là encore, à faire une hypothèse supplémentaire :

Hypothèse 2 : la pression interstitielle initiale est égale à la pression atmosphérique : en fait, avant l'essai de perméabilité, il y a un écart de temps entre la mise sous pression de confinement et le début de l'essai de perméabilité. Ce temps peut être de quelques dizaines de minutes. Par rapport à la durée de l'essai pulse, ce temps dit de « repos » est largement

supérieur à la durée de l'essai. Durant ce temps de repos, la pression interstitielle dans l'éprouvette se dissipe ; la pression à la surface d'injection est maintenue à la pression atmosphérique. Donc la pression interstitielle autour de la surface d'injection chute pendant la durée du temps de repos. La dimension de la zone où la pression va être modifiée par l'essai pulse est certainement inférieure à la dimension de la zone où la pression a sensiblement chuté pendant la durée du temps de repos, à condition que ce temps de repos soit largement supérieur à celui de l'essai pulse. Sans attendre que la pression interstitielle soit uniforme, on peut supposer que la pression initiale dans la zone où l'essai pulse a une influence correspond à la pression atmosphérique.

Cette hypothèse est d'autant plus vraisemblable que la pression de confinement est faible. On a également effectué des essais pulse à forte pression de confinement. Il est évident que, dans certain cas, la pression interstitielle peut être supérieure à la pression d'injection, mais on n'a pas constaté d'augmentation de la pression de pores sous confinement élevé pendant l'essai pulse.

L'utilisation des résultats présentés dans la suite doit tenir compte des hypothèses ci-dessus présentées dans les deux derniers paragraphes et des conditions spécifiques de l'essai pulse réalisées dans les siltites du Gard.

IV.4. Variation de la perméabilité axiale au cours de l'endommagement

On a effectué des mesures de perméabilité dans le sens axial, deux éprouvettes G1 et G3 ont été utilisées. Les tableaux IV-5 et IV-6 présentent les résultats des mesures de la perméabilité. Les numéros d'étape des essais sont également illustrés dans ces tableaux.

Étape	P _{conf} (MPa)	S _{xx} (dév.) (MPa)	P _{inj} (MPa)	K (m ²) (P ₀ = 0)	K (m ²) P ₀ = - 10 MPa
1.a	2	0	1	6.10 ⁻¹⁸	5 x 10 ⁻²⁰
1.b	45	0	-	-	
1.c	45	0	1	1,5.10 ⁻¹⁸	
1.d	45	71	1	2.10 ⁻²⁰	
1.e	45	0	-	-	
2.a	2	0	1	1,5.10 ⁻¹⁷	5 x 10 ⁻²⁰
2.b	45	0	-	-	
2.c	45	0	-	-	
2.d	45	64	1	10 ⁻¹⁹	
2.e	45	0	1	10 ⁻¹⁹	
3.a	2	0	0,95	2.10 ⁻¹⁷	6 x 10 ⁻²⁰
3.b	45	0	-	-	
3.c	45	0	1,05	5 x 10 ⁻¹⁹	
3.d	45	54	0,97	2 x 10 ⁻¹⁹	
3.e	45	0	0,92	5 x 10 ⁻¹⁹	
4.a	2	0	0,9	1,4.10 ⁻¹⁷	6 x 10 ⁻²⁰
4.b	45	0	-		
4.c	45	0	-		
4.d	FIN		-		

Tableau IV-5 : Résultats de mesures de la perméabilité obtenus sur l'éprouvette G1

Étape	P _{conf} (MPa)	S _{xx} (dév.) (MPa)	P _{inj} (MPa)	K (m ²) (P ₀ = 0)	K (m ²) P ₀ = - 10 MPa
1.a	2	0	1,2	2.10 ⁻¹⁷	5 x 10 ⁻²⁰
1.b	-	-	-	-	
1.c	60	0	1,3	1 10 ⁻¹⁹	
1.d	60	67	1,2	1,5 x 10 ⁻¹⁹	
1.e	60	0	1,8	5 x 10 ⁻¹⁹	
2.a	2	0	1	2 x 10 ⁻¹⁷	5 x 10 ⁻²⁰
2.b	-	-	-	-	
2.c	-	-	-	-	
2.d	60	65	1,2	1,5 x 10 ⁻¹⁹	
2.e	60	0	1,2	7 x 10 ⁻¹⁹	
3.a	2	0	1,0	6 x 10 ⁻¹⁷	1 x 10 ⁻¹⁹
3.b	-	-	-	-	
3.c	60	0	1,1	10 ⁻²⁰	
3.d	60	70	1,1	10 ⁻¹⁹	
3.e	60	0	1,1	2.10 ⁻¹⁹	
4.a	2	0	0,96	6.10 ⁻¹⁷	1 x 10 ⁻¹⁹
4.b	-	-	-	-	
4.c	60	0	1,0	1,5.10 ⁻¹⁹	
4.d	FIN		-		

Tableau IV-6 : Résultats de mesures de la perméabilité obtenus sur l'éprouvette G3.

IV.4.1. Perméabilité initiale

La figure IV-9 illustre la courbe de la pression du réservoir en fonction du temps correspondant au premier essai pulse pour l'éprouvette G1. Cet essai est réalisé avec 2 MPa de pression de confinement et sans appliquer de forces déviatoriques. La pression d'injection de l'eau est égale à 1 MPa. La décroissance de la pression en fonction du temps est significative ; au bout de 300 secondes d'injection, la pression du réservoir a chuté de 0,16 MPa. Après simulation de cette courbe avec les courbes données par le code de calcul ANTHYC, on obtient une perméabilité d'environ $6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Cette valeur de perméabilité

initiale s'avère trop élevée par rapport aux valeurs habituelles des argiles raides. Pourtant, les valeurs du même ordre sont trouvées également pour les autres éprouvettes.

La question qui se pose est si la baisse de pression correspond réellement à la pénétration du fluide dans l'éprouvette. Pour cela beaucoup de travaux ont été réalisés concernant l'étanchéité de tout le système et les améliorations ont été apportées au fur et à mesure de l'avancement de l'étude ; un essai sur une éprouvette en acier a été réalisé dans les mêmes conditions. Avec l'éprouvette en acier, on observe une légère baisse de la pression du réservoir en fonction du temps (figure IV-10), elle peut atteindre environ 0,04 MPa au bout de 300 secondes. En conséquence, une variation de 0,04 MPa pendant 300 secondes correspond à une variation de 8 mm³ d'eau. Cette différence de volume est faible mais indique que soit 8 mm³ d'eau sont sortis du réservoir, soit que le volume du réservoir a augmenté de 8 mm³. C'est très probablement la seconde hypothèse qui est la cause de la baisse de la pression. En effet, une injection de fluide modifie la contrainte effective dans les interfaces des talons, en modifiant ainsi le volume des vides dans les interfaces. La diffusion de la pression dans les interfaces des talons ne se fait pas instantanément. Par ailleurs, le coefficient d'emmagasinement du réservoir est d'environ 200 mm³/MPa.

Ainsi on peut conclure que la forte valeur trouvée pour la mesure de la perméabilité initiale des siltites du Gard correspond bien à la perméabilité initiale sans erreur de mesure liée au dispositif expérimental.

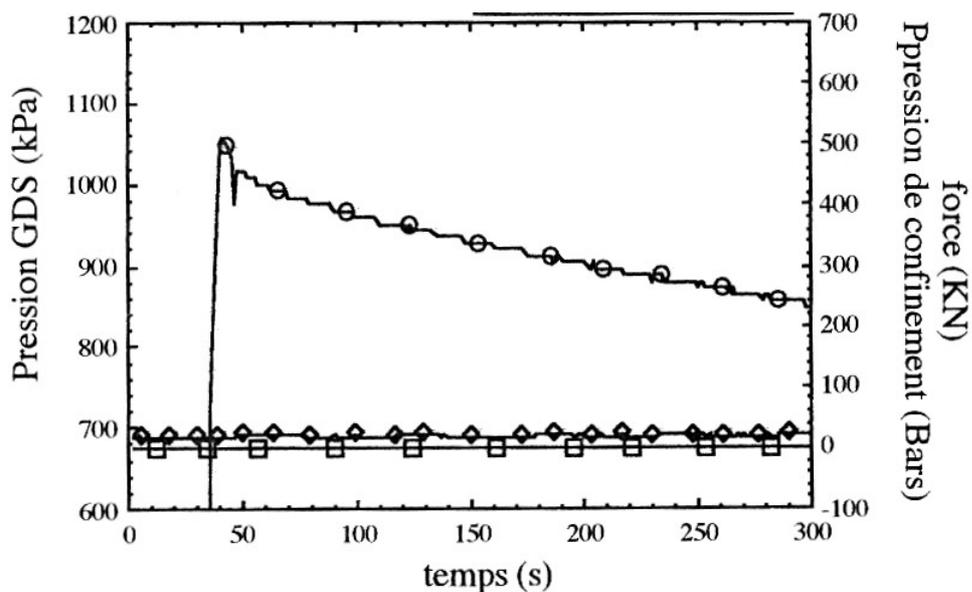


Figure IV-9 : Evolution de la pression du réservoir pendant un essai de perméabilité réalisé sur l'éprouvette G1 à l'étape 1.a

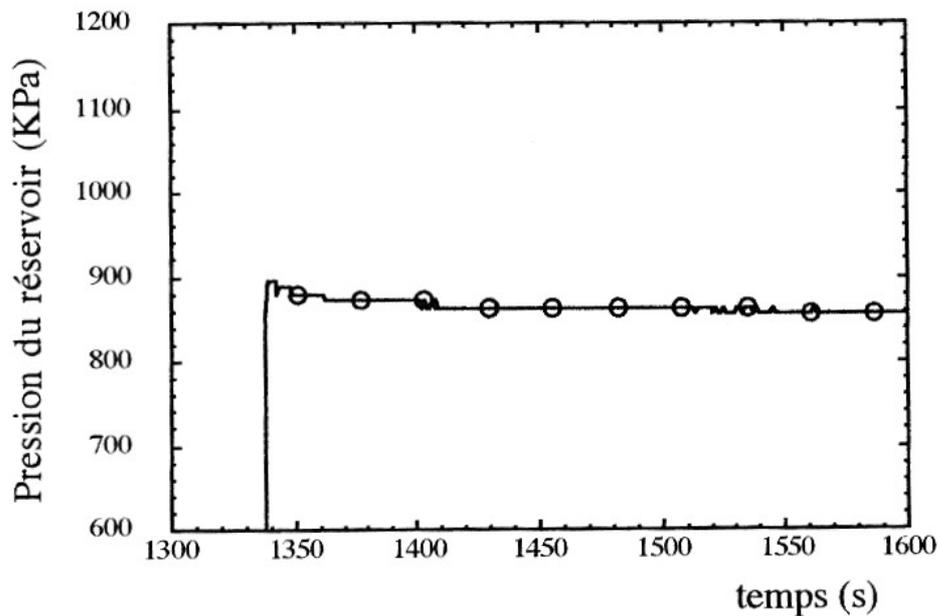


Figure IV-10 : Evolution de la pression du réservoir pendant un essai de perméabilité réalisé sur une éprouvette en acier.

Néanmoins, plusieurs facteurs peuvent avoir des effets significatifs sur les résultats de mesure de la perméabilité :

IV.4.1.a. Effets de la pression interstitielle initiale sur la mesure de la perméabilité

Au début des expériences, et après application de la contrainte de confinement, on ne sait pas exactement quelle est la valeur de la pression initiale des pores à l'intérieur de l'éprouvette avant la première injection. Il est probable que la surface de l'éprouvette est partiellement désaturée. Dans ce cas, la force de succion engendre une pression équivalente négative. Cette pression peut atteindre des valeurs très élevées jusqu'à 10 MPa (étant donné la petite taille des pores). Si on simule la courbe de la figure IV-9 avec une pression initiale des pores de -10 MPa, on trouve effectivement une perméabilité de $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Les résultats de la première mesure de perméabilité sont difficiles à interpréter lorsque l'éprouvette n'est pas encore saturée et qu'il existe un gradient de degré de saturation en fonction de la distance à la paroi de l'éprouvette. On peut être tenté d'appliquer une loi dite de Darcy généralisée comme il est souvent le cas en milieu non saturé. Dans la pratique cette tentative se heurte à la grande

incertitude pesant sur de nombreux paramètres intervenant : les perméabilités à l'eau et à l'air et leur évolution en fonction du degré de saturation, les coefficients de Biot relatifs à l'air et à l'eau et les modules de Biot correspondant à chaque phase fluide, autant de paramètres qui ne pourraient être déterminés aisément au laboratoire (cela est déjà difficile en milieu saturé).

IV.4.1.b. Effets de l'endommagement des bords de l'éprouvette sur la mesure de la perméabilité

Pendant la fabrication de l'éprouvette, les bords de l'éprouvette ont subi de fortes contraintes de cisaillement lors de l'usinage. Inévitablement, une épaisseur millimétrique autour de l'éprouvette a été endommagée. Des réseaux de fissures ont pu être créés. La perméabilité dans les couches extérieures a donc considérablement augmenté par rapport à celle de l'intérieur du matériau. En plus, la pression d'injection de la mesure de l'essai pulse n'a pénétré que de quelques millimètres à l'intérieur de l'éprouvette, donc la mesure de la perméabilité a pu être influencée par les effets liés aux faces extérieures endommagées.

IV.4.1.c. Effets de l'étanchéité latérale sur la mesure de la perméabilité

Beaucoup d'effort et plusieurs améliorations ont été apportés au niveau de l'étanchéité du système. Avant le début de l'étude et pour s'assurer de l'étanchéité, on a utilisé une éprouvette en acier ; on n'a constaté aucune défaillance de l'étanchéité latérale assurée par la jaquette et la pression de confinement. Mais quand il s'agit d'une éprouvette en argile, la rugosité de la surface est évidemment supérieure à celle d'une éprouvette en acier ; c'est cela qui peut affecter l'étanchéité. D'une manière générale, toute interface imparfaite introduit un chemin préférentiel d'écoulement.

Tout cela amène à conclure qu'il y a des situations où on ne peut pas être affirmatif sur la valeur de la perméabilité initiale des siltites du Gard :

- La baisse significative de la pression du réservoir en fonction du temps n'est pas due à une fuite des circuits hydrauliques.
- La perméabilité initiale des siltites du Gard serait de l'ordre de $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$, en supposant qu'il existe une pression de succion initiale de l'ordre de -10 MPa (hypothèse à vérifier)

- La perméabilité initiale peut être de l'ordre de $6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$, si l'on néglige l'existence de la pression de succion, associée à une désaturation partielle.

IV.4.2. Mesure de la perméabilité sous un confinement de 2 MPa à différents stades de l'endommagement

On prend l'hypothèse d'une pression interstitielle égale à la pression atmosphérique. La perméabilité axiale, après décharge de la contrainte déviatorique et de la pression du confinement, est présentée dans les tableaux IV-5 et IV-6.

On constate, par exemple, sur l'éprouvette G1, que la perméabilité a augmenté de 2,5 fois (étape 2.a comparée à l'étape 1.a, tableau IV-5) après un cycle de chargement déviatorique. Ce cycle de chargement n'a pas provoqué de déformation volumique irréversible significative, mais on trouve une déformation irréversible axiale égale à -0,8%, et une déformation irréversible latérale égale à +0,4%. Dans les cycles suivants (étape 3.a et 4.a, tableau IV-5), la perméabilité demeure constante sous une pression de confinement de 2 MPa.

Pourtant, sur les figures IV-11 et IV-12 on constate une évolution des déformations irréversibles axiales, latérales et volumiques :

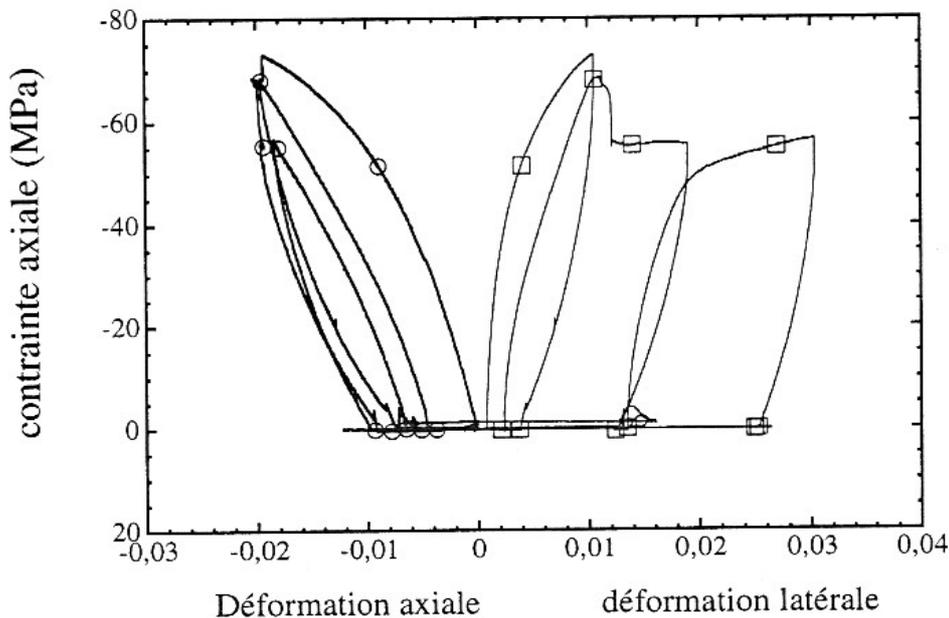


Figure IV-11 : Courbe contrainte-déformation axiale et latérale pendant un essai de compression déviatorique sur l'éprouvette G1 (pression de confinement = 45 MPa).

Figure IV-12 : Courbe contrainte-déformation volumique pendant un essai de compression déviatorique sur l'éprouvette G1 (pression de confinement = 45 MPa).

En fait, la rupture de l'éprouvette G1 a eu lieu sur un plan. Donc au-delà de la résistance maximale, les déformations mesurées sont dominées par le glissement du plan de rupture qui n'a pas contribué au développement des micros fissures. Quand le plan de rupture ne passe pas par la surface soumise à l'injection (c'est le cas), alors il est normal que l'on ne constate pas d'évolution de la perméabilité.

IV.4.3. Mesure de la perméabilité sous une pression de confinement élevée à différents stades de l'endommagement

Sous une pression de confinement élevée (60 MPa), plusieurs nouveaux phénomènes surgissent. En effet, en comparant les courbes de « pression du réservoir-temps » obtenues à l'état initial (2 MPa de pression de confinement) et à 60 MPa de pression de confinement, on constate que les allures des courbes sont totalement différentes (figure IV-13).

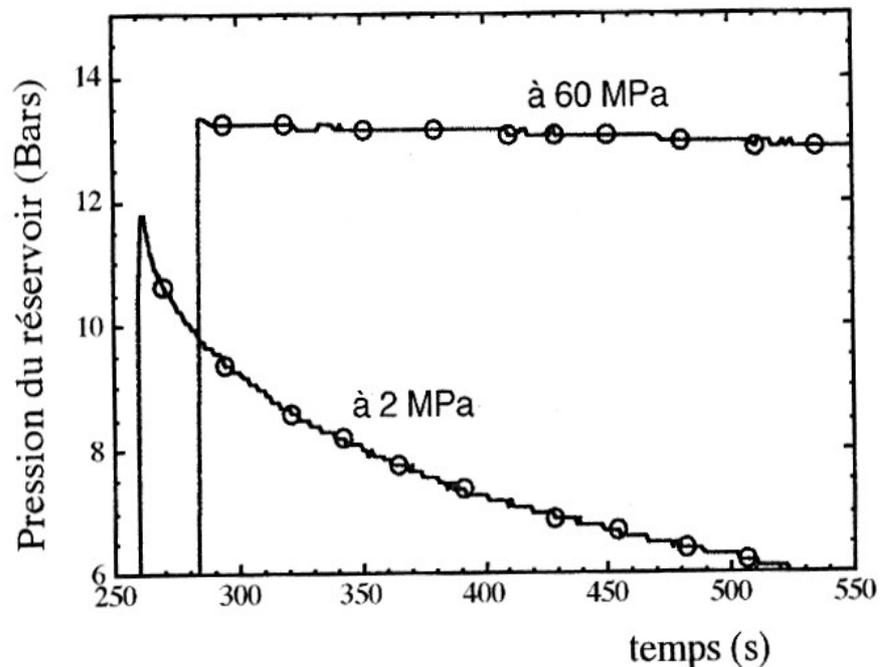


Figure IV-13 : Comparaison des courbes d'évolution de la pression pour deux mesures de perméabilité respectivement à 2 et à 60 MPa de confinement (éprouvette G3).

Les perméabilités sont calculées avec l'hypothèse de pression initiale égale à la pression atmosphérique. Pour le passage de 2 à 60 MPa en pression de confinement les mesures de perméabilité ont chuté d'environ trois ordres de grandeur. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette chute de perméabilité sous confinement élevé :

IV.4.3.a. L'effet de confinement sur la pression initiale

Pour les matériaux si peu perméables, comme l'argile, la pression interstitielle créée à la suite d'un fort confinement a beaucoup de mal à se dissiper. De ce fait la pression interstitielle initiale a changé, mais il est difficile de préciser, a priori, la valeur de cette pression.

IV.4.3.b. La déformation élastique du matériau sous confinement

A 60 MPa, la déformation volumique est d'environ 0,4% pour l'éprouvette G3 ayant un module de compressibilité de 15000 MPa, ce qui provoque une variation de la porosité de 10% étant donné que sa valeur initiale est de 4%. La diminution de la porosité se traduit donc par une diminution de la perméabilité.

On n'a pas constaté d'évolution de perméabilité sous confinement à différents cycles de chargement. On peut en conclure que :

La pression de confinement ou la contrainte moyenne, a une influence significative sur la perméabilité.

Sous une forte pression de confinement, la perméabilité ne varie pas avec l'évolution de l'endommagement localisé sur un plan ne passant pas par la surface d'injection.

IV.4.4. Evolution de la perméabilité sous un chargement mécanique déviatorique

Pour l'éprouvette G3, la rupture a conduit à une fissuration relativement homogène, mais on a constaté qu'il n'y avait pas d'évolution de perméabilité sous chargement déviatorique. A la fin des essais, l'éprouvette est sortie de la cellule et à l'aide d'un liquide (Trichloréthylène) que l'on étale sur la surface latérale de l'éprouvette, on a remarqué l'existence de plusieurs fissures. Ces fissures ne sont pas suffisamment grandes et dispersées pour qu'elles débouchent sur les surfaces d'injection. C'est ce qui explique le fait de ne pas avoir d'évolution de perméabilité sur cette éprouvette. Mais cette expérience a montré que l'on est sur le bon chemin et que la procédure utilisée était utile à la création d'un réseau de fissuration homogène et diffus et non une rupture localisée sur un plan. Un chargement déviatorique plus

important aurait pu entraîner une fissuration assurant le passage du fluide et conduisant à une évolution de la perméabilité.

L'éprouvette G1 s'est rompue suivant un plan lors de l'application de la contrainte déviatorique. Dans ce cas aussi, la perméabilité n'a pas montré d'évolution. En fait, la contrainte déviatorique a pour effet d'ouvrir le plan de glissement durant la phase post rupture. Mais quand le plan de glissement ne coupe pas la surface soumise à l'injection, l'évolution de la perméabilité ne peut être observée. En conclusion, la perméabilité d'une éprouvette ne varie avec la contrainte déviatorique que lorsqu'il y a création d'une fissuration débouchant sur la surface d'injection.

IV.4.5. Relation entre la perméabilité axiale et la déformation

Un des objectifs de l'étude est d'établir une relation entre la perméabilité et un indicateur de l'endommagement. Dans un essai mécanique, cet indicateur peut être exprimé en fonction de la déformation ou de la contrainte.

Dans le paragraphe précédent, on a conclu que la perméabilité ne varie pas avec la contrainte déviatorique, mais elle décroît sensiblement avec la contrainte isotrope.

En compression déviatorique, aux extrémités des éprouvettes cylindriques, il existe un « cône » où l'état de contrainte est triaxial en raison du frottement. La fissuration dans cette région est très peu développée. C'est la raison pour laquelle la perméabilité axiale varie peu à différents stades de l'endommagement.

Si on exclut les déformations dominées par le glissement du plan de rupture, il est difficile de proposer a priori une relation entre perméabilité et déformation. Néanmoins, on obtient les deux valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Eprouvette G3 :} \quad & k_{\text{initiale}}(P_0 = -10 \text{ MPa}) = 5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \\ & k = 10^{-19} \text{ m}^2 \text{ pour } \varepsilon_{ax}^{irr} = 7\%, \varepsilon_{lat}^{irr} = 3\% \end{aligned}$$

Ces résultats correspondent à un endommagement créé sous 60 MPa de pression de confinement et la perméabilité est mesurée sous 2 MPa de pression de confinement et 1 MPa de pression d'injection.

On représente sur la figure IV-14 la courbe de contraintes axiales en fonction des déformations axiale et latérale de l'éprouvette G3.

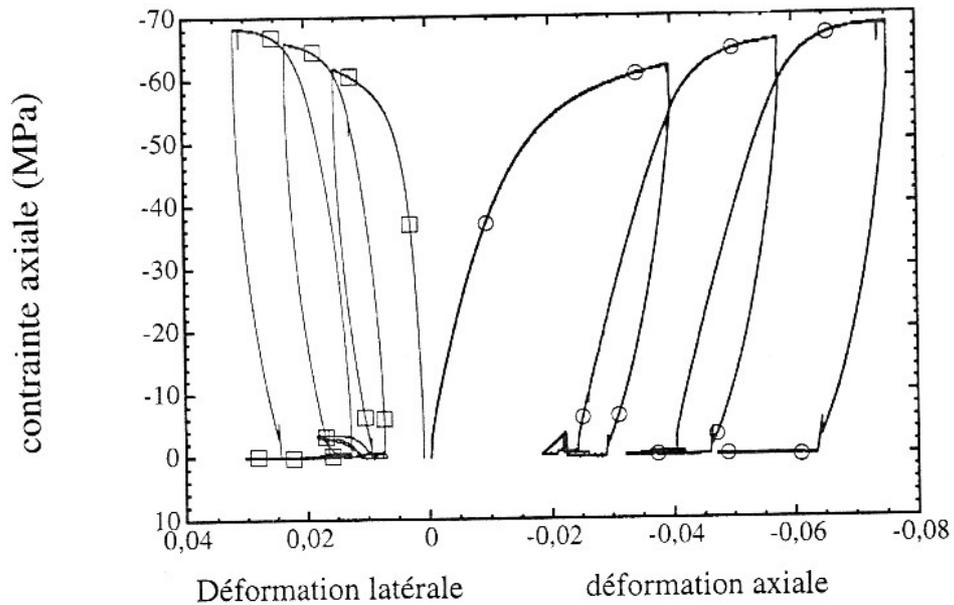


Figure IV-14 : Compression déviatorique : Eprouvette G3

IV.5. Interprétation des résultats

On présente dans les tableaux IV-7 et IV-8 un résumé de différents résultats mesurés et calculés à partir des essais réalisés respectivement sur l'éprouvette G1 et G3. Les évolutions de ces paramètres sont présentés sur les figures IV-15 et IV-16 pour G1 et les figures IV-17 et IV-18 pour G3.

La variable d'endommagement D est calculée à l'aide de la formule n° 4 du chapitre II.

Cycle	0	1	2	3
Perméabilité [k] (10^{-20} m^2)	5	5	6	6
$\frac{\Delta k}{k_0}$	0	0	0,2	0,2
Compressibilité [K] (MPa)	18000	14200	9800	11200
Endommagement [D]	0	0,21	0,45	0,38

ε_{irr}^v	0	0,01	0,01	0,02
-----------------------	---	------	------	------

Tableau IV-7 : Paramètres mesurés et calculés lors de l'essai sur G1.

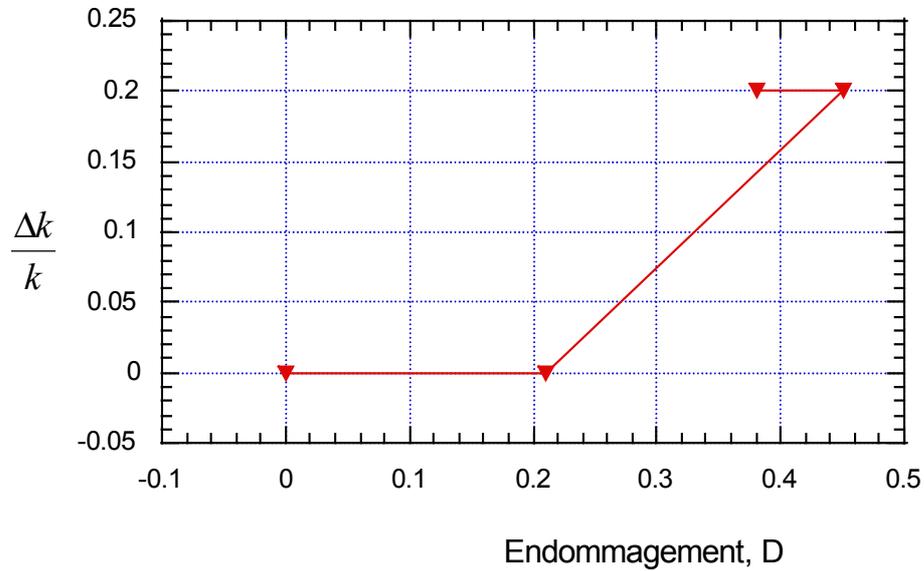


Figure IV-15 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de l'endommagement D pour l'éprouvette G1.

Remarque : au cours du dernier cycle, les sollicitations mécaniques (forte pression de confinement) viennent consolider l'éprouvette et par suite une légère augmentation de compressibilité est enregistrée, ce qui explique la diminution du paramètre d'endommagement correspondant au troisième cycle.

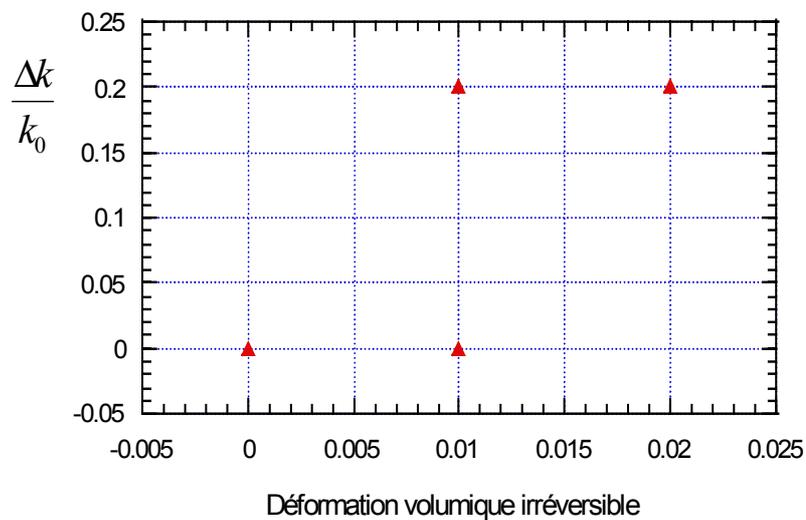


Figure IV-16 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de la déformation volumique irréversible pour l'éprouvette G1.

Cycle	0	1	2	3
Perméabilité [k] (10^{-20} m ²)	5	5	10	10
$\frac{\Delta k}{k_0}$	0	0	1	1
Compressibilité [K] (MPa)	15000	13500	11900	11500
Endommagement [D]	0	0,1	0,21	0,23
ϵ_{irr}^v	0	0,01	0,0135	0,015

Tableau IV-8 : Paramètres mesurés et calculés lors de l'essai sur G3.

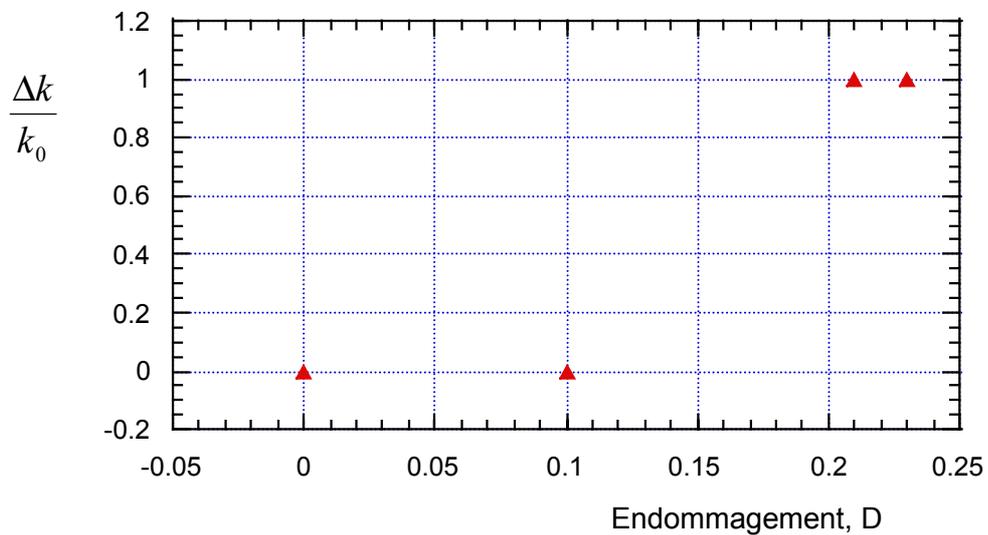


Figure IV-17 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de l'endommagement D pour l'éprouvette G3.

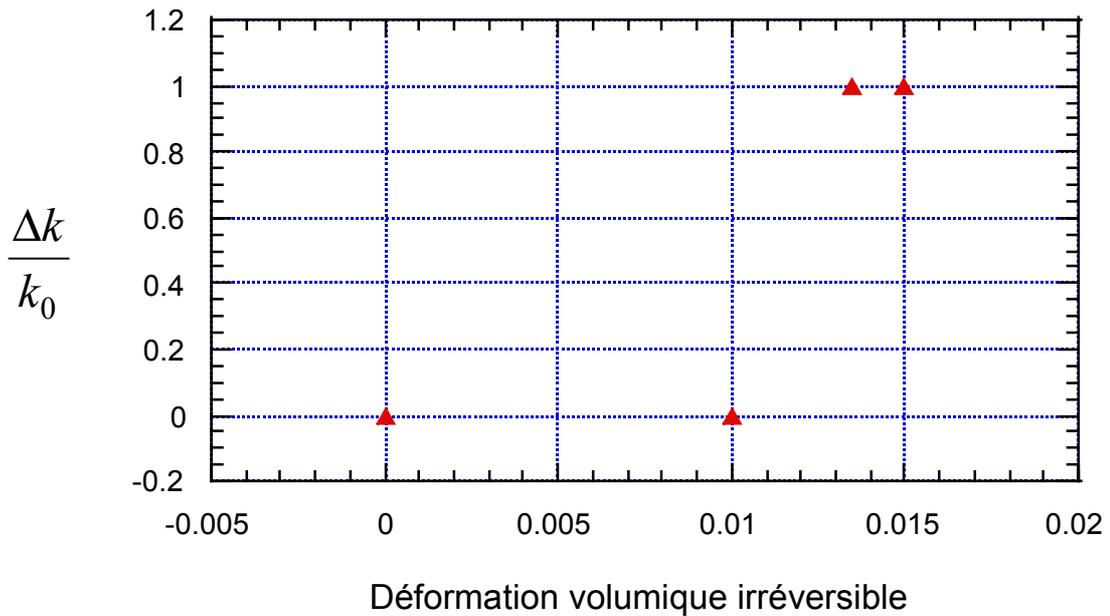


Figure IV-18 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de la déformation volumique irréversible pour l'éprouvette G3.

IV.6. Variation de la perméabilité latérale en fonction de l'endommagement

Des mesures de perméabilité ont été effectuées dans le sens latéral, deux éprouvettes ont été utilisées ; G4 et G6. Les tableaux présentés en annexe montrent les résultats des mesures de la perméabilité obtenus. Les numéros d'étapes des essais sont également illustrés dans ces tableaux.

IV.6.1. Perméabilité initiale

La figure IV-19 représente une courbe de la pression du réservoir en fonction du temps, elle correspond à un essai pulse réalisé sur l'éprouvette G4, avec une pression d'injection de 1 MPa, à une pression de confinement de 2 MPa et sans aucune contrainte déviatorique : ce sont les conditions qui aboutissent à la mesure de la perméabilité latérale initiale. Comme pour la mesure de la perméabilité axiale, la décroissance de la pression du réservoir en fonction du temps est significative. Au bout de 300 secondes, la pression chute de 0,7 MPa. On trouve une valeur de perméabilité proche de 10^{-17} m^2 , valeur trop élevée pour un matériau argileux, mais c'est une valeur qui reste proche de la valeur mesurée dans la direction axiale. Cette valeur a

été obtenue en supposant que le matériau est saturé et que la pression interstitielle initiale est égale à la pression atmosphérique.

Dans le cas où les mesures de la perméabilité ont été effectuées en supposant que la pression interstitielle initiale est égale à -10 MPa (suction), la perméabilité mesurée est de 10^{-20} m² (valeur plus réaliste).

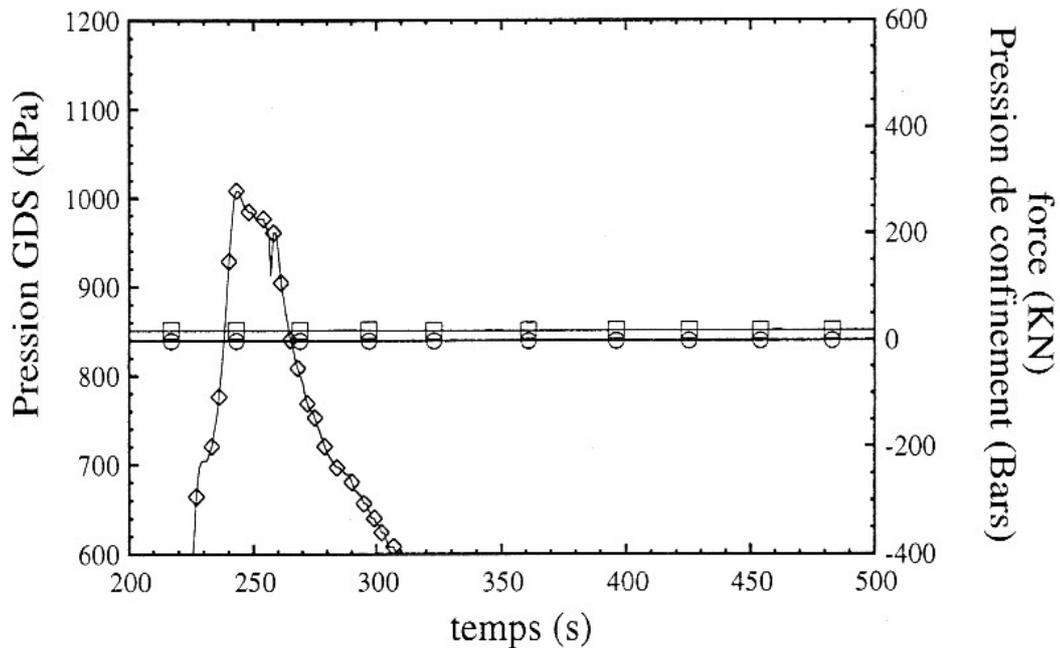


Figure IV-19 : Evolution de la pression du réservoir pendant un essai de perméabilité latérale réalisé sur l'éprouvette G4 à l'étape 1.a.

De la même façon on s'assure de la fiabilité de tout le système expérimental en essayant de reproduire les mêmes procédures de l'essai sous les mêmes conditions (confinement, jaquette, diffuseurs...) sur une éprouvette en acier. On constate qu'au bout de 300 secondes la pression du réservoir diminue seulement de 0,02 MPa.

On a voulu améliorer les conditions dans lesquelles se déroulent les expériences surtout pour ce qui concerne l'étanchéité entre la jaquette et l'éprouvette, tout ce qui peut y avoir comme défaut ou petites fissures survenant lors du carottage. Dans ce but on a appliqué, sur l'éprouvette G2, une couche de graisse à vide sur toutes les surfaces sauf celles soumises à l'injection. Cette couche a l'avantage d'une part d'améliorer l'étanchéité des interfaces « éprouvette –jaquette » et d'autre part de boucher les fissures dans les couches extérieures de l'éprouvette.

La figure IV-20 montre que l'effet de la graisse est significatif. La perméabilité initiale calculée est de l'ordre de 10^{-19} m^2 si on suppose que la pression interstitielle est nulle. Mais après l'essai, on constate que la surface soumise à l'injection contient une couche de graisse. Les précautions prises lors du montage de l'éprouvette (surtout au moment de son introduction dans la jaquette) ne sont pas suffisantes pour empêcher la graisse de toucher la surface soumise à l'injection.

De la même manière, une tentative a été faite avec de la colle, mais les mêmes problèmes surviennent. Il faut donc plus de progrès pour améliorer cette partie.

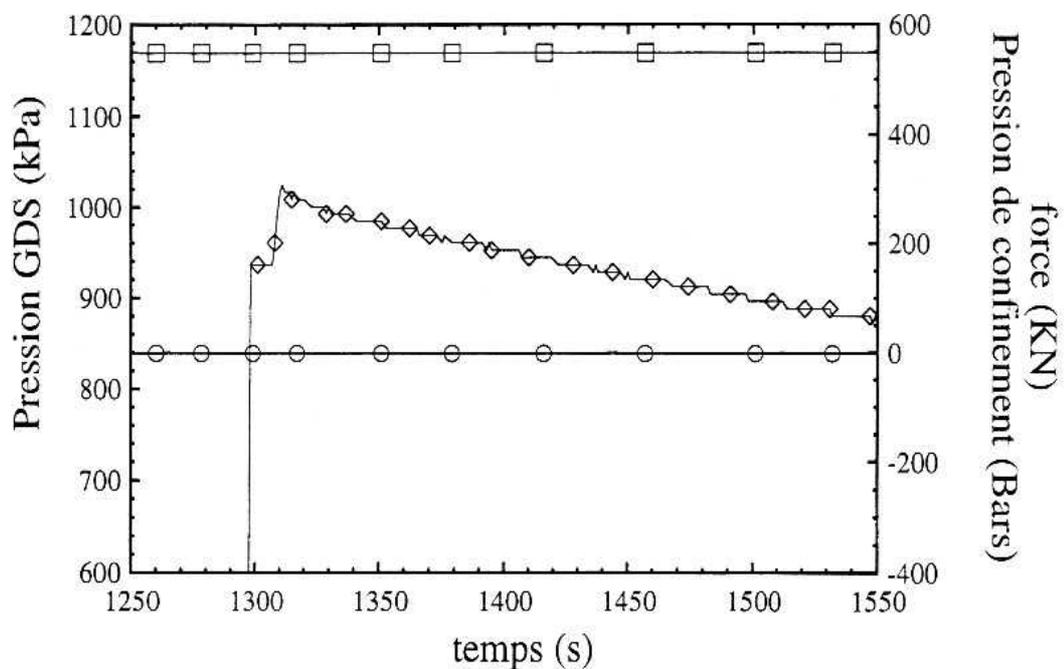


Figure IV-20 : Evolution de la pression du réservoir pendant un essai de perméabilité latérale réalisé sur l'éprouvette G2 à l'étape 1.a.

IV.6.2. Evolution de la perméabilité à différents stades de l'endommagement, sous faible pression de confinement

Les résultats obtenus dans les tableaux de l'annexen°? montrent que les valeurs de perméabilité, calculées avec l'hypothèse de pression initiale nulle, ne varient pas en fonction des cycles de chargement.

Les déformations irréversibles enregistrées, attestant de l'endommagement du matériau, ne se traduisent pas par une augmentation significative de la perméabilité contrairement à notre attente.

La déformation volumique irréversible est nulle : le processus de fissuration dans les siltites du Gard est caractérisé par des glissements et des dislocations des particules de la roche qui ne créent pas nécessairement de fissures ouvertes à l'échelle de l'éprouvette du laboratoire.

IV.6.3. Evolution de la perméabilité sous confinement élevé

La perméabilité latérale sous confinement élevé est très faible pour une roche argileuse, elle est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ pour l'éprouvette G4, soit 500 fois plus grande que celle de l'éprouvette G6. C'est une grande différence probablement liée à l'état initial de chacune des deux éprouvettes, ce qui est conforme à la différence des vitesses des ondes données dans le tableau IV-2.

Cela porte à penser que l'éprouvette G4 est initialement endommagée, on peut alors considérer que la différence de perméabilité observée sur ces deux éprouvettes témoigne de l'endommagement initial.

C'est, à notre avis, une bonne démonstration de l'évolution de la perméabilité avec l'endommagement. La perméabilité de l'éprouvette G4 est élevée puisque cet échantillon était initialement endommagé d'après la caractérisation préliminaire. Cet endommagement se présente sous la forme des micro-fissures réparties dans l'éprouvette et également sur les surfaces d'injection (ce que l'on n'a pas pu réaliser par le biais d'endommagement au laboratoire à cause du frottement créé par les injecteurs).

Aussi, une évolution de la perméabilité ne peut être observée que si l'endommagement est diffus.

Nous verrons plus loin que l'endommagement diffus créé par des sollicitations thermiques (micro-ondes) a un effet très net et mesurable sur la perméabilité.

V. CONCLUSION

La mesure de la perméabilité sur les siltites du Gard, matériau argileux raide et peu perméable, est très délicate.

Malgré les mesures, effectuées avec les précautions nécessaires, le dispositif expérimental n'a pas permis de révéler une évolution significative de la perméabilité en fonction de l'endommagement provoqué par des sollicitations mécaniques. Plusieurs raisons sont à l'origine de ce constat :

Le matériau étudié a un comportement fragile même sous forte contrainte moyenne. La rupture conduit au glissement suivant un plan. La déformation volumique irréversible est très faible, le volume de fissures créées par l'endommagement est donc faible. Ainsi la perméabilité demeure peu sensible à l'endommagement.

Tout système de mesure de faibles perméabilités est sensible à la moindre fuite. Une étanchéité parfaite est très difficile à assurer. Toute interface peut avoir une perméabilité largement plus grande que celle des siltites du Gard. La perméabilité mesurée peut varier de plusieurs ordres de grandeurs en fonction de l'hypothèse sur la valeur de la pression interstitielle initiale, qui est un paramètre très difficile à apprécier. De plus, les échantillons étudiés ayant été prélevés, il y a plus de trois ans, ils ne sont plus saturés, ce qui complique l'interprétation des mesures.

Les paramètres du couplage hydro-mécanique sont difficiles à caractériser pour des roches peu perméables et contenant peu d'eau. Pourtant, ils ont une influence certaine sur l'interprétation des résultats.

La rupture des siltites du Gard est fragile et se manifeste par des plans de glissement (parfois un seul). C'est donc la perméabilité des plans de rupture qui est susceptible d'être mesurée si ceux-ci passent par la face d'injection. Cela ne peut être qu'une grandeur locale distincte de la perméabilité de la roche endommagée. Cette dernière se réfère à une microfissuration diffuse assurant l'homogénéité du milieu à une certaine échelle, ce qui n'est pas le cas en présence d'un nombre limité de fissures bien orientées.

Malgré la complexité des problèmes de mesure et de leur interprétation, on peut conclure que :

La perméabilité des siltites du Gard à l'état initial (état correspondant à une éprouvette prélevée il y a 3 ans) est de l'ordre de 10^{-20} m².

Sous fort confinement (60 MPa), la perméabilité peut baisser d'un ordre de grandeur.

En fonction de la contrainte déviatorique, la perméabilité ne varie que si la fissuration est diffuse et répartie sur toute l'éprouvette formant un réseau à travers lequel le fluide peut circuler. Un tel état est difficile à obtenir en laboratoire, du moins sur les siltites du Gard et par chargement mécanique.

Il y a quelques mesures qui montrent une variation de la perméabilité en fonction de l'endommagement, mais elles ne sont pas suffisamment nombreuses et précises ; elles ne permettent pas d'exprimer une relation entre la perméabilité et l'endommagement.

Ces observations ne doivent pas être généralisées et pourront être modifiées par des résultats expérimentaux complémentaires qui seront réalisés sur d'autres matériaux comme les argilites de l'Est.

DIFFERENTS STADES

D'ENDOMMAGEMENT DES ARGILITES DE

L'EST

I. PROPRIETES DES ARGILITES DE L'EST

Des recherches réalisées, pendant les années précédentes, sur le comportement thermo-hydro-mécanique des argilites de l'Est, ont abouti à un ensemble de données minéralogiques et physiques. Ces paramètres ont permis de mieux caractériser le matériau et de prévoir son comportement sous différentes sollicitations.

Les expériences de laboratoire sont réalisées sur les carottes provenant des sondages effectués entre 400 m et 600 m de profondeur.

I.1. Minéralogie et texture

La composition minéralogique de la roche varie en fonction de la profondeur. Sur quelques échantillons soumis à l'analyse minéralogique, on note les proportions suivantes :

30 à 60% d'argiles, essentiellement des interstratifiées illites-smectites (50 à 90% de la fraction argileuse, selon les résultats de la diffraction aux rayons X). La proportion de smectite est plus importante dans la partie supérieure. Ceci se traduit également par des capacités d'échange cationique (CEC) plus fortes dans ces niveaux que dans les niveaux inférieurs.

Du quartz, en proportion légèrement inférieure à celle de l'argile.

20 à 40% de carbonates, essentiellement CaCO_3 .

Moins de 5% de minéraux accessoires, tel que la pyrite.

L'argile est à base d'illite. Les ions de potassium présents entre les feuillets assurent une cohésion très grande de feuillet à feuillet. Il en résulte que les cristallites d'argile sont

extrêmement rigides. D'après les observations au Microscope Optique à Transmission, ces argiles sont relativement de grande extension dans le plan des feuillet. L'épaisseur des cristallites ou paquets de cristallites est de quelques centaines d'Å.

I.2. Aptitude au gonflement-retrait

Quelques essais mécaniques, destinés à l'étude du gonflement, ont été réalisés sous contraintes isotropes. Lors de l'application d'une contre pression, les résultats montrent qu'il y a des évolutions de débit d'eau ainsi que les déformations longitudinale et radiale. La figure V-1 montre les résultats d'un essai qui témoigne d'une telle évolution, très lente mais significative : le gonflement est bien visible sous 12 MPa de contrainte isotrope.

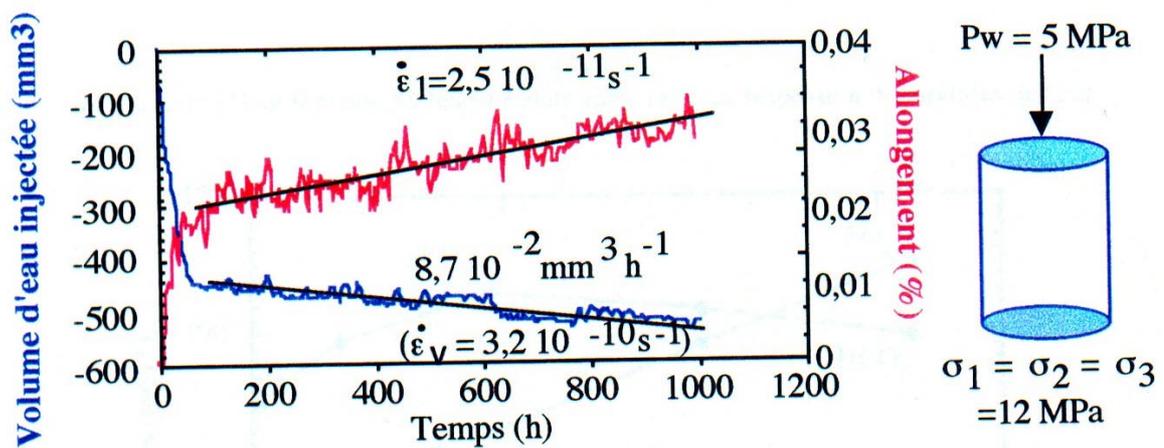


Figure V-1 : Gonflement des argilites de l'Est sous contrainte isotrope.

Pour les argilites de l'Est, l'espace intercrystallite n'est pas ou peu rempli par de la calcite ; c'est à dire pas de cimentation des argiles par la calcite. Il en résulte que les particules peuvent se réorganiser de telle sorte qu'un éloignement ou rapprochement peut se produire, modifiant ainsi la taille des pores du système. Cette organisation de l'argile est à l'origine des propriétés de gonflement-retrait observées au laboratoire, même à l'état parfaitement saturé, à partir des essais de réhumectation-dessiccation. Elle explique aussi la fissuration aléatoire observée lors de la dessiccation (rapport scientifique G3S, 1998).

I.3. Propriétés physiques de l'argilite de l'Est

Les valeurs de densité naturelle sont comprises entre 2,32 et 2,61 pour une valeur moyenne de 2,42.

Les teneurs en eau naturelle, calculées par pesée différentielle avant et après le passage à l'étuve à 110°C pendant 48 heures, sont comprises entre 2,8 et 8,7% avec une moyenne de 6,7%.

La porosité a été déterminée à partir des valeurs de densité, sa valeur est comprise entre 9 et 18%, avec une moyenne de 14%.

La figure représentée dans l'annexe n°2, présente l'évolution des propriétés physiques (teneur en eau, densité, teneur en carbonate, CEC et porosité), acoustiques (célérité des ondes de compression et de cisaillement), mécaniques (résistance à la traction et à la compression) et thermiques (conductivité et dilatation).

II. ESSAI DE PERMEABILITE AXIALE

II.1. Préparation à l'essai

II.1.1. Eprouvettes

Les éprouvettes utilisées ont une forme cylindrique avec un diamètre de 60 mm et une hauteur de 120 mm, elles proviennent d'une profondeur comprise entre 400 et 500 m.

Des études antérieures réalisées par C. BAUER [1998] montrent que les mesures de différentes caractéristiques effectuées sur les échantillons dans deux directions perpendiculaires ; suivant l'axe du forage et dans le sens perpendiculaire à celui-ci, montrent que l'anisotropie des propriétés élastiques et acoustiques n'excède pas 15%.

Au total, six éprouvettes ont été prélevées des carottes, on note que la préparation des éprouvettes de l'argilite de l'Est est plus délicate que celle du siltite du Gard. Le tableau V-1 présente les informations relatives aux éprouvettes préparées.

Eprouvettes	Cote (m)	γ (g/cm ³)	ϕ (%)	w (%)
E1	425,3	2,57	3,45	1,36
E2	425,42	2,43	10,2	4,38
E3	425,6	2,41	14,8	6,55
E4	425,72	2,41	14,8	6,55
E5	463,22	2,41	15,87	7,05
E6	463,36	2,41	15,87	7,05

Tableau V-1 : Présentation de quelques propriétés des éprouvettes des argilites de l'Est.

γ : Masse volumique

ϕ : Porosité (en supposant que le matériau est saturé)

w : teneur en eau

Les essais interprétés sont ceux réalisés sur les éprouvettes E3, E4 et E5.

Sur les deux éprouvettes E3 et E5 nous avons effectué des essais de perméabilité axiale, par contre sur l'éprouvette E4, un essai de perméabilité latérale a été effectué.

II.1.2. Fluide d'injection

Pour tous les essais réalisés, on a utilisé l'eau comme fluide d'injection. Pour respecter l'équilibre chimique de l'eau qui se trouve à l'intérieur de l'éprouvette, la composition chimique de l'eau utilisée se rapproche de celle de l'éprouvette. La préparation de cette eau est faite de la manière expliquée dans le deuxième chapitre.

Contrairement aux siltites du Gard, l'eau obtenue pour les argilites de l'Est reste une eau claire et transparente.

II.2. Essais hydro-mécaniques

Les difficultés rencontrées au cours des essais hydro-mécaniques précédents réalisés sur les siltites du Gard, ont été mises à profit pour améliorer les procédures de réalisation de ces essais. Ici, chaque essai hydro-mécanique dure entre une et deux semaines (voire davantage) en suivant une méthodologie qui permet de recueillir un maximum d'informations. Pour les pulse tests, on effectue des pulses à longue durée (plusieurs heures). Une autre méthode a été ensuite établie qui permet de déterminer certains paramètres poroélastiques du matériau dont les valeurs étaient, jusqu'alors, basées sur des hypothèses.

II.2.1. Procédure de mesure de la perméabilité

A partir d'un schéma de charge bien défini pour chaque essai, on procède à la mesure de la perméabilité à différentes étapes du chargement mécanique. Le schéma de charge de l'éprouvette E3 (figure V-2) indique que la pression d'injection, utilisée pour la mesure de la perméabilité, est appliquée au début sous 3 MPa de pression de confinement pour la détermination de la perméabilité initiale puis sous 75 MPa suivi d'une compression déviatorique. Ces manipulations sont répétées sur plusieurs cycles durant plusieurs mois. On rappelle que pendant l'injection de l'eau les chargements mécaniques, isotrope ou déviatorique, sont maintenus constants. Comme pour les siltites du Gard, les argilites de l'Est ont une très faible perméabilité d'où l'application de la méthode transitoire du pulse test pour la mesure de la perméabilité.

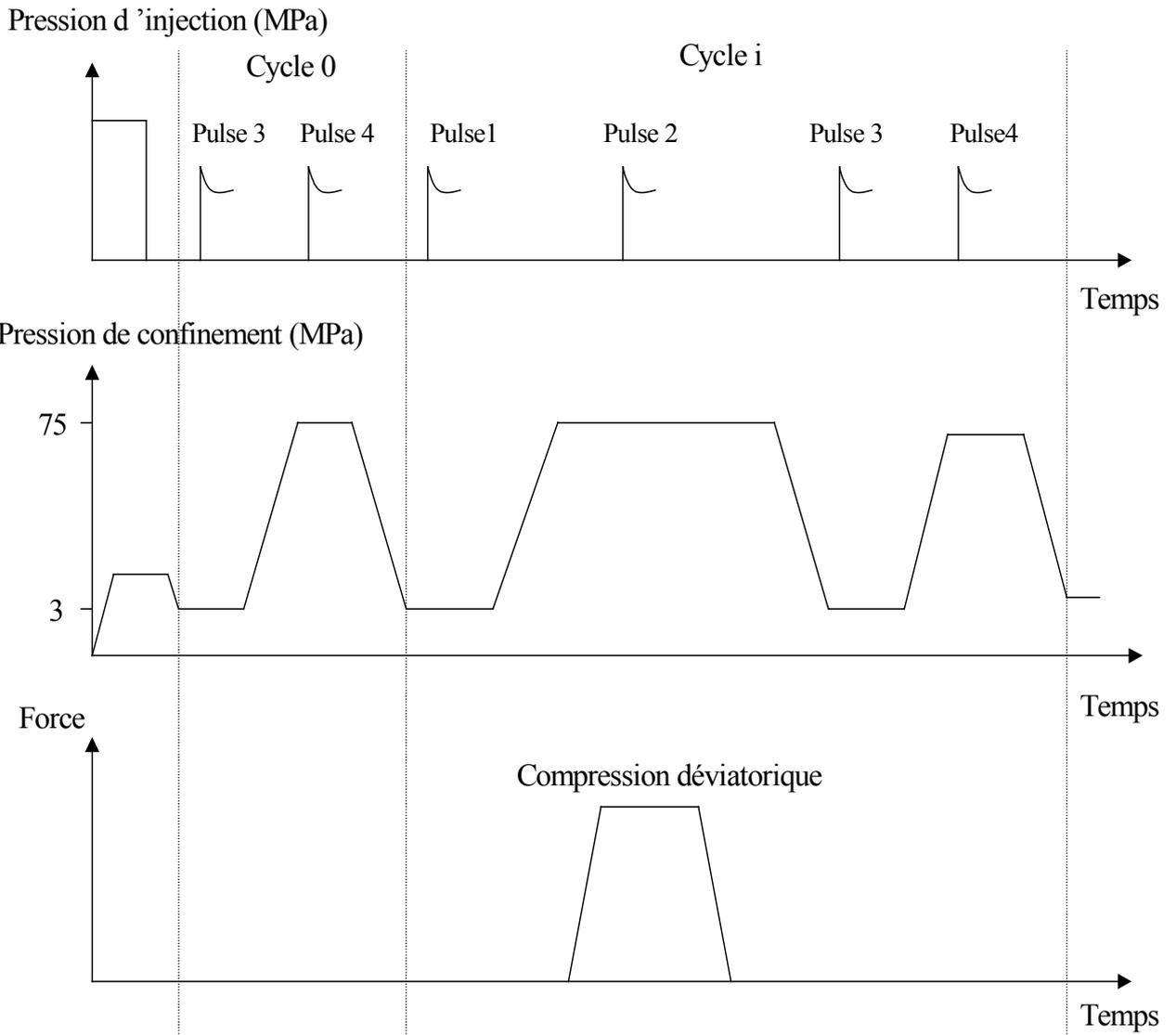


Figure V-2 : Schéma de charge de la pression d'injection, la pression de confinement et la force appliquée à l'éprouvette E3.

II.2.2. Procédure des essais mécaniques

On présente sur la figure V-2 ci-dessus le schéma d'application de la force et de la pression de confinement pour l'éprouvette E3. Ces trajets de charge peuvent être modifiés au fur et à mesure de l'avancement de l'essai.

Dans le but de maîtriser le processus de fissuration, le chargement déviatorique s'effectue toujours en pilotant la déformation circonférentielle.

Les procédures de mise en place de l'éprouvette dans la cellule triaxiale sont les mêmes que pour les éprouvettes des siltites du Gard.

D'abord l'éprouvette est soumise à une contrainte isotrope de 3 MPa. On procède alors à une mesure de perméabilité initiale de l'éprouvette à l'essai pulse.

Ensuite, l'éprouvette est soumise à un cycle de charge-décharge de compression isotrope jusqu'à 75 MPa. Ce qui permet d'étudier le comportement mécanique en compression isotrope. A nouveau, une pression de confinement isotrope est imposée. Elle est maintenue constante tout au long de l'application de la contrainte déviatorique.

Lorsque la contrainte déviatorique est jugée suffisante pour créer des fissures, la perméabilité est mesurée sous contrainte déviatorique.

Enfin, la contrainte déviatorique est déchargée complètement puis la pression de confinement à 3 MPa. A ce stade, la perméabilité est mesurée pour être comparée à celle du pulse 1 (voir figure V-2).

Ce cycle de chargement est répété plusieurs fois jusqu'à l'obtention des résultats significatifs.

II.2.3. Module de Young et coefficient de Poisson

Elberhardt et al. [1999], ont étudié les déformations axiales et latérales au cours de l'endommagement ainsi que l'évolution du module de Young et du coefficient de Poisson avant et après le seuil d'endommagement.

Sur la figure V-3 est présentée une courbe de contrainte-déformation au cours d'un essai de compression déviatorique réalisé sur l'éprouvette E3 avec une pression de confinement de 78 MPa.

Le module de Young est mesuré sur le trajet de décharge de la contrainte déviatorique. Sa valeur est donnée à titre indicatif, sans pouvoir préciser réellement s'il s'agit d'une propriété drainée. On constate que le module de Young n'évolue quasiment pas, le coefficient de Poisson est, quant à lui, proche de 0,5 (comportement pratiquement incompressible). Les différentes caractéristiques mesurées et calculées sont présentées dans les deux tableaux V-2 et V-3.

Compression déviatorique Pression de confinement : 78 MPa

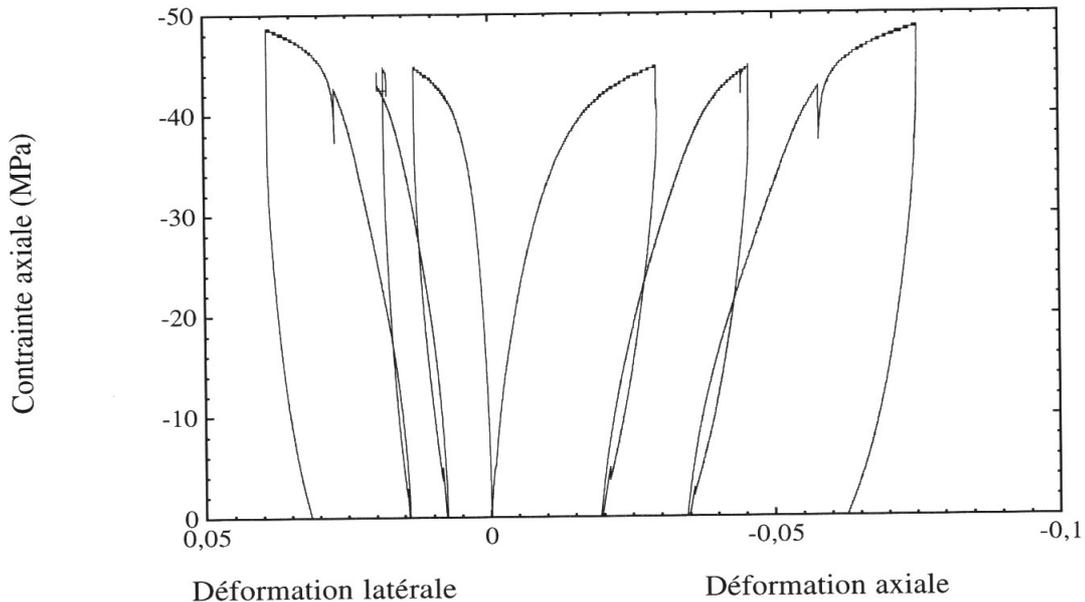


Figure V-3 : Courbe de compression déviatorique sur l'éprouvette E3 sous pression de confinement de 78 MPa.

II.2.4. Module de compressibilité

Pour la compression isotrope, on remarque, sur les courbes issues des différents cycles, que le comportement est linéaire par morceau surtout en décharge. La figure V-4 illustre un exemple de résultats de l'essai de compression isotrope lors du premier cycle sur l'éprouvette E3. A chaque cycle de chargement correspond d'une part une diminution de la valeur du module de compressibilité et, d'autre part, une diminution de la valeur relative à la transition d'un module de compressibilité à l'autre.

Au fur et à mesure de l'évolution de l'endommagement, les microfissures se développent sous la forme de différentes familles, ce qui conduit à une diminution du module de compressibilité et une diminution du seuil de transition. C'est le seuil d'ouverture ou de fermeture d'une famille de microfissures qui est à l'origine de la valeur de la transition d'un module de compressibilité à l'autre.

Comme nous l'avons déjà dit, un des meilleurs paramètres pour caractériser l'évolution d'endommagement est le module de compressibilité ; la valeur du module de compressibilité non drainé à faible confinement et à l'état initial est de 4700 MPa, elle évolue à 2200 MPa puis à 2000 MPa au cours du premier et du deuxième cycle d'endommagement. Elle devient 1300 MPa après le troisième cycle. Cette évolution très significative atteste que

l'endommagement a bien eu lieu et qu'il peut être caractérisé par le module de compressibilité, paramètre qui se révèle comme un bon indicateur de l'endommagement.

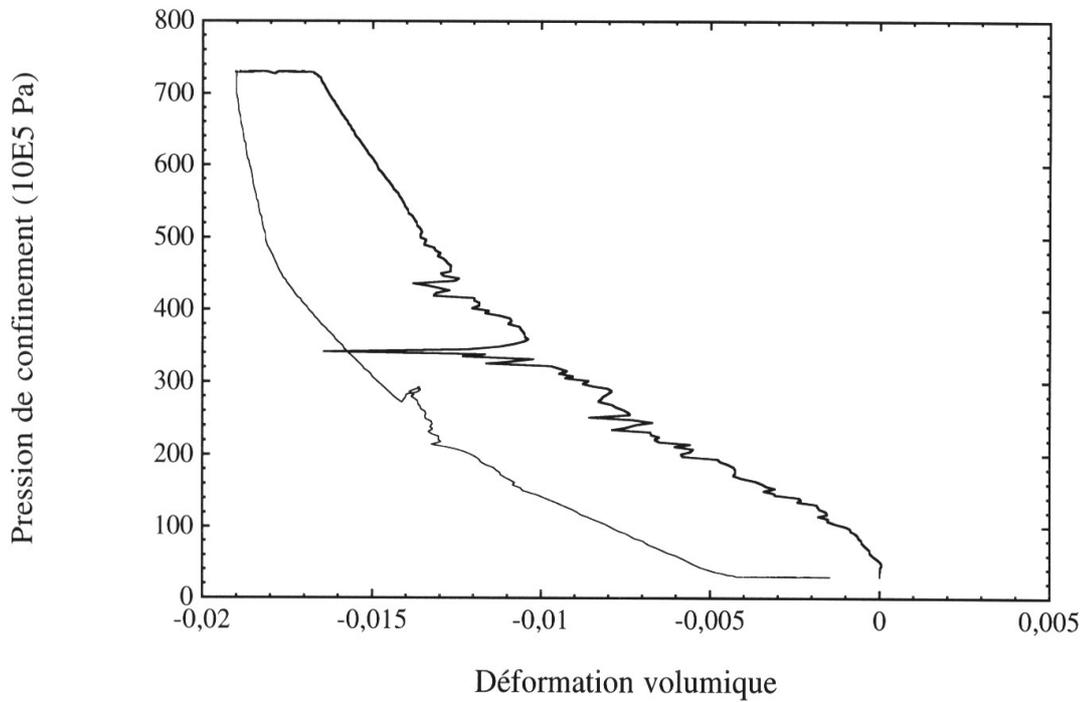


Figure V-4 : Essai de compression isotrope sur l'éprouvette E3 présentant un comportement linéaire par morceau en décharge.

II.2.5. Paramètres hydro-mécaniques calculés

A partir des mesures des paramètres hydro-mécaniques, on a calculé d'autres paramètres hydro-mécaniques à savoir le module et le coefficient de Biot (M et b) et le coefficient d'emménagement de la roche (S). Les résultats obtenus pour l'éprouvette E3 sont donnés dans le tableau V-3.

Principes de calcul : Sous l'hypothèse que l'écoulement est régi par la loi de Darcy, on montre que la loi d'évolution de la pression interstitielle est :

$$\frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial t} + b \frac{\partial(\text{tr} \underline{\underline{\varepsilon}})}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 P \quad (1)$$

où k : perméabilité (m²) et μ : viscosité (Pa.s)

on réécrit cette équation sous la forme :

$$\frac{K}{K_0 M} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{b}{3K_0} \frac{\partial(\text{tr} \underline{\underline{\sigma}})}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 P \quad (2)$$

et on pose :
$$S = \left(\frac{1}{M} + \frac{b^2}{K_0} \right) = \frac{K}{K_0 M}$$

S est appelé le coefficient d'emmagasinement de la roche.

Lorsqu'il n'y a pas de variation de contraintes totales (qui est le cas au moment des essais pulse), la loi de diffusion des pressions hydrauliques (2) se simplifie pour donner :

$$S \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 P \quad (3)$$

D'autre part nous considérons qu'un chargement de compression isotrope en conditions non drainées va provoquer une déformation volumique de l'échantillon e_v . Cette variation de volume peut être calculée à l'aide de l'équation de conservation de la masse fluide :

$$P - P_0 = M \left(-b \text{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}) + \frac{m}{\rho_f} \right) \quad (4)$$

avec P_0 : pression interstitielle initiale.

Dans notre cas, l'équation (4) donne :

$$\frac{m}{\rho_f} = 0 = b e_v + \frac{P_i}{M} \quad (5)$$

D'où
$$P_i = -b M e_v \quad (6)$$

Avec P_i : la variation de pression interstitielle due au chargement de compression isotrope.

Soit la relation contrainte-déformation suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{\sigma}}_0 = \left(K_0 - \frac{2}{3} G \right) \text{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{1}} + 2G \underline{\underline{\varepsilon}} - b(P - P_0) \underline{\underline{1}} \quad (7)$$

En attendant la dissipation des pressions interstitielles à contrainte de confinement constante, l'équation (7) devient :

$$\text{tr}(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{\sigma}}_0) = 0 = 3K_0 e_d + 3bP_i \quad (8)$$

avec e_d : déformation différée sous contrainte de confinement constante.

ce qui donne
$$P_i = -\frac{K_0}{b} e_d \quad (9)$$

En se basant sur les équations précédentes, on obtient le système d'équations suivant :

$$\frac{1}{S} = \frac{K_0 M}{K} \quad (10a)$$

$$b^2 = K S a (1 - a) \quad (10b)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{(b - \phi)(1 - b)}{K_0} \quad (10c)$$

avec
$$a = \frac{b^2 M}{K} = \frac{e_d}{e_v + e_d}$$

A partir du système d'équations dernier, Le calcul de b, M et de S devient alors immédiat.

(L'annexe 3 montre la courbe présentant la définition des déformations e_v et e_d ainsi que le détail de calcul)

	K (MPa)	Transition (MPa)	Module moyen (MPa)	E (MPa)	a
Cycle 0	27000 7300 4700	70 39	5500	4500	0,15
Cycle 1	22900 5000 2200	45 21	4700	4500	0,22
Cycle 2	27000 5000 2050	35 15	6000	4200	0,21
Cycle 3	17800 2300 1370	30 11	4800	4200	0,16

Tableau V-2 : Paramètres hydromécaniques mesurés lors d'un essai sur l'éprouvette E3.

*Tableau V-3 : Paramètres hydromécaniques calculés à partir de ceux mesurés
dans le tableau V-2.*

Remarques

- ◆ Le dispositif de réalisation des essais pulse contient le contrôleur de pression/volume (GDS) de façon à mesurer les débits et les pressions. En raison du nombre important des essais pulse par cycle de chargement et la très faible perméabilité de l'éprouvette, nous n'avons pas attendu suffisamment la stabilisation des pressions dans le réservoir d'injection. Nous n'avons donc pas pu mesurer directement le coefficient d'emmagasinement et nous l'avons déduit par calcul (colonne 2, tableau V-3).
- ◆ Les essais pulse à faible pression de confinement sont réalisés par injection sur un seul côté de l'éprouvette, le gradient hydraulique est donc plus important que si l'injection se faisait des deux côtés, et, il y a une décroissance rapide de la pression d'injection est donc une mesure plus fine de la perméabilité, tandis que les essais pulse sous fort confinement sont réalisés par injection de deux côtés aussitôt après le chargement mécanique. La décroissance de la pression lors de l'injection par les deux côtés de l'éprouvette est moins rapide que lors de l'injection par un seul côté, le gradient de pression étant plus faible.
- ◆ Le chargement mécanique rapide va créer une surpression interstitielle dans l'éprouvette. En mettant le réservoir déformable au contact de l'éprouvette, il convient d'observer l'équilibre des pressions entre le réservoir et l'éprouvette. Ce qui permet de déterminer les surpressions initiales dans l'éprouvette et donc le coefficient de Skempton.
- ◆ L'éprouvette utilisée provient d'une profondeur de 425,60 m, correspondant au sommet de la couche, niveau carbonaté. La valeur de la pression de confinement pour laquelle le matériau a été endommagé est comprise entre 73 et 78 MPa. Dans ce domaine de pression élevée, le comportement est ductile (écrouissage positif).

II.3. Evolution de la perméabilité

Nous n'avons pas réussi à détecter une évolution de la perméabilité avec l'endommagement sur l'éprouvette E3. Les résultats sont présentés dans le tableau (voir

annexe n°4). La présence du contrôleur de débit-pression (GDS) dans le système de mesure de la pression d'injection engendre une compressibilité du réservoir qui n'autorise pas une mesure des perméabilités inférieures à 10^{-20} m^2 .

La pression d'injection décroît au cours du temps, alors que l'on observe des déformations différées traduisant le fait que des surpressions interstitielles se dissipent dans l'éprouvette. La présence d'air piégé dans l'éprouvette ou entre l'éprouvette et la jaquette est l'explication la plus probable pour ce phénomène. Cet air piégé non purgé par le processus de resaturation, se déforme à la présence des surpressions et permet leurs dissipations. Donc l'interprétation des essais pulse à fort confinement est plus une valeur déduite des résultats des essais pulse de l'état de référence qu'une valeur réellement interprétée qui devrait prendre en compte l'existence de cette bulle d'air.

La difficulté de mesurer des perméabilités inférieures à 10^{-20} m^2 a conduit à améliorer la procédure d'essai. D'abord, la procédure de réalisation des essais pulse a été optimisée pour réussir à mesurer des perméabilités inférieures à 10^{-20} m^2 . Ensuite, la tentative de mesurer des surpressions dans l'échantillon a été abandonnée.

II.4. Nouvelle procédure mise en œuvre pour l'éprouvette E5

D'abord et comme prévu, le contrôleur de débit-pression (GDS) est mis hors-circuit du dispositif de mesure de l'essai pulse ; ce qui a permis de réduire la compressibilité de réservoir et d'effectuer des essais pulse plus longs qu'auparavant, le dispositif sans le GDS étant moins sensible aux variations de la température. La difficulté que pose cette innovation est la détermination de la compressibilité du réservoir, on a donc dû développer une nouvelle méthode de détermination de la compressibilité du réservoir.

Sur la figure V-5 présente le nouveau chemin de charge appliqué à l'éprouvette E5.

Après la saturation, l'éprouvette est soumise à une compression isotrope de 3 MPa et on procède à une mesure de la perméabilité selon la procédure de l'essai pulse. La valeur de la perméabilité mesurée correspond à la perméabilité à l'état initial, la perméabilité de référence. L'éprouvette est soumise ensuite à un cycle de charge-décharge de compression isotrope jusqu'à 20 MPa. Cette partie de chargement permet d'étudier le comportement mécanique du matériau en compression isotrope. Puis une pression de confinement est de nouveau imposée jusqu'à 75 MPa et est maintenue constante pendant l'application de la force déviatorique. Une contrainte déviatorique est appliquée à une valeur jugée suffisante pour créer un endommagement. La force est déchargée à zéro puis la pression de confinement jusqu'à la pression de référence c'est à dire à 3 MPa. Un deuxième essai pulse est alors effectué.

Tous les essais pulse sont réalisés à l'état de référence caractérisé par une contrainte de confinement de 3 MPa et une pression interstitielle nulle. Cette pression est imposée aux deux extrémités de l'éprouvette tout en mesurant les déformations. Lorsque les déformations n'évoluent plus, les pressions interstitielles sont considérées comme étant à l'équilibre.

Comme on l'a déjà signalé, on effectue des essais pulse longs jusqu'à la stabilisation de la pression dans le réservoir d'injection. Cette procédure permet de vérifier qu'il n'y a pas de fuite dans le système de mesure et de déterminer le coefficient d'emménagement de la roche.

Les paramètres hydromécaniques sont déterminés à partir des déformations dues à la dissipation de la pression interstitielle suite à une compression isotrope. Les paramètres du couplage hydromécanique dépendent de l'état de contraintes, c'est pour cette raison que la compression isotrope est limitée à une valeur de 20 MPa seulement. Cette valeur correspond à la partie linéaire du comportement mécanique lors de la compression isotrope.

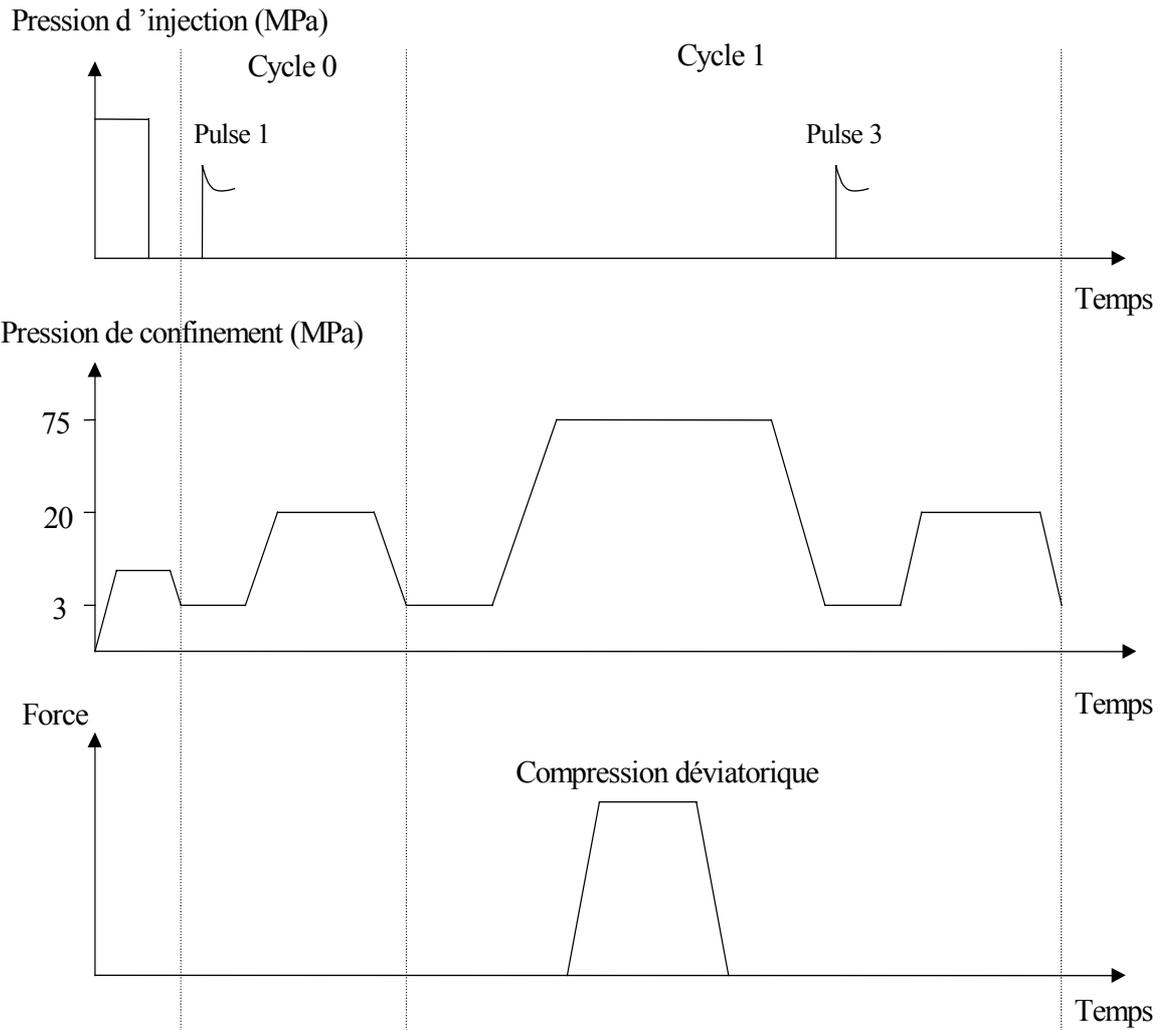


Figure V-5 : Schéma de charge de la pression d'injection, la pression de confinement et la force appliquée à l'éprouvette E5.

II.4.1. Module de compressibilité

Le module de compressibilité est mesuré lors de la compression isotrope à 20 MPa. Sa valeur est déduite de la pente de décharge de la pression de confinement en fonction de la déformation volumique, figure V-6.

Le module de compressibilité non drainé de la roche valait 7000 MPa avant l'endommagement, il a augmenté à la suite du premier cycle d'endommagement à 10500 MPa, puis il a diminué pour atteindre 5000 MPa. La diminution du module de compressibilité après le deuxième cycle de chargement atteste de l'endommagement.

Le module de compressibilité de la roche mesuré après le premier cycle d'endommagement a une valeur plus élevée que celle mesurée au cycle zéro. Une première

explication est que l'éprouvette n'était pas saturée au début de l'essai. En effet, s'il existe une bulle d'air, le fluide interstitiel aura une compressibilité apparente beaucoup plus grande que celle de l'eau sans air. Ceci explique l'augmentation du module de compressibilité non drainé avec le degré de saturation.

Figure V-6 : Cycle de charge-décharge en compression isotrope sur l'éprouvette E5

II.4.2. Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement de la roche est déterminé à partir de la courbe asymptotique de la pression de réservoir au cours du temps. On présente sur la figure V-7 un exemple de courbe de pression du réservoir en fonction du temps qui montre une simulation du coefficient d'emmagasinement pour une valeur de perméabilité de 10^{-20} m^2 .

Le coefficient d'emmagasinement de la roche a évolué de 7000 MPa initialement à 5000 MPa après le premier cycle et à 3000 MPa à la fin des cycles d'endommagement. On donne dans le tableau V-4 des résultats sur les paramètres hydromécaniques mesurés pour l'éprouvette E5 et nous remarquons l'incertitude sur le coefficient d'emmagasinement. Elles sont dues aux fluctuations de la pression d'injection autour de la valeur asymptotique. Ces fluctuations, qui ont une période de 24 heures, sont dues à la variation de la température entre le jour et la nuit. Lorsque le coefficient d'emmagasinement diminue, la pression d'injection chute de manière plus importante, ce qui la rend moins sensible aux variations de la température (figure V-7).

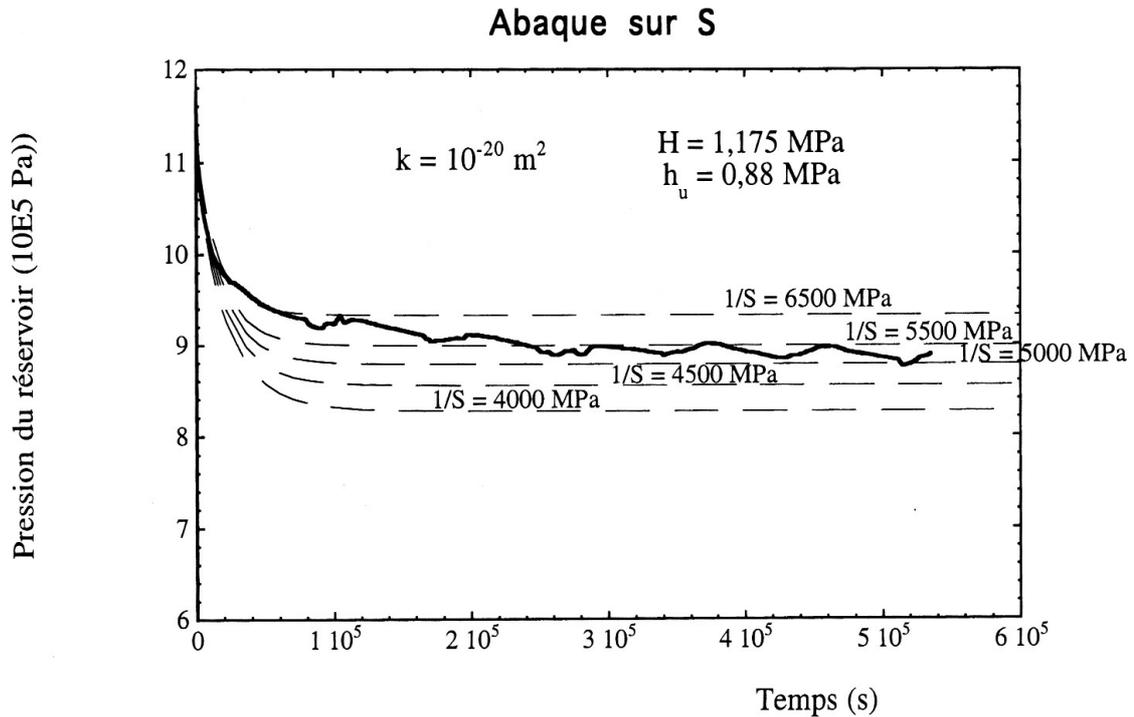


Figure V-7 : Courbes de simulations du coefficient d'emmagasinement, elles ont été faites à l'aide de ANTHYC pour une valeur de perméabilité de 10^{-20} m^2 , la valeur adoptée d'après ces courbes est $1/S = 5500 \text{ MPa}$.

II.4.3. Coefficient de Biot-Module de Biot

Vincké et al. [1998] ont réalisé une série d'expérience sur les schistes pour déterminer les différentes propriétés poroélastiques, ils se sont intéressés particulièrement à l'évaluation du tenseur de Biot par la combinaison des résultats de deux différentes décharges mécaniques. Une, consiste à diminuer la contrainte totale, l'autre consiste à augmenter la pression de pores.

A partir des mesures du coefficient d'emmagasinement, du module de compressibilité non drainé et des déformations différées en compression isotrope réalisés dans ce mémoire (tableau V-4), on peut déterminer les paramètres de couplage hydromécanique, le module de compressibilité drainé et le coefficient de Skempton.

Les différentes valeurs calculées sont présentées dans le tableau V-5, le coefficient de Biot évolue au cours de l'endommagement entre 0,36 initialement et 0,58 après le dernier cycle d'endommagement. Au début du chargement, le coefficient est déterminé avec une grande précision, mais à la fin de l'essai l'incertitude est importante. Ceci tient essentiellement au comportement différé qui est différent en charge et en décharge de compression isotrope. Cette différence peut être attribuée à l'hétérogénéité des fissures qui augmentent au fur et à mesure de l'endommagement.

Pour le module de Biot, on enregistre aussi une évolution dans le sens d'une baisse de sa valeur de 8500 à 4100 MPa entre l'état initial et l'état final après endommagement.

	Perméabilité (m ²)	Durée de la mesure (s)	1/S (MPa)	K (MPa)	E (MPa)	a
Cycle 0	2 10 ⁻²² à 5 10 ⁻²²	10 ⁶	7000 ±2000	7100	2800	0,15
Cycle 1	5 10 ⁻²¹ à 10 ⁻²⁰	5 10 ⁵	5500 ±500	10500	3700	0,19
Cycle 2	10 ⁻²⁰ à 2 10 ⁻²⁰	3,5 10 ⁵	3500	5500	2500	0,16 à 0,30

Tableau V-4 : Paramètres hydromécaniques mesurés lors de l'essai sur l'éprouvette E5.

	K ₀ moyen (MPa)	M (MPa)	b	B _s = $\frac{bM}{K}$
Cycle 0	6000	8300 ±2000	0,36 ±0,05	0,42
Cycle 1	8500	6000 ±500	0,54	0,31
Cycle 2	3800 à 4600	4100 à 5000	0,46 à 0,58	0,34 à 0,52

Tableau V-5 : Paramètres hydromécaniques calculés lors de l'essai sur l'éprouvette E5.

II.4.4. Evolution de la perméabilité

Après deux cycles d'endommagement, la perméabilité évolue pratiquement de deux ordres de grandeur. La valeur de la perméabilité initiale est précisément de 2.10⁻²² m², après le

premier cycle d'endommagement, elle est de 5.10^{-21} m^2 , et après le deuxième cycle, elle est devenue 10^{-20} m^2 .

Les mesures de la perméabilité ont duré le temps de la stabilisation des pressions dans le réservoir d'injection. Ce temps dépend de la compressibilité du réservoir d'injection, du coefficient d'emménagement de la roche et de la perméabilité. On constate une diminution du temps nécessaire à la stabilisation des pressions au cours des différents cycles, ce qui montre clairement une évolution de la perméabilité et du coefficient d'emménagement de la roche.

II.4.4.a. Endommagement et rupture du matériau

L'endommagement a été créé à une pression de confinement de 75 MPa pour laquelle le comportement est ductile. La contrainte déviatorique maximale correspondante est de 28 MPa (figure V-8).

Deux cycles de chargement ont eu lieu. L'endommagement dans le premier cycle est peu significatif (environ 0,1% de déformation volumique irréversible), tandis que dans le deuxième cycle, l'endommagement est beaucoup plus marqué (environ 4% de déformation volumique irréversible).

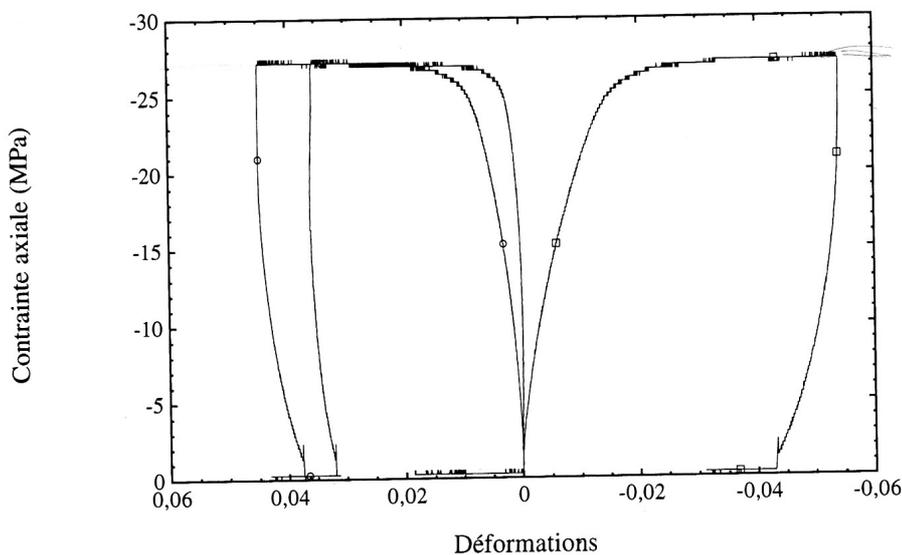


Figure V-8 : Deuxième cycle d'un chargement déviatorique sur l'éprouvette E5 sous pression de confinement de 75 MPa.

II.4.4.b. Relation perméabilité axiale-déformation volumique

Cette étude est réalisée dans le but d'établir une relation entre la perméabilité et l'endommagement. Plusieurs paramètres peuvent caractériser l'endommagement ; parmi ces paramètres, les déformations volumiques irréversibles.

Dans les essais réalisés sur l'éprouvette E5, une augmentation de la perméabilité au cours de l'endommagement est enregistrée :

$$k_{\text{initiale}} = 2.10^{-22} \text{ m}^2$$
$$k = 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ pour } \varepsilon_v^{\text{irr}} = 4\%$$

II.4.4.c. Interprétation des résultats

Les tableaux V-6 et V-7 présentent un résumé de différents résultats mesurés et calculés au cours des essais réalisés sur l'éprouvette E5. Les figures V-9 et V-10 présentent les évolutions de ces paramètres. La variable d'endommagement D est calculée à partir de la formule n° 4 au chapitre II.

Cycle	1	2
Compressibilité [K] (MPa)	10500	5500
Endommagement [D]	0	0,47

Tableau V-6 : Paramètres mesurés et calculés lors de l'essai sur E5

Dans ce tableau, nous supposons que l'état initial correspond au cycle 1 pour éviter une valeur négative de l'endommagement lors du calcul.

Cycle	0	1	2
Perméabilité [k] (10^{-21} m^2)	0,2	5	10
$\frac{\Delta k}{k_0}$	0	24	49
\mathcal{E}_v^{irr}	0	0,003	0,03

Tableau V-7 : Paramètres mesurés et calculés lors de l'essai sur E5

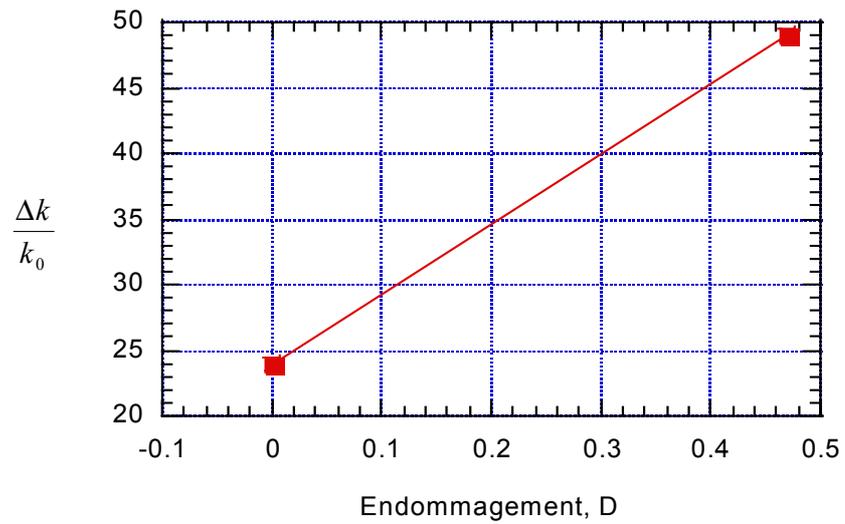


Figure V-9 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de l'endommagement D pour l'éprouvette E5.

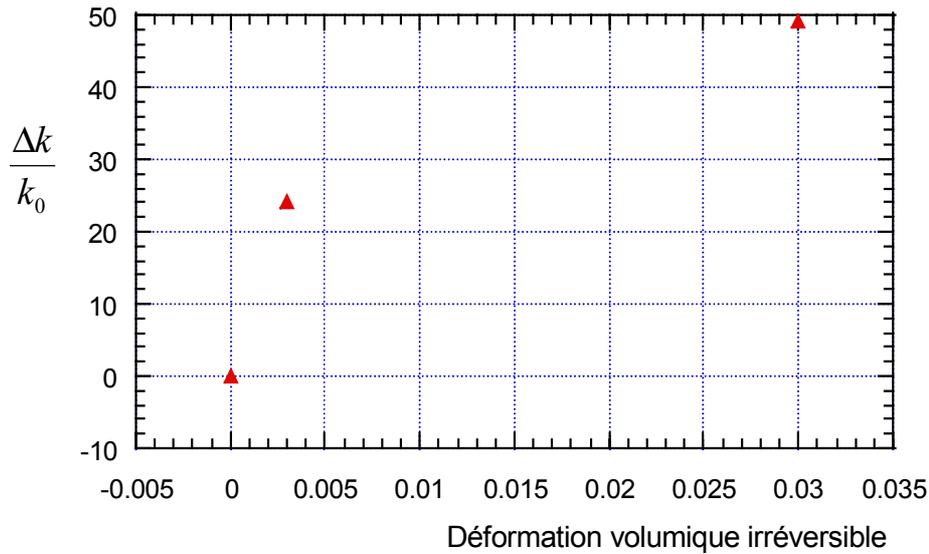


Figure V-10 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de la déformation volumique irréversible pour l'éprouvette E5.

II.4.4.d. Remarques

Les déformations différées après le chargement de compression isotrope peuvent être reproduites assez précisément au début de l'essai avec l'hypothèse de l'éprouvette drainée sur ses faces latérales. Lorsque la perméabilité est aussi faible que $2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$, les micro-défauts créés par le carottage sur les bords de l'éprouvette constituent des drains. Après le dernier cycle d'endommagement, la perméabilité augmente jusqu'à 10^{-20} m^2 . Les déformations différées sont alors mieux reproduites avec cette hypothèse des surfaces latérales non drainées qu'avec l'hypothèse des surfaces latérales drainées.

II.4.4.e. Synthèses

Sur l'éprouvette E5, trois mesures de perméabilité ont été effectuées à l'état initial et à deux niveaux d'endommagement distincts. La réalisation des essais pulse a demandé beaucoup de temps pour deux raisons : d'abord, il a fallu vérifier l'état initial de l'éprouvette, une condition nécessaire à la réussite des essais pulse. Ensuite, on a dû attendre la stabilisation de la pression du réservoir d'injection de façon à caractériser avec précision le coefficient d'emmagasinement de la roche. On a ainsi pu mettre en évidence une évolution du coefficient d'emmagasinement de la roche avec l'endommagement, et de mesurer le coefficient de Biot et le module de Biot.

On observe une augmentation du premier et une diminution du deuxième avec l'endommagement, sans pouvoir proposer un modèle d'évolution des propriétés hydromécaniques sur la base d'un seul essai. Cependant, c'est une voie à explorer, car, comme on l'a vu, le temps d'obtention des pressions d'équilibre dans le réservoir d'injection est particulièrement sensible aux valeurs des paramètres hydromécaniques.

II.5. Conclusions

Nous n'avons pas réussi à mesurer une évolution graduelle de la perméabilité pour l'éprouvette E3, le dispositif de mesure n'ayant pas été assez précis.

En revanche, une évolution de perméabilité de $2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ à 10^{-20} m^2 a été mise en évidence pour l'éprouvette E5, grâce à l'amélioration apportée au système de mesure. A la fin des cycles d'endommagement, la perméabilité a évolué de deux ordres de grandeur environ pour l'éprouvette E5, tout en restant faible.

Une fissuration diffuse a été créée lors de l'endommagement des éprouvettes E3 et E5. Celle-ci est suffisamment faible pour admettre l'absence d'une localisation des déformations. Toutefois, nous nous sommes posés des questions sur la taille de fissures créées et s'ils seront représentatives de la fissuration qui sera créée autour de l'ouvrage. Il est certain que la pression de confinement autour d'une galerie sera beaucoup plus faible que celle que l'on a appliquée pour provoquer l'endommagement. La taille des fissures créées autour des ouvrages sera certainement beaucoup plus grande et conduira aussi à une évolution de la perméabilité beaucoup plus importante que celle qui a été observée. Il est très difficile de reproduire la fissuration attendue autour des ouvrages sur une éprouvette au laboratoire.

III. ESSAI DE PERMEABILITE LATERALE

III.1. Présentation de l'essai

L'éprouvette E4 est utilisée ; elle est cylindrique de dimensions (60 x 120mm) et provenant d'une profondeur de 425,72 m.

Le but de l'essai latéral est de mesurer si l'évolution de la perméabilité latérale avec l'endommagement crée par une contrainte déviatorique axiale. Le dispositif de mesure est pratiquement le même que celui de la perméabilité axiale.

Une difficulté technique est l'étanchéité du système. On a du changer la procédure de fabrication de la jaquette et du moule pour autoriser le passage des tubes d'injection du fluide.

La deuxième difficulté est la diffusion du fluide d'injection, pour ceci nous avons conçu deux diffuseurs en cuivre recuit. Ce sont des plaques de forme rectangulaire assez souples pour épouser la face latérale de l'éprouvette. Le diffuseur a une largeur égale au quart de la circonférence de l'éprouvette et une hauteur d'environ 10 cm, un centimètre de moins de chaque côté de la hauteur de l'éprouvette pour assurer l'étanchéité. La face intérieure du diffuseur présente des rayures dans les deux sens pour assurer une répartition homogène de la pression du fluide sur la surface de l'éprouvette.

Le trajet de charge est le même que celui de l'éprouvette E5. Les propriétés mécaniques non drainées n'ont pas été évaluées, ainsi les propriétés mécaniques n'ont pas pu être déterminées.

III.2. Module de compressibilité

Le module de compressibilité est déterminé de la même manière que pour les autres éprouvettes, en décharge.

Avant l'endommagement, le module de compressibilité non drainé vaut 5000 MPa. A la suite du premier cycle d'endommagement et avant la rupture, il vaut 4250 MPa. Après la rupture, le module de compressibilité tend vers une valeur stable voisine de 1000 MPa. Il est mesuré sur la partie de la courbe précédente l'initiation de la fissuration (tableau V-8).

III.3. Evolution de la perméabilité

Les essais pulse ont été réalisés par l'application d'une pression de fluide d'un seul côté de l'éprouvette, et de l'autre côté les augmentations éventuelles de la pression du fluide sont enregistrées. On n'a pas enregistré des surpressions dans le réservoir servant à recueillir de l'eau. Ceci tient essentiellement au fait que la compressibilité du réservoir est fortement non linéaire, et qu'aux faibles valeurs de la pression il faut des grandes quantités d'eau pour observer une augmentation mesurable de la pression.

Le tableau V-8 présente les résultats de mesures de la perméabilité et du module de compressibilité effectués sur l'éprouvette E4. L'interprétation des essais pulse est très difficile car aucun des abaques effectués n'ajuste correctement les courbes expérimentales sur toute la durée des essais pulse. Une analyse de la décroissance de la pression d'injection sur les 10^4 premières secondes (environ 3 heures) conduit à une valeur de la perméabilité de 10^{-20} m². Par contre, la décroissance de la pression dans le réservoir d'injection pour des temps supérieurs à 10^4 secondes laisse à penser que la valeur de la perméabilité est plus faible ; 10^{-21} m².

Ces valeurs de perméabilité ne sont pas compatibles avec une forte densité de fissures. L'absence d'évolution de la perméabilité malgré l'endommagement créé, s'explique, à notre

sens, par la rupture fragile de l'éprouvette sur un plan qui ne traverse pas la surface d'injection. (Voir en annexe n°5 les photos présent après la fin de l'essai).

Lors du démontage de l'appareillage, on a observé une bande de cisaillement inclinée à 50 à 55° par rapport à la face inférieure de l'éprouvette. A la fissure centrale responsable du glissement plan sur plan est associé un système de fissures secondaire d'orientation parallèle et orthogonale à la direction de la bande de cisaillement.

L'ensemble des fissures forme un réseau connecté et il est évident que la perméabilité globale de l'éprouvette a fortement évolué. Toutefois aucune des fissures ne débouche sur la surface des injecteurs.

Tableau V-8 : Paramètres hydromécaniques mesurés lors d'un essai sur l'éprouvette E4.

III.4. Endommagement et rupture

D'après le chemin de charge présenté en annexe n°6, trois cycles d'endommagement ont eu lieu pour une pression de confinement de 70 MPa, pression responsable d'un comportement ductile. La contrainte déviatorique maximale est de 35 MPa.

Lors de la deuxième phase d'endommagement, une rupture de la pente de la courbe de contrainte-déformation est observée ; la courbe contrainte déviatorique-déformation devient linéaire : ce constat révèle un glissement de deux blocs attestant que l'éprouvette est brisée. Pour vérifier, un deuxième cycle de chargement déviatorique a été effectué. On constate alors à partir de 25 MPa, une nouvelle rupture de pente tandis que le comportement redevient linéaire. Les parties linéaires des deux courbes sont superposables et se retrouvent également pour le troisième cycle d'endommagement.

Sous une pression de confinement de 75 MPa, le comportement de l'éprouvette est dominé par celui de la matrice rocheuse jusqu'à une valeur d'environ 23 MPa de contrainte axiale, au-delà, il devient linéaire et dominé par le comportement de la fracture.

La rupture de l'éprouvette est également visible sur les courbes relatives à la compression isotrope. Après le deuxième cycle d'endommagement, lors de la décharge de la pression de confinement, on observe nettement une première phase durant laquelle la contrainte de confinement diminue avec une très faible variation de volume de l'éprouvette, puis une décharge est observée pour laquelle l'éprouvette augmente de volume au fur et à mesure de la diminution de la contrainte de confinement.

III.5. Remarques

Le nouveau mode opératoire permet de déterminer une défaillance éventuelle de l'étanchéité du système ; en cas de fuite, les pressions dans les deux réservoirs vont s'équilibrer, avant de diminuer. Tout se passe comme si l'essai pulse était réalisé par injection sur toute la surface latérale.

Grâce au système de plaques métalliques servant à l'injection de l'eau, la compressibilité du réservoir n'évolue pas au cours des cycles de chargement. Par conséquent, les courbes de décroissance de la pression en fonction du temps sont très similaires d'un cycle d'endommagement à l'autre. Bien que la perméabilité mesurée n'ait pas évoluée au cours de l'endommagement, les observations visuelles après le démontage de l'essai attestent le contraire, au moins dans la partie centrale de l'éprouvette.

III.6. Conclusions

L'interprétation des courbes des mesures de perméabilité est effectuée sur deux parties. Des abaques permettant d'interpréter les essais pulse pendant les 10^4 premières secondes, au-delà, la vitesse de décroissance de la pression diminue et conduit à une interprétation d'une perméabilité plus faible que celle initialement effectuée.

Lors du chargement déviatorique, l'éprouvette se brise par une rupture fragile malgré que le chargement soit effectué sous une pression de confinement de 70 MPa. Généralement à cette pression, le comportement est ductile.

Malgré la rupture fragile et l'existence de nombreuses fissures, on n'a pas enregistré d'évolution de perméabilité : aucune des fissures ne débouchait sur la surface des injecteurs.

III.7. Conclusions Générales

- ◆ Sur quatre éprouvettes de l'argilite de l'Est, quatre essais de perméabilité-endommagement ont été réalisés. Trois de ces éprouvettes étaient destinées pour l'évolution de la perméabilité verticale et une pour l'évolution de la perméabilité horizontale. Pour tous les essais, l'endommagement est créé par l'application d'un chargement déviatorique et sous une valeur élevée de pression de confinement de façon à rendre le comportement du matériau ductile.

- ◆ Grâce à l'amélioration des procédures de réalisation des mesures mécaniques et hydrauliques, il est maintenant possible de mesurer des perméabilités très faibles ; sur l'éprouvette E5 une évolution de la perméabilité de $2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ à 10^{-20} m^2 a été mesurée. La perméabilité finale de cette éprouvette reste faible en comparaison avec d'autres géomatériaux, toutefois, l'endommagement a été très modéré.

- ◆ Les évolutions de la perméabilité mesurées sont parfois dues principalement à la création des zones à forte perméabilité qui sont les fractures. Or sur l'éprouvette E4, malgré une importante fracturation, aucune fracture n'a été en contact avec le réservoir d'injection, la conséquence a été que l'augmentation de la perméabilité avec la création des fractures n'a pas pu être décelée.

I. INTRODUCTION

Le comportement de la craie intéresse plusieurs domaines de recherche, c'est une roche complexe, et dépend de nombreux paramètres notamment de sa grande porosité et de la présence d'autres minéraux, impuretés [Hatzor Y.H. et Palchik V., 1997]. Les pétroliers sont eux aussi attirés par l'étude de cette roche et considèrent la craie comme une roche réservoir pour sa grande porosité et sa teneur en eau.

De façon générale, les caractéristiques des craies diffèrent selon leurs origines et leurs types en liaison avec leurs microstructures et leur minéralogie [Shao J.F., 1987 ; Gaviglio P. et al., 1993 ; Hazebrouck R., 1976 ; Doremus C., 1978 ; Jones M.E. et al., 1984].

Dans la présente étude, on s'intéresse à différentes caractéristiques de la craie et en particulier à sa perméabilité.

Ce chapitre présente une étude expérimentale sur l'effet de différentes sollicitations mécaniques sur la perméabilité de la craie à l'eau.

La première partie de ce chapitre présente les propriétés physiques (porosité, densité, teneur en eau...) et mécanique (module de compressibilité, module d'Young, coefficient de Poisson...) de la craie. Dans la deuxième partie, on définit les propriétés hydrauliques de la roche et on présente des mesures de la perméabilité initiale de la craie. Dans la troisième partie, les propriétés hydro-mécaniques, l'évolution de la perméabilité en fonction de la pression de confinement, ainsi que la mesure de la perméabilité au cours de l'endommagement seront présentées.

Le but de cette étude est de fournir une meilleure compréhension des mécanismes de diffusion de fluide à travers la roche sous contraintes mécaniques.

Les expériences sont effectuées sur la craie de la mer du Nord en utilisant un appareil triaxial.

II. TEXTURE ET COMPORTEMENT DES CRAIES

Les études réalisées par Le Roux A. [1973] confirment l'importance du rôle joué par la texture dans le comportement de la craie. Minéralogiquement, les craies apparaissent comme constituées exclusivement de carbonate de calcium ($\text{CaCO}_3 > 95\%$), la fraction argileuse se trouve réduite à quelques pour-cent et a une action peu sensible sur le comportement.

Plusieurs échantillons de différentes origines ont aussi été étudiés, par Le Roux, au microscope électronique à balayage. Tous les échantillons se sont montrés constitués de grains de CaCO_3 plus ou moins anguleux. Les cristaux constituant la roche ont une taille variable comprise entre 0,5 et 2 microns. Il y a également des cristaux de CaCO_3 très bien formés, souvent groupés et de taille comprise entre 2 et 20 microns (figure VI-1).

Il est important de noter que dans tous les échantillons observés les grains de CaCO_3 apparaissent liés entre eux par des ponts de CaCO_3 d'environ 0,1 à 0,2 microns (figure VI-2).

Ce type de liaison entre les grains donne à la craie une certaine cohésion, ainsi en apportant une certaine sollicitation mécanique, ces liaisons se brisent facilement surtout si la craie est mouillée.

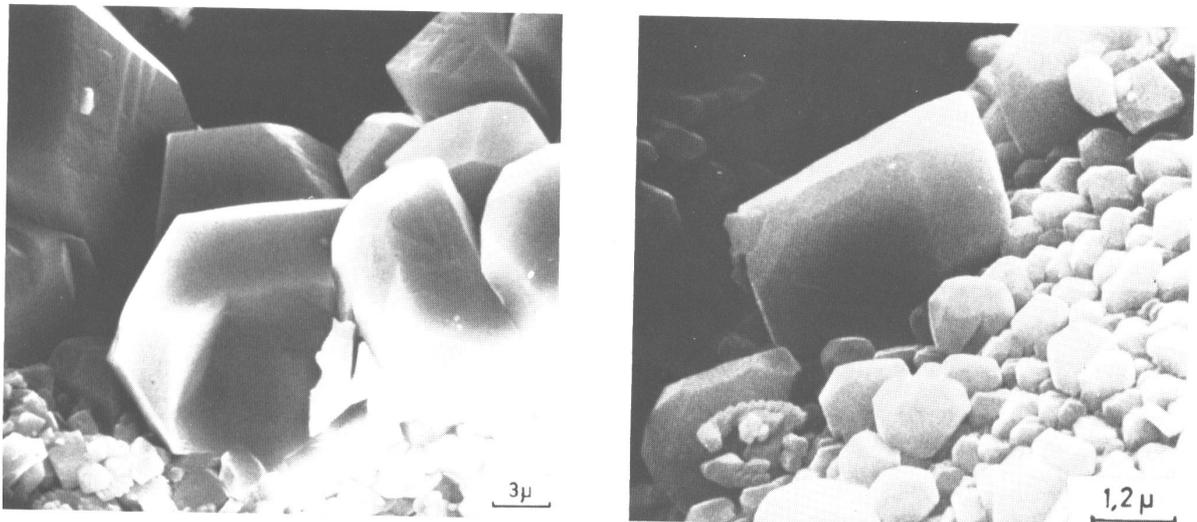


Figure VI-1 : Des photos prises au microscope électronique à balayage montrant les différentes tailles de CaCO_3 constituant la craie. (D'après A. LE ROUX, 1973).

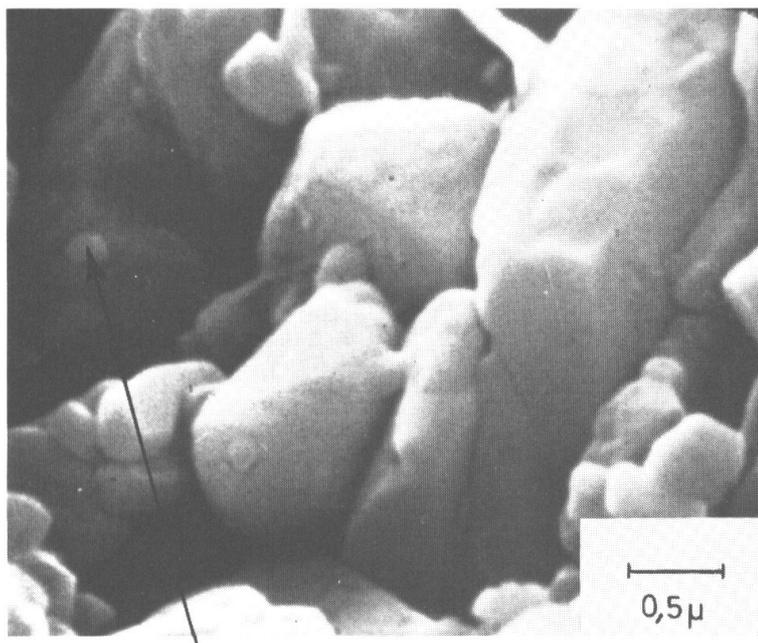


Figure VI-2 : Photos de la structure interne de la craie.

Les deux photos montrent l'existence des liaisons par ponts associées à des cristaux arrondis à l'aspect de dragées. Le carbonate de calcium qui a donné naissance à ces ponts provient des grains voisins par dissolution ; la recristallisation s'étant faite aux points de contact entre grains. Ces liaisons sont assez fragiles pour se briser sous des sollicitations mécaniques.

III. INFLUENCE DU DEGRE DE SATURATION EN EAU SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIKES

Des essais effectués sur la craie d'Épernay par DESSENNE J.L. [1971] avaient permis d'observer une chute progressive de la résistance à la compression simple en fonction de l'augmentation du degré de saturation. Cette chute est particulièrement forte au voisinage du point de saturation.

Des résultats similaires ont été obtenus par MASSON M. [1971] sur la craie de Val Guyon. La comparaison des résistances à la compression simple (R_c) mesurées, d'une part sur échantillon saturé et d'autre part sur échantillon sec, (sans mesure intermédiaire) a été réalisée pour différents types de craie. Elle permet d'observer des différences importantes de sensibilité à l'eau entre les craies en calculant le rapport des résistances de l'échantillon sec et

saturé. Tous les résultats confirment la chute de la résistance de l'échantillon saturé par rapport au sec.

Grâce à ce rapport Masson classifie la craie de la manière suivante :

$$r = \frac{R_c^{sec}}{R_c^{sat}}$$

$r < 3$: très bonnes craies
$3 < r < 3,5$: bonnes craies
$3,5 < r < 4$: craies médiocres à mauvaises
$r > 4$: craies très mauvaises.

IV. RECEPTION ET CAROTTAGE DES EPROUVETTES

Des blocs de craie, provenant de la mer du Nord, nous ont été livrés et aussitôt gardés dans une chambre froide à 8 °C. A partir de ces échantillons nous avons carotté plusieurs éprouvettes de forme cylindrique ayant une hauteur de 120 mm et un diamètre de 60 mm. Le carottage de toutes les éprouvettes a été réalisé à sec. Les petits morceaux qui restent après le carottage sont utilisés pour la mesure des propriétés physiques, et pour la préparation du fluide qui servira à la saturation de l'éprouvette et comme fluide d'injection.

V. PREPARATION DU FLUIDE D'INJECTION

V.1. Mécanisme de l'interaction craie-fluide

Les différents mécanismes possibles pouvant expliquer la réponse de la craie vis à vis du fluide injecté sont étudiés par plusieurs chercheurs. En général, ils peuvent être classés en mécanismes physiques et chimiques.

V.1.1. Mécanisme physique, effet de capillarité

Les forces de capillarité surviennent de la tension entre l'interface solide-fluide.

La magnitude de la force de capillarité est directement proportionnelle à l'angle de contact du fluide et du solide et inversement proportionnelle à la taille des pores. Au moment de la saturation, l'eau pénètre dans les petits pores en formant des ménisques de capillarité qui attachent les grains ensemble avec une pression de contact. Cette pression a pour effet de

provoquer des liens de cohésion entre les grains. Donc en introduisant un fluide qui réagit moins avec la surface du contact, on aura moins de destruction des liens de capillarité.

Les forces de capillarité et les effets de saturation ont été proposés comme le principal mécanisme de l'interaction eau-craie par plusieurs chercheurs (Anderson 1995 ; Papamichos et al 1997 ; Schroeder and Shao 1996 et Plischke 1996).

V.1.2. Effets chimiques

L'effet chimique comme un mécanisme à prendre en compte pour l'interaction entre la craie et l'eau a été postulé depuis 1983 par Newman [1983].

Une simple réaction chimique qui peut affecter la rigidité et attaquer la structure intérieure de la craie est la décomposition et la dissolution des minéraux quand ils viennent en contact avec le fluide. Cette dissolution s'accompagne d'une migration des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} , cet effet implique la destruction des petits ponts qui forment le lien entre les grains et induit une perte de la forme de la matrice interne de la craie, et par suite, affecte directement la porosité connectée de la roche. Ainsi le choix du fluide est très important pour maintenir la structure de la roche.

Pour éviter (ou du moins minimiser) toute dissolution des constituants du matériau, au passage du fluide d'injection à travers l'éprouvette, qui entraînera la détérioration de la forme structurale de la roche, nous avons préparé une eau en équilibre chimique avec les constituants de la craie (en grande partie du CaCO_3).

La procédure consiste à mélanger de la craie en poudre avec de l'eau distillée en quantité suffisante pour atteindre la saturation. Après quelques jours, on filtre la solution et on obtient une eau que l'on utilise aussi pour la saturation de l'éprouvette.

VI. PROPRIETES PHYSIQUES DE LA CRAIE

VI.1. Densité

Pour déterminer la densité de grains (densité du solide) de la craie on utilise un pycnomètre. On procède d'abord au séchage de l'échantillon en mettant un morceau de craie, récupéré sur les chutes du carottage, dans l'étuve à 120 °C pendant 24 heures. Ensuite, la craie doit être broyée et une pesée différentielle s'impose : pesée de la cellule du pycnomètre vide puis de la cellule contenant l'échantillon. On dispose des cellules de différents volumes. On choisit une cellule dont le volume ajuste le mieux celui de l'échantillon de façon à réduire le volume du gaz. Dans notre cas, la cellule est remplie d'environ trois quarts de son volume.

La cellule est mise en place dans le réceptacle et une série d'opérations est réalisée afin d'obtenir les résultats qui permettront de calculer la densité. Les mesures et les calculs effectués sont présentés dans le tableau de l'annexe n°7. Les opérations sont réalisées sous contrôle de la température qui est fixée à 26°C. La densité des grains trouvée est égale à 2,63 g/cm³.

VI.2. Porosité

La craie est une roche très poreuse. La porosité de la craie est mesurée en divisant le volume du vide de l'échantillon par son volume total. La porosité est mesurée sur une éprouvette cylindrique de 60 mm de diamètre et de 120 mm de hauteur, elle vaut en moyenne **38%**. (Pour plus de détails sur le calcul, voir annexe n° 8).

VI.3. Teneur en eau de saturation

Une fois extraite de son gisement, la craie perd progressivement la plus grande partie de son eau interstitielle. Pour cette raison, avant de commencer les mesures de la teneur en eau, on procède à la saturation de l'éprouvette qui dure environ 3 jours. On détermine la teneur en eau à partir du rapport du poids de l'eau par le poids du solide. La valeur calculée de la teneur en eau est environ **20%**. (Le détail de calcul se trouve dans l'annexe n° 8).

VII. PROPRIETES MECANQUES DE LA CRAIE

VII.1. Compression simple

Les propriétés mécaniques sont déduites des essais de compression uniaxiale simple. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes à l'état naturel (diamètre = 60 mm et hauteur = 120 mm). Malgré les précautions prises (emballage dans du papier aluminium et la mise dans une chambre froide à 8°C), les éprouvettes perdent une grande quantité de leur eau interstitielle.

D'abord, le premier essai est réalisé sur une éprouvette que l'on place entre deux talons en acier. On applique, sur celui du haut, une force axiale ; le piston descend jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette. Un extensomètre à bras est placé sur le talon supérieur pour détecter le déplacement axial du piston. A l'issue de cet essai, on note une résistance maximale $\sigma_c = 8$ MPa et un module d'Young $E = 4000$ MPa. La figure VI-3 présente la courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

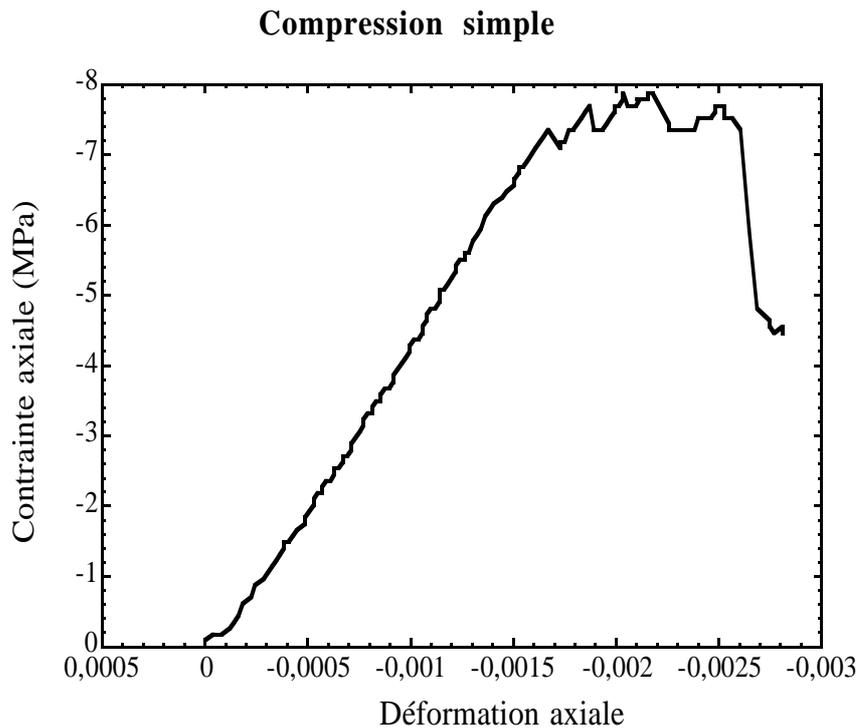


Figure VI-3 : Courbe de compression simple permettant de déterminer le module de Young et la résistance de la craie.

VII.2. Compression déviatorique

Un deuxième essai est réalisé sur une éprouvette sur laquelle on place deux extensomètres à haute précision (axial et latéral). Placée aussi entre deux talons en acier ayant le même diamètre, l'éprouvette reçoit une force axiale jusqu'à la rupture. La courbe de la figure VI-4, représentant la contrainte axiale en fonction des déformations axiale, latérale et volumique, permet de déterminer le module d'Young (E), la résistance maximale à la compression axiale

(σ_c) ainsi que le coefficient de Poisson. Les résultats sont donnés dans le tableau VI-1.

Figure VI-4 : Courbe du comportement de la craie lors d'un essai triaxial sous une pression de confinement de 2 MPa.

Module de Young (MPa)	Résistance à la compression axiale (MPa)	Coefficient de Poisson
5500	4	0,14

Tableau VI-1 : Mesure des différentes propriétés mécaniques de la craie.

VIII. PROPRIETES HYDRAULIQUES DE LA CRAIE

Dans les chapitres précédents, on a pu mesurer, par une méthode transitoire, la perméabilité de l'argilite de l'Est et de la siltite du Gard, deux roches peu poreuses et ayant une faible teneur en eau. Et aussi par la méthode permanente, la perméabilité du grès, une roche beaucoup plus perméable. Ce qui nous a poussé, dans ce qui suit, à soulever quelques questions :

Comment mesure-t-on la perméabilité de la craie ?

Quel est l'effet du fluide injecté sur la structure de la craie ?

Dans le cas d'une roche très poreuse ayant une grande teneur en eau, comme la craie, quel serait l'effet des sollicitations mécaniques sur l'évolution de la perméabilité ?

Les essais que l'on va réaliser tout au long de cette partie, visent à apporter des éléments de réponse à ces questions.

VIII.1. Essai de perméabilité à l'eau

VIII.1.1. Mesure de la perméabilité initiale

Etant donné la grande perméabilité de la craie comparée aux argilites étudiées dans les chapitres précédents, il est possible et plus simple d'utiliser la méthode des débits. C'est une méthode en régime permanent, qui consiste à injecter de l'eau d'un côté de l'éprouvette et de la récupérer de l'autre côté. On mesure la perméabilité axiale par une injection parallèle à l'axe principal de l'éprouvette.

VIII.1.2. Dispositif et procédure expérimentale mis en œuvre

Les essais ont été réalisés sous faible confinement à des pressions d'environ 0,5 MPa. La pression de confinement a été imposée par le contrôleur de pression-volume GDS.

La saturation de l'éprouvette a duré deux jours, en utilisant l'eau spécialement préparée ; c'est une eau saturée et en équilibre chimique avec les constituants de la craie. Les différentes caractéristiques de l'éprouvette avant et après la saturation sont données dans le tableau VI-2 suivant :

	Avant saturation	Après saturation
Poids (g)	557,45	671,1
Hauteur (mm)	119,4	119,1
Diamètre (mm)		
haut	59,9	59,7
milieu	59,8	59,6
bas	59,6	59,6
Teneur en eau	21 %	
Porosité	34 %	

Tableau VI-2 : Différentes caractéristiques de l'éprouvette avant et après la saturation

L'éprouvette est entourée d'une jaquette en viton et placée dans la cellule triaxiale, les déplacements axial et latéral ont été contrôlés à l'aide de deux extensomètres.

Le but de cet essai est de déterminer la perméabilité initiale de la craie, à l'état initial.

Dans un premier temps, un chargement isotrope a été appliqué à la pression de confinement désirée (0,5 MPa). Cette première étape visait à assurer l'étanchéité autour de l'éprouvette (pour s'assurer que l'eau injectée passe à travers l'éprouvette et non sur les côtés, et que l'huile de confinement ne pénètre pas à l'intérieur de l'éprouvette). Puis, une pression d'injection est appliquée jusqu'à 0,3 MPa. L'essai a été réalisé à température ambiante.

Des précautions ont également été prises pour assurer la bonne saturation initiale du circuit hydraulique. Avant chaque essai le circuit hydraulique est vidangé puis rempli par la même eau utilisée pour l'injection.

VIII.1.3. Résultats

L'injection est effectuée à travers le talon inférieur pour améliorer davantage la saturation, et on attend que l'écoulement ait atteint le régime permanent. Ensuite on récupère l'eau qui sort de l'autre côté pendant une période donnée. Enfin, on mesure le débit. Le débit mesuré est de 1,8 g/min.

Le tableau VI-3 suivant présente une comparaison entre l'état initial (après saturation) et l'état final (après l'essai de perméabilité) de l'éprouvette :

	État initial	État final
Poids (gr)	671,1	676,3
Hauteur (mm)	119,1	119,3
Diamètre (mm)		
haut	59,7	59,7
milieu	59,6	59,7
bas	59,6	59,6

Tableau VI-3 : Différentes caractéristiques à l'état initial saturé et l'état final après l'essai de perméabilité.

VIII.1.4. Calcul de la perméabilité

On suppose que l'injection de l'eau dans l'échantillon en fonction du temps représente un écoulement permanent, et on admet que la compressibilité de l'eau est négligeable, la perméabilité est calculée par la relation suivante :

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\Delta P \cdot S} \quad (1)$$

Q : débit traversant l'éprouvette (m^3/s)

μ : viscosité dynamique de l'eau. $\mu = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

L : hauteur de l'éprouvette (m)

S : section de l'éprouvette (m^2)

ΔP : différence de pression entre les deux extrémités de l'éprouvette (Pa).

En appliquant la formule précédente avec le débit que l'on a déterminé et une différence de pression de 0,3 MPa ($3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) on peut calculer la perméabilité de la craie à l'état initial, elle vaut environ 10^{-15} m^2 .

VIII.1.4.a. Observations et remarques :

* Au cours de la saturation, l'éprouvette a absorbé une grande quantité d'eau sans pour autant changer de volume total.

* On remarque que les essais de saturation sont réalisés sans gonflement ni retrait.

VIII.1.4.b. Importance de la nature du fluide :

L'importance de la nature réactive du fluide sur le comportement différé a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales sur différents types des roches.

Par exemple, au laboratoire, l'effet de la saumure sur la rhéologie de la halite monocristalline a été observé par Kleinhanns (Horseman, 1984).

Pour répondre à la question qui s'est posée à propos de l'importance du fluide que l'on utilise pour la saturation de l'éprouvette et pour l'injection, une autre expérience a été réalisée.

L'expérience consiste à refaire le même essai en respectant les mêmes procédures que l'essai précédent, le seul changement sera au niveau du fluide utilisé : on utilisera cette fois de

l'eau distillée, avec laquelle, d'une part on sature l'éprouvette, et d'autre part, on l'utilise comme fluide d'injection.

On applique 0,5 MPa de pression de confinement et 0,3 MPa de pression d'injection. Les résultats montrent que les débits enregistrés sont plus faibles que ceux mesurés lors du premier essai.

Le problème se résume dans le fait que, lors de l'injection, l'eau distillée est susceptible de réagir avec les composants de la craie, ce qui provoque une dégradation des particules au passage de l'eau dans les pores et par suite les vitesses seront de plus en plus ralenties, donc un débit et une perméabilité plus faibles.

On constate aussi une ressemblance sur le comportement entre les résultats sur la halite trouvés par Horseman et ceux de la craie sous un essai triaxial, en ce qui concerne la tendance vers la plasticité parfaite du comportement de l'éprouvette. Un tel comportement est visible sur l'exemple illustré par la courbe de contrainte-déformation présentée par la figure VI-5.

La courbe représente des cycles de charge décharge de la contrainte axiale en fonction de la déformation volumique au cours d'un essai triaxial sur une éprouvette de craie saturée à l'eau distillée. La pression de confinement est de 2 MPa.

Au départ, l'échantillon est non saturé, en recevant de l'eau distillée la craie réagit avec l'eau : dissolution du CaCO_3 dans l'eau, dégradation des parois des pores au passage de l'eau et écrasement de la porosité connecté, ce qui rendra la roche très molle et très plastique.

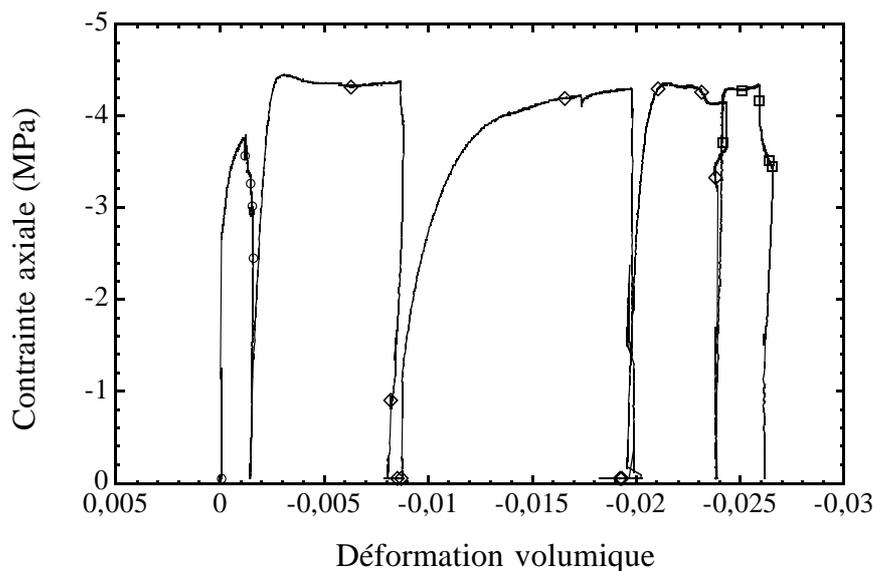


Figure VI-5 : Courbe de contrainte axiale en fonction de la déformation volumique montrant un comportement plastique parfait sous 2 MPa de pression de confinement.

VIII.1.4.c. Conclusion

Cette craie présente une porosité de 34 % et une teneur en eau de 21 %. Nous avons réussi à déterminer sa perméabilité (environ 10^{-15} m²) par la méthode de débit. C'est donc cette méthode qui sera utilisée pour la suite des expériences.

IX. PROPRIETES HYDRO-MECANIQUES DE LA CRAIE

IX.1. Etude de la perméabilité sous compression isotrope

L'effet de la contrainte moyenne sur la perméabilité a été étudié sur d'autres matériaux que la craie. La perméabilité du sel, par exemple, mesurée en laboratoire diminue sensiblement lorsque la pression de confinement augmente (Lai 1971 ; Sutherland et cave 1980 ; Le Guen 1991). Cette diminution d'abord instantanée, se poursuit dans le temps (Peach 1991 ; Le Guen 1991). Par exemple selon Peach (1991) pour un échantillon de sel de la mine de Asse (Allemagne) soumis à une contrainte hydrostatique de 20 MPa, la perméabilité mesurée diminue d'un facteur 5. Dans la suite, nous étudions l'effet de la contrainte moyenne sur la perméabilité de la craie.

IX.1.1. Déroulement de l'expérience

L'échantillon utilisé pour notre étude est de même origine que celui utilisé précédemment, c'est à dire, provenant de la mer du Nord. Les procédures de préparation (saturation), le montage et la mise en place de l'échantillon sont effectués de la même façon que les essais précédents.

Au cours de cette expérience, on a déterminé la perméabilité de l'échantillon pour plusieurs paliers de pressions de confinement en charge (jusqu'à 18 MPa) et en décharge. A chaque palier on augmente la pression de confinement de 2 MPa comme l'indique le chemin de charge sur la figure VI-6. La perméabilité est mesurée pour deux pressions de d'injection : 0,3 MPa et 1 MPa, dans le but de déterminer l'influence de la pression d'injection sur la valeur de la perméabilité à pression de confinement constante.

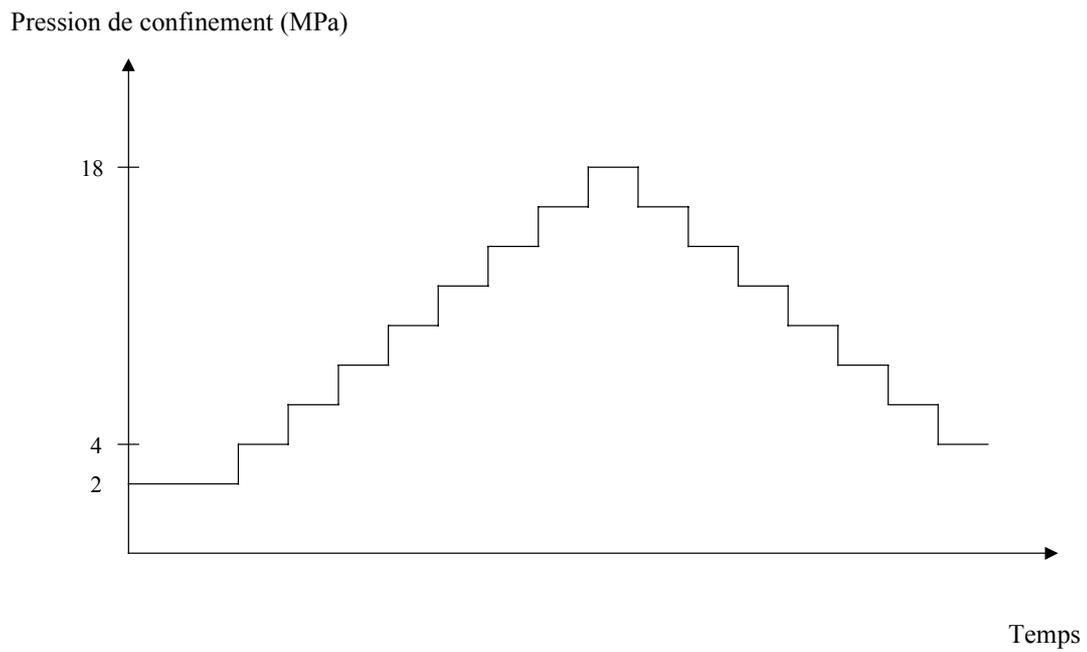


Figure VI-6 : Chemin de charge suivi lors de la mesure de la perméabilité en fonction de la pression de confinement.

IX.1.2. . Résultats

Les résultats de ces expériences sont réunis dans le tableau VI-4 et ils sont présentés sur la figure VI-7.

PRESSION DE CONFINEMENT (MPa)	PERMEABILITE (10^{-16} m^2)	
	Pression d'injection = 0,3 MPa	Pression d'injection = 1 MPa
2	7,36	237

4	14,6	17,8
6	12,7	13,7
8	8,6	10,11
10	8,05	6,5
12	2,97	5,6
14	3,45	3,5
16	2,26	2,87
18	2,67	2,19
16	2,08	1,97
14	1,58	1,86
12	1,61	1,71
10	1,44	1,7
8	1,61	1,59
6	1,5	1,67
4	2	2,5
2	2,86	3,48

Tableau VI-4 : Mesure de la perméabilité sous charge et décharge de la pression de confinement à deux pressions d'injections différentes.

IX.1.3. Observations et remarques

Pour la détermination de la perméabilité, l'eau est injectée dans le sens axial à deux pressions d'injections différentes. La figure VI-7 présente l'évolution de la perméabilité en fonction de la pression de confinement.

En charge, la diminution de la perméabilité est instantanée au début de l'essai, surtout pour la pression d'injection de 1 MPa. Puis elle continue à diminuer progressivement au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement.

On remarque qu'il n'y a pas de différence entre la perméabilité mesurée avec 0,3 MPa de pression d'injection et celle mesurée avec 1 MPa de pression d'injection, surtout pendant la phase de décharge.

Au fur et à mesure que la pression de confinement augmente, les pores s'écrasent, la porosité interconnectée se réduit et la perméabilité diminue. En décharge, il n'y a pas d'évolution de perméabilité remarquable.

A 20 MPa de pression de confinement, le débit diminue énormément, et à 25 MPa, on ne peut plus faire passer le fluide à travers l'éprouvette (débit nul). L'échantillon perd environ 30% de son volume, et presque la totalité de sa porosité initiale.

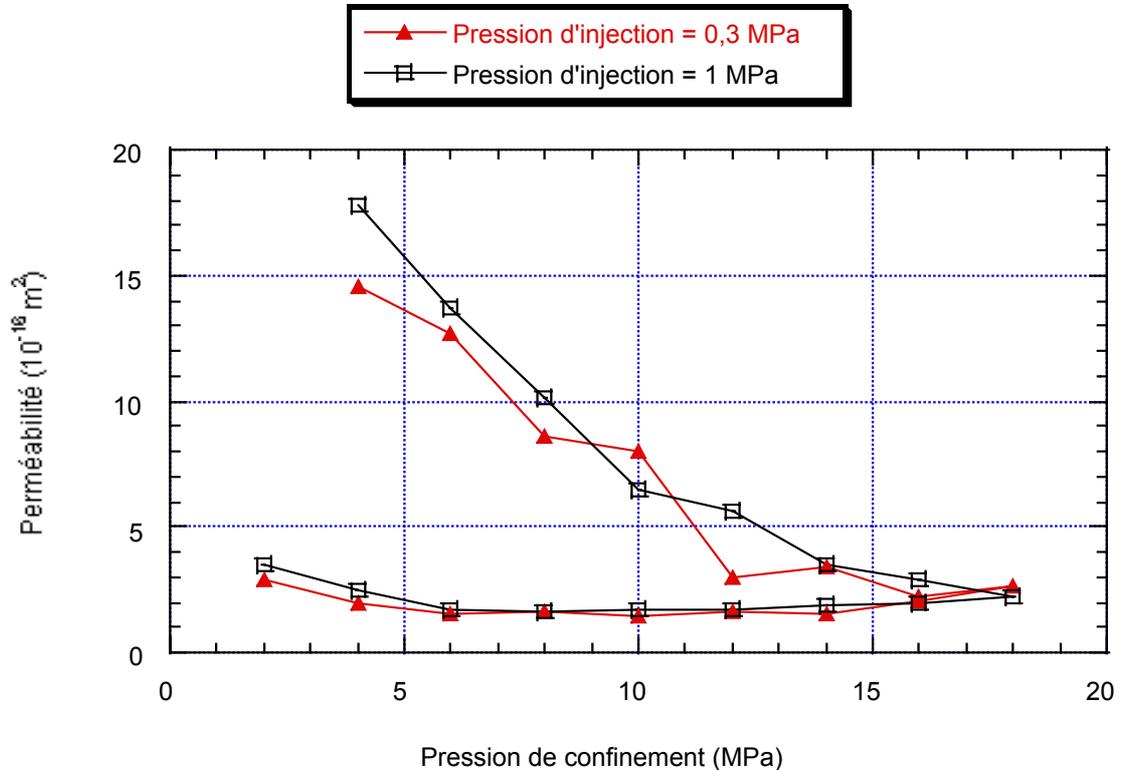


Figure VI-7 : Evolution de la perméabilité en fonction de la pression de confinement, en charge et en décharge, pour deux pressions d'injection différentes.

IX.1.4. Conclusions

Une évolution des propriétés hydrauliques est enregistrée au cours du changement de la compression isotrope. Cette évolution se traduit par une décroissance non linéaire de la perméabilité en fonction de la pression de confinement. Ce comportement est totalement irréversible, en effet, au cours de la décharge de la pression de confinement, on n'enregistre pas d'évolution remarquable de la perméabilité.

A partir des résultats des expériences, on peut conclure qu'à une pression de confinement constante, la modification de la pression d'injection n'a pas d'influence sur la valeur de la perméabilité, ce qui traduit bien la validité de la loi de Darcy, c'est à dire la linéarité du flux en fonction du gradient de pression.

La diminution de la perméabilité au cours de l'augmentation de la pression de confinement est attribuée à deux effets : d'une part la fermeture progressive des pores qui restreint le volume accessible au fluide, d'autre part et le plus important, l'écrasement de la porosité interconnectée qui affecte la connectivité et réduit les trajets d'écoulement du fluide dans la roche.

IX.2. Evolution de la perméabilité avec l'endommagement

Au cours d'un essai triaxial, et d'une manière générale, lorsque l'échantillon est soumis à une contrainte déviatorique supérieure au seuil de dilatance irréversible correspondant à l'initiation des microfissures, la perméabilité mesurée augmente progressivement de manière significative (Le Guen 1991 ; Peach 1991 ; Stormont et Deamen 1992).

La craie est une roche très poreuse et présente une très faible résistance. Les études menées par Masson [1971], montrent qu'une craie saturée est environ trois fois moins résistante qu'une craie sèche.

Dans cette partie, on va déterminer l'évolution de la perméabilité axiale de l'échantillon au cours de l'endommagement. Des chemins de charge bien précis sont appliqués, permettant d'abord de mesurer le module de compressibilité initiale de la roche, puis le module de compressibilité en fonction de l'endommagement d'une part, et la mesure de la perméabilité en fonction de l'endommagement d'autre part.

IX.2.1. Essai drainé

L'essai consiste à appliquer une charge jusqu'à 2 MPa suivie d'une décharge jusqu'à 0,5 MPa de compression isotrope, cette étape permet de déterminer le module de compressibilité initiale de la roche. Ensuite, des cycles similaires de charge décharge sont appliqués entre lesquels des contraintes déviatoriques sont appliquées pour endommager l'échantillon, ainsi à chaque étape d'endommagement on mesure le module de compressibilité de la roche. Un cycle de chargement est représenté sur la figure VI-8.

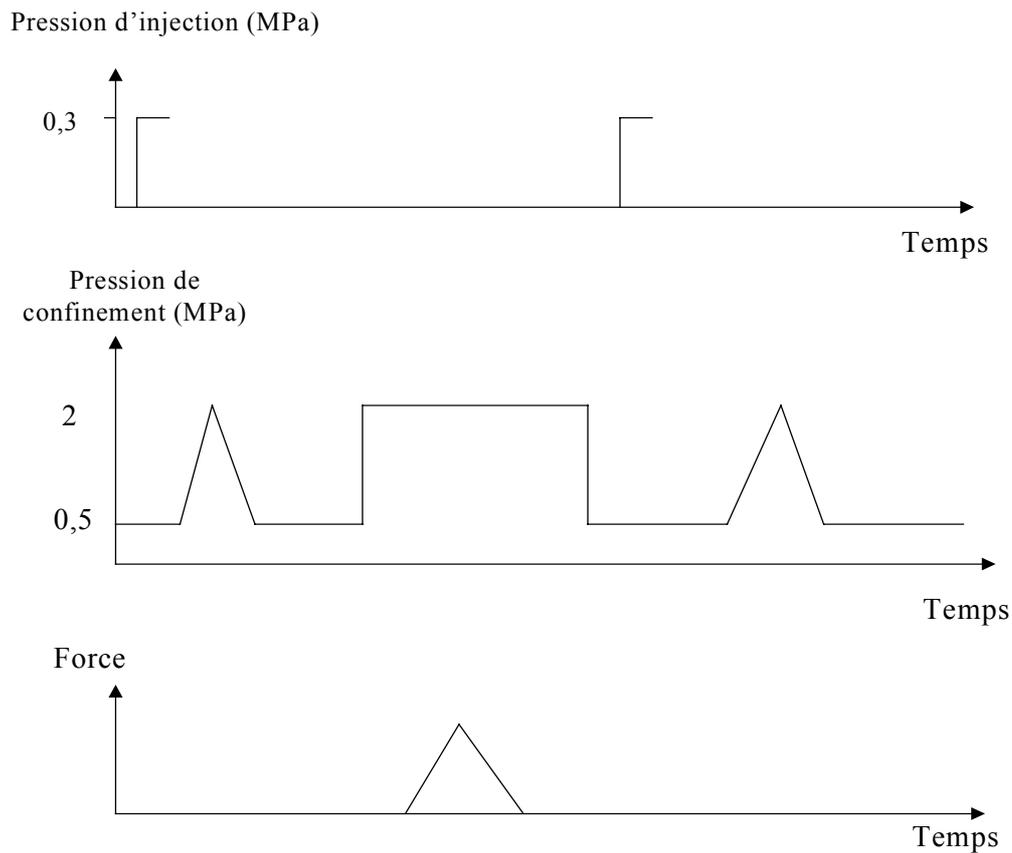


Figure VI-8 : Un cycle de chargement appliqué pour la mesure de la compressibilité de l'éprouvette au cours de l'endommagement.

IX.2.1.a. Résultats

Les résultats sont donnés dans le tableau VI-5 suivant, l'évolution de la perméabilité en fonction du module de compressibilité est présentée sur la figure VI-9.

On présente sur la figure VI-10 l'évolution de la perméabilité en fonction de l'endommagement.

Cycle	initial	1	2	3	4
Perméabilité (10^{-16} m^2)	1,5	0,9	5	11,5	16
Module de compressibilité (MPa)	2800	3200	2000	1500	1000

Tableau VI-5 : Paramètres mesurés et calculés à différents stades de l'endommagement.

IX.2.1.b. Remarques

Le module de compressibilité de la roche diminue au cours de l'endommagement.

La première force axiale appliquée sur l'échantillon a provoqué un petit tassement et un petit réarrangement des grains, consolidant ainsi la structure de l'échantillon. Le module de compressibilité du premier cycle est donc plus élevé que le module initial.

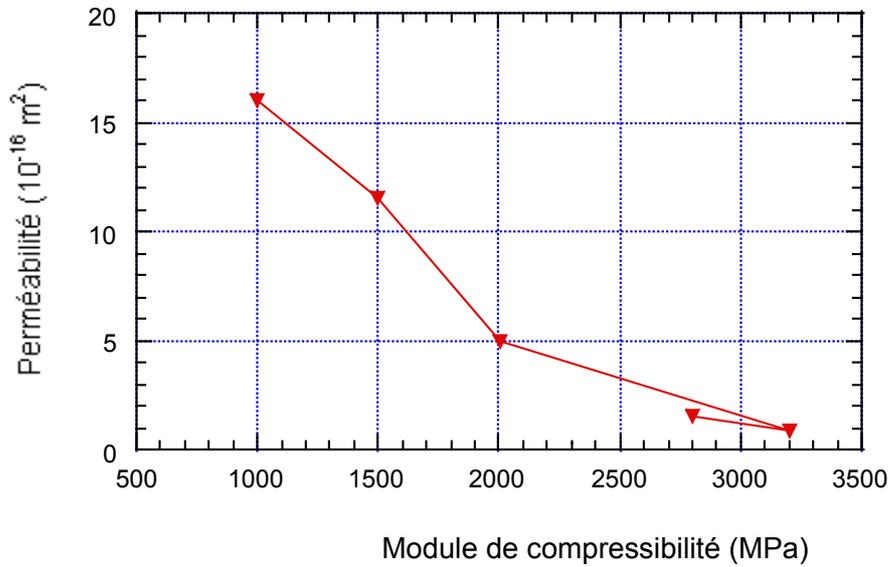


Figure VI-9 : Evolution de la perméabilité en fonction du module de compressibilité au cours de l'endommagement d'une éprouvette de craie.

La variable d'endommagement D est calculée comme définie au chapitre I, par $D = -\frac{\Delta K}{K}$ où K est le module de compressibilité. Les résultats de mesures sont présentés dans le tableau VI-6, l'évolution relative de la perméabilité ($\frac{\Delta k}{k_0}$) en fonction de D est donnée sur la figure VI-10.

On considère le cycle 1 comme étape initiale pour éviter une valeur d'endommagement négatif, à la suite de l'augmentation du module de compressibilité du cycle initial au cycle 1.

Cycle	1	2	3	4
Perméabilité (10 ⁻¹⁶ m ²)	0,9	5	11,5	16
Module de compressibilité (MPa)	3200	2000	1500	1000

compressibilité (MPa)				
$\frac{\Delta k}{k_0}$	0	4,5	11,7	16,7
D	0	0,37	0,53	0,69

Tableau VI-6 : Paramètres mesurés et calculés à différents stades de l'endommagement.

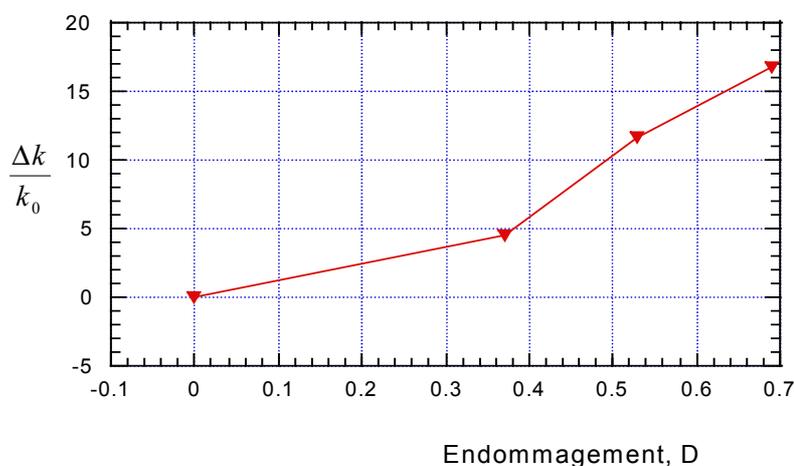


Figure VI-10 : Variation de $\frac{\Delta k}{k_0}$ en fonction de l'endommagement D .

Un ajustement de la courbe par une droite passant par l'origine conduit à la loi empirique suivante :

$$\frac{\Delta k}{k_0} = 22D$$

IX.2.2. Essai non drainé

Les essais précédents, du module de compressibilité et de la perméabilité en fonction de la pression de confinement, ont permis de montrer que lorsqu'on augmente la pression de confinement, il y a écrasement des pores et la porosité diminue d'où une diminution de l'espace interstitiel permettant la circulation de l'eau.

Pour cette raison, on réalise, dans cette partie, des essais non drainés. Pour ouvrir un maximum de fissures tout en écrasant un minimum des pores, on a utilisé la méthode suivante :

D'abord, tous les essais de cette partie sont menés à basse pression de confinement, c'est à dire à une pression qui ne dépasse pas 2 MPa.

Ensuite, et contrairement aux essais précédents, la pression de confinement est appliquée par petits paliers jusqu'à atteindre la pression voulue, et à chaque palier on augmente la pression interstitielle à l'intérieur de l'échantillon en injectant de l'eau et sans dépasser la pression de confinement.

Pendant le chargement de la pression de confinement, le système est maintenu en condition non drainée.

IX.2.2.a. Déroulement de l'essai

L'objectif premier de l'essai est de créer un maximum de fissures en minimisant l'écrasement des pores, en imposant en même temps une pression interstitielle et une pression de confinement isotrope. La température est toujours constante pendant toute la durée de l'essai, et elle est égale à la température ambiante (environ 20°C).

Le but est de préserver la structure de la roche et essayer de conserver la porosité connectée par une force interstitielle interne.

Ensuite, en appliquant une force déviatorique, on crée des fissures qui permettent d'augmenter le volume de l'espace poreux connecté et par suite la perméabilité.

La réussite de l'essai est conditionnée par le soin apportée à chacune de différentes étapes : mise en place de l'échantillon dans la jaquette, installation dans la cellule triaxiale, fixation des extensomètres axial et latéral, ainsi que les diverses précautions prises pour l'étanchéité.

L'essai consiste à appliquer une pression de confinement de 1,5 MPa par palier de 0,5 MPa, et à chaque palier on augmente la pression interstitielle, elle vaut donc 0,3 MPa au premier palier, ensuite 0,6 MPa au deuxième et 1 MPa au troisième. Enfin, une force axiale est appliquée.

La perméabilité initiale de l'échantillon est mesurée au premier palier, à 0,5 MPa de confinement et à 0,3 MPa de pression d'injection. D'autres mesures de perméabilité sont effectuées après chaque cycle. On présente sur la figure VI-13 un cycle de chemin de charge appliquée.

Une autre méthode qui peut aussi être efficace pour créer des fissures et augmenter la perméabilité consiste à effectuer l'essai en conditions drainées et à très basse pression. On augmente alors la contrainte axiale et à un moment bien précis, correspondant au point de

passage contractance-dilatance sur la courbe de déformation volumique en fonction de la contrainte déviatorique, on applique une pression d'injection de fluide.

Cette méthode a abouti à des résultats intéressants que l'on va présenter dans la suite.

IX.2.2.b. Résultats

Quatre cycles de chargement ont été réalisés (figure VI-13). La perméabilité a été mesurée en régime permanent, le calcul est effectué en régime permanent. On peut aussi avoir la valeur de la déformation volumique irréversible après chaque cycle de chargement. La courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation volumique est présentée sur la figure VI-11.

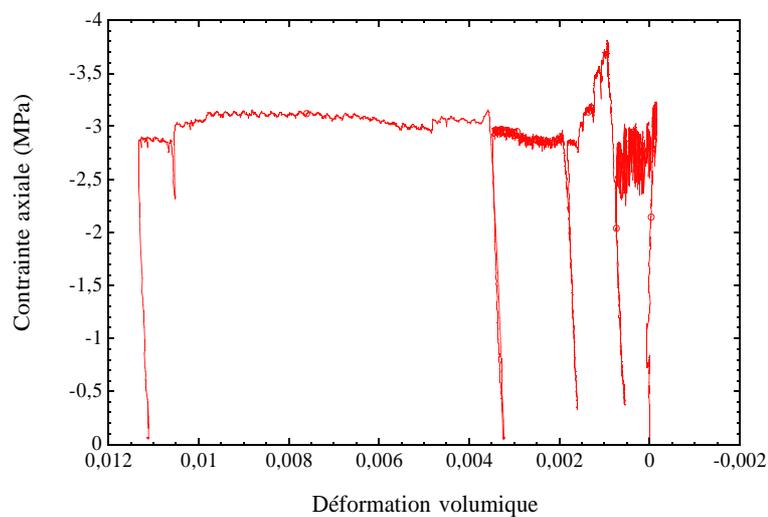


Figure VI-11 : Courbe de contrainte-déformations volumiques sur la craie en condition non drainée.

Tous les résultats sont présentés dans le tableau VI-7. La figure VI-12 présente l'évolution de la perméabilité en fonction de la déformation volumique irréversible.

	Etat initial	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4
Perméabilité (10^{-16} m^2)	1	2	6	9	17
$\frac{\Delta k}{k_0}$	0	1	5	8	16
Déformation volumique irréversible	0	0,0005	0,0015	0,0033	0,011

Tableau VI-7 : Mesure de la perméabilité et de la déformation volumique irréversible pour chaque cycle de chargement.

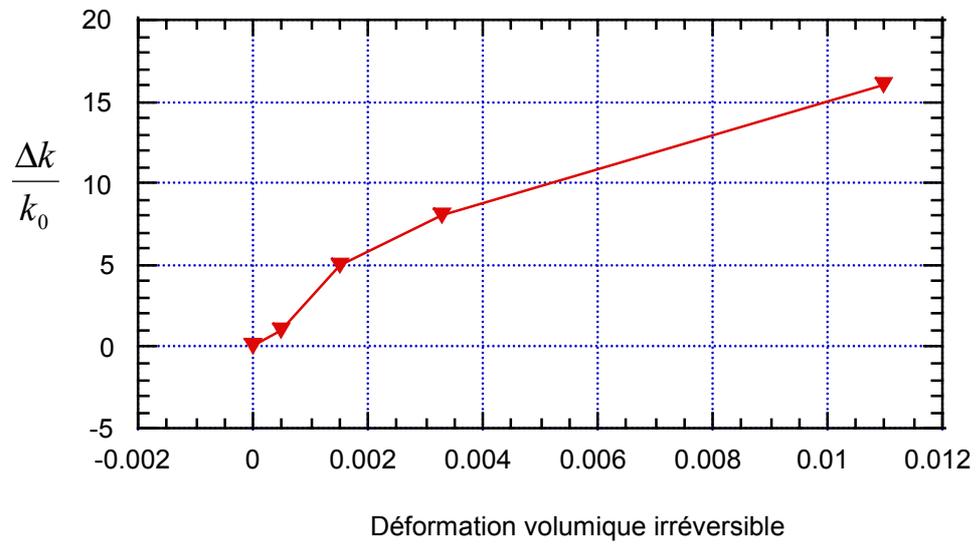
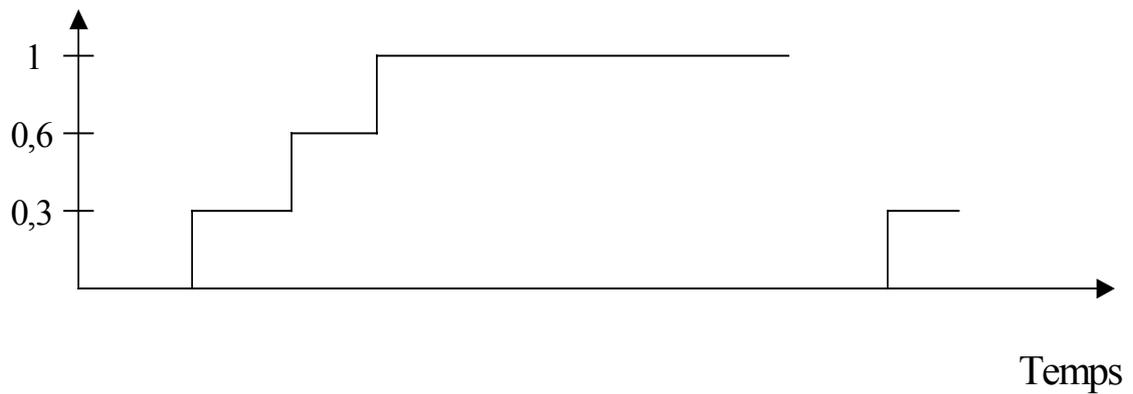
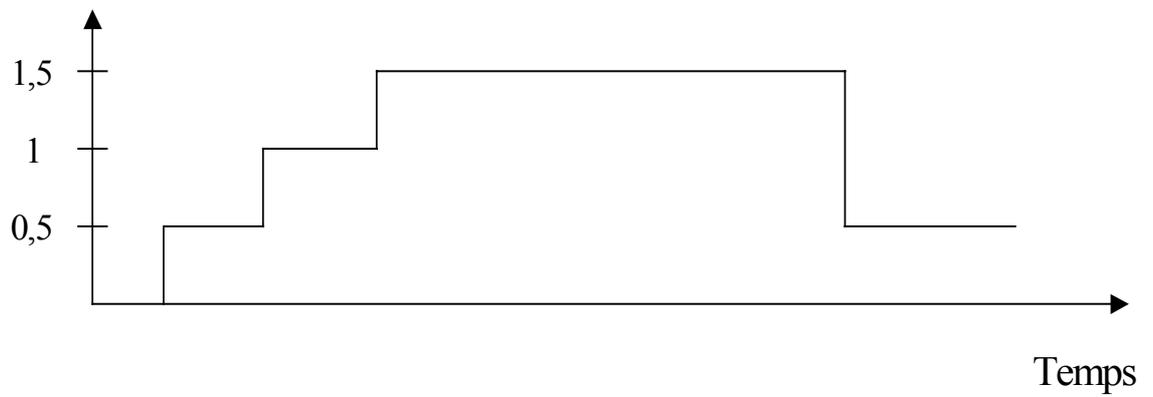


Figure VI-12 : Evolution de la perméabilité en fonction de la déformation volumique irréversible au cours de l'endommagement d'une éprouvette de craie.

Pression d'injection (MPa)



Pression de confinement (MPa)



Force

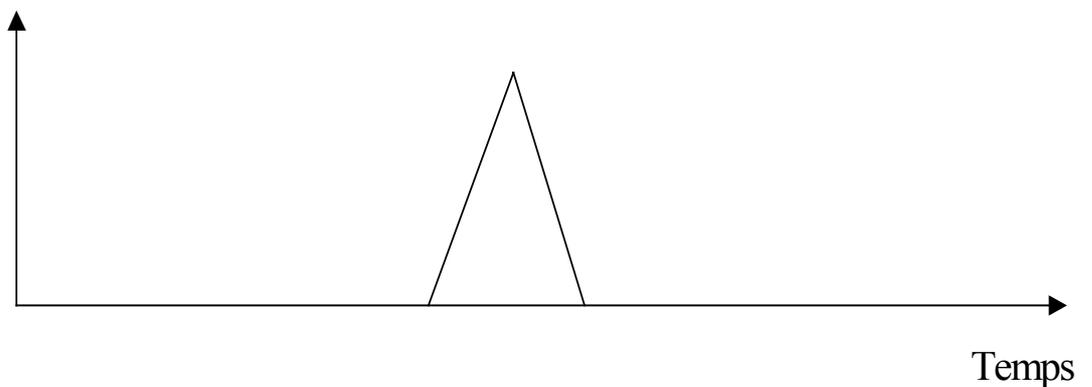


Figure VI-13 : Un cycle de charge pour un essai triaxial en condition non drainée.

IX.2.3. Essai drainé avec relaxation de contrainte axiale

Pendant un essai triaxial sur la craie, on remarque l'existence de quatre phases qui se résument comme suit :

Une première phase courte et non linéaire qui manifeste l'écrasement de quelques ponts fragiles qui relient les grains entre eux. Cette phase est suivie d'une deuxième beaucoup plus

longue et à comportement linéaire. Celle-ci représente le comportement de l'échantillon dont les pores les plus fragiles ont été écrasés. Cette partie s'arrête au début de la fissuration où commence la troisième phase qui va jusqu'à la résistance maximale de l'échantillon. Enfin, la phase de coalescence des fissures qui mène à la rupture totale de l'échantillon en cas d'un faible confinement (figure VI-14). On peut observer les mêmes étapes sur la courbe de la figure VI-3 de ce chapitre qui représente une compression uniaxiale avec rupture totale de l'échantillon à la fin de l'essai.

Pour l'essai triaxial, on remarque qu'il y a création de fissures, mais qui restent fermées tant que les contraintes sont appliquées. Nous avons donc décidé de relâcher la force axiale avant l'injection du fluide. Ce qui a permis aux fissures de s'ouvrir et par suite, d'augmenter la perméabilité.

IX.2.3.a. Déroulement de l'essai

L'essai est réalisé avec un échantillon cylindrique de dimensions 60 mm x 120 mm. La saturation de l'échantillon est effectuée à l'intérieur de la cellule triaxiale.

Sous une pression de confinement de 0,5 MPa, on applique une force axiale jusqu'à l'étape d'ouverture et de coalescence des fissures qui correspond à une contrainte d'environ 3,5 MPa, représenté par l'étoile n°1 sur la courbe de la figure VI-14, et qui correspond aussi au moment de l'injection. On injecte une pression d'eau de 0,3 MPa à la base de l'échantillon et on détermine la valeur de la perméabilité.

Immédiatement après, on diminue la force axiale qui correspond à un relâchement du piston d'environ 0,07 mm et dans les mêmes conditions on mesure le débit et on détermine la perméabilité. Cette étape est désignée par une deuxième étoile sur la figure VI-14.

Ces deux étapes sont répétées encore une fois pour vérifier la répétitivité de résultats et s'assurer de leur pertinence. Ce sont les étapes 3 et 4 sur la courbe de la figure VI-14.

Figure VI-14 : Présentation des points de mesure de la perméabilité pendant le trajet de chargement.

IX.2.3.b. Résultats

On présente dans le tableau VI-8 qui suit les différentes valeurs de perméabilité calculées en régime permanent :

Etapes	1	2	3	4
Perméabilité (10^{-16} m^2)	2,5	11	3,9	10,4

Tableau VI-8 : Mesure de la perméabilité avant et après relâchement de la contrainte axiale, sous une pression de confinement de 0,5 MPa et une pression d'injection de 0,3 MPa.

IX.2.3.c. Remarque

Plusieurs cycles de charge-décharge mécanique ont été réalisés avec des mesures de perméabilité aux instants représentés par des étoiles sur la courbe de la figure VI-14. Les résultats enregistrés sont présentés dans le tableau VI-9 ; la perméabilité est plus élevée lorsque la contrainte axiale est relâchée.

Figure VI-15 : Cycles de charge-décharge avec mesures de perméabilité, sous une pression de confinement de 0,5 MPa et une pression d'injection de 0,3 MPa.

Etapes	5	6	7	8	9	10
Perméabilité (10^{-16} m^2)	2,5	58	2,4	63	2,9	45
	11	12	13	14	15	16
	3,1	47	3,3	39	5	26

Tableau VI-9 : Mesure de la perméabilité avant et après relâchement de la contrainte axiale, sous une pression de confinement de 0,5 MPa et une pression d'injection de 0,3 MPa.

On présente sur la figure VI-15 les deux courbes correspondant à la mesure de la perméabilité avant et après relâchement de la contrainte axiale.

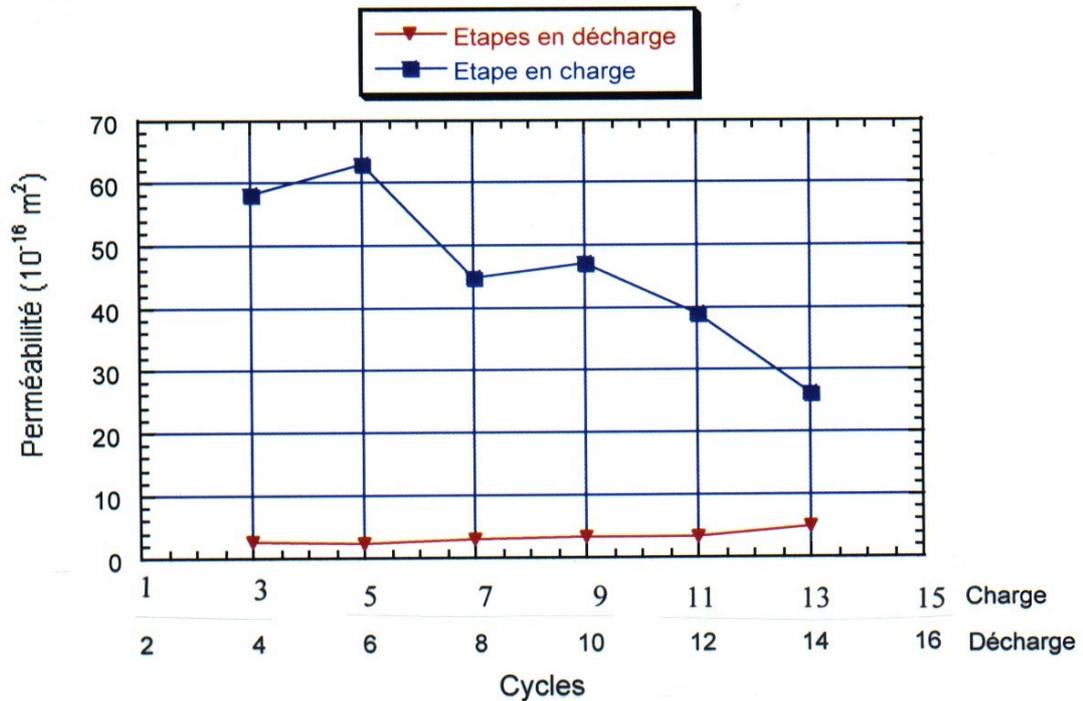


Figure VI-16 : Courbes de la perméabilité en fonction des cycles en charge et en décharge de la contrainte axiale sous une pression de confinement de 0,5MPa et une pression d'injection de 0,3 MPa.

On remarque une augmentation progressive de la perméabilité dans la phase de décharge et à l'inverse, une diminution progressive de la perméabilité mesurée sous contrainte axiale. Les deux séries des valeurs convergent vers une même valeur. On peut en déduire qu'au fur et à mesure de l'application des cycles de charge-décharge, la fissuration de l'éprouvette atteint un état stable qui n'est plus affecté par la contrainte axiale. La diminution ou l'augmentation de cette contrainte ne modifie plus, dans cet état, l'ouverture des fissures.

X. EFFETS DU FLUIDE D'INJECTION SUR LE COMPORTEMENT HYDRO-MECANIQUE

En suivant les mêmes procédures que l'essai n°3 précédent, nous avons recommencé un autre essai sur une nouvelle éprouvette de mêmes dimensions. La pression de confinement appliquée pendant l'essai est de 0,2 MPa, la pression d'injection est de 0,1 MPa.

La seule différence entre les deux essais est le fluide utilisé pour la saturation et l'injection ; l'eau est la même que celle utilisée pour les essais précédents, mais du Chlorure de Sodium a été ajouté jusqu'à la saturation. Le chemin de charge appliqué est le même que l'essai n°3.

Résultats

On présente sur le tableau VI-10 les mesures de la perméabilité réalisées à différentes étapes de charge et décharge.

Etapas	1	2	3	4	5	6	7	8
	charge	décharge						
Perméabilité (10^{-15} m^2)	2,65	3,43	3,41	3,68	2,79	3,29	3,37	9,88

Tableau VI-10 : Mesure de la perméabilité avant et après relâchement de la contrainte axiale, sous une pression de confinement de 0,2 MPa et une pression d'injection de 0,1 MPa.

Remarque : les points de mesures de la perméabilité pendant le trajet de chargement ont les mêmes emplacements que ceux de la figure VI-14.

Observations

- ❖ Il n'y a pas eu de différence nette entre les valeurs des perméabilités mesurées en charge et en décharge.
- ❖ Les valeurs de perméabilité sont à peu près d'un ordre de grandeur supérieures à celles de l'essai précédent.

On observe ainsi une modification importante de la perméabilité due à la nature chimique du fluide d'injection. Mis à part le fait que ces résultats montrent d'une manière évidente l'effet important de la nature physico-chimique de l'eau d'injection sur la mesure de la perméabilité, il est difficile d'en tirer d'autres interprétations, et d'expliquer en particulier pourquoi dans le cas du fluide utilisé l'effet va dans le sens d'une augmentation de la perméabilité et moins de sensibilité à la contrainte appliquée. On peut en effet penser que l'eau d'injection utilisée dans ces essais n'étant pas en équilibre chimique avec le squelette solide, elle peut attaquer ce squelette, en détruisant les ponts entre les grains et faciliter ainsi le passage du fluide et donc augmenter la perméabilité. Mais on ne saura pas expliquer pourquoi cette modification inhibera la création ou l'ouverture-fermeture des fissures sous

contrainte axiale, et diminuera la différence des perméabilités mesurées sous charge et décharge.

XI. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques expériences visant à montrer et à qualifier la variation de la perméabilité de la craie due à la fissuration. Contrairement aux roches argileuses étudiées dans les chapitres précédents dont le comportement raide rend difficile la création d'un état d'endommagement diffus, la craie a un comportement déformable ou ductile dès qu'une certaine pression de confinement est appliquée. Cela devrait rendre plus facile la création d'un état d'endommagement diffus. Mais la craie est un matériau à grande porosité dont les pores s'écrasent facilement sous l'effet de la contrainte. L'écrasement de ces pores a pour résultat la diminution de la perméabilité.

Malgré ces difficultés, nous avons réussi à réaliser une évolution graduelle de l'état d'endommagement du matériau, que nous avons caractérisé par la variation du module de compressibilité, et de mesurer la variation de la perméabilité au cours de cette évolution. Ceci nous a conduit vers une relation empirique donnant la variation relative de la perméabilité en fonction de l'endommagement. Nous avons réalisé d'autres essais dans des conditions différentes (drainage, fluide d'injection,...) qui n'ont pas été aussi concluants, mais qui nous ont permis d'approfondir d'autres aspects de ces phénomènes, comme par exemple l'effet d'une charge-décharge cyclique sur l'évolution de la perméabilité ou l'effet important de la nature physico-chimique du fluide d'injection servant à mesurer la perméabilité.

THERMIQUE SUR LA PERMEABILITE

I. INTRODUCTION

Parmi les différentes méthodes d'endommagement nous avons choisi dans cette partie de créer un endommagement par choc thermique. Cette idée est surgie à la suite d'une réflexion sur la manière à obtenir une fissuration aussi homogène que possible dans l'échantillon. Le choc thermique est obtenu par échauffement d'une éprouvette cylindrique dans un four à micro-ondes. En fonction de la durée et du nombre de cycles d'échauffement, les caractéristiques ultrasoniques, le poids et le volume de l'éprouvette évoluent.

On présente donc dans ce qui suit le principe de cette méthode ainsi que d'autres méthodes d'endommagement thermique rencontrées dans la littérature, l'évolution de l'endommagement et une étude théorique de la condition sur laquelle l'éprouvette se rompt par traction provoquée par la surpression interstitielle accompagnée d'une dilatation thermique différentielle de l'eau et du squelette solide.

Les différents essais ont été réalisés sur les argilites de l'Est, les siltites du Gard et la craie.

L'application des températures élevées peut induire des contraintes thermiques importantes dans les roches. Du fait de l'hétérogénéité minéralogique des roches, une variation de température suffisamment grande peut provoquer une dilatation différentielle des grains dont la conséquence est l'ouverture des zones de contact entre les grains. 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 intragranulaire dans la roche aura pour conséquence une augmentation sensible de la perméabilité, fonction du degré d'endommagement thermique. Mais dans cette partie il n'y a pas eu de mesures de perméabilité à la suite de l'endommagement thermique des argilites pour des raisons pratiques concernant l'appareillage et la taille des échantillons. Ces procédures constituent une perspective de ce travail après amélioration du dispositif expérimental.

Homand-Etienne et Houpert [1989] ont mis en évidence une corrélation claire entre l'évolution des propriétés mécaniques (module de Young par exemple) et le degré de fissuration thermique pour des granites traités thermiquement jusqu'à 600 °C environ. Ils ont observé que la fissuration intracristalline se développait à partir de 500 °C et que pour des températures supérieures à 600 °C, la majorité des joints de grains étaient ouverts.

Pour Reuschlé et al [1988] un échauffement thermique n'entraîne forcément pas une augmentation de la perméabilité, le contraire est à envisager. En effet, des températures pas trop élevées, auront pour conséquence principale de favoriser certains processus physico-chimiques. Par exemple, la dissolution de certains minéraux dans des conditions thermodynamiques favorables va entraîner un élargissement local des pores. Le volume poreux accessible aux fluides et alors plus important et il en résulte une perméabilité plus forte. Mais par ailleurs, les éléments dissous peuvent se recristalliser sur des parois libres d'autres grains. La localisation des zones de précipitation chimique dans la roche va contrôler l'évolution de la perméabilité du milieu. Si la recristallisation a lieu dans les canaux étroits assurant la connectivité du réseau poreux, une réduction significative de la perméabilité est attendue.

Dans ce travail, nous allons appliquer une méthode d'échauffement par micro-ondes pour créer un état d'endommagement dans le matériau.

Une caractéristique des fours à micro-ondes est l'homogénéité de l'échauffement d'un corps contenant de l'eau.

Les micro-ondes ont une fréquence spécifique permettant de faire vibrer les molécules d'eau qui se trouvent dans le matériau, ainsi l'eau absorbe l'énergie et sa température augmente. De cette augmentation résulte ensuite une élévation générale de la température du corps. Si l'on suppose que l'échantillon est à l'état initial homogène et saturé ce qui signifie que l'eau est bien répartie d'une façon homogène dans le matériau, donc on peut déduire que la température augmente de façon homogène dans tout l'échantillon.

Mais suite à une dilatation différente de l'eau et du squelette, une contrainte de traction peut apparaître sur le squelette qui, comme dans la fracturation hydraulique des roches, va causer la fissuration du squelette. C'est cet état de fissuration que nous allons produire et étudier.

Pour des raisons pratiques, nous n'avons pu étudier l'effet de cet endommagement sur la perméabilité que sur des échantillons de craie. Les éprouvettes d'argilites soumises à ces essais ont par contre servi à des observations par microscopie électronique afin d'étudier la taille et la forme des microfissures qui peuvent être créées par un endommagement diffus.

II. EXPERIENCE SUR LES ARGILITES

II.1. Principe de la méthode

Les échantillons utilisés dans cette partie ont une forme cylindrique de 24 mm de diamètre et d'une hauteur de 24 mm. Ces dimensions sont relativement petites pour diminuer la durée d'un essai (temps d'échauffement et temps de refroidissement) et d'autre part effectuer des visualisations au microscope dont on présentera quelques-unes par la suite. Le four à micro-ondes est réglé à sa puissance minimale (105 W) et au temps d'échauffement désiré. Avant de mettre l'échantillon dans le four, on le sort de son emballage, qui lui servait à conserver son état initial et à ne pas perdre d'eau par évaporation. Le poids et les dimensions de l'échantillon et ses célérités des ondes ultrasonores sont mesurés.

L'échantillon est placé dans un récipient en plastique avec couvercle dont les dimensions sont légèrement plus grandes que celles de l'échantillon.

L'expérience consiste à placer l'échantillon avec son récipient fermé dans le four puis faire démarrer l'appareil. Chaque échantillon subit des cycles d'échauffement espacés d'un temps de refroidissement d'environ une heure. La durée d'échauffement est de 20s, 40s et 60 s.

Après chaque échauffement, on sort l'échantillon du four et on le place à un endroit prédéfini afin d'effectuer rapidement la mesure de la température à l'aide d'une caméra infrarouge, puis de mesures de poids, de volume et de vitesses des ondes sont réalisées.

La mesure de la température s'effectue à l'extérieur du four, parce qu'il est impossible d'utiliser un thermocouple (objet métallique) pour contrôler la température de l'échantillon à l'intérieur du four. Pour cette raison, une caméra infrarouge est utilisée pour accélérer la mesure.

En raison de la différence entre les propriétés thermiques de l'eau et celle de la matrice solide de la roche, une pression interstitielle sera alors créée par cet échauffement homogène.

Cette pression est d'autant plus élevée que la différence entre le coefficient de dilatation thermique du fluide et celui de la matrice solide est grande : on l'appelle « l'effet du coefficient différentiel ». Mais la surpression interstitielle dépend également de plusieurs autres paramètres, notamment de la perméabilité de la roche. Quand la perméabilité est grande, la surpression créée par échauffement peut se dissiper aussitôt, par ailleurs si la perméabilité est faible, la surpression peut atteindre des valeurs suffisamment grandes pour provoquer une fissuration. Ce sont des fissures de traction, car l'échantillon placé dans un four à micro-ondes n'est soumis à aucunes contraintes totales. La relation entre la contrainte

effective et la pression, définie dans la théorie de la mécanique des milieux poreux, prévoit sous cette condition une contrainte effective en traction :

$$\sigma_t = \sigma_{eff} - bP$$

où σ_t est la contrainte totale

σ_{eff} est la contrainte effective

b est le coefficient de Biot et P la pression

$$\text{Si } \sigma_t = 0, \quad \text{alors } \sigma_{eff} = bP$$

Le développement des fissures par traction dans l'échantillon s'accompagne évidemment d'une modification des propriétés mécaniques du matériau. Ainsi la méthode d'échauffement homogène par micro-ondes peut être suffisamment efficace pour endommager le matériau par l'effet de la dilatation thermique différentielle.

II.2. Détermination de la surpression et de la contrainte effective

Le calcul de la surpression interstitielle et de la contrainte effective est effectué en fonction de la variation de température, nous nous sommes également intéressés aussi à travers ce calcul à la température théorique pour laquelle un échantillon du Gard ou de l'Est peut se rompre par traction par un échauffement homogène rapide.

Pour réaliser ce travail certaines hypothèses ont été adoptées :

H 1 Milieu homogène et isotrope : les études antérieures ont montré qu'à l'échelle de l'éprouvette du laboratoire les matériaux des sites de l'Est et du Gard ont des propriétés thermo-hydro-mécaniques plus ou moins homogènes et isotropes.

H 2 Milieu poreux : selon des études antérieures, là aussi, les éprouvettes sont supposées initialement saturées en eau. Les porosités des matériaux étudiés sont comprises entre 9 et 18 %. Les feuillets des argiles ont une taille extrêmement petite, les tailles des pores demeurant entre les feuillets des argiles sont également petites. Vu la petite taille des pores, l'eau n'est pas nécessairement libre, elle se présente sous forme liée. Donc d'après la mécanique des milieux poreux, les définitions de l'eau, des pores et de la matrice solide ne sont pas

nécessairement valables pour les argilites de l'Est et les siltites du Gard, mais, a priori, en l'absence d'autre cadre théorique que celui de la mécanique des milieux poreux, on va utiliser ce concept.

H 3 Echauffement instantané : le temps caractéristique de diffusion hydraulique d'un échantillon de siltite du Gard de 24 mm de diamètre est de :

$$\tau = \frac{r^2}{k}$$

Avec $r = 0.012$ m : rayon

$$k = \frac{KM}{\mu} \quad : \text{diffusivité hydraulique [m}^2/\text{s]}$$

où $K = 10^{-20}$ m² : perméabilité intrinsèque (il s'agit d'un ordre de grandeur)

$M = 10000$ MPa : module de Biot

$\mu = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Pas : viscosité dynamique de l'eau

alors la diffusivité hydraulique calculée est de l'ordre de 10^{-7} m²/s ce qui donne une valeur de :

$$\tau = 1440 \text{ s}$$

Ainsi, étant donné que le temps d'échauffement est limité à quelques secondes ou à quelques dizaine de secondes, on peut considérer que la durée d'échauffement est négligeable devant le temps caractéristique de diffusion hydraulique donc l'élévation de la pression par échauffement est instantanée et la diffusion de la pression n'a pas eu lieu.

H 4 contrainte totale nulle : l'échantillon est placé librement dans le four sans aucune contrainte extérieure. Avec l'hypothèse des propriétés isotropes et homogènes et celle d'élévation homogène de température, on peut exclure toute déformation et contrainte déviatorique dans l'échantillon.

En s'appuyant sur les hypothèses ci-dessus, les équations de conservation de masse et d'équilibre mécanique s'écrivent sous la forme suivante :

$$P = -Mbe + 3M\alpha_m T \quad \text{conservation de masse} \quad (1)$$

$$K_o e - bP - 3\alpha_o K_o T = 0 \quad \text{équation d'équilibre} \quad (2)$$

Où :

- P : variation de la pression interstitielle dans l'échantillon
- T : variation de la température dans l'échantillon
- K_o : module de compressibilité en condition drainée [Pa]
- M : module de Biot
- b : coefficient de Biot
- e : déformation volumique
- α_m : coefficient de dilatation thermique différentielle entre l'eau et la matrice solide [K^{-1}]
- α_o : coefficient de dilatation thermique en condition drainée [K^{-1}]

A partir des équations (1) et (2) on peut déterminer les deux inconnus P et e, il vient :

$$e = 3T \frac{Mb\alpha_m + \alpha_o K_o}{K_o + Mb^2} \quad (3)$$

$$P = 3TK_o B_o \left(\frac{\alpha_m}{b} - \alpha_o \right) \quad (4)$$

Alors la contrainte effective dans l'éprouvette est égale à :

$$\sigma_{eff} = bP = 3bTK_o B_o \left(\frac{\alpha_m}{b} - \alpha_o \right) \quad (5)$$

où B_o est le coefficient de Skempton : $B_o = \frac{Mb}{K_o + Mb^2}$

Ainsi, on peut déterminer la contrainte effective (en traction) et la surpression interstitielle en fonction de la température. Pour ce calcul, on utilise les caractéristiques des argilites de l'Est et des siltites du Gard permettant d'obtenir plusieurs caractéristiques thermo-hydro-mécaniques.

Les valeurs de ces paramètres ainsi que le calcul des équations (4) et (5) sont présentés dans le tableau VII-1.

D'après les calculs présentés dans le tableau VII-1, on constate que, à une même élévation de température, la contrainte effective dans le siltite du Gard est six fois plus grande que celle dans l'argilite de l'Est. On remarque que les deux matériaux ont la même résistance à la traction simple.

	Argilite de l'Est	Siltite du Gard
Module de Biot	M = 6000 MPa	M = 12700 MPa
Module de compressibilité en condition drainée	K _o = 1850 MPa	K _o = 5570 MPa
Coefficient de dilatation thermique différentielle	$\alpha_m = 1,41 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$\alpha_m = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Coefficient de dilatation thermique en condition drainée	$\alpha_o = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$\alpha_o = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Coefficient de Biot	b = 0,6	b = 0,4
Résistance à la traction simple	R _t = 2 MPa	R _t = 2 MPa
Suppression interstitielle	P = 0,03 T (MPa)	P = 0,26 T (MPa)
Contrainte effective	$\sigma_{\text{eff}} = 0,018 \text{ T (MPa)}$	$\sigma_{\text{eff}} = 0,104 \text{ T (MPa)}$

Tableau VII-1 : Présentation des différentes caractéristiques de l'argilite de l'Est et du siltite du Gard permettant de calculer la suppression interstitielle et la contrainte effective dans un échantillon lors d'un échauffement thermique.

II.3. Analyse des résultats

II.3.1. Mesure de la température

Deux séries de trois échantillons d'argilites de l'Est et de siltites du Gard ont été placées dans le four à micro-ondes une par une, respectivement pendant 20, 40 et 60 secondes. Puisqu'on ne dispose pas de moyens techniques pour mesurer la valeur de la température de l'échantillon directement à l'intérieur du four, l'échantillon est placé sur une table et sa température est mesurée, comme cela a été déjà dit, à l'aide d'une caméra infrarouge.

Les figures VII-1 et VII-2 montrent le champ de température vu d'une extrémité des échantillons d'argilite de l'Est à l'état initial et après échauffement (d'autres figures concernant les siltites du Gard sont présentées dans l'annexe 9).

On constate que la température maximale de l'échantillon augmente en fonction de la durée d'échauffement ; la température de l'échantillon, soumis à soixante secondes d'échauffement, atteint 120 °C tout en signalant que l'écart de température mesuré par une caméra infrarouge est d'environ 15 °C. La distribution de la température sur la surface de l'extrémité est relativement homogène.

Le fonctionnement du four à micro-ondes présente un petit effet qui peut être gênant dans l'interprétation des résultats. En effet, le four dont on dispose, comme la plupart des fours à micro-ondes domestique, fonctionne en créneaux, c'est à dire que les micro-ondes sont émises pendant une durée limitée et stoppées pendant un certain temps avant d'être émises à nouveau ; dans les essais réalisés, une puissance minimale est utilisée soit 105 W, alors l'émission des micro-ondes dans ce cas dure environ 5 secondes et s'arrête pendant environ 20 secondes. Ainsi, avec ce type de régulation, il est difficile de contrôler la durée exacte de l'échauffement de l'échantillon. La comparaison de la température entre différentes durées apparentes d'échauffement doit prendre en compte la durée réelle de l'échauffement. Par ailleurs, pour mener une étude plus appropriée sur ce sujet, il est nécessaire de disposer d'un four à micro-ondes à émission continue qui n'est pas un produit standard.

Sous les mêmes conditions d'échauffement, pour les éprouvettes de siltites du Gard la température enregistrée est d'environ 20 à 30°C inférieure à celle obtenue sur les argilites de l'Est, la raison en est que la teneur en eau dans les siltites du Gard est environ deux fois plus faible que celle des argilites de l'Est.

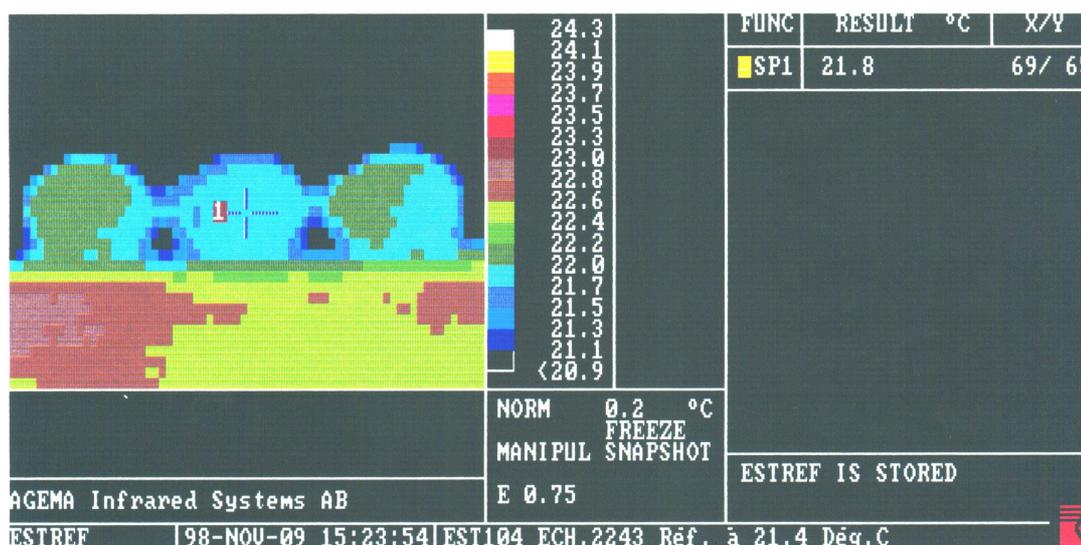


Figure VII-1 : Température des éprouvettes des argilites de l'Est à l'état initial, avant l'échauffement.

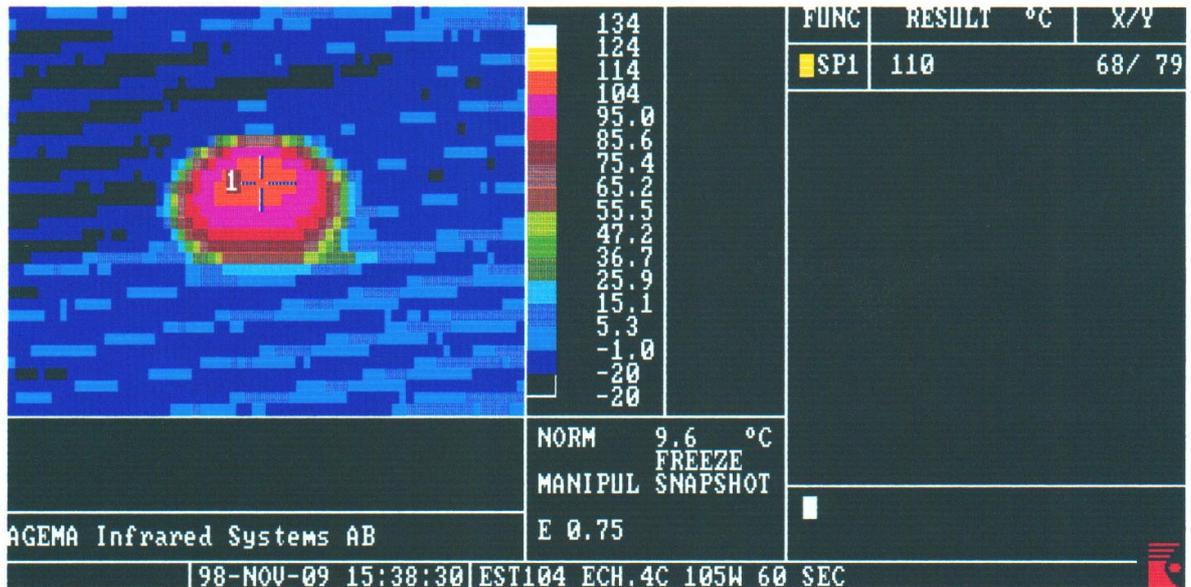


Figure VII-2 : Température d'une éprouvette des argilite de l'Est après 60 secondes d'échauffement dans un four à micro-ondes avec une puissance de 105 W.

II.3.2. Variation des vitesses des ondes sonores et de la porosité

Les vitesses des ondes longitudinales ultrasonores ont été mesurées sur des éprouvettes refroidies après échauffement. Le tableau VII-2 présentent les évolutions de la vitesse des ondes, du poids de l'éprouvette et de son volume pour différentes durées d'échauffement. On constate que la vitesse des ondes décroît en fonction du nombre de cycles d'échauffement. Pour les argilites de l'Est la baisse de la vitesse des ondes est significative et peut atteindre 30%. (Des résultats correspondant à d'autres périodes d'échauffement sur l'argilite de l'Est et aussi sur les siltites du Gard sont présentés dans l'annexe 9).

Numéro du cycle	$\frac{\text{Poids}}{\text{Poids initial}}$	$\frac{V_l}{V_{l_0}}$	V_l (m/s)	$\frac{\text{Volume}}{\text{Volume initial}}$
0	1	1	2860	1
1	0,9917	0,93	2667	0,9994
2	0,9915	0,85	2422	1
3	0,9872	0,84	2397	0,9987
4	0,9826	0,73	2100	0,9987
Poids initial : 25,455g - Volume initial : 10515 mm ³ , V_l : vitesse des ondes longitudinales				

Tableau VII-2 : Variations des paramètres physiques de l'argilite de l'Est en fonction du nombre de cycles d'échauffement à soixante secondes.

Cette baisse est due à deux facteurs :

- a) L'élévation de la température a créé une pression interstitielle. Un fort gradient de pression hydraulique est créé sur les couches extérieures de l'éprouvette, ce qui fait que l'eau qui se trouve à l'intérieure de l'éprouvette s'écoule vers l'extérieur. Dans le cas des argilites de l'Est, on peut voir, à l'œil nu, un fluide sortant de l'éprouvette. Par conséquent, la teneur en eau dans le matériau est modifiée ainsi que le degré de saturation. La vitesse de propagation des ondes longitudinales décroît quand le degré de saturation en eau diminue.
- b) La chute de la vitesse des ondes témoigne également de la création des fissures suite à la surpression interstitielle. D'après les résultats, on constate que pour les argilites de l'Est le volume de l'éprouvette diminue, malgré que d'une manière générale la fissuration s'accompagne d'une augmentation du volume.

Ce phénomène s'explique par le mécanisme de retrait résultant de la désaturation de l'éprouvette suite au départ de l'eau par évaporation. Le contrôle du poids de l'éprouvette montre que ce dernier diminue significativement avec le cycle d'échauffement. Sur les argilites de l'Est, après quatre cycles d'échauffement de soixante secondes, le poids a diminué de 2% (tableau VII-2), et le volume de 0,13%.

D'après les mesures de volume, représentées dans le tableau VII-2, on remarque qu'après quatre cycles d'échauffement le taux de saturation a baissé de 25%, ce qui peut expliquer en partie la baisse des vitesses des ondes ultrasonores. La désaturation conduit également au

retrait. On souligne ainsi que le retrait obtenu dans les essais est provoqué par un choc thermique homogène et n'est pas dû à un dessèchement à l'air.

Les résultats sur les siltites du Gard ne montrent aucun retrait visible dû aux cycles d'échauffement homogène, même au bout de 6 cycles d'échauffement, malgré qu'on constate une perte d'eau et une baisse de célérité longitudinale des ondes.

Ces résultats confirment les conclusions faites lors des études antérieures, à savoir que le retrait ainsi que le gonflement ne sont pas significatifs pour les siltites du Gard.

II.3.3. Observation au microscope

Après endommagement aux micro-ondes, quelques fissures ont été observées au microscope électronique à balayage. La figure VII-3 qui suit présente une photo d'un échantillon d'argilite de l'Est fissuré.

Les différentes caractéristiques de ces fissures (épaisseur et longueur de l'ouverture) serviront à effectuer différents calculs numériques par la suite.

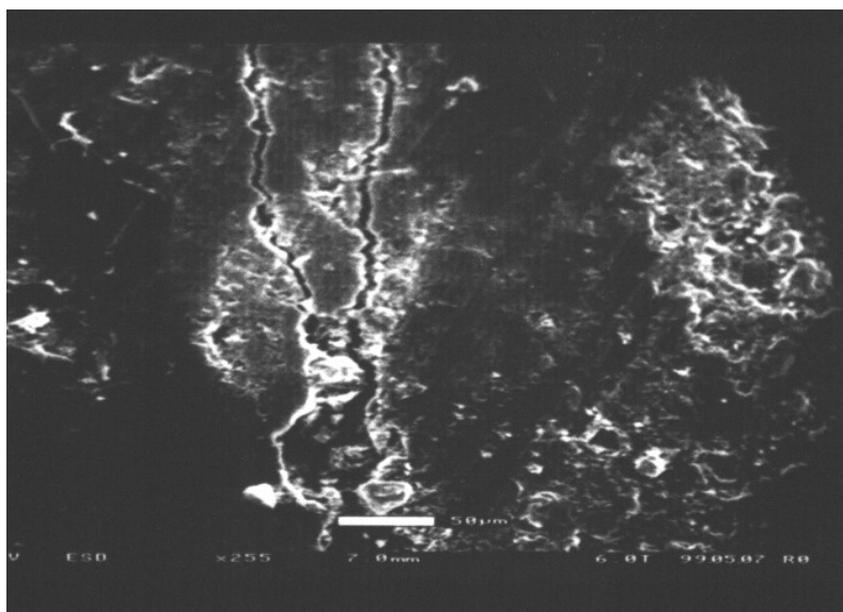


Figure VII-3 : Photo des fissures observées au microscope d'une éprouvette d'argilite de l'Est après un échauffement de soixante secondes aux micro-ondes.

II.3.4. Remarques

Quelques tests ont été menés en utilisant la puissance maximale du four, soit une puissance de 700 W. Les résultats révèlent qu'une éprouvette d'argilite de l'Est (diamètre = hauteur = 24 mm – N° carottage : 2243), se rompt après environ deux secondes d'échauffement. Sous les mêmes conditions, une éprouvette de siltite du Gard (de même dimensions – N° carottage : 6817) se rompt après environ cent secondes.

Contrairement à ce qui est prévu par le calcul du tableau VII-1, l'éprouvette de siltite du Gard a résisté plus longtemps à l'échauffement que l'éprouvette de l'argilite de l'Est. Il y a probablement plusieurs explications :

- a) Les valeurs des paramètres utilisés dans le tableau VII-1 sont des valeurs moyennes obtenues sur plusieurs dizaines d'éprouvettes qui s'étalent sur 300 m de variation de profondeur. Il existe donc une dispersion des valeurs des paramètres. L'éprouvette du Gard utilisée pour ce test, peut être une éprouvette partiellement désaturée ou endommagée.
- b) Certains paramètres poro-élastiques pour les siltites du Gard sont très difficiles à caractériser en laboratoire, comme les coefficients b , M ou α_m .

Pour les argilites de l'Est, la rupture après deux secondes d'échauffement est prévisible. On suppose que toute la puissance des micro-ondes soit transportée sur l'éprouvette (il y a certainement des pertes significatives de cette puissance). Alors, on peut estimer que l'éprouvette est chauffée à un rythme voisin de 35°C/s . Au bout de deux secondes, l'éprouvette devrait subir une élévation de température de 70°C , ce qui induit une contrainte effective en traction de $1,26\text{ MPa}$ (selon le calcul du tableau VII-1). Par les expériences mécaniques, on sait que la résistance à la traction des argilites de l'Est est de l'ordre de 2 MPa en moyenne. C'est la raison pour laquelle on constate une rupture à environ deux secondes d'échauffement.

A partir des données géologiques disponibles sur le site du Gard, il semble que la carotte N°6817 provienne d'une profondeur de 757 m et appartienne à la couche E parmi les cinq couches découpées (de A à E). C'est la dernière couche, sous la couche grès-calcaire. Il est très probable que la composition minéralogique et la texture de la couche sont différentes de celles des autres.

Un autre test a été réalisé, dans les mêmes conditions, sur l'échantillon N°6435 et qui se trouve à une profondeur de 671 m , la rupture a eu lieu au bout de dix secondes d'échauffement. Ce qui affirme la forte dispersion parmi les différents échantillons de siltites du Gard.

Les essais d'échauffement homogène rapide sont relativement simples, mais on peut conclure que les valeurs des paramètres poro-élastiques des argilites de l'Est, illustrées dans le tableau VII-1, sont vraisemblables et qu'elles ont permis de prévoir la durée de l'échauffement afin d'atteindre la rupture par traction dans un four à micro-ondes.

II.4. conclusions

L'échauffement homogène rapide dans un four à micro-ondes sur les éprouvettes d'argile peut provoquer une rupture dans les argilites de l'Est et les siltites du Gard.

Les relations donnant la contrainte effective en fonction de la température d'échauffement ont été établies en se basant sur la théorie de la mécanique des milieux poreux. A l'aide de ces relations, on peut prévoir correctement le temps d'échauffement permettant de conduire à la rupture des argilites de l'Est. Mais pour les siltites du Gard, la prévision ne correspond pas toujours aux résultats des essais.

Nous pouvons conclure également que les argilites de l'Est correspondent bien à un milieu poreux, tel que cela est défini dans la mécanique des milieux poreux. Nous ne pouvons pas en dire autant pour les siltites du Gard.

Cette conclusion nous permet de mieux comprendre les difficultés rencontrées pour mesurer et interpréter la perméabilité dans un tel milieu. A notre avis, il est à la limite de la définition d'un milieu poreux.

Il est certain que le dispositif expérimental nécessite des améliorations afin de pouvoir l'appliquer à un tel milieu, notamment au niveau des techniques de diffusion de la pression dans les deux directions, axiale et latérale. Cependant, c'est une voie intéressante qui permettrait d'obtenir un mode de fissuration par traction, plus ou moins diffus, différent du mode de cisaillement obtenu lors d'essais mécaniques sur les matériaux fragiles.

III. EXPERIENCE SUR LA CRAIE

Dans cette partie, des essais ont été réalisés sur la craie, une roche beaucoup plus perméable et poreuse. De la même façon, la création de l'endommagement est réalisée par choc thermique obtenu par échauffement dans un four à micro-ondes.

Les échantillons utilisés ont une forme cylindrique d'un diamètre et d'une hauteur de 50 mm, ces dimensions sont choisies par rapport aux dimensions de la cellule de l'appareil qui permettra de mesurer la perméabilité.

La porosité des échantillons, mesurées à l'aide d'un porosimètre à Hélium, vaut environ 44%, et la masse volumique des grains est égale à 2,7 g/cm³.

III.1. Principe de l'essai

Cet essai est partagé en deux étapes. La première étape consiste à saturer l'échantillon et mesurer son poids et ses dimensions. Ensuite, chaque échantillon est mis dans le four à micro-ondes pendant une période de temps précise, à la sortie du four, une mesure de la vitesse des ondes de compression est effectuée. (En réalité, l'appareil utilisé permet de mesurer le temps (t) mis par l'onde pour passer d'une extrémité de l'échantillon à l'autre, et à partir duquel on déduit la vitesse des ondes $V = \frac{d}{t}$ avec $d = 50$ mm, hauteur de l'échantillon).

Dans la deuxième étape, des mesures de perméabilité sont réalisées ; avant ces mesures, les échantillons ont été séchés pendant 5 jours dans une étuve à 40°C. La perméabilité est mesurée avec un perméamètre au gaz (l'azote), sous une pression de confinement de 2,7 MPa.

III.2. Résultats

On représente dans le tableau VII-3 suivant les résultats des différentes mesures effectuées dans les deux parties de cette étude :

Echantillons	Vitesses des ondes initiales (10^3 m/s)	Durée de chauffe (s)	Vitesses des ondes après chauffage (10^3 m/s)	Perméabilité au gaz (10^{-15} m ²)
1	4,0	0	-	3,2
2	4,13	30	3,31	3,7
3	4,16	60	3,18	3,9
4	4,0	90	3,03	4,7

Tableau VII-3 : Résultats des mesures des vitesses des ondes et de la perméabilité au gaz des échantillons de craie avant et après échauffement aux micro-ondes.

III.3. Observations et interprétations

On présente sur les figures VII-4 et VII-5 l'évolution des vitesses des ondes et de la perméabilité au gaz en fonction de la durée de chauffe dans le four à micro-ondes.

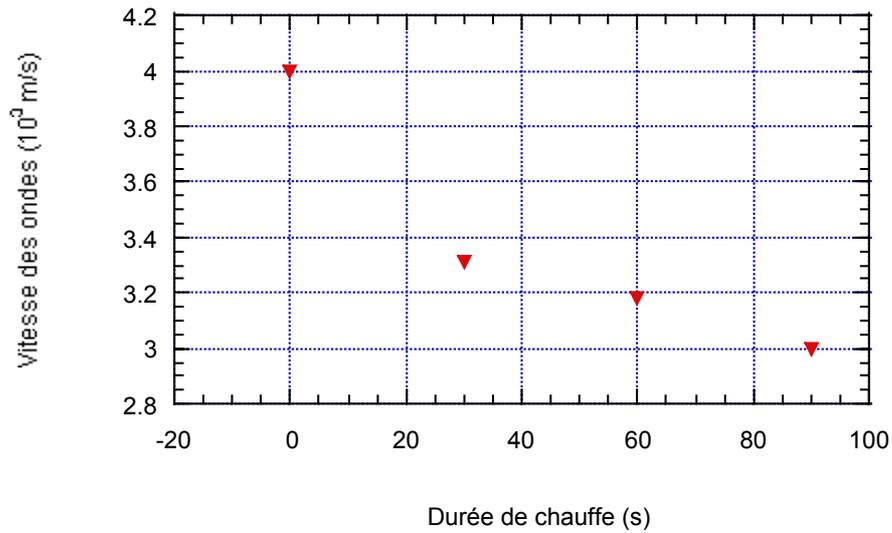


Figure VII-4 : Variation des vitesses des ondes en fonction de la durée d'échauffement aux micro-ondes.

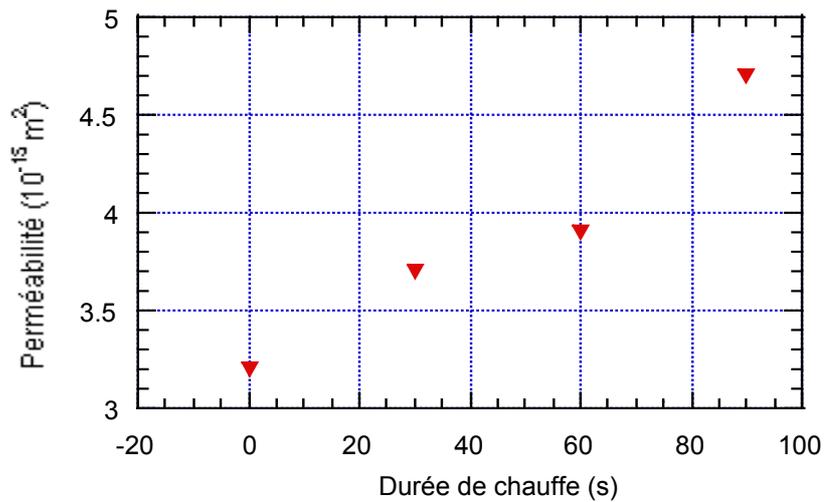


Figure VII-5 : Variation de la perméabilité en fonction de la durée d'échauffement aux micro-ondes.

III.4. Relation endommagement-vitesse des ondes

On présente la vitesse des ondes longitudinales pour un milieu élastique et isotrope sous la forme suivante : [François D. et al., 1993]

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

ρ : masse volumique de la roche.

λ et μ : coefficients de Lamé.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

en remplaçant λ et μ par leurs valeurs dans l'équation de C_L on trouve :

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Le facteur $\sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$ est très proche de 1, pour $\nu = 0,2$ ce facteur vaut 1,05.

En supposant que ν ne varie pas lors de l'endommagement, on trouve :

$$\frac{\Delta C_L}{C_L} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E}$$

d'après la définition de Lemaître-Chaboche de l'endommagement en fonction du module d'élasticité du matériau on a :

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} = \frac{E - \tilde{E}}{E} = -\frac{\Delta E}{E}$$

donc

$$D = -2 \frac{\Delta C_L}{C_L}$$

Les différents calculs et mesures ramenant à la détermination de l'endommagement D sont présentés dans le tableau VII-4 :

Durée de chauffe (s)	0	30	60	90
Vitesse des ondes [C_L] (10^3 m/s)	4,0	3,31	3,18	3,03
Perméabilité [k] (10^{-15} m ²)	3,2	3,7	3,9	4,7

$\frac{\Delta k}{k_0}$	0	0,15	0,22	0,47
$\frac{\Delta C_L}{C_{L0}}$	0	-0,17	-0,20	-0,24
D	0	0,34	0,40	0,48

Tableau VII-4 : Calcul de l'endommagement sous l'effet des micro-ondes sur des échantillons de craie.

Sur les figures VII-6 et VII-7 sont présentées respectivement l'évolution de la perméabilité en fonction de la vitesse des ondes et en fonction de l'endommagement.

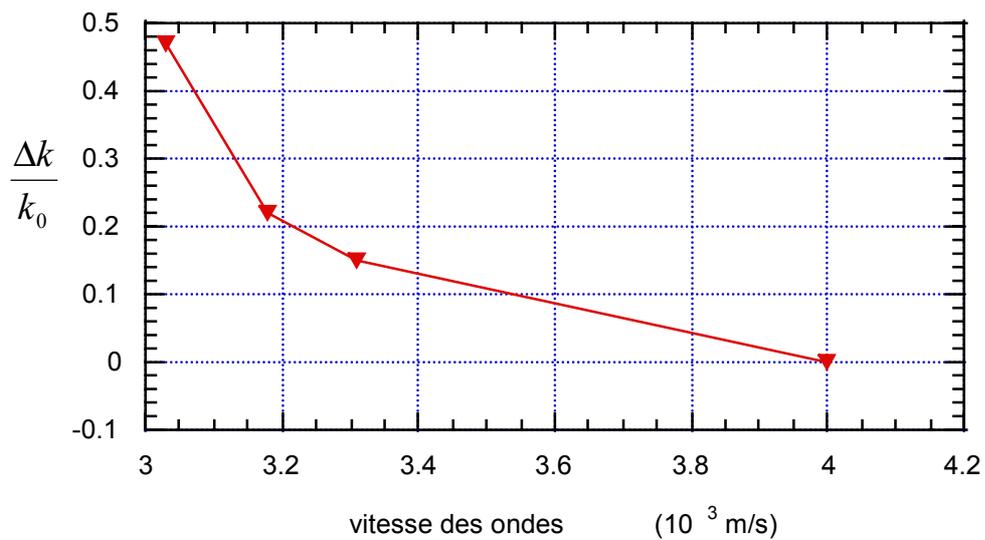


Figure VII-6 : Variation de la perméabilité en fonction des vitesses des ondes.

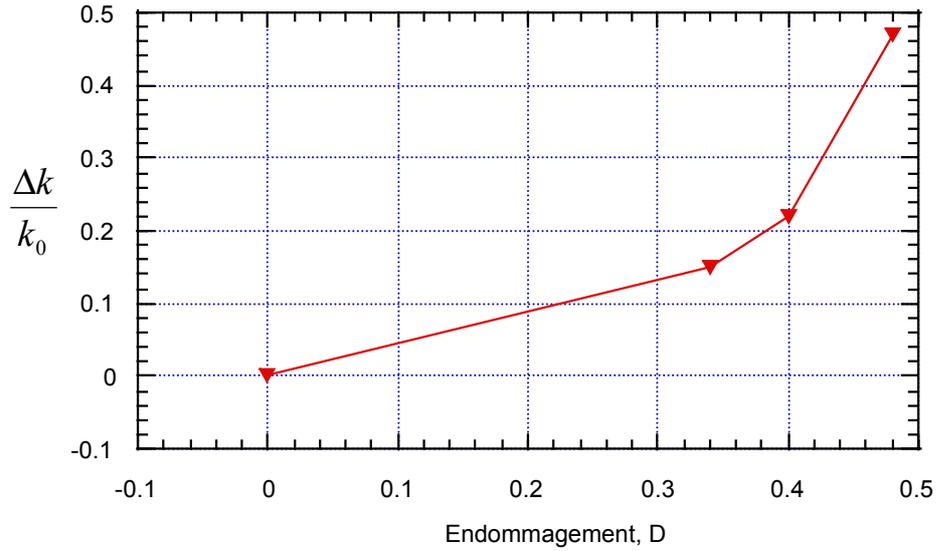


Figure VII-7 : Variation de la perméabilité en fonction de l'endommagement D.

Une présentation des mêmes paramètres en échelle logarithmique donne la figure VII-8 suivante :

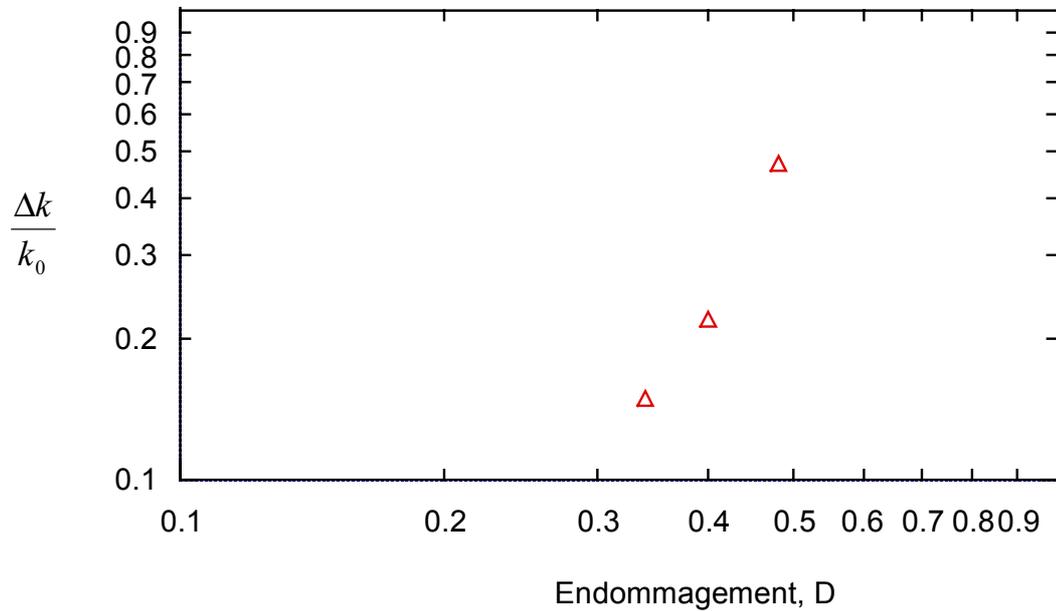


Figure VII-8 : Présentation logarithmique de la variation de la perméabilité en fonction de l'endommagement.

Un ajustement de cette courbe par une droite permet de déduire une loi du type :

$$\ln \frac{\Delta k}{k_0} = 1,63 + 3,32 \ln D$$

Cela donne approximativement :

$$\frac{\Delta k}{k_0} = 5D^3$$

avec \ln : Logarithme népérien.

III.5. Conclusions

Nous avons vu que sur la craie comme sur les argilites, un état de fissuration ou d'endommagement diffus a pu être créé par exposition aux micro-ondes. Cet état d'endommagement nous a servi d'étudier l'ordre de grandeur de la taille et l'ouverture des fissures créées dans les argilites qui peuvent ensuite être utilisés dans des modélisations numériques ou d'autres investigations. Dans le cas de la craie, nous avons pu étudier l'effet de cet endommagement sur la perméabilité. Nous avons également pu faire évoluer l'endommagement de manière graduelle et mesurer la perméabilité en fonction de l'endommagement. Cela a permis d'établir une loi de variation relative de la perméabilité en fonction de l'endommagement. Cette loi n'est pas la même que celle que nous avons obtenue dans les chapitres précédents où l'endommagement était créé par la voie mécanique et la perméabilité mesurée à l'eau.

Cela pose alors la question de la représentativité de l'état d'endommagement que nous avons créé par l'exposition aux micro-ondes par rapport à l'endommagement d'origine mécanique ; s'agit-il du même type de distribution de fissures (longueurs, orientations, densité, ouvertures etc.) ? Nous pouvons affirmer avec une certaine certitude que le caractère diffus de l'endommagement est mieux produit par la voie thermique (micro-ondes) que mécanique.

C'est probablement ce qui explique aussi que dans le cas de l'endommagement d'origine thermique, la perméabilité varie moins que dans le cas mécanique, car on peut penser qu'un endommagement localisé sur un plan de fracture pourra expliquer une forte variation de la perméabilité en fonction de l'endommagement.

En conclusion, l'exposition aux micro-ondes constitue une voie très simple comparée à la voie mécanique, de créer un état de fissuration plus ou moins homogène, ou d'endommagement diffus dans les matériaux poreux ayant une certaine teneur en eau. Cette voie paraît très attrayante pour l'étude de l'évolution de la perméabilité avec l'endommagement. Mais la représentativité de l'état d'endommagement ainsi créé par rapport

à ce que se produit in situ sous l'effet de contraintes mécaniques au voisinage des ouvrages souterrains, mérite d'autres études et réflexions.

CONCLUSION GENERALE

Le couplage entre les comportements hydraulique et mécanique peut être très forts dans les roches profondes et peu perméables. La compréhension et la modélisation de ce phénomène est nécessaire pour traiter un certain nombre de problèmes industriels, en particulier le stockage des déchets radioactifs. Nous avons examiné dans ce travail l'effet de l'endommagement sur la perméabilité dans les roches poreuses saturées par des méthodes expérimentales.

La première étape de ce travail a consisté en la validation de nos méthodes et dispositifs expérimentaux. Cette validation a été basée sur la mesure de la perméabilité du Grès de Fontainebleau. Connaissant a priori la perméabilité de ce matériau, nous avons testé l'efficacité de nos méthodes en mesurant la perméabilité axiale et latérale, à l'eau et au gaz, de quelques éprouvettes de ce matériaux. Il en ressort que nos mesures de perméabilité donnent des valeurs similaires à celles obtenues dans la littérature pour la même roche. Ces observations ont servi à justifier que le système (cellule-presse-circuits hydrauliques) fonctionne bien, au moins pour des valeurs de perméabilité comparables à celle du Grès.

La déformation volumique irréversible ainsi que le module de compressibilité sont les deux paramètres choisis comme indicateur de l'endommagement. Ces deux paramètres ont pu être mesurés pour la majorité des essais présentés dans ce mémoire. La mesure de la variation de volume et de la compressibilité de la roche au cours de l'essai est assez pratique et donne une information en continue sur l'évolution de l'endommagement à chaque étape d'essais :

- L'initiation de l'endommagement est repérée sous chargement déviatorique (compression) par l'état de contrainte correspondant à la perte de linéarité de la courbe contrainte déviatorique en fonction de la déformation volumique.
- Cela permet, en réalisant plusieurs cycles de charge/décharge, d'enregistrer des déformations volumiques irréversibles caractéristiques de l'initiation et de l'évolution de l'endommagement.
- Pour le module de compressibilité, il correspond à la pente en décharge de la pression de confinement en fonction de la déformation volumique, plusieurs cycles de

charge/décharge de la pression de confinement ont permis d'évaluer l'évolution du module de compressibilité de la roche au cours de l'endommagement.

L'ensemble des essais réalisés a systématiquement montré un net accroissement de la perméabilité avec l'endommagement. Les deux difficultés majeures de ces expériences ont été la mesure de très faible perméabilité d'une part, et la création d'un état d'endommagement diffus d'autre part. En imposant des trajets de chargement judicieux et parfois complexes, combinant différents efforts de pression de confinement, contrainte déviatorique et pression d'injection, et en changeant souvent de méthodes et de moyens de mesures, nous avons essayé de vaincre ces difficultés.

Les essais réalisés sur les siltites du Gard et les argilites de l'Est se sont révélés difficiles en raison de leur très faible perméabilité. Néanmoins, on a pu, à l'aide de la méthode de l'essai pulse, mesurer la valeur de leurs perméabilités. Cependant la création d'un endommagement diffus reste une tâche difficile ; sous chargement déviatorique les échantillons ont tendance à avoir une rupture fragile malgré l'application d'un confinement élevé. Du fait de ces difficultés, les mesures que nous avons réussies à réaliser sur ces matériaux sont rares. Nous avons pu montrer qu'à la fin de quelques cycles d'endommagement d'une éprouvette d'argilite de l'Est (E5), la perméabilité a évolué de deux ordres de grandeur environ, quand la déformation volumique irréversible a atteint 4%. Une technique a été proposée pour mesurer ou calculer sur la même éprouvette les paramètres hydromécaniques, le coefficient et le module de Biot, qui subissent eux aussi les conséquences de l'endommagement.

La craie est un matériau à grande porosité dont les pores peuvent s'écraser sous l'effet des faibles contraintes. Ceci constitue une difficulté pour créer un endommagement diffus dans la craie, spécialement en conditions drainées. Des mesures réalisées montrent qu'en régime non drainé, l'application des contraintes déviatoriques permet de créer des fissures conduisant à une augmentation de la perméabilité.

Ces essais nous ont permis de déterminer quelques ordres de grandeur de la variation de la perméabilité avec l'endommagement, ou plus précisément avec la déformation volumique irréversible dans le cas des argilites. Ils nous ont permis d'établir un modèle simple de la variation relative de la perméabilité en fonction de l'endommagement dans le cas de la craie.

De point de vu expérimental, les perspectives seront d'améliorer le système hydraulique : la frontière entre le circuit d'injection et l'éprouvette (le diffuseur) pour la perméabilité latérale, et aussi il sera intéressant d'étudier la création des fissures par des essais déviatoriques en extension. L'objectif étant toujours d'aboutir à un état d'endommagement diffus bien contrôlé.

Les difficultés rencontrées par la création d'un état d'endommagement diffus dans le matériau par un chargement mécanique, nous a amené à tester la voie thermique par l'exposition aux micro-ondes. Par ce procédé nous avons pu créer facilement des états d'endommagement diffus à différents stades d'avancement et mesurer l'évolution de la perméabilité avec l'endommagement. Une relation entre la perméabilité et l'endommagement de ce matériau à travers la mesure de la vitesse acoustique a pu être établie. Mais la question se pose de démontrer la représentativité de cet endommagement à ce qui se produit in situ dans la roche sous l'effet des contraintes mécaniques.

La suite de ce travail sera une modélisation numérique qui permettra de coupler l'endommagement et la perméabilité, et l'implémentation dans un code de calcul du modèle établi. C'est l'objet d'une autre thèse qui vient de commencer à G3S.

ANNEXES

ANNEXE 1

Mesure de la perméabilité au gaz en régime permanent :

Pour une éprouvette cylindrique, si l'on suppose que la loi de Darcy est valable localement on peut établir la relation :

$$V = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

k : Perméabilité intrinsèque, (m²).

μ : Viscosité dynamique, (Pa.s)

L'équation de conservation de la masse dans le cas du régime permanent et unidimensionnel s'écrit :

$$\frac{d}{dx}(\rho V) = 0$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dx} \left(\rho \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \right) = 0$$

ρ est la masse volumique du gaz.

Elle est déterminée par l'équation d'état :

$$\rho = \frac{\rho_0}{P_0} P$$

ρ_0 et P_0 sont respectivement la masse volumique et la pression de référence.

Alors l'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\frac{\rho_0}{P_0} \frac{k}{\mu} \frac{d}{dx} \left(P \frac{dP}{dx} \right) = 0$$

La solution de la pression pour cette équation s'exprime sous la forme :

$$P = \left(\frac{P_2^2 - P_1^2}{L} x + P_1^2 \right)^{1/2}$$

avec L : longueur de l'éprouvette

et P_1 et P_2 sont respectivement les pressions imposées aux extrémités de l'éprouvette $x = 0$ et $x = L$.

Le flux massique par unité de surface est égal à

$$\phi_m = \rho V = \rho \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx}$$

$$\phi_m = \frac{\rho_0}{P_0} \frac{k}{\mu} \frac{P_2^2 - P_1^2}{2L}$$

D'après les expériences effectuées, c'est le débit volumique correspondant à la pression atmosphérique P_0 et à la température ambiante que l'on enregistre à l'aide d'un débitmètre.

Ainsi le flux volumique traversant l'éprouvette est :

$$\phi_V = \frac{\phi_m}{\rho_0} S = \frac{P_2^2 - P_1^2}{2P_0L} \frac{k}{\mu} S$$

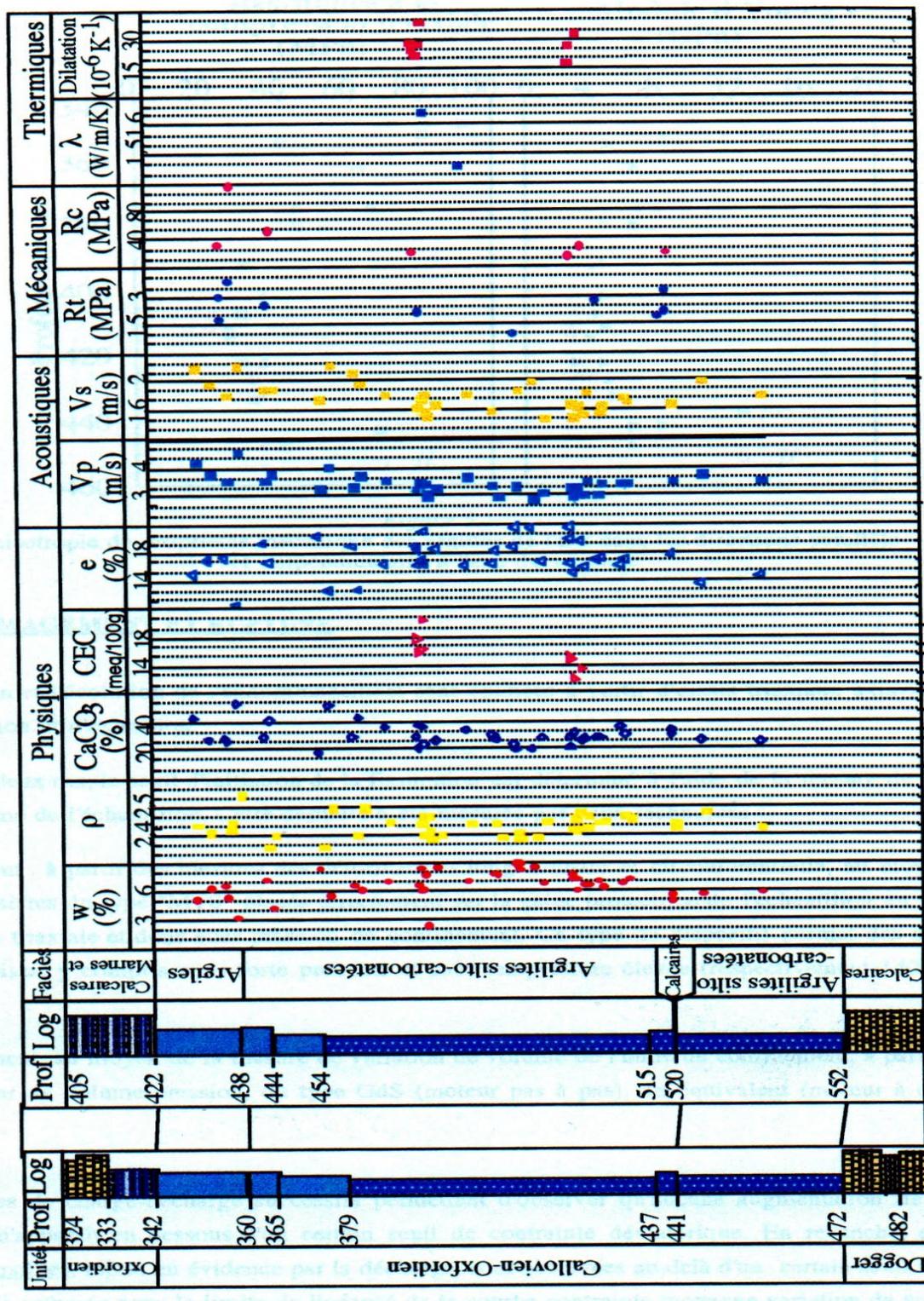
Avec S section de l'éprouvette en m^2 .

Donc la perméabilité en fonction du flux volumique est :

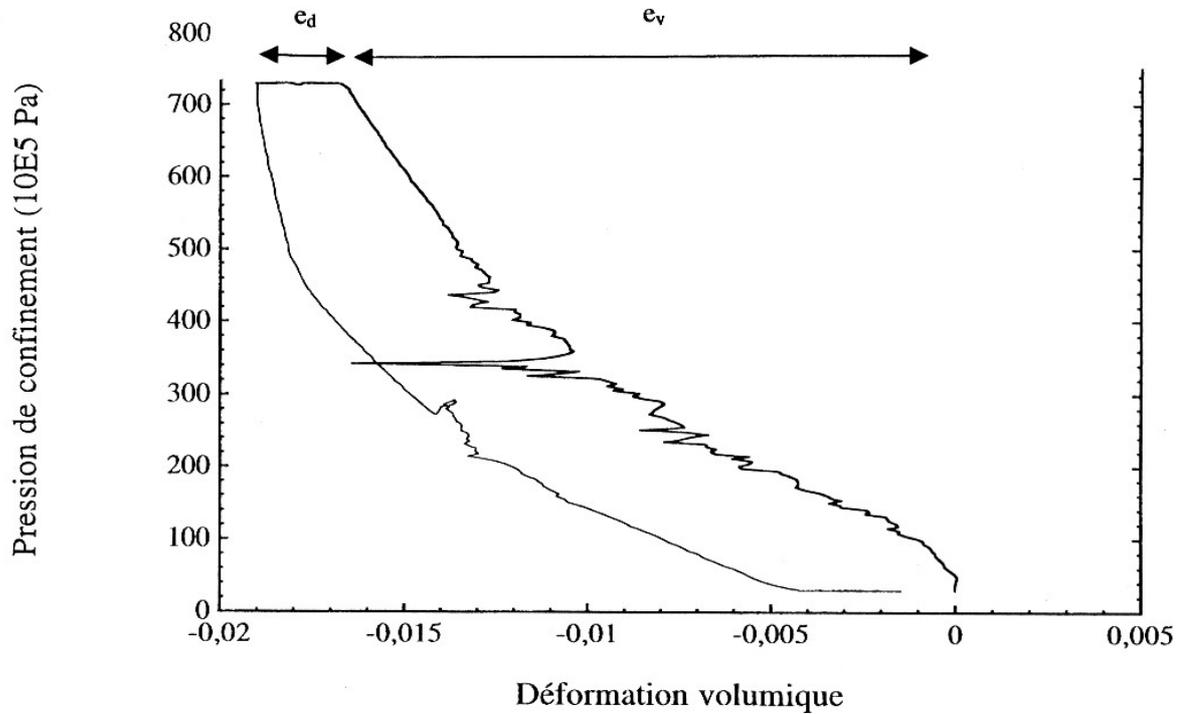
$$k = \frac{2P_0L\mu}{(P_2^2 - P_1^2)S} \phi_V$$

ANNEXE 2

Présentation des différents propriétés physiques , acoustiques, mécaniques et thermiques des argilites de l'EST avec la profondeur.



ANNEXE 3



Essai de compression isotrope sur l'éprouvette E3 présentant un comportement linéaire par morceau en décharge.

Dans le cas d'un couplage hydro-mécanique l'équation de diffusion hydraulique s'écrit sous la forme :

$$\frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial t} + b \frac{\partial(\text{tr} \underline{\underline{\varepsilon}})}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 P \quad (1)$$

où k : perméabilité intrinsèque (m^2) et μ : viscosité du fluide (Pa.s)

les équations d'états de la poroélasticité linéaire isotrope peuvent s'écrire sous forme de relations linéaires liant les variations de contrainte $\Delta \underline{\underline{\sigma}}$, de pression interstitielle ΔP à la variable d'état $\underline{\underline{\varepsilon}}$ (en éliminant la partie thermique) :

$$\Delta \underline{\underline{\sigma}} = \left(K_0 - \frac{2}{3} G \right) tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{1}} + 2G \underline{\underline{\varepsilon}} - b \Delta P \underline{\underline{1}}$$

et en éliminant aussi le terme relatif aux cisaillements on a :

$$\Delta \underline{\underline{\sigma}} = K_0 tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{1}} - b \Delta P \underline{\underline{1}} \quad (2)$$

ce qui donne :

$$\underline{\underline{\sigma}} = K_0 tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{1}} - b P \underline{\underline{1}}$$

$$tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{1}} = \frac{1}{K_0} (\underline{\underline{\sigma}} + b P \underline{\underline{1}})$$

$$3tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) = \frac{1}{K_0} (tr(\underline{\underline{\sigma}}) + 3bP)$$

$$tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) = \frac{1}{3K_0} (tr(\underline{\underline{\sigma}}) + 3bP)$$

En remplaçant les déformations par les contraintes l'équation de diffusion (1) devient :

$$\left(\frac{1}{M} + \frac{b^2}{K_0} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{b}{3K_0} \frac{\partial (tr \underline{\underline{\sigma}})}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 P \quad (3)$$

le coefficient d'emménagement de la roche est alors :

$$S = \left(\frac{1}{M} + \frac{b^2}{K_0} \right) = \frac{K}{K_0 M}$$

avec $K = K_0 + b^2 M$

Lorsqu'il n'y a pas de variation de contraintes totales (qui est le cas au moment des essais pulse), l'équation de diffusion des pressions hydrauliques (3) se simplifie pour donner :

$$S \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 P \quad (4)$$

Soit l'équation de conservation de la masse fluide sous la forme :

$$\Delta P = M \left(-b tr(\underline{\underline{\varepsilon}}) + \frac{m}{\rho_f} \right) \quad (5)$$

avec m : apport de masse fluide

ρ_f : masse volumique du fluide

D'autre part on considère qu'un chargement de compression isotrope en conditions non drainées va provoquer une déformation volumique de l'échantillon e_v (voir figure ci-dessus), alors l'équation (5) donne, dans le cas où l'apport de masse fluide est nul :

$$be_v + \frac{P_i}{M} = 0$$

D'où
$$P_i = -bMe_v \quad (6)$$

Avec P_i : la variation de pression interstitielle due au chargement de compression isotrope.

En attendant la dissipation des pressions interstitielles à contrainte de confinement constante, l'équation (2) devient :

$$tr(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{\sigma}}_0) = 0 = 3K_0e_d + 3bP_i \quad (7)$$

avec e_d : déformation différée sous contrainte de confinement constante (voir figure ci-dessus).

ce qui donne
$$P_i = -\frac{K_0}{b}e_d \quad (8)$$

A partir des deux équations (6) et (8) on a :

$$bMe_v = \frac{K_0}{b}e_d \quad (9)$$

et en posant
$$K_0 = K - b^2M \quad (10)$$

on obtient
$$\frac{b^2M}{K} = \frac{e_d}{e_v + e_d} \quad (11)$$

on pose
$$a = \frac{e_d}{e_v + e_d} \quad (12)$$

En se basant sur les équations précédentes, on obtient le système d'équations suivant :

$$\frac{1}{S} = \frac{K_0M}{K} \quad (13a)$$

$$b^2 = KSa(1-a) \quad (13b)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{(b-\phi)(1-b)}{K_0} \quad (13c)$$

C'est un système de 3 équations à 3 inconnues qui sont : b , M et S .

b est donc solution de l'équation du second degré :

$$\frac{b^2}{a} - b(1+\phi) + \phi \left(1 - \frac{K_0}{K_{fl}} \right) = 0$$

A partir du système d'équation (13), on en déduit la valeur de M et S .

ANNEXE 4

Résultats de mesures de la perméabilité effectuées sur l'éprouvette E3 :

		Pression de confinement (MPa)	Type de mesure	Perméabilité (m ²)
Cycle 0	3	3	1	< 10 ⁻²⁰
	4	78	2	< 10 ⁻²⁰
Cycle 1	1	3	1	< 10 ⁻²⁰
	2	73	2	< 10 ⁻²⁰
	3	3	2	< 10 ⁻²⁰
	4	73	2	< 10 ⁻²⁰
Cycle 2	1	3	1	< 10 ⁻²⁰
	2	78	2	< 10 ⁻²⁰
	3	3	/	/
	4	70	2	< 10 ⁻²⁰
Cycle 3	1	3	1 - 2	< 10 ⁻²⁰
	2	78	/	/
	3	3	/	/
	4	78	2	< 10 ⁻²⁰
Cycle 4	1	3	1	< 10 ⁻²⁰

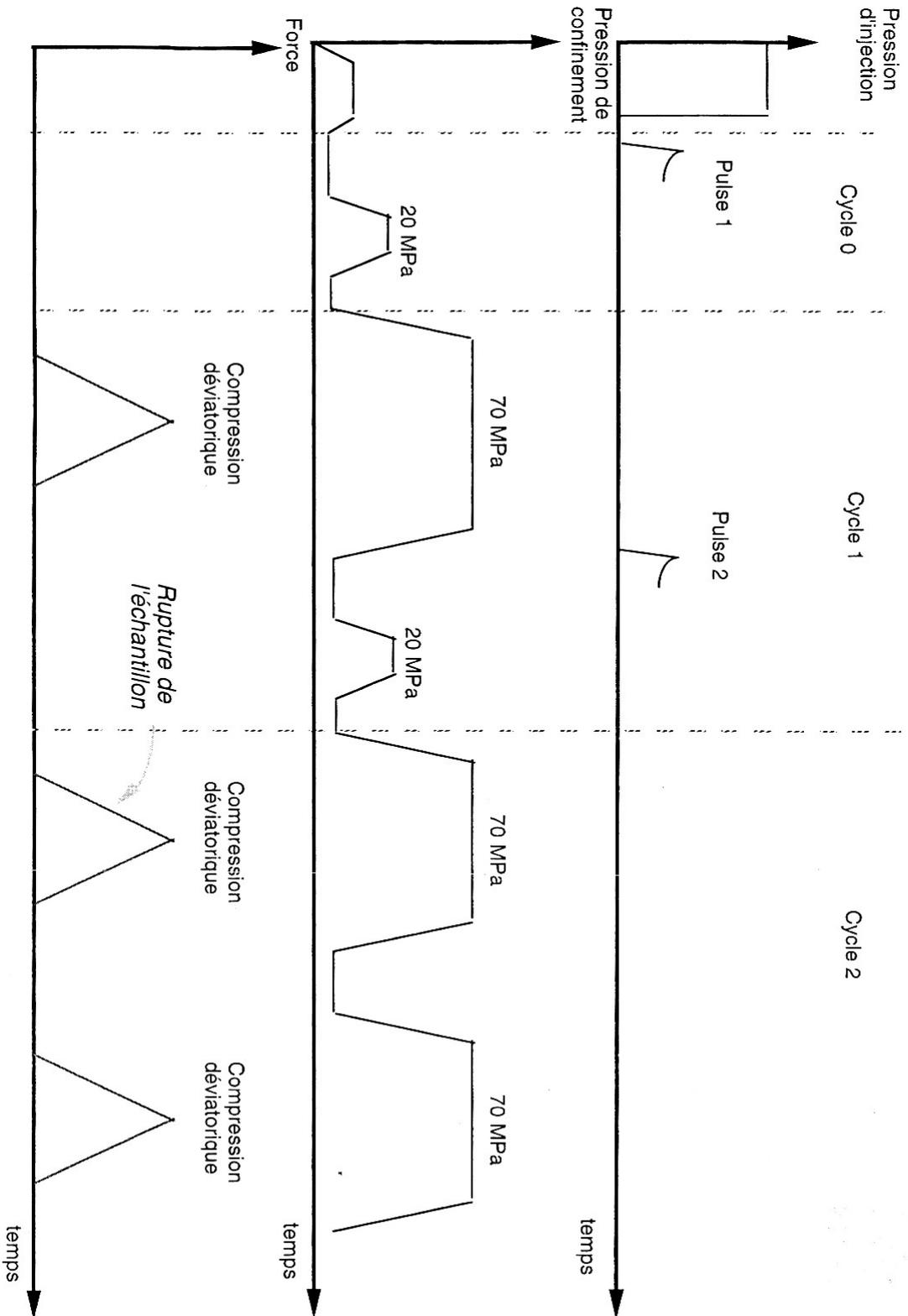
ANNEXE 5

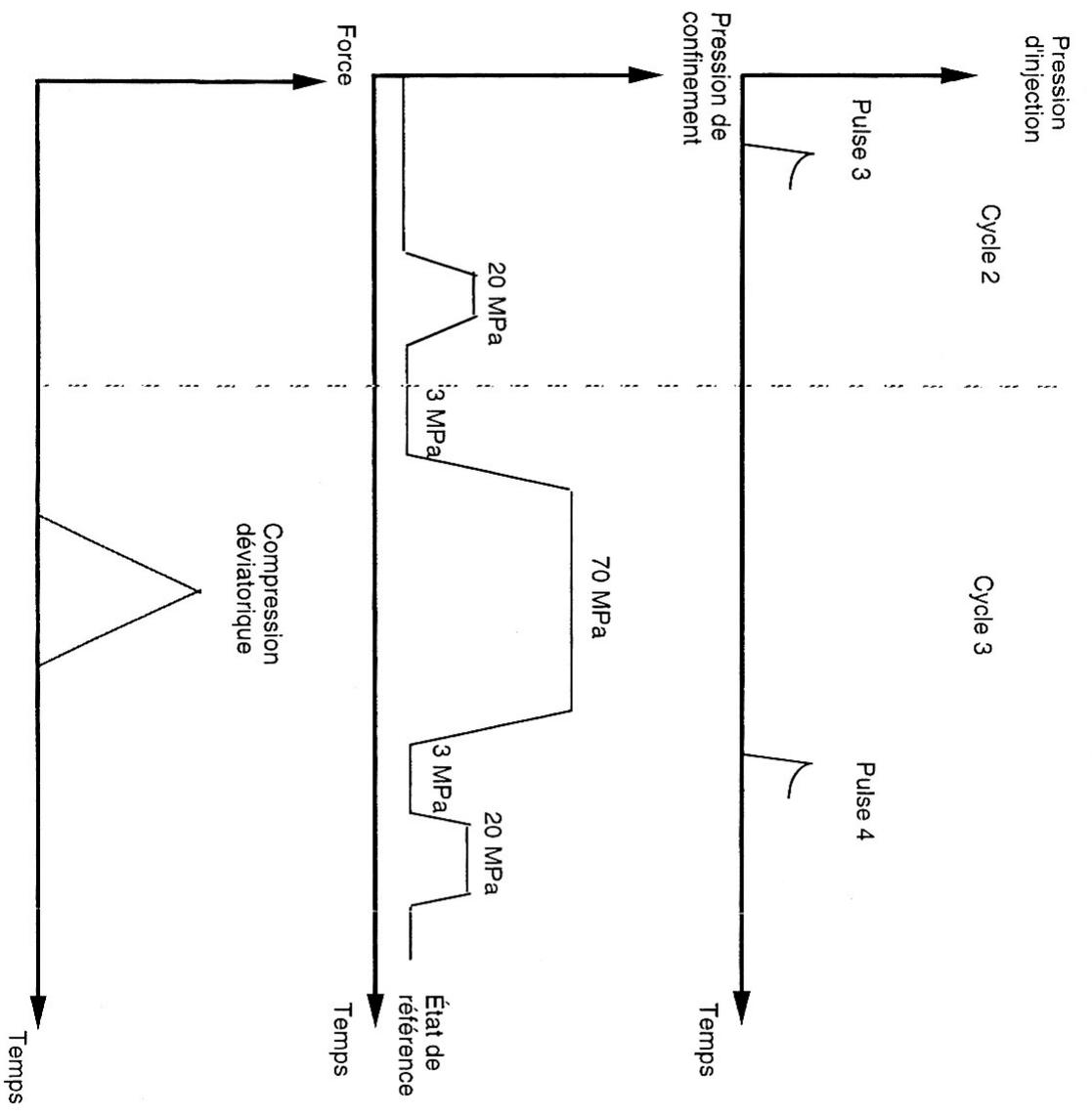
Des photos montrant une fracture fragile de l'éprouvette E4 sous sollicitations mécaniques.
On remarque que cette fracture ne passe pas par les surfaces d'injection.

Eprouvette E4



ANNEXE 6





ANNEXE 7

1) Mesure de la densité de la craie :

Masse de la cellule + échantillon (g)	Masse de la cellule (g)	P ₁ (MPa)	P ₂ (MPa)	V _p (cm ³)	Densité des grains (g/cm ³)
14,92	4,22	0,12	0,042	4,07	2,63

Tableau 1 : Mesure de la densité des grains

Densité des grains = Poids de l'échantillon/V_p

$$V_p = V_c - V_r \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right)$$

P₁ : pression de la cellule

P₂ : pression (cellule + volume de référence)

V_c : volume de la cellule, V_c = 29,944 cm³

V_r : volume de référence, V_r = 13,963 cm³

ANNEXE 8

Calcul de la porosité :

On note ϕ la porosité :

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

V_v : volume des vides,

V : volume totale de l'éprouvette,

Pour une éprouvette cylindrique : diamètre = 60 mm

Hauteur = 120 mm

$$V = 339,3 \text{ cm}^3$$

Pour le volume des vides : $V_v = V - V_s$ V_s : volume du solide.

$$V_s = \frac{W_s}{d_s}$$

W_s : poids de la structure solide sec, qui correspond au poids de l'éprouvette après séchage dans l'étuve pendant 48 heures à 120°C,

d_s : densité des grains solides,

$$W_s = 558 \text{ g}$$

$$d_s = 2,63 \text{ g/cm}^3$$

$$\phi = (339,3 - (558/2,63))/339,3$$

$$\phi = 0,375$$

$$\phi = 37,5 \%$$

Calcul de la teneur en eau :

On note w la teneur en eau : $w = \frac{W_w}{W_s}$

W_s : poids du solide, c'est le poids de l'éprouvette sèche : $W_s = 558 \text{ g}$

W_w : poids de l'eau contenue dans l'éprouvette après saturation :

$$W_w = W^{\text{saturé}} - W^{\text{sec}}$$

$W^{\text{saturé}}$: poids de l'éprouvette après saturation, $W^{\text{saturé}} = 671 \text{ g}$

W^{sec} : poids de l'éprouvette sèche après 48 heures à l'étuve, $W^{\text{sec}} = 558 \text{ g}$

$$W_w = 671 - 558 = 113 \text{ g}$$

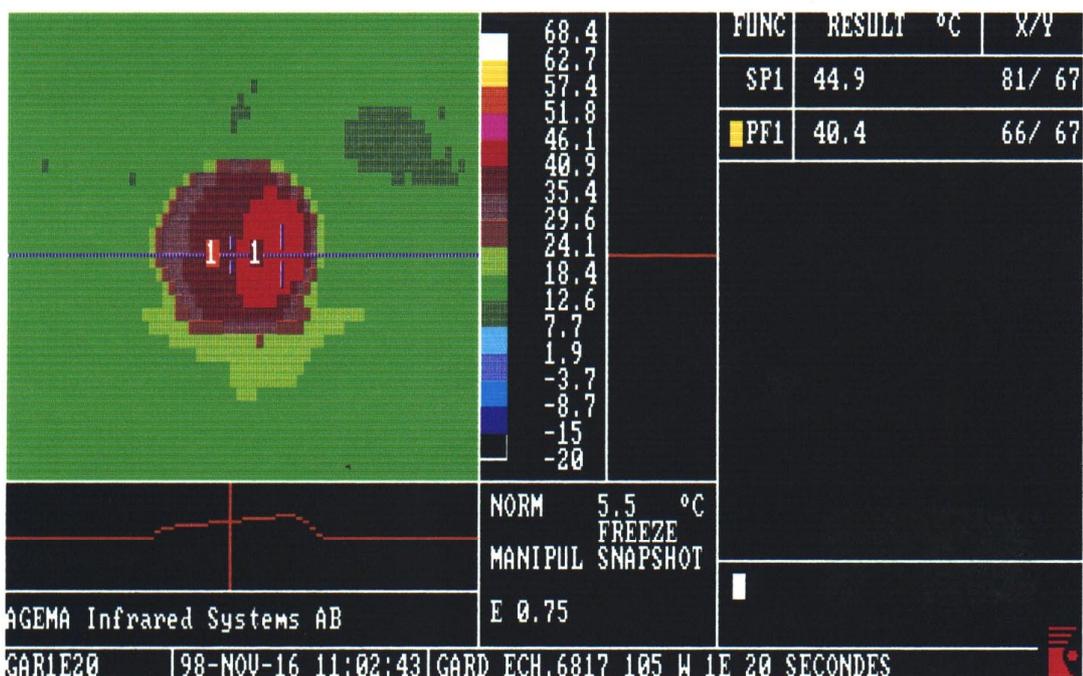
$$w = \frac{113}{558}$$

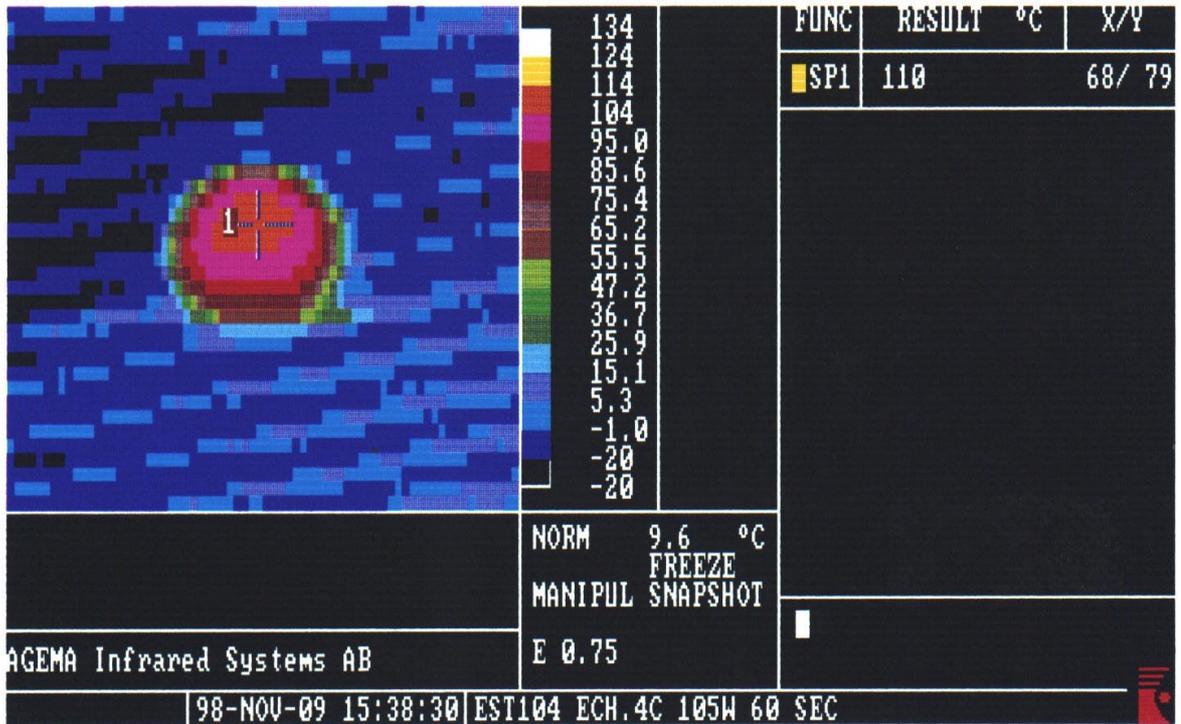
$$w = 0,20$$

$w = 20\%$

ANNEXE 9

On présente sur les figures ci-dessus un autre exemple de mesure de la température sur un échantillon de siltite du Gard, à l'état initial et après 20 et 60 secondes de chauffage dans le four à micro-ondes :





On présente aussi, dans les tableaux suivants, la variation des paramètres physiques des siltites du Gard après 20 et 60 secondes de chauffage dans un four à micro-ondes :

Numéro du cycle	$\frac{\text{Poids}}{\text{Poids initial}}$	$\frac{V_l}{V_{l_0}}$	V_l (m/s)	$\frac{\text{Volume}}{\text{Volume initial}}$
0	1	1	3193	1
1	0,9991	0,97	3097	1
2	0,9984	0,96	3065	1
3	0,9979	0,95	3033	1
4	0,9968	0,95	3033	1
5	0,9957	0,96	3065	1
6	0,9950	0,93	3193	1
Poids initial : 27g - Volume initial : 10362 mm ³ , V _l : vitesse des ondes longitudinales				

Variation des paramètres physiques des siltites du Gard en fonction du nombre de cycles d'échauffement à 20 secondes.

Numéro du cycle	$\frac{\text{Poids}}{\text{Poids initial}}$	$\frac{V_l}{V_{l_0}}$	V_l (m/s)	$\frac{\text{Volume}}{\text{Volume initial}}$
0	1	1	3165	1
1	0,9984	0,97	3083	1
2	0,9958	0,91	2895	1
3	0,9950	0,87	2760	1
4	0,9933	0,91	2895	0,9994
5	0,9920	0,90	2860	0,9994
6	0,9911	0,88	2793	0,9994
Poids initial : 27.128 g - Volume initial : 10639 mm ³ , V _l : vitesse des ondes longitudinales				

Variation des paramètres physiques des siltites du Gard en fonction du nombre de cycles d'échauffement à soixante secondes

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSEN M.A. (1995), Petroleum reseach in North Sea chalk, RF-Rogaland Reseach Monograph.

BARY B. (1996), Etude du couplage hydraulique-mécanique dans le béton endommagé, Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Superieure de Cachan, Spécialité : Génie civil, 156p.

BAUER C. (1998), Rhéologie et couplage thermo-hydro-mécanique des siltites du Gard, Rapport final ANDRA, B RP 0.G.3S 98-005/A.

BRACE W. F., WALSH J. B., FRANGOS W. T. (1968), Permeability of granite under high pressure, J. Geophys. Res., Vol 73, N)6, pp 2225-2236.

BRACE W. F., (1980) Permeability of cristalline and argillaceous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 17, p. 241-251.

BROWN K. (1994), Fluids in deforming sediments, in the geological deformation of sediments, A.Maltman editor, pp. 239-244.

CHEN M., BAI M. (1998), Modelling stress-dependent permeability for anisotropic fractured porous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol 35, n°8, pp 1113-1119.

CHRISTENSEN H.F. (1996) Rock mechanics and water injection-water flooding of chalk, In : Proc. 5th North Sea chalk Symp., Reims, France.

CHUNG R. SONG, GEORGE Z. VOYIADJIS, MEHMET T. TUMAY (1999), Determination of permeability of soils using the multiple piezo-element penetrometer, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 23, 1609-1629.

COLLINS R. E. (1952), Determination of transverse permeability of large core sample from petroleum reservoirs, J. of Appl. Phys., 23, n°6, june 1952, pp 681-684.

COMES G. (1973), La craie dans les sites d'ouvrages des productions d'électricité, Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées, Spécial V, Octobre 1973, pp 149-158.

COSENZA Ph. (1996), Sur les couplages entre comportement mécanique et processus de transfert de masse dans le sel gemme, Thèse de doctorat de l'université de Paris 6.

COSENZA Ph., GHOREYCHI M. (1999), Effects of very low permeability on the long term evolution of a storage cavern in rock salt, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36 (1999), pp 527-533.

COSTE F., BOUNENNI A. (1999), Couplage entre la perméabilité et l'endommagement dans les matériaux des sites du Gard de l'Est et de la Vienne, Rapport final, ANDRA, B RP 0 G3S 996004/A, G3S, Ecole polytechnique, Palaiseau.

DE MARSILY G. (1994), Hydrogéologie quantitative, Masson, Paris, 219 p.

DESSENNE J.L. (1971), Etude rhéologique et géologique de la craie, Thèse de Docteur-Ingénieur, Grenoble, 27 Janvier 1971.

DIENES J. K. (1982), Permeability, percolation and statistical crack mechanics, in Issues in Rock Mechanics, Goodman R.E. & Heuse F.E. (Eds), pp 86-94, American Institute of Mining, Metallurgical and petroleum Engineers, New York.

DJERAN-MAIGRE I. (1991), Etude des diffusions thermique et hydraulique dans une argile soumise à un champ de température, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, spécialité : Mécanique-Géotechnique, 346p.

DJERAN-MAIGRE I., TESSIER D., VELDE B., GRUNBERGER D., VASSEUR G. (1995), Evolution of microstructures and of microscopic properties of some clays during experimental compaction, submitted to marine and Petroleum Geology in 1995.

DOREMUS C. (1978), Les craies du Nord de la France, corrélations entre la lithostratigraphie, la microstructure et les propriétés mécaniques, Université des Sciences et Techniques de Lille, Doctorat de 3^{ème} cycle.

EBERHARDT E., STEAD D., STIMPSON B. (1999), Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (1999), pp 361-380.

EVANS B., FREDRICH J.T., WONG T.F. (1990), The brittle-ductile transition in rocks : Recent experimental and theoretical progress, *Geophysical Monograph* 56.

FOGED N., ANDERSEN M.A., (1996), Rock mechanics and water injection, In : Proc. 5th North Sea chalk Symp., Reims, France.

FRANCOIS D., PINEAU A., ZAOUI A. (1993), Mechanical behaviour of materials, volume I : Elasticity and plasticity, Kluwer academic publishers.

GAVIGLIO P., CHAYE D'ALBISSIN M., BERGERAT F., VANDYCKE S. (1993), Modifications de texture dans la craie au contact des failles normales : un exemple de graben dans le bassin de Mons (Belgique), *Bull. Soc. Géol. France*, 164, 4, pp 565-575.

GIRAUD A. (1993), Couplages Thermo-Hydro-Mécaniques dans les milieux poreux peu perméables : Application aux argiles profondes, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux, 269p.

GRAVILENKO P., GUEGUEN Y., (1889), Pressure dependence of permeability : a model for cracked rocks, *Geophys. Int. J.*, vol 98, pp 159-172.

GRAY D.H., BERGAMINI G. (1963), The effect of stress on permeability of sandstone cores, *Soc. Pet. Eng. J.*, June 1963, pp 95-100.

GRUNBERGER D. (1995), Etude expérimentale de l'évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction, thèse de doctorat, Université de Montpellier II.

GUEGUEN Y., PALCIAUSKAS V. (1992), Introduction à la physique des roches, Hermann, Paris, 299 p.

HARDY H. R. (1988), Acoustic emission during dissolution of salt, 2nd conf. On the Mechanical Behavior of Salt. Hanover, Germany. Sept. 24-28. Trans Tech Pub. Pp 159-177.

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

HATZOR Y.H., PALCHIK V. (1997), The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical flaw length in dolomites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, n° 5, pp 805-816.

HAZEBROUCK R. (1976), Propriétés mécaniques des craies : relations avec leurs microstructures, rôle de l'environnement, Doctorat du 3^{ème} cycle, Lille, France.

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

HORSEMAN S.T. (1984), Moisture content- A major uncertainty in storage cavity closure prediction, In Proc. 2nd Conference of the Mechanical Behavior of Salt, Hannover, Germany, Sept. 24-28, Trans Tech Publications, Clausthal.

HSIEH P.A., TRACY J.V., NEUZIL C.E., BREDEHOEFT J.D., SILLIMAN S.E. (1981), A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of tight rocks – I. Theory, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 18, pp 245-252.

HUNSCHE U. (1993), Failure behavior of rock salt around underground cavities, 7th Symposium on salt, Kakihana H. (Ed), Elsevier B., Amsterdam.

JACQUIN C. (1964), Corrélation entre la perméabilité et les caractéristiques géométriques du grès de Fontainebleau, Revue de l'Institut Français du Pétrole, pp 921-937, juillet-août 1964.

JONES M.E., BEDFORT J., CLAYTON C. (1984), On natural deformation mechanisms in the chalk, J. Geol. Soc. Lond., 141, pp 675-683.

KEANEY G.M.J., MEREDITH P.G., MURRELL S.A.F (1998), Laboratory study of permeability evolution in tight sandstone under non-hydrostatic stress conditions, SPE (Society of Petroleum Engineers)/ISRM Eurock'98, Trondheim, Norway, 8-10 July 1998.

KHEMISSA M. (1998), Mesure de la perméabilité des argiles sous contraintes et température, Revue Française de Géotechnique, N°82, 1^{er} trimestres 1998.

LAI C. (1971), Fluid flow through rock salt under various stress states, Michigan State University, Ph. D. Thesis.

LE GUEN C. (1991), Mesure de la perméabilité des roches très peu perméables et étude de son évolution sous sollicitations thermomécaniques, Thèse de l'Ecole Nationale des Mines de Paris.

LEMAITRE J., CHABOCHE J. L. (1988), Mécanique des matériaux solides, Bordas, Paris, 544 p.

LEMAITRE J., DUFAILY J. (1977), Modélisation et identification de l'endommagement des métaux, 3^e congrès français de mécanique, Grenoble.

LEPLAT J., (1973), Les cavités souterraines de la craie dans le nord de la France, Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées, Spécial V, Octobre 1973, pp 123-149.

LE RAVALEK M., GUEGUEN Y. (1994), Permeability models for heated saturated igneous rocks, J. Geophys. Res., vol 99, pp 24,251-24,261.

LE ROUEIL S., LERAT P., HIGHT D.W., POWELL J.J.M. (1992), Hydraulic conductivity of a recent estuarine silty clay at Bothkennar, *Géotechnique*, vol 42, n° 2, pp 275-288.

LE ROUX A. (1973), Texture et comportement des craies, *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, Spécial V, Octobre 1973, pp 49-53.

LE ROUX A. (1972), Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture, *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 61, Sept.-Oct. 1972, pp 155-178.

LITTLE J.A., MUIR WOOD D., PAUL M.A., BOUAZZA A. (1992), Some laboratory measurements of permeability of Bothkennar clay in relation to soil fabric, *Géotechnique*, vol 42, n° 2, pp 355-361.

MARTIN C.D., CHANDLER N.A. (1994), The progressive fracture of lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol 31, n°6, pp 643-659.

MASSON M. (1971), Péetrophysique de la craie, *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, Spécial V, Octobre 1973, pp 23-47.

MAURY V. (1987), Observation, recherches et résultats récents sur les mécanismes de ruptures autour des galeries isolées, *Rapport de la commission S.I.M.R. sur les mécanismes de ruptures autour d'ouvrages souterrains*, pp 1119-1128.

MAZARS J., PIJAUDIER-CABOT G. (1989), Continuum damage theory-Application to concrete, *J. Engin. Mech.*, vol. 115, n° 2, pp 345-365.

NAGARAJ T. S., PANDIAN N.S., NARASIMHA RAJU P.S.R. (1994), Stress-state – permeability relations for over consolidated clays, *Géotechnique* 44, N°2, pp 349-352.

NEUZIL C.E., COOLEY C., SILLIMAN S.E., BREDEHOEFT J.D., HSIEH P.A. (1981), A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of tight rocks – II. Application, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol 18, pp 253-258.

NEWMAN G.H. (1983), The effect of water chemistry on the laboratory compression and permeability characteristics of some North Sea Chalk, *Journal of Petroleum Technologie*, 35, pp 976-980.

NOUAILHAS D. (1981), Etude expérimentale de l'endommagement de plasticité ductile anisotrope, *Colloques internationaux du CNRS, N° 319, Comportement Plastique des Solides Anisotropes*.

PANET M. (1973), Quelques remarques sur la stabilité des tunnels réalisés dans la craie, *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées, Spécial V, Octobre 1973*, pp 159-164.

OLSEN H.W., NICHOLS R.W., RICE T.L. (1985), Low gradient permeability measurements in triaxial system, *Géotechnique*, vol 35, n° 2, pp 145-157.

PAPAMICHOS E., BRIGNOLI M., SANTARELLI F.J. (1997), An experimental and theoretical study of partially saturated collapsible rock, *Mechanics of cohesive-frictional materials*, vol 2, pp 251-278.

PEACH J.C. (1991), Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks, Thèse de l'université d'Utrecht, *Geologica Ultraiectina*, N° 77, Hollande, ISBN 0072-, 1026 n°77.

PERAMI R., CALEFFI C., ESPAGNE M., PRINCE W. (1993), Fluage et microfissuration du sel dans les stockages souterrains, *Geoconfine 93*, Arnould, Barrès & Come (eds), 1993 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 330 2, pp 99-104.

PLISCHKE B. (1996), Some aspects of numerical simulation of water induced chalk compaction, In : *Proc. 5th North Sea chalk Symp.*, Reims, France.

REYNOLDS T. D., GLOYNA E. F. (1961), Permeability measurements of rock salt, *J. Geophys. Res.*, vol 11, pp 3913-3921.

RISNES R., KRISTENSEN C.N. (1996), Triaxial testing on high porosity chalk with different saturating fluids, In : *Proc. 5th North Sea chalk Symp.*, Reims, France.

RISNES R., FLAAGENG O. (1999), Mechanical properties of chalk with emphasis on chalk-fluid interactions and micromechanical aspects, Oil & Gas Science and technologie-Rev. IFP, vol 54, n°6, pp 751-758.

ROUSSET G., GIRAUD A. (1996), Stockage de déchets radioactifs dans l'argile, Revue française de géotechnique, n° 74, 1^{er} trimestre 1996, pp 19-30.

SCHRODER C., SHAO J.F. (1996), Plastic deformation and capillary effects in chalks, In : Proc. 5th North Sea chalk Symp., Reims, France.

SHAH K.R., LABUZ J.F. (1995), Damage mechanisms in stressed rock from acoustic emission, Journal of Geophysical Research, vol 100, n°B8, pp 15,527-15,539.

SHAO J.F. (1987), Etude du comportement d'une craie blanche très poreuse et modélisation, Université de Lille Flandre Artois, France, Doctorat de 3^{ème} cycle.

SHAO J.F., KONDO D., IKOGOU S. (1994), Stress-induced microcracking in rock and its influence on wellbore stability analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 31, n° 2, pp 149-155.

SPIERS C.J., PEACH C.J. (1989), Development of dilatancy and permeability in rocks during creep : Experiments on rock salt as rock analog, Int. Geol. Congr., 1989-07-09 Washington DC.

STORMONT J.C., DAEMEN J.J.K. (1992), Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract. Vol.29, N°4, pp325-342.

STORMONT J.C., DAEMEN J.J.K., DESAI C.S. (1992), Prediction of dilation and permeability changes in rock salt, Int. J. for num.and anal.meth. in geomech, vol 16, pp 545-569.

STORMONT J.C., HOWARD C.L., DAEMEN J.J.K. (1991) Changes in rock salt permeability due to nearby excavation, *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science*, Roegiers (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 194X, pp 899-907.

SU K. (1997), Influence de la température sur le comportement hydraulique du granite de la Vienne, rapport ANDRA : BRPO G3S 97-005/A

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.

SUTHERLAND H. J., CAVE S. P. (1980), Argon gas permeability of new mexico rock salt under hydrostatic compression, *Int. J. Rock Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 17, pp 281-288.

SUZUKI K., ODA M., YAMAZAKI M., KUWAHARA T. (1998), Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol 35, n° 7, pp 907-921.

THOREL L., GHOREYCHI M., (1996), Plasticité et endommagement du sel gemme, *Revue Française de Géotechnique*, N° 77, 4^e trimestre.

THOREL L. (1994), Plasticité et endommagement des roches ductiles –Application au sel gemme, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, spécialité : Géotechnique, 274p.

VINCKE O., LONGUEMARE P., BOUTECA M., DEFLANDRE J.P. (1998), Investigation of the poromechanical behavior of shales in the elastic domain, *Society of Petroleum Engineers, Eurock'98, Trondheim, Norway, 9-10 July 1998.* (SPE/ISRM 47589).

YEO I.W., DE FREITAS M.H., ZIMMERMAN R.W. (1998), Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 35, n°8, pp 1051-1070.

ZHANG X., POWRIE W., HARKNESS R., WANG S. (1999), Estimation of permeability for the rock mass around the shiplocks of the three gorges project, China, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol 36, pp 381-397.