50 376
1995
371

THESE

présentée par

Abdelhamid HAIED

pour obtenir le titre de

DOCTEUR

de l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité

Génie Civil

Sujet

Etude expérimentale de la rupture en mode localisé dans un grès

UNIVERSITE DES Sc. et Techn. LILLE
BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE

Soutenue le 21 Décembre 1995 devant la commission d'examen composée de Messieurs

Président :	**J. DESRUES**	Directeur de recherche CNRS, Grenoble
Rapporteurs :	**J. M. TORRENTI**	C. E. A., Saclay
	P. Y. HICHER	Maître de Conférence à l'Ecole Centrale de Paris
Examinateurs :	**Y. BERTAUD**	Directeur de recherche CNRS, Paris
	J. SULEM	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
	J. P. HENRY	Professeur à l'E.U.D.I.L., Université de Lille
	D. KONDO	Maître de Conférence à l'E.U.D.I.L., Université de Lille

AVANT PROPOS

La réalisation du travail présenté dans ce mémoire a été menée au sein du Laboratoire de Mécanique de Lille, au Département " Mécanique des Matériaux Fragiles et des Structures " à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur **Jean Pierre HENRY**, Professeur à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille de m'avoir accueilli dans son équipe, d'avoir assuré la direction de ce travail et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **Djimedo KONDO**, Maître de Conférence à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille d'avoir suivi le déroulement de ce travail et dont la passion pour le sujet, les remarques et la disponibilité ont été d'un grand soutien dans l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Monsieur **Jacques DESRUES**, Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique au laboratoire 3S de l'Institut de Mécanique de Grenoble, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Je remercie vivement Monsieur **Jean Michel TORRENTI** du Commissariat de l'Energie Atomique et Monsieur **Pierre Yves HICHER**, Professeur à l'Ecole Centrale de Paris d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Mes remerciements à Monsieur **Yves BERTAUD**, Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique au Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil de Paris, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail au sein du Gréco Géomatériaux d'une part, et pour avoir accepté de faire partie du jury d'autre part.

Mes remerciements vont également à Monsieur **Jean SULEM**, Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées d'avoir bien voulu examiner ce travail et accepter de faire partie du jury.

J'exprime mon amitié et mes remerciements les plus sincères à Monsieur **Jean SECQ** a qui je dois de grandes améliorations techniques de par la mise à disposition de son savoir faire professionnel et la qualité de ces suggestions. Je tient également à préciser que c'est grâce à sa collaboration que les observations au Microscope Electronique à Balayage ont été réalisées. Qu'il trouve ici, l'expression de ma vive reconnaissance.

Je remercie également Monsieur **Jiunfu SHAO**, Professeur à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille qui n'a jamais manqué d'être à l'écoute pour formuler des conseils judicieux qui m'ont été très précieux.

Je tiens à remercier Monsieur **Malek SIBAI**, Ingénieurs de Recherche au Laboratoire de Mécanique de Lille dont les qualités personnelles et professionnelles installent un esprit de convivialité et une ambiance de travail amicale au sein du laboratoire.

Je ne saurais oublier Monsieur **Bruno HAUBREUX**, Technicien au Laboratoire de Mécanique de Lille pour son assistance technique et sa disponibilité empreinte d'humour et de gentillesse.

Je tiens par ailleurs à remercier l'ensemble du personnel du Laboratoire de Mécanique de Lille à travers son Directeur Monsieur **Guy CAIGNAERT**, et à souhaiter bonne continuation à mes chers collègues chercheurs.

Enfin, j'adresse une pensée pleine de gratitude et d'affection à mes parents et il m'est extrêmement difficile d'exprimer ici en peu de mots toute la reconnaissance qui leur est due. Que ce travail soit, un tant soit peu, à la hauteur de leur confiance.

J'associe également la réussite de ce travail au concours précieux de ma compagne **Isabelle Pennequin** pour l'encouragement et le soutien moral qu'elle m'a apporté tout au long de ce travail et durant lequel elle m'a offert les deux plus beaux présents : nos enfants **Sélim** (4 ans) et **Sofiane** (21 mois). Qu'elle sache ici combien je lui suis reconnaissant. Et que mes enfants me pardonnent le temps volé dans le sablier de leur vie, et je souhaite qu'en contre partie, ce travail puisse un jour représenter à leurs yeux un Exemple.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude expérimentale de la localisation des déformations en bandes de cisaillement dans un grès. Divers chemins de sollicitations, en conditions axisymétriques, ont permis de caractériser le comportement mécanique de ce matériau. Il s'agit d'une roche initialement isotrope, dilatante et susceptible à la microfissuration. Les essais cycliques ont permis de quantifier l'endommagement et la dégradation anisotrope du matériau sous chargement monotone ou répété. La procédure expérimentale mise en oeuvre pour la détection de la localisation consiste à déterminer la perte d'homogénéité des déformations par l'anisotropie de la dilatance. Un dispositif de mesure est mis au point. Le protocole expérimental est appliqué sur des échantillons prismatiques d'abord sans, puis avec une imperfection (petit trou circulaire). Les seuils de localisation en contraintes et en déformations, ainsi que les caractéristiques des bandes de localisation (orientations et épaisseurs) ont été déterminées pour l'ensemble des essais. L'imperfection a permis entre autre des corrélations substantielles, obtenues au moyen de mesures locales. L'influence due à la présence et à la taille de cette imperfection introduite a été étudiée tant sur la localisation que sur son implication dans les mécanismes de la rupture fragile. Dans le même esprit, l'effet de l'épaisseur des plaques rectangulaires, et de la forme géométrique des éprouvettes (cylindre - prisme) ont fait l'objet d'une étude parallèle, détaillée. L'examen visuel et microscopique (M.E.B.) des échantillons déformés, déchargés à des niveaux élevés de la contrainte déviatorique montre que l'interaction entre les fissures orientées parallèlement à l'axe de chargement et la distribution hétérogène des contraintes locales constituent le facteur principal qui contrôle la formation des bandes de localisation dans le grès soumis à l'essai de compression triaxiale.

Mots clés

Localisation des déformations; Grès; Rupture fragile; Dilatance; Bifurcation; Bandes de cisaillement; Endommagement; Comportement mécanique; Discontinuités; Hétérogénéités; Instabilité.

Abstract

This thesis concerns an experimental study of strain localization in a sandstone. Several stress paths, in axisymetric conditions, had allowed to characterize the mechanic behaviour. The studied sandstone is an isotropic and dilatant rock material, with a high microcracking susceptibility. Triaxial cyclic compression tests allowed to quantify the damage, and in particular to display an anisotropic stress induced damage in monotonic or repeated applied load. The experimental procedure used to detect the onset of strain localization consists to determine the loss of homogeneities by anisotropy of dilatancy. An apparatus of measure was tuned. The experimental sequence was applied on prismatic samples both without and with imperfection (little circular hole). The onsets of localization in term of stress and strains, as well as shear bands characteristics (orientations and thickness) had been determined for all tests. The imperfection permits among others substantial correlations, given by local measurements. The continuing influence of this imperfection and its size effects were studied both on the treshold and its involvement in the process of brittle failure. In the same view, both effect of plate thickness and their geometrical shape (cylindrical-prismatic) had affected a parallel detailed investigation. The visual and microscopic (SEM) examination on deformed specimens unloaded at high deviatoric stresses shown that the interaction between the axially oriented cracks, together with induced local stress inhomogeneities constitutes the main point which controls shear bands formation in sandstone specimens subjected to triaxial conditions.

Keywords

Strain Localization; Sandstone; Brittle failure; Dilatancy; Bifurcation; Shear band; Damage; Mechanic behaviour; Disconuities; Heterogeneities; Instability.

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1

I - Localisation des Déformations dans les Roches et Méthodes Expérimentales

Introduction 4
I- 1 : Microfissuration et comportement mécanique 4
I- 2 : Rupture en mode localisé 8
I-2- 1 : Mécanismes élémentaires de rupture 8
I-2- 2 : Quels modes de fissuration pour les bandes de cisaillement? 10
I-2- 3 : Formation et matérialisation des bandes de cisaillement 11
I- 3 : Théorie de la bifurcation et localisation des déformations 14
I-3- 1 : Formulation et équations de base.. 15
I-3- 2 : Application au cas de l'essai triaxial de révolution 18
I- 4 : Approches expérimentales de la localisation 20
I-4- 1 : Les méthodes directes 21
I-4-1- 1 : La méthode des lames minces 21
I-4-1- 2 : La méthode des répliques 22
I-4- 2 : Les méthodes quantitatives 24
I-4-2- 1 : Les vitesses d'onde élastiques 24
I-4-2- 2 : Localisation par émission acoustique 26
I-4- 3: Les méthodes de champ 29
I-4-3- 1 : La stéréophotogrammétrie 29
I-4-3- 2 : Granularité laser (Speckle) 31
I-4- 4: Localisation par mesures des déformations 32
I- 5 : Conclusions 35

II - Endommagement Mécanique et Rupture du Grès de Fontainebleau

Introduction 37
II- 1 : Matériau et éprouvettes 37
II-1- 1 : Choix du matériau 37
II-1- 2 : Préparation des éprouvettes et définitions géométriques 38

II- 2 : Dispositif expérimental 40
II-2- 1 : Matériel utilisé 40
II-2- 1 : Montage expérimental et conditions d'essais 41
II- 3 : Etude expérimentale du comportement mécanique de base 44
II-3- 1 : L'essai hydrostatique 44
II-3- 2: Essais de compression triaxiale monotone 46
II-3- 3 : Essais de compression avec cycles de chargement - déchargement 51
II- 4 : Evaluation expérimentale de l'endommagement anisotrope:Equivalence en énergie. 54
II-4- 1 : Equivalence en énergie, procédure expérimentale 54
II-4- 2 : Résultats et conclusions 56
II- 5 : Autres chemins de sollicitations 58
II-5- 1 : L'essai d'extension latérale 58
II-5- 2 : Les essais proportionnels 59
II- 6 : Analyse et observations sur les lignes de rupture 60
II- 7 : Conclusions 65

III - Analyse et Détection Expérimentale de la localisation en Compression Multiaxiale

Introduction 67
III- 1 : Tentatives de détection du seuil de localisation dans les conditions axisymétriques 68
III-1- 1 : Compression triaxiale monotone 69
III-1- 2 : Compression triaxiale cyclique 71
III-1- 3 : Chemins de sollicitations proportionnelles 73
III-1- 4 : Conclusions 74
III- 2 : Essais sur plaques rectangulaires 75
III-2- 1: Montage et procédures expérimentaux 76
III-2- 2 : Lignes de rupture 83
III-2- 3 : Analyse et interprétation des réponses mécaniques 88
III- 3 : Conclusions 95

IV - Localisation dans des Eprouvettes Contenant une Imperfection

Introduction 98
IV- 1 : Choix et lieu géométrique de l'imperfection 99
IV- 2 : Objectifs expérimentaux 100
IV- 3 : Lignes de ruptures 102
IV-4 : Résultats des mesures de déformations 106
IV-4- 1 : Comparaison avec les essais sur plaques non percées 106
IV-4- 2 : Les déformations locales 111
IV- 5 : Synthèse de quelques observations liées aux effets de la pression de confinement 116
IV-5- 1 : Les contraintes critiques 116
IV-5- 2 : Les déformations critiques 117
IV-5- 3 : Orientations des surfaces de rupture 118
IV-5- 4 : Le module d'écrouissage au seuil de localisation 122
IV- 6 : Effets de l'imperfection 125
IV-6- 1 : Lignes de rupture 125
IV-6- 2 : Analyse et interprétation des réponses mécaniques 126
IV - 7 : conclusions 131

V - Effets de Forme et Observations Microscopiques

Introduction 133
V- 1 : Effet de forme 133
V-1- 1 : Essais de compression uniaxiale 134
V-1- 2 : Essais de compression triaxiale 139
V-1- 3 : Conclusions 144
V- 2 : Observations visuelles et microscopiques 145
V-2- 1 : Observations visuelles 145
V-2- 1 : Observations au MEB 150
V-2-2 -2 : Observations générales 151
V-2-2 -2 : Mécanismes élémentaires 160
V-2- 3 : Conclusions 163

CONCLUSIONS 162

Références bibliographiques 166

ANNEXES

Annexe 1 : Comportement et Pression de confinement I

Annexe 2 : Comparaison de forme (cylindre- prisme) IV

Annexe 3 : Courbes γ - τ VI

Annexe 4 : Courbes $\varepsilon_v{}^p$ - γ^p XI

Annexe 5 : Tableaux synoptiques (plaques percées et épaisses) XVI

INTRODUCTION

Les problèmes d'instabilité de structure en milieu rocheux ont depuis longtemps été au centre des préoccupations des ingénieurs et exploitants en charges de ces structures. Les travaux d'investigations sur le sujet rapportent pour la plupart que les cas de ruine ou d'effondrement résultent de phénomènes de rupture par blocs ou écailles. Une observation plus fine laisse souvent apparaître une pseudo périodicité de ces zones qui suggère la nécessité d'une bonne description du processus de déformation. Ces ruptures qui s'initient souvent à l'intérieur du parement, présentent un caractère de fragilité avec pour corollaire une dilatance prononcée. Il s'agit d'un phénomène localisé qui met en cause soit une hétérogénéité du massif, soit une hétérogénéité du champ de contrainte.

Les lignes de rupture qui résultent de ces instabilités définissent une zone désignée par le nom de Bande de cisaillement mécanique par opposition à la bande de cisaillement naturelle (shear zone) que nous n'aborderons pas explicitement dans cette étude. Une déformation intense siège à l'intérieur de la zone étroite qu'elle définie. Les déformations observées dans les autres parties du massif (ou de l'échantillon de laboratoire) deviennent, par rapport aux déformations dans la bande, quasiment négligeables.

L'approche pragmatique qu'offre l'analyse des essais de laboratoire pour éventuellement la mise en évidence des mécanismes en jeu, devient dans ce contexte une nécessité incontournable. En règle générale, la démarche préalable à la réalisation ou à la poursuite de l'ouvrage nécessite cinq étapes :

(i) l'identification du matériau rencontré : identification géologique, géotechnique, éventuellement bibliographique ;

(ii) sa caractérisation mécanique au moyen d'essais conventionnels ;

(iii) l'élaboration selon les objectifs d'un modèle capable de décrire l'essentiel du comportement ;

(iv) la validation du modèle sur des chemins de sollicitations non conventionnels ;

(v) enfin l'étude de l'applicabilité du modèle sur l'ouvrage.

Les étapes de caractérisation et de modélisation du comportement ont fait l'objet d'importants travaux. La caractérisation s'est doté ces deux dernières décennies de moyens d'investigations de plus en plus sophistiqués (machines d'essai servo contrôlées, extensométrie, M.E.B., scanner, émission acoustique etc...). On a pu ainsi mettre en évidence dans le cas des roches et matériaux proches tels les bétons par exemple, le rôle capital joué par la microstructure dans les réponses aux sollicitations mécaniques.

Parallèlement, la modélisation et la prédiction de ces réponses ont fait des progrès considérables grâce notamment à l'essor des méthodes numériques telle la Méthode des éléments finis. Malgré ces avancées remarquables, les mécanismes dont résulte la rupture fragile ne sont

pas directement abordés, sont écartés ou contournés. En effet, la description de la rupture est souvent réduite à un critère macroscopique ; celui ci une fois atteint ou dépassé est supposé mener à la ruine ou à un effondrement local de l'ouvrage.

Parmi les théories, la mécanique de l'endommagement semble fournir un cadre d'étude unifié dans le processus de dégradation et l'évolution de cette dégradation du matériau soumis à des contraintes mécaniques croissantes ou répétées. L'étude de la localisation de la déformation en mécanique des roches s'inscrit dans le cadre de la théorie de la bifurcation. Basée sur la notion d'équilibre instable, la théorie de la bifurcation développée par Rudnucki et Rice (1975) et Rice (1976) parvient à situer cette transition du mode de déformation diffus au mode localisé dans une analyse théorique d'un mode particulier : la bande de cisaillement. Cette transition supposée se produire dans ce contexte de manière spontanée et irréversible, est décrite par le Point de Bifurcation.

L'objectif du travail expérimental présenté dans ce mémoire est double, on se propose d'établir :

- une approche qui permet de cerner et de mieux comprendre les phénomènes physiques en jeu, responsables ou impliqués dans les mécanismes de localisation qui mènent à la rupture fragile d'une roche.

- une banque de données expérimentales sur la localisation des déformations dans le grès de Fontainebleau soumis à l'essai de compression multiaxiale.

LE MEMOIRE COMPORTE CINQ CHAPITRES.

Le premier est consacré à une étude bibliographique qui analyse les mécanismes de déformations par microfissuration et l'implication de cette dernière dans la rupture en mode localisé dans les géomatériaux. Une formulation de la théorie de la bifurcation dans le cas quasi statique sera présenté et développé dans le cas particulier de l'essai de compression triaxiale de révolution. Les moyens et techniques d'investigation expérimentaux les plus pertinents en matière de détection et de suivi de bandes de localisation seront présentés et discutés.

Dans le deuxième chapitre, nous effectuons une caractérisation complète du comportement mécanique du grès de Fontainebleau. La dégradation du matériau sous sollicitation mécanique croissante est mise en évidence, l'évolution de cet endommagement progressif est quantifié à l'aide d'essais cycliques. Une attention particulière sera portée sur l'anisotropie de cette dégradation ainsi que sur les phénomènes de rupture observés.

Les essais spécifiques à l'étude de la localisation et la détection de l'instant où elle se produit sont abordés dans le chapitre 3. La méthodologie adoptée consiste à déterminer la perte d'homogénéité des déformations par anisotropie de la dilatance. Nous privilégions la simplicité de la procédure expérimentale qui nous permet de conclure. Un dispositif et un protocole expérimentaux ont été mis au point à cette fin. Les résultats sont présentés, commentés et analysés, et les caractéristiques des bandes de cisaillement (seuils, orientations et épaisseurs) sont donnés.

L'étude de la localisation est poursuivie, dans le chapitre 4, sur des éprouvettes contenant une imperfection. Il s'agit de plaques rectangulaires percées au centre d'un trou circulaire de faible diamètre. L'implication d'une hétérogénéité sur les lieux d'amorçage et son effet sur les conditions de localisation et les faciès de rupture seront étudiés. Des corrélations locales seront recherchées. L'effet de la taille du point de faiblesse introduit sera examiné. Les contraintes et les déformations critiques, ainsi que les orientations des bandes et les modules d'écrouissage au seuil de localisation feront l'objet d'une comparaison qualitative.

Le chapitre 5 traite dans un premier temps, des facteurs d'influence des paramètres géométriques des éprouvettes utilisées. Cette première partie concerne essentiellement l'effet de l'épaisseur des plaques rectangulaires utilisées dans l'étude développée dans les deux chapitres précédents (3 et 4). Le passage de l'éprouvette cylindrique à l'éprouvette prismatique sera considéré et discuté parallèlement à cette étude. La seconde partie de ce chapitre aborde l'étude des mécanismes élémentaires de fissuration. On tentera d'isoler le type et le mode de propagation de la microfissuration à l'origine des bandes de localisation. Le Microscope Electronique à Balayage sera mis à profit pour les observations.

CHAPITRE I

LOCALISATION DES DEFORMATIONS DANS LES ROCHES ET METHODES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION

Les discontinuités naturellement présentes, ou induites par les sollicitations mécaniques constituent l'élément déterminant dans le comportement fragile d'une roche. Le caractère fragile de la rupture, systématiquement précédé d'une microfissuration diffuse puis localisée dans le matériau, met l'accent sur la complexité des processus menant à la formation des surfaces de rupture. Celles ci, ne se forment pas instantanément, mais résultent d'un endommagement progressif de la microstructure. L'étude bibliographique à laquelle nous consacrons ce chapitre concerne la localisation des déformations dans les roches.

Dans un premier temps, une attention particulière sera portée sur la microfissuration et les mécanismes dont résultent les phénomènes de rupture observés dans l'éprouvette testée au laboratoire. La deuxième partie sera consacrée à l'approche théorique qui s'est développée ces trente dernières années et qui s'inscrit dans le cadre de la bifurcation. Nous décrirons et discuterons une formulation quasi statique, bien que la démarche soit globalement orientée sur l'aspect macroscopique. Dans la dernière partie de ce chapitre, on présentera les techniques d'investigation les plus performantes reconnues, pour leur efficacité dans l'étude de la localisation des déformations dans les géomatériaux.

I-1: MICROFISSURATION ET COMPORTEMENT MECANIQUE

Le développement récent des moyens d'essai mécaniques et de techniques d'investigations approfondies, ont permis d'améliorer de façon remarquable la caractérisation des géomatériaux. Pour ce type de matériau, la microstructure conditionne de beaucoup les propriétés mécaniques globales. Cependant, malgré son extrême simplicité dans les matériaux granulaires, la caractérisation à partir de la seule connaissance de la microstructure reste malgré de nombreuses tentatives un problème entièrement posé.

Depuis le début des années 70, les investigations visant la compréhension des mécanismes qui mènent à la rupture fragile d'une roche, ont fait appel à de puissants instruments optiques, et en particulier le Microscope Electronique à Balayage (M.E.B.). Son grossissement et sa haute résolution à trois dimensions ont permis des explorations de la microstructure qui établissent de manière claire l'importance du rôle joué par la microfissuration (voir à ce sujet les revues bibliographiques de Paterson (1978, pp.147-157) et de Kranz (1983)). Les descriptions détaillées de la microstructure endommagée à divers niveaux de la contrainte déviatorique, assorties de microphotographies peuvent être trouvées dans Sprunt et Brace (1974), Tapponnier et Brace (1976), Kranz (1979a, 1979b) et Wong (1982a).

Les facteurs physiques externes susceptibles de causer et d'accroître la fissuration des roches sont principalement de nature mécanique et thermique (Paterson, 1978 ; Bauer et Johnson, 1979 ; Kranz, 1983). Les observations de la structure de microfissures initialement préexistantes ont été rapportées le plus souvent dans les roches riches en quartz tels le granite et le quartzite. Dans ces roches, les microfissures visibles se trouvent principalement dans le quartz et ont une longueur approximativement égale ou légèrement inférieure à la taille d'un grain. Les fissures induites par la contrainte déviatorique peuvent être distinguées de celles de la roche vierge ou dans les roches préalablement soumises aux seules contraintes de température ou hydrostatique. Les différences sont évidentes dans leur morphologie, leurs orientations et densités (Kranz, 1983). La plupart des études microscopiques montrent que le type de microfissures (inter, intra ou transgranulaires) mécaniquement induites dans la roche, ainsi que leur nombre relatif dépend de la structure initiale (histoire géologique), de la minéralogie, du type de roche et de l'état de contrainte (histoire récente) ou chemins de sollicitations.

Une littérature abondante a permis de répondre à un grand nombre d'interrogations à propos de l'incidence de l'évolution du développement de la microfissuration sur le comportement fragile d'une roche. La plupart de ces observations ont été effectuées sur le granite (Peng et Johnson, 1972 ; Sprunt et Brace, 1974 ; Mosher et al., 1975 ; Tapponnier et Brace, 1976; Hadley, 1976 ; Kranz, 1979a, 1979b, 1980 ; Wong, 1982a). On dispose également de données microscopiques sur le quartzite (Hallbauer et al., 1973), sur le grès (Sangha et al., 1974), sur le calcaire (Olsson, 1974), sur le marbre (Nolen et Gordon, 1987), sur le sel (Lajtai et al., 1994), sur le béton (Bascoul et al., 1993), sur l'argile (Hicher et al., 1994) et sur la marne (Raynaud, 1992). Ces études ont été réalisées à divers points de la courbe contrainte déformation pré-rupture et ont concerné l'essai de compression uniaxiale, triaxiale, de fluage ou flexion trois points. En augmentant la contrainte mécanique principale majeure, leurs observations peuvent se résumer de la façon suivante (Figure 1.1):

Phase 1- A niveau de contrainte très faible: fermeture des pores et fissures préexistantes et en particulier celles qui font des angles relativement élevés avec la direction de la contrainte principale majeure.

Phase 2- A ce stade de déformation dite "élastique", les diverses méthodes utilisées pour l'étude de la microfissuration dans la roche ne suggèrent aucune manifestation directe liée à la présence de discontinuités mécaniquement induites. Il a cependant été mentionné par certains auteurs que durant cette phase, des glissement de fissures préexistantes peu inclinées par rapport à la contrainte principale majeure peuvent se produire comme le suggère Bieniawski (1967).

Phase 3- A un niveau de contrainte légèrement supérieur au seuil de dilatance qu'on situe généralement entre 30 et 40 % de la résistance à la rupture, on observe l'apparition de la première génération de microfissures mécaniquement induites. Elles s'amorcent à partir des pores, des frontières séparant les grains de composition minéralogique différente et aux extrémités des cavités ouvertes allongées préexistantes. Cette microfissuration orientée principalement dans la direction de la contrainte principale majeure, se propage sur une petite distance puis reste stable.

Phase 4- Aux environs de 50-55 % de la résistance à la rupture, on enregistre souvent une augmentation relativement importante de l'activité fissurale. On observe une remarquable augmentation du nombre et de la longueur de ces fissures récemment produites. On rapporte aussi l'apparition des premières fissures de frontières de grains et des fissures axiales transgranulaires. On recense également parmi cette nouvelle génération de fissures, des fissures qui s'amorcent sur les points de contacts entre grains de même composition minéralogique et des fissures intragranulaires, essentiellement situées le long des plans de clivage de certains cristaux.

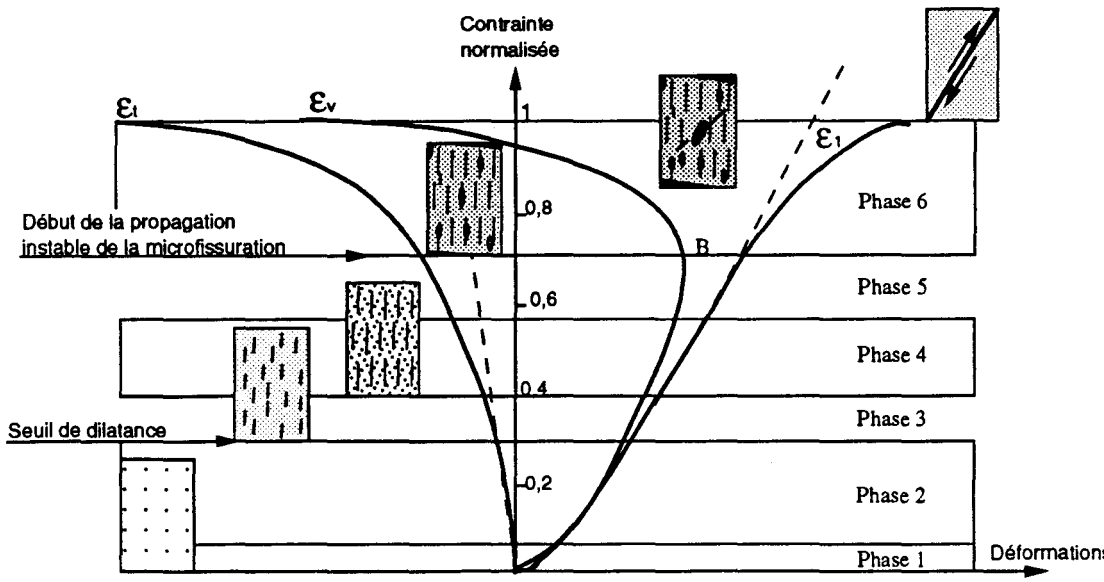


Figure 1.1 : Courbes contraintes déformations classiques dans le comportement fragile d'un échantillon de roche sollicité en compression.

Phase 5- Autour du point B, entre 70 et 90 % de la résistance à la rupture, il y a production de nouvelles fissures associées avec les "vieilles". On note l'apparition de quelques fissures transgranulaires, inclinées faisant en moyenne 30° par rapport à l'axe de chargement. Des régions dans l'éprouvette sont repérées comme des sites à densité de fissuration élevée à l'intérieur desquelles on distingue parfois des grains fort endommagés.

Phase 6- Entre le point B et le pic, la densité moyenne de fissure augmente considérablement. La majorité des frontières de grains sont fissurées. Au delà d'un seuil, on observe que l'une des zones à densité de fissuration élevée se met à se développer de manière plus ou moins rapide, selon que la contrainte soit maintenue constante (fluage) ou croissante et monotone. Puis apparaît des fissures supplémentaires qui se développent à partir des extrémités des fissures qui délimitent cette zone. Une rapide coalescence de ces sites à densité de fissuration élevée mène à la formation de la surface de rupture. Au pic, on observe plusieurs régions de fissuration intergranulaire intense qui se déploient sur 3 ou 4 grains et faisant approximativement 30° avec l'axe de chargement. A deux, trois grains de cette bande, les microstructures restent qualitativement similaires à celles observées durant le phase 5. De sorte que la partie post pic correspond à l'endommagement progressif de la zone de déformation localisée donnant naissance dans le cas de l'essai triaxial au traditionnel plan de cisaillement.

Ainsi, l'application d'un champ de contraintes déviatoriques relativement élevées, sur les frontières d'un échantillon de roche résulte, à l'échelle microscopique, en un système très complexe de contrainte lequel affecte énormément l'amorçage, les chemins de propagation, la répartition et la densité de fissures. Les microfissures peuvent s'ouvrir, se fermer, croître ou s'arrêter de se développer en réponse à des contraintes locales. Même si les conditions de chargement sont parfaites, la distribution spatiale du champ de contrainte est hétérogène et semble être à l'origine du caractère fragile du comportement et de la rupture. Une cartographie qui préciserait la répartition géométrique et le lieu de ces concentrations de contraintes et leurs amplitudes relatives, en fonction de l'état de contrainte ou du chemin de sollicitation pourrait indirectement fournir des informations capitales sur la nature des interactions et leurs propriétés (intensités et directions). Toutefois, on s'accorde à situer les contraintes locales les plus élevées sur les points et les lignes de contact des frontières de grains, aux voisinages très proche des frontières de grains, en bout de fissures, autour des cavités intracristallines, des pores et des hétérogénéités préexistantes. Le signe et l'amplitude de ces contraintes dépendent principalement de l'orientation et de la géométrie des micro cavités et bien entendu des propriétés mécaniques du milieu. Pour ce qui est des microfissures associées avec les pores et les cavités intracristallines une illustration en est faite dans l'étude de Kranz (1979b), de Wong (1982a) et de Sammis et Ashby (1986). Dans le but d'une meilleure compréhension du rôle joué par ces cavités naturellement présentes dans la roche, l'étude réalisée par Jaeger et Cook (1976) a porté sur la

distribution bidimensionnelle des contraintes dans un milieu élastique autour d'une cavité circulaire (pp. 249-252) et elliptique (pp. 266-277). S'agissant du rôle des interactions entre micro défauts, une analyse théorique a été réalisée par Dey et Wang (1981) et à plus grande échelle, des solutions analytiques confrontées à des données expérimentales ont été proposées par Horii et Nemat-Nasser (1985) et Ashby et Hallam (1986).

Précisons aussi que la pression hydrostatique stabilise les fissures et semble inhiber leurs croissance. Cependant, le nombre et la taille moyenne des microfissures mécaniquement induites sont très importants dans la roche déformée à hautes pressions de confinement. En fait, dans l'essai triaxial, même si la pression de confinement semble stabiliser les fissures et s'opposer à leur développement, elle favorise en revanche les interactions entre défauts. Cette influence est mise en évidence dans le modèle explicatif de Horii et Nemat-Nasser (1985) qui montrent que l'augmentation de la pression latérale fait que les fissures émanants des extrémités des imperfections acquièrent très rapidement une configuration instable.

De manière générale, l'étude bibliographique sur les mécanismes élémentaires met en évidence le rôle central de la microfissuration même si quantitativement celle-ci reste encore matière à discussion. Un grand nombre de techniques et méthodes expérimentales ont été mises au point ces trente dernières années en vue de quantifier la microfissuration par la dilatance ou d'autres manifestations macroscopiques. Certains ont essayé, lorsque la sensibilité et la mise en œuvre de la technique employée le permettent (voir § I-4), de caractériser la distribution des microfissures dans l'éprouvette et, l'évolution de cette distribution tout au long de l'essai. Cependant, si les configurations et mécanismes de fissuration des roches, définies de manière précise, sont encore sujet à de nombreuses controverses, la corrélation entre le comportement fragile et le degré de l'intensité de fissuration diffuse, puis localisée paraît mieux acceptée.

I-2: RUPTURE EN MODE LOCALISE

I-2-1: MECANISMES ELEMENTAIRES DE RUPTURE

Les études et observations réalisées par plusieurs auteurs établissent clairement que la rupture fragile résulte de processus associés à une localisation spatiale de la microfissuration. Nous avons déjà souligné que lorsque la charge augmente, le développement de la microfissuration s'accélère ; apparaissent alors des régions isolées dans l'éprouvette, où la densité de microfissures devient relativement élevée. Tandis que certains réseaux de fissures commencent à dominer, d'autres cessent de se développer. Et l'évolution de la charge axiale entraîne non seulement un agrandissement des dimensions de ces réseaux, mais aussi une continuelle augmentation de la densité de fissure à l'intérieur de ces réseaux. A une distance

équivalente à la taille de quelques grains, la densité de fissuration diminue considérablement (e.g. Wong, 1982a; Ord et al., 1991). Les microfissures gardent une distribution spatiale à peu près homogène dans tout le reste de l'échantillon et leur densité diminue lorsqu'on s'approche des frontières de l'éprouvette (Peng et Johnson, 1972). Ceci va dans le sens où expérimentalement, dans l'essai triaxial, on observe que le cisaillement macroscopique commence à se développer systématiquement au centre de l'éprouvette. Le fait que la localisation débute dans un volume situé au centre de l'éprouvette pour une roche homogène dans les essais de compression a été plusieurs fois observé (e.g. Peng et Johnson, 1972; Hallbauer et al., 1973) et confirmé par l'émission acoustique (e.g. Scholz, 1968; Lockner et Byerlee, 1992).

A un niveau de contrainte relativement élevé, apparaît alors de manière plus ou moins soudaine une zone très fine, de faible longueur, où la densité de fissures est très élevée. Sur le long de la frontière de cette zone, on peut observer une altération importante (gouge) qui semble produite par des déplacements substantiels qu'on attribue généralement à de la dilatance locale. L'examen au M.E.B. de cette zone, réalisé par Wong (1982a) montre qu'elle est le siège d'une fissuration intense. En général, la zone localisée contient un nombre considérable de fissures (figure 1.2) de toute nature, enchevêtrées, et, pour la plupart coplanaires et faisant parfois des angles allant de 15 à 45° de l'axe de chargement. Un déplacement substantiel le long des fissures fort inclinées indique que les fissures à ce stade sont des fissures de cisaillement. Ces zones sont interrompues par des fissures axiales isolées ou en réseau et semblent indiquer que la bande de cisaillement se matérialise par la combinaison des deux principaux modes de fissuration.

Figure 1.2 : Observation au M.E.B. par la méthode des lames minces, d'une zone de coalescence menant à la formation de la bande de cisaillement, rapportée par Wong (1982a, 1982b). L'échantillon (granite) a préalablement été soumis à l'essai de compression triaxial (Pc=250MPa) et à une température constante de 150°C dans la phase radoucissante (post pic). La direction de la contrainte principale majeure est verticale.

I-2-2 : QUELS MODES DE FISSURATION POUR LES BANDES DE CISAILLEMENT?

La connaissance de la dimension et de la densité de fissuration a de l'importance car ce sont souvent les discontinuités les plus grandes qui conditionnent la rupture. Mais l'orientation des fissures par rapport à la direction de la contrainte principale majeure joue un rôle déterminant, si on se rapporte aux travaux de Brace et al. (1966). Signalons aussi qu'en mécanique de la rupture, les travaux de Henry et al. (1977) ont montré que les facteurs d'intensité de contrainte dépendent essentiellement de l'orientation de la fissure. Les fissures axiales (mode I) et les fissures de cisaillement (mode II) jouent un rôle principal dans la phase finale de la formation de la bande de cisaillement.

Des observations de la roche déformée dans la phase pré rupture indiquent que le plus grand nombre de fissures mécaniquement induites apparaissent en mode d'extension (mode I) (Wawersik et Brace, 1971; Peng et Johnson, 1972; Dunn et al., 1973; Hallbauer et al., 1973; Bombolakis, 1973; Olsson et Peng, 1976; Tapponnier et Brace, 1976; Kranz, 1979a; Wong, 1982a, 1982b; Lajtai et al., 1994), avec parfois un léger mouvement de glissement (cisaillement) sur les lèvres de fissures (Tapponnier et Brace, 1976; Wong, 1982a).

Dans la région post pic, Wawersik et Brace (1971) observaient que les fissures de cisaillement constituent le mode dominant et qu'elles s'étendent dans leur propre direction. Sur la même roche, au même stade de déformation, les observations au M.E.B. indiquent que la microfissuration reste principalement axiale (Wong, 1982a). Ces divergences remettent en cause non seulement les conditions particulières d'essai mais aussi les techniques d'investigation employées (lames minces).

Outre le glissement des lèvres des fissures subaxiales, les fissures dites de cisaillements auxquelles on attribue l'hystérésis de dilatance ont été rarement identifiés avant le pic, probablement à cause de leurs petites tailles (Tapponnier et Brace, 1976) ou parce qu'elles sont étroitement serrées et naissent souvent sur un interface de grain (Kranz, 1983), ce qui rend leur détection au moyen d'observation directe pratiquement impossible. Cependant, les contraintes locales de cisaillement peuvent être émises d'une extrémité à l'autre des fissures orientées parallèlement à la contrainte compressive la plus importante. Ceci peut avoir lieu par exemple lorsqu'une fissure est légèrement inclinée par rapport à l'axe de chargement et n'est donc pas une fissure " vraiment axiale " (Tapponnier et Brace, 1976). En fait cette explication est la plus acceptée pour justifier l'existence des contraintes de cisaillement sur les fissures subaxiales.

I-2-3: FORMATION ET MATERIALISATION DES BANDES DE CISAILLEMENT

Bien que nous disposons de schématisations post localisation de l'évolution spatiale de la microfissuration, fournies par les observations microscopiques (e.g. Hallbauer et al., 1973) ou par l'émission acoustique (e.g. Lockner et Byerlee, 1992), ou encore à la stéréophotogrammétrie dans l'essai biaxial ou uniaxial (e.g. Torrenti et al., 1989; Torrenti et al., 1990; Benaija, 1992) sur le béton, les mécanismes précis dont résulte la matérialisation physique de la bande de cisaillement échappent encore à tout contrôle ou analyse claire et rigoureuse.

L'étude bibliographique des mécanismes en jeu, responsables ou impliqués dans la formation de la bande de cisaillement s'accorde à souligner le rôle (quantitatif) imposant de la microfissuration axiale. D'une façon caricaturale, la réponse au problème posé exige la description du ou des mécanismes de connexion (figure 1.3) dont résulterait la phase finale dans la formation de la bande de cisaillement. Les avis restent partagés, selon le matériau ou les chemins de sollicitation étudiés.

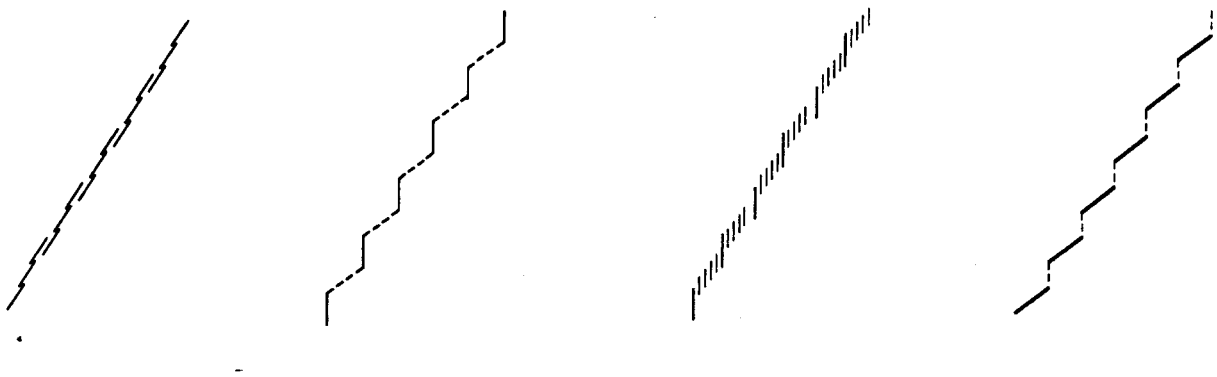


Figure 1.3 : Type de connexions élémentaires préconisées pour les mécanismes de base dans la formation des bandes de cisaillement.

Les études détaillées au M.E.B. indiquent que certaines configurations et orientations dans la disposition des fissures sont plus favorables à une coalescence plutôt qu'une autre et que cette coalescence n'a pas lieu lorsque les fissures voisines sont plus nombreuses que les fissures isolées de faibles longueurs (Kranz, 1983; Horii et Nemat-Nasser, 1985). Du point de vue théorique, la coalescence de deux fissures ou plus ne peut se faire que si, dans leurs chemins de propagations éventuelles, les fissures peuvent se croiser (Dey et Wang, 1981).

A l'issue de son analyse expérimentale (Kranz, 1979a, 1979b, 1980) et bibliographique (Kranz, 1983), Kranz suggère que la formation d'une bande de cisaillement s'accomplit par la connexion de zones localement denses en fissures, par les fissures de frontières de grains et par les fissures dont la disposition permet cette liaison. Les études expérimentales sur l'interaction de fissures taillées dans un matériau artificiel (Horii et Nemat-Nasser, 1985) montrent que certaines configurations de fissures en échelon (fig. 8 et 9 pp. 3311-3313) progressent vers les concentrations de contraintes de traction élevées qu'on s'accorde à situer sur les extrémités de fissures voisines plutôt que dans la direction des fissures isolées.

Sur le granite de Westerly, Wong (1982a) observait que les fissures axiales disposées dans le quartz et la microline sont espacées, formant des structures semblables à des colonnes élancées (figure 1.2). Les extrémités de certaines atteignent des configurations instables et vont coalescer et s'associer aux fissures de cisaillement ; il semble donc que les contraintes de traction au voisinage d'une extrémité de fissure de cisaillement sont plus importantes que celles proches des extrémités d'une fissure axiale. En revanche, sur un autre granite (Chelmsford), Peng et Johnson (1972) observaient que les microfissures transgranulaires dans les grains de feldspath sont souvent perpendiculaires à deux fissures axiales jumelles. Elles sont très courtes dans le grain et paraissent en gouge parallèles les unes aux autres et forment un réseau en échelon. Les interactions de telles fissures (axiales) semblent être responsables de la formation et de la disposition des fissures en échelon qui vont s'étendre sur la diagonale, à travers l'échantillon de roche. Ce point de vue est partagé par la majorité des auteurs qui tentent d'isoler le ou les mécanismes de base, responsables de la formation des surfaces de rupture. Les conclusions convergent généralement vers l'idée que la bande de cisaillement se développe à partir de la coalescence de la microfissuration qui se développe en mode de traction et non en mode de cisaillement. Ainsi, la coalescence de systèmes de fissures en extension (mode I) en échelon serait fondamentale à la formation aussi bien de la rupture en extension qu'en cisaillement.

La formation d'un plan de rupture incliné est un processus très complexe. Au vu des suggestions proposées par les différents auteurs, initialement, il y a une disposition en échelon de fissures de traction, courtes, qui se chevauchent. Dans l'essai triaxial à pression de confinement élevé, les fissures disposées en échelon sont de très petites tailles mais on observe une augmentation du chevauchement des unes par rapport aux autres (Lajtai et al. 1994). Les fissures individuelles sont parallèles à l'axe de chargement, mais le plan de rupture lui, est incliné par rapport à la contrainte principale. Peng et Johnson (1972) (voir aussi Ashby et Hallam, 1986), suggèrent qu'il est " raisonnable " (ou justifié) de supposer que, au moment où la rupture macroscopique a lieu, les fissures axiales parallèles délimitent de minuscules colonnes qu'ils assimilent à des poutres de sections rectangulaires. La flexion et la rupture latérale de ces colonnettes alignées côte à côte le long du plan de rupture aurait pour conséquence la

matérialisation de la bande de cisaillement. A plus petite échelle, les observations commentées de Wong (1982a), rejoignent ce point de vue. Sur le quartzite, Hallbauer et al. (1973) observaient au microscope optique dans la partie post pic que les fissures sont peu inclinées (moins de 10°) et qu'elles se propagent principalement en échelon. A une échelle encore plus petite, la propagation en échelon à partir d'un plan de clivage à l'autre a été rapportée par plusieurs auteurs (Kranz, 1979b; Dunning et al., 1980). A très grande échelle, les géologues ont également et à plusieurs reprises rapporté que les bandes de cisaillement naturelles résultent d'un arrangement de fissures en échelon (Ramsay, 1967; 1980; Pollard et al., 1982).

La compréhension de la manière avec laquelle les fissures axiales et les fissures inclinées interagissent peut être importante pour la formulation d'une théorie générale de la rupture fragile. Plusieurs modèles explicatifs ont émergés ces dernières années. Tantôt on ne considère qu'une fissure isolée inclinée (Horii et Nemat-Nasser, 1985), tantôt un jeu de fissures axiales en échelon (Peng et Johnson, 1972; Dey et Wang, 1981; Yijun et Aydin, 1991) ou encore un jeu de fissures inclinées (Horii et Nemat-Nasser, 1985; Kemeny et Cook, 1987). Les résultats sont pratiques parce qu'ils permettent de comprendre comment l'instabilité peut résulter d'un mécanisme individuel (élémentaire). Cependant, ces modèles se heurtent à des difficultés d'ordre phénoménologique qui font que certains aspects du comportement (dilatance, susceptibilité à la pression de confinement, domaine élastique...) ne sont pas toujours correctement décrits. Une modélisation complète du comportement d'une roche ne pourra pas se réduire à une caractérisation macroscopique de l'état microstructural. La difficulté majeure en ce qui concerne ces approches, tient au fait que le milieu macroscopique est un milieu continu alors que le milieu local est nécessairement discontinu. Cette différence de nature entre les deux échelles du milieu rend difficile les techniques d'homogénéisation. Et il semble que la tentative d'isoler un mécanisme dominant comme responsable de la rupture fragile n'est pas facile à établir pour une roche. L'obstacle provient essentiellement de l'ignorance de la distribution de contrainte dans l'éprouvette, qui fait que théoriquement, il n'est pas possible de prédire les orientations que vont adopter les fissures induites par la contrainte macroscopique.

Il est donc essentiel que les développements théoriques soient guidés par les observations détaillées des morphologies de fissures et éventuellement, que ces observations soient soutenues par des interprétations des phénomènes physiques dont ils résultent. Une modélisation réaliste du comportement d'une roche suppose aussi qu'il est nécessaire d'avoir au préalable une bonne connaissance de la nature des liaisons intergranulaires et de leurs importances.

Nous constatons à travers le bref résumé de cette étude bibliographique, la complexité du comportement fragile d'une roche, associé à la microfissuration, menant à la rupture par localisation des déformations. Résultant de l'amorçage, la prolifération, la propagation, l'interaction, puis leur coalescence au sein du matériau, la rupture fragile fait apparaître l'urgence qu'il y a à développer de nouvelles voies d'études capables de décrire le mécanisme qui permet le passage de la microfissuration diffuse à la rupture franche de la roche. Diverses théories se sont développées ces dernières années, on peut citer la mécanique de l'endommagement, la mécanique de la rupture, ou encore la théorie de la bifurcation. L'étude de la localisation des déformations en mécanique des roches s'inscrit dans le cadre de la théorie de la bifurcation.

L'idée selon laquelle la rupture fragile d'une roche puisse être prédite par la théorie de la bifurcation a intéressé de nombreux mécaniciens des roches et industriels confrontés aux instabilités d'ouvrages géotechniques et de structures profondes. Ceci est compréhensible, puisque cette théorie ne considère que le chemin de sollicitation, les conditions limites et surtout la loi de comportement du matériau.

I-3 : THEORIE DE LA BIFURCATION ET LOCALISATION DES DEFORMATIONS

Historiquement, l'approche et les bases théoriques qui incluent les phénomènes de localisation dans la théorie de la bifurcation remontent aux travaux d'Hadamard (1903). Ces travaux reposent sur l'analyse de la vitesse de propagation d'ondes d'accélération dans les solides élastiques linéaires. Plus tard, Thomas (1961), Hill (1962) et Mandel (1964) ont étendu les principes de cette approche dynamique aux matériaux à comportement non linéaire. Une formulation quasi statique de la théorie de la localisation des déformations, adaptée aux géomatériaux a été introduite en 1975 par Rudnicki et Rice (1975). La démarche suivie consiste à rechercher si, la description rhéologique de la loi de comportement permet d'obtenir une solution, compatible avec les conditions aux limites, et comportant un mode de déformation localisée en bande de cisaillement. Pour pallier aux effets de bord liés aux conditions limites et réduire la complexité des équations, le matériau est supposé homogène, infini et non visqueux. Les conditions limites ne jouant aucun rôle dans l'analyse (Rice, 1976), la loi de comportement à elle seule définit les conditions de localisation (seuil de localisation et orientation de la bande de cisaillement).

Nous rappelons brièvement la formulation (quasi statique) qui fait appel à des hypothèses générales où la loi rhéologique est non linéaire sous forme incrémentale. On tiendra compte également de l'éventuelle rotation des axes principaux. Nous insisterons, sur l'application de cette

théorie dans le cas de l'essai triaxial de révolution, sur les prédictions qu'elle peut fournir et d'autre part sur les investigations expérimentales qu'elle suscite ou exige.

I-3-1: FORMULATION ET EQUATIONS DE BASE:

Soit un échantillon homogène d'un matériau soumis à un champ uniforme de contrainte de Cauchy $[\sigma_{ij}]$. La présentation de Rice (1976) adoptait le tenseur de contrainte nominale (transposé du tenseur de contrainte de Piola-Kirchoff), mais l'un ou l'autre peut être utilisé dans la formulation statique (Rice et Rudnicki, 1980).

Soit $[d\sigma_{ij}]$ l'incrément de contrainte exprimé dans le repère (1,2,3) et soit une facette parallèle à la bande Σ (figure 1.4).

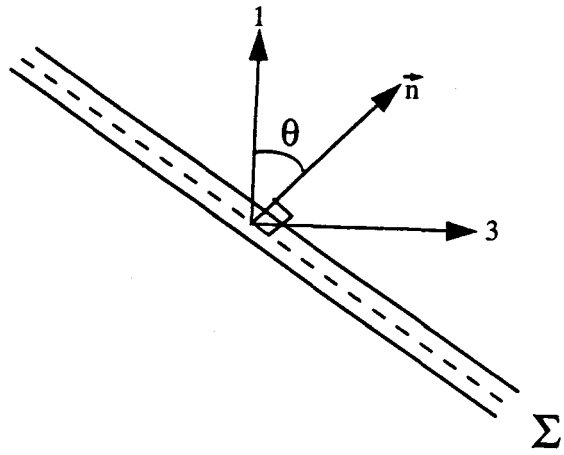


Figure 1.4: Schématisation théorique de la bande de cisaillement

La continuité de $[d\sigma_{ij}]$ sur cette facette lorsqu'elle traverse la bande se traduit par la relation de type statique:

$$n_i \, \Delta[d\sigma_{ij}] = 0 \qquad (1)$$

où les n_i sont les composantes dans (1,2,3) du vecteur unitaire normal à la bande.

Soient $\vec{V}$ le vecteur vitesse de déplacement du point courant et $\vec{g}$ un vecteur arbitraire quelconque fonction des coordonnées du point courant et tel que $\vec{g}=\vec{0}$ en dehors de la bande. Compte tenu de sa définition mécanique, la bande de cisaillement matérialise un lieu de discontinuité du gradient de la vitesse de déplacement. La continuité de $\vec{V}$ impose que la

discontinuité de grad$\vec{V}$ soit purement normale (Hadamard, 1903), c'est à dire vérifier l'équation de compatibilité d'Hadamard qui s'écrit :

$$\left[\text{grad}\vec{V}\right] = \vec{g} \otimes \vec{n} \qquad \text{soit} \qquad \left[V_{i,j}\right] = g_i n_j \tag{2}$$

où $V_{i,j}$ représente la dérivée de la composante V_i du vecteur déplacement par rapport à la variable d'espace X_j. La déformation ε associée à V est définie par $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(V_{i,j} + V_{j,i})$.

Soit dt l'incrément du temps et $\left[d\varepsilon_{ij}\right]$ l'incrément de déformation pure, le saut de déformation s'écrit:

$$\Delta\left[d\varepsilon_{kl}\right] = \frac{1}{2}(g_k n_l + g_l n_k)dt \tag{3}$$

Cette équation (3) de type cinématique, jointe à l'équation (1), représente la condition nécessaire pour l'existence d'une bande de cisaillement. Ce sont des conditions suffisantes si le vecteur $\vec{g}$ n'est pas nul; auquel cas, les déformations seraient partout homogènes puisque (2) deviendrait $\Delta\left[d\varepsilon_{ij}\right] = 0$.

La condition rhéologique donne la relation entre $\left[d\sigma_{ij}\right]$ à $\left[d\varepsilon_{ij}\right]$. Si nous nous limitons au domaine de comportement élasto - plastique du matériau, cette loi rhéologique s'écrit de manière générale:

$$D\sigma_{ij} = F_{ij}(d\varepsilon_{kl}) \tag{C}$$

Dans le cas d'une loi de comportement incrémentalement multilinéaire par zones (Rice, 1976) on a :

$$D\sigma_{ij} = L_{ijkl} : d\varepsilon_{kl} \tag{D}$$

ou L est le tenseur rhéologique vérifiant les symétries $L_{ijkl} = L_{jikl}$ et $L_{ijkl} = L_{ijlk}$.

Les équations (1) et (3) sont écrites dans les axes fixes (1,2,3). Or la relation (C) pour être "objective", doit tenir compte dans la différentiation de $d\sigma$, de la rotation matérielle. Cette objectivité n'est assurée si la différentiation s'effectue dans un repère local tournant avec une vitesse égale à la rotation propre de l'élément matériel. Si on se propose de garder toutes les équations dans le repère fixe, il convient d'utiliser un opérateur de différentiation objectif comme par exemple l'opérateur de Jaumann qui s'écrit:

$$D\sigma_{ij} = L_{ijkl} : d\varepsilon_{kl} = d\sigma_{ij} - d\omega_{ik}\sigma_{kj} - d\omega_{jk}\sigma_{ik} \tag{4}$$

où $d\omega_{ij} = \frac{1}{2}(V_{i,j} - V_{j,i})$ est la rotation propre relative à l'incrément $d\sigma$.

Dans l'écriture générale de la loi de comportement sous forme incrémentale (D) ou (5) de type (C), la fonction F peut être linéaire, multilinéaire par zones ou encore non linéaire incrémentalement. Si F est linéaire:

(4) devient $\Delta[d\sigma_{ij}] = L_{ijkl} : \Delta[d\varepsilon_{kl}]$

et avec (1), on a: $n_i\, L_{ijkl} : \Delta[d\varepsilon_{kl}] = 0$

si on utilise (2), on obtient:

$$(n_i\, L_{ijkl}\, n_k)\, g_k = 0 \tag{5}$$

Revenons à l'expression (D) de (C) où L est une fonction supposée homogène de degré 1, mais non linéaire dès que pour un incrément de contrainte donné, des irréversibilités plastiques apparaissent (Darve et al., 1981). L'incrément de contrainte ne concerne que les termes différenciés:

$$\Delta[D\sigma_{ij}] = L_{ijkl} : \Delta[d\varepsilon_{kl}] = \Delta[d\sigma_{ij}] - \Delta[d\omega_{ik}]\,\sigma_{kj} - \Delta[d\omega_{jk}]\sigma_{ik} \tag{6}$$

En utilisant (2) et (6), on obtient:

$$\Delta[d\omega_{ij}] = \frac{1}{2}(g_i n_j - g_j n_i)dt \tag{7}$$

En utilisant la condition statique (1), et les relations (6) et (7)

$$n_i\,\Delta[D\sigma_{ij}] = -\frac{1}{2}\, n_i (g_i n_k - g_k n_i)\sigma_{kj} dt - \frac{1}{2}\, n_i (g_j n_k - g_k n_j)\sigma_{ik} dt \tag{8}$$

(8), (3) et (4) donnent:

$$n_i\,\Delta[D\sigma_{ij}] = \frac{1}{2}\, n_i\, L_{ijkl}\,(g_k n_l + g_l n_k)dt \tag{9}$$

(8) et (9) permettent d'obtenir (Darve et al., 1981) :

$$\left[\, n_i\, L_{ijkl}\, n_l + \frac{1}{2}(n_p\sigma_{pj} n_k + n_p\sigma_{pq} n_q \delta_{ik} - n_p\sigma_{pk} n_j - \sigma_{jk})\,\right] g_k = 0 \tag{10}$$

δ est le symbole de kronecker.

Le système d'équations (10) (comme le système d'équations (5)), est un système homogène à trois inconnues g_1, g_2 et g_3. La solution triviale $g_1 = g_2 = g_3 = 0$ comme on l'a vu plus haut correspond à l'absence de bifurcation. Une condition nécessaire et suffisante pour qu'il y ait localisation ($\vec{g}$ non nul) est que le déterminant du système (10) (ou (5)) soit nul.

Cette condition fournie le critère de localisation qu'on peut écrire sous la forme:

$$\det (n_i L_{ijkl} n_l - \Lambda_{jk}) = 0 \qquad (11)$$

Ainsi, cette équation fait intervenir, les composantes de $\vec{n}$, l'état de contrainte actuel, l'histoire de la sollicitation ainsi que la direction du vecteur incrément de contrainte par l'intermédiaire du tenseur rhéologique L. Il y aura bifurcation du champ de déformation si, pour un chemin de sollicitation donné, l'équation (11) admet une ou plusieurs racines réelles {ni}. L'état de contrainte et de déformation obtenues pour un jeu de racines réelles {ni}, pour un chemin de sollicitation donné, constitue la condition nécessaire pour l'existence théorique du point de bifurcation. L'ensemble des points, établira le critère de bifurcation spécifique pour ce matériau, et dans le chemin de sollicitation considéré. L'angle θ (via les composantes de $\vec{n}$) qui défini la direction locale de la bande peut alors être déterminé.

I-3-2: APPLICATION AU CAS DE L'ESSAI TRIAXIAL DE REVOLUTION:

Nous considérons ici le matériau parfaitement homogène et que le problème est de révolution autour de l'axe 1, les deux directions latérales seront notées 3. Si on tient compte des conventions et hypothèses, dans ce cas précis on a:

$\sigma_{ij} = 0$ si $i \neq j$ et $\sigma_{11} = \sigma_1$; $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_3$

$\varepsilon_{ij} = 0$ si $i \neq j$ et $\varepsilon_{11} = \varepsilon_1$; $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\varepsilon_3$

Dans ce cas, on a : $\Lambda_{11} = (n_2^2 + n_3^2) \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$; $\Lambda_{22} = \Lambda_{33} = - n_1^2 \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$;

$\Lambda_{21} = - \Lambda_{12} = - n_1 n_2 \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$; $\Lambda_{31} = - \Lambda_{13} = - n_1 n_3 \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$

et $\Lambda_{23} = \Lambda_{32} = 0$

On pose $\tan\theta = \dfrac{n_1}{\sqrt{n_2^2 + n_3^2}}$ avec $n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1$

L'angle θ défini alors la direction locale de la bande. Si on suppose que la sollicitation n'a pas induit de rotations des axes principaux, on démontre que l'échantillon est orthotrope et que les axes d'orthotropie sont confondus avec les axes principaux des contraintes (Chambon, 1981; Darve et al., 1981). Ce qui se traduit dans L par : $L_{iikl} = L_{klii} = 0$ si $k \neq 1$. L'équation (11) se transforme en une équation paire de degré six en $\tan\theta$.

L'élimination d'une racine négative de $\tan^2\theta$ nous ramène à l'équation:

$$\tan^4\theta + A\tan^2\theta + B = 0 \qquad (15)$$

où A et B s'expriment en fonction des L_{ijkl} et du déviateur de contrainte $(\sigma_1 - \sigma_3)$.

Cette équation ne peut admettre que des racines réelles positives, ce qui se traduit par la distinction de trois régimes (Rudnicki et Rice 1975; Rice 1976; Vardoulakis, 1979; Darve, 1985) : s'il n'y a pas de solution, on a un régime elliptique et pas de bifurcation; s'il y a deux solutions distinctes on a un régime hyperbolique; s'il y a une solution double, un régime parabolique. La situation peut se résumer de la façon suivante: si, à partir d'un incrément, la valeur du discriminant $(A^2 - 4B)$ de négative devient nulle, l'état de contrainte et de déformation à cet incrément correspond précisément au seuil de localisation ou point de bifurcation pour ce matériau, dans l'essai triaxial. Le régime parabolique caractérise en effet les points de bifurcation. Après cet incrément, le discriminant devient strictement positif, le régime est hyperbolique. Cette transition souligne le caractère spontané dans l'apparition du point de bifurcation. Au delà du seuil de localisation, on peut sérieusement douter de la validité de la loi de comportement car dans la pratique, les états de contrainte de bifurcation constituent des états limites.

Rudnicki et Rice (1975) et Rice (1976) ont étudié une loi de comportement (C) de type Drucker - Prager. Les ingrédients essentiels dans ce modèle sont le coefficient de frottement μ et un paramètre de dilatance β. Ils montrent notamment que dans le cas des lois de comportement élastoplastiques associées ($\mu = \beta$), la localisation ne peut avoir lieu qu'en régime d'écrouissage négatif (phase de déformation post pic). Nous savons que les études expérimentales usant de diverses techniques de détection du seuil de localisation montrent en général que ce seuil a lieu bien avant le pic. En revanche, pour une loi non associée, on obtient un seuil de localisation en régime d'écrouissage positif (e.g. Sulem, Vardoulakis et Papamichos, 1993).

Plus particulièrement, dans le comportement fragile des roches, le frottement joue un grand rôle à l'échelle des microfissures, l'existence d'un régime d'arête pour la surface de charge (surface irrégulière ou le "Yield vertex" pour utiliser le terme anglo-saxon), peut avancer l'instant de la localisation. Dans ce contexte, des résultats prometteurs obtenus par Diouta et al. (1994) sur nos essais montrent l'intérêt d'une telle modification. Cette constatation confirme la nécessité d'intégrer les mécanismes fondamentaux de déformation des roches dans les modèles de comportement. Il est souhaitable dans ces conditions que la modélisation s'appuie aussi sur des observations qui font état de la structure à l'échelle microscopique.

Par ailleurs, le calcul post bifurcation exige des traitements de régularisation. L'analyse théorique de la localisation ne donne pas d'informations sur l'épaisseur de la bande de cisaillement; cette épaisseur est de fait supposée nulle au vue des hypothèses de base dans la formulation. La prévision d'une épaisseur de bande nécessite généralement l'introduction d'une longueur caractéristique (ou interne) dans la loi rhéologique. Une telle démarche a été développée dans la théorie de Cosserat par Mülhaus et Vardoulakis (1987) et Vardoulakis et Sulem (1993). Dans une approche dynamique, Needelman (1988) puis Loret et Prevost (1990) introduisent une viscosité fictive (régularisation viscoplastique) où une longueur est incluse implicitement dans la formulation. On peut aussi dans ce contexte voir les tentatives de modélisations non locales (Pijaudier-Cabot et Bazant, 1987). Enfin, la théorie prédit généralement des plans multiples et symétriques de localisation. Il apparaît donc important que les études expérimentales fournissent des indications sur les caractéristiques des bandes de localisation (instant d'apparition, orientation, épaisseurs de bande, multiplicité des bandes et éventuellement leur relation avec la microstructure du matériau et du chemin de sollicitation étudiés). Notre étude s'inscrit dans cette perspective.

I-4: APPROCHES EXPERIMENTALES DE LA LOCALISATION

L'étude expérimentale de la localisation des déformations a pour principaux objectifs, dans le cas d'un chemin de sollicitations donné, la mise en évidence des mécanismes d'émergence des bandes de localisation, la détection du seuil de localisation et enfin la détermination des caractéristiques des surfaces de rupture observées (nombre, orientation, épaisseur, et éventuellement dilatance locale). On distingue généralement deux types d'approches qui tentent d'atteindre ces objectifs. La première consiste à caractériser au moyen d'observations, l'évolution de la microfissuration sur une surface ou dans un volume de l'éprouvette. L'autre démarche consiste à se donner les moyens techniques et méthodologiques qui permettent d'établir un tracé de la carte du champ de déformation et de préciser les conditions d'apparition des déformations non homogènes.

Lorsqu'on se livre à une étude bibliographique sur l'expérimentation concernant la localisation des déformations dans les roches, on s'aperçoit que de nombreuses méthodes et techniques ont été utilisées. Bien que toutes ont leur importance, nous n'insisterons ici que sur celles dont les résultats nous paraissent les plus pertinents en ce qui concerne la détection du seuil de localisation. L'ensemble des caractéristiques spécifiques à chacune de ces méthodes sera examiné. Nous en décrirons le principe puis nous discuterons en particulier la nature (destructive ou non), la précision (acuité, pouvoir de résolution et reproductibilité), les facilités de mise en oeuvre, le champ d'application, les possibilités de corrélations avec des manifestations macroscopiques (dilatance, irréversibilités, etc.) et bien entendu le coût matériel et éventuellement la mobilité (transportable sur le terrain).

I-4-1: LES METHODES DIRECTES:

La manière la plus directe de caractériser la microfissuration est de faire des observations microscopiques. Les plus connues d'entre ces moyens d'investigations sont la méthode des lames minces et celle des répliques. Elles consistent à charger l'éprouvette jusqu'à un niveau de contrainte donné, puis à la décharger et une procédure expérimentale bien spécifique à chacune de ces deux méthodes, permet de réaliser des observations microscopiques.

I-4-1-1: LA METHODE DES LAMES MINCES:

Après avoir déformé l'éprouvette jusqu'au déviateur souhaité, on y découpe des bandes très fines et, on confectionne un certain nombre de sections polies et de lames minces qui sont étudiées sous microscope, soit en réflexion où Brady (1974) observe une localisation à 95% du pic dans l'essai triaxial sur un marbre et un granite, soit en transmission où Friedman, Perkins et Green (1970) l'observe presque au pic, soit encore au M.E.B. (e.g. Mosher et al., 1975; Tapponnier et Brace 1976; Kranz 1979a, 1980; Wong 1982a). Cette technique, permet d'étudier en détail la morphologie des microfissures, leur distribution, leurs orientations et éventuellement leur localisation spatiale. Elle offre l'avantage de pouvoir être utilisée dans n'importe quel type d'essai et de fournir des informations sur l'évolution du développement de la microfissuration. La première partie de ce chapitre a essentiellement reposée sur les observations recueillis par le biais de cette technique (voir figure 1.2).

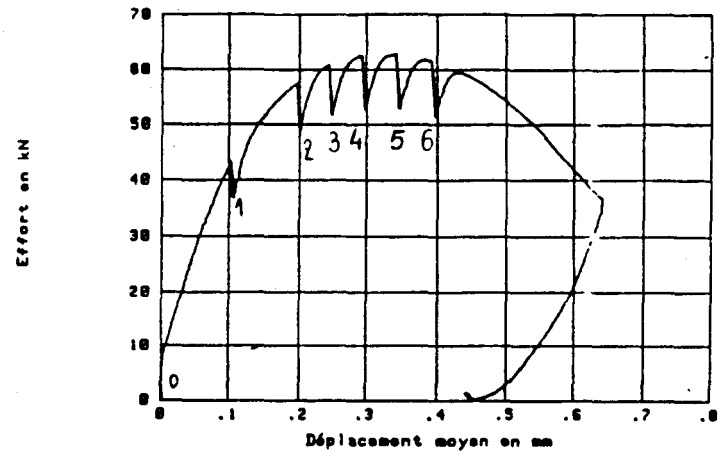
Il convient cependant de signaler les quelques désavantages, dictés par la procédure et qui conditionnent les résultats relatifs à cette technique d'investigation. L'inconvénient majeur est qu'elle est destructive et impose des essais de chargement déchargement. La découpe des plans

étudiés au microscope se fait après le déchargement de l'éprouvette et l'une comme l'autre de ces deux opérations (déchargement et découpe) peut être à l'origine d'une microfissuration supplémentaire (généralement supposées négligeables). On note aussi que les grandes différences rapportées dans les estimations concernant le nombre et les longueurs moyennes des fissures semblent dépendre de l'orientation du plan de coupe de la surface étudiée.

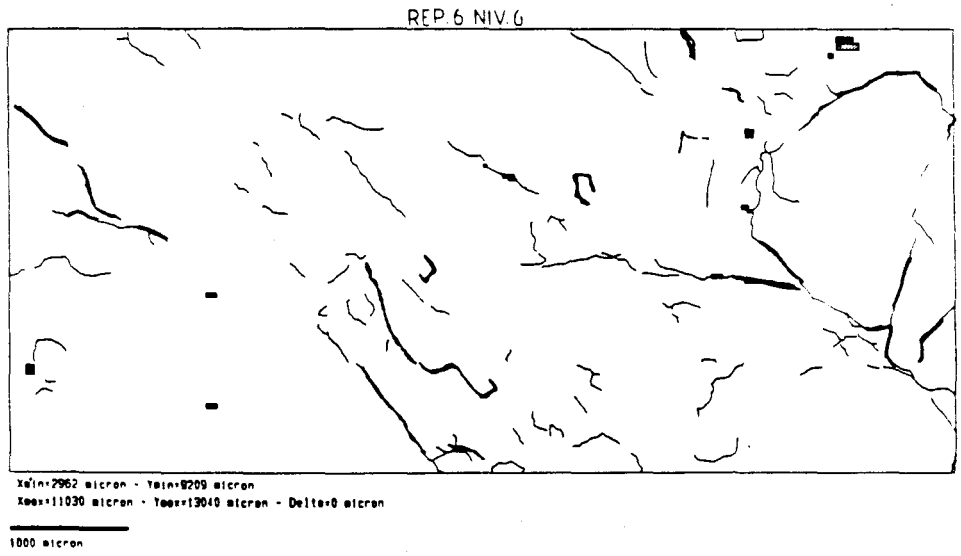
I-4-1-2: LA METHODE DES REPLIQUES :

Le principe de cette technique consiste en l'observation d'une empreinte de la surface d'un échantillon. Les répliques de surface sont des empreintes qui permettent une observation de la topographie superficielle du matériau. La prise d'empreinte s'effectue au moyen d'un film (d'acétate de cellulose par exemple). Le solvant de ce film est pulvérisé sur la surface à répliquer, puis le film y est appliqué. Au cours du séchage du solvant, l'acétate de cellulose fluidifié est entraîné par capillarité dans les anfractuosités du matériau et plus particulièrement dans les microfissures. Quelques minutes après son application, le film est délicatement décollé et placé entre deux lamelles de verre adaptées au porte objet du M.E.B.. Avant son observation, la surface supérieure de la réplique (celle de l'empreinte), est rendue conductrice par une métallisation sous vide ou ionisation. Pour plus de détails sur la méthode, se référer par exemple à Ringot et al. (1987).

Pour suivre l'évolution des microfissures sous charge croissante, les répliques sont effectuées au même endroit de la partie externe des éprouvettes sollicitées en compression. Ce type de technique a permis par exemple de suivre à l'échelle microscopique et de façon non destructive les dommages occasionnés par les sollicitations en un point précis dans les ouvrages et édifices. L'observation des répliques nécessite de réaliser des surfaces d'étude parfaites; le moindre défaut ou décrochement peut rendre les images indéchiffrables. Cependant, si on suppose ces surfaces parfaites, on peut accorder à cette méthode une précision remarquable, celle du M.E.B. utilisé pour les observations. La méthode est remarquablement utile et efficace pour la détermination de l'étendue des réseaux de microfissuration. Elle fournit une bonne estimation des longueurs et du nombre des microfissures, mais ne permet pas de se prononcer sur leurs ouvertures. Ce suivi de la microfissuration permet de fournir des informations sur la localisation des déformations. Un exemple d'observations faites par Bascoul et al (1993) sous sollicitations de compression uniaxiale est montré sur la figure 1.5. Dans ce cas précis, la petite taille de la surface examinée (environ 4 cm^2), restreint l'étude à un champ limité et la zone examinée ne contient pas forcément la zone de localisation.



courbe effort déplacement moyen



Etat de la microfissuration

réplique N°4

réplique N°6

Figure 1.5 : Utilisation des répliques de surfaces dans l'étude de l'évolution de la microfissuration dans le béton d'après Bascoul et al. (1993).

La méthode a l'avantage d'être non destructive et relativement facile à mettre en oeuvre. Elle ne permet cependant de suivre l'évolution de la microfissuration jusqu'à la rupture dans le même échantillon que dans l'essai uniaxial. Et, même si elle ne permet pas de détecter le moment et le lieu précis de localisation, elle apparaît comme un complément idéal à d'autres techniques de champs telles que la granularité laser ou la stéréophotogrammétrie.

Pour conclure, les méthodes directes apparaissent intéressantes pour comprendre les mécanismes physiques conduisant à la localisation des déformations par la caractérisation de la microfissuration à un état de contrainte ou de déformation donné. Dans le cas des roches, il est nécessaire au cours des observations au M.E.B. de bien distinguer les microfissures induites par le chargement des joints de grains et des discontinuités naturelles préexistantes sans oublier celles générées par la procédure (déchargement et préparations des surfaces étudiées). L'inconvénient majeur pour réaliser les observations à l'aide de ces techniques directes réside dans l'obligation d'effectuer un déchargement de l'échantillon. Les fissures observées à l'état non contraint peuvent donner une fausse impression sur les dimensions réelles de ces même fissures lorsque la charge est appliquée. Le nombre de cycles généralement limité, impose un suivi sous forme de cliché et la localisation peut se produire entre deux déchargements.

I-4-2: LES METHODES QUANTITATIVES:

Les méthodes quantitatives permettent le suivi de l'évolution des déformations à partir d'indicateurs physiques choisis. Il existe un très grand nombre de méthodes quantitatives, les plus connues sont l'absorption gazeuse (surface BET), la perméabilité à l'air ou à l'eau, la résistivité ou conductivité électrique, la tomodensitométrie, les ultrasons et l'émission acoustique. Toutes ces techniques sont capables de mettre en évidence les discontinuités présentes dans une roche; nous ne présentons ici que les deux méthodes les plus utilisées en mécanique des roches dans l'étude de la localisation que sont les ondes ultrasonores et l'émission acoustique.

I-4-2-1: LES VITESSES D'ONDE ELASTIQUES:

Lorsqu'un solide est soumis à une perturbation d'origine mécanique ou thermique, des ondes élastiques prennent naissance et se propagent dans ce solide. On distingue généralement deux types d'ondes: les ondes planes et les ondes de surface. Seules les ondes planes intéressent les études consacrés à l'évolution du développement de la microfissuration (Tourenq, 1967 ; Tourenq et al., 1971; Hadley, 1975a ; Berthaud, 1987) et en particulier la détection du seuil de localisation (Hadley, 1976 ; Lockner et al., 1977; Sobolev et al., 1978 ; Soga et al., 1978).

On démontre qu'il existe deux sortes d'ondes planes qui sont susceptibles de se propager à l'intérieur d'un solide, homogène, et isotrope (pour les détails voir par exemple Absi, 1990). Les ondes longitudinales (ou de compression) appelées aussi ondes P ont la vitesse de propagation V_P la plus élevée. Dans ce cas, la direction de polarisation est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Les ondes transversales (ou de cisaillement) appelées aussi ondes S (shear), leur vitesse de propagation est notée V_S. La direction de polarisation est perpendiculaire au sens de propagation de l'onde. Les résultats théoriques concernant l'influence des

microfissures sur les vitesses d'onde élastiques peuvent être résumés de la façon suivante: les vitesses V_P et V_S sont toutes les deux affectées par la présence de microfissures dans le milieu élastique où elles se propagent. V_P et V_S s'expriment facilement en fonction des coefficients élastiques de Lamé λ et μ et de la masse volumique du milieu.

Pour une éprouvette de roche donnée, la technique de mesure consiste à calculer les vitesses V_P et V_S à différents niveaux de contraintes et de les comparer avec ceux mesurées dans une direction; de la différence obtenue, on fait état des discontinuités. Tourenq et al. (1971) définissent un indice de qualité IQ par le rapport: vitesse des ondes longitudinales mesurées sur la vitesse théorique calculée. La connaissance de l'indice de qualité IQ et de la porosité de la roche permet de distinguer de manière quantitative la fissuration mécaniquement induite des discontinuités initialement présentes. Ainsi, l'état de référence est établi pour l'éprouvette, et dans la direction de propagation de l'onde. L'influence des discontinuités sur V_P est très importante lorsque la direction de propagation est perpendiculaire au plan de la fissuration; V_P est peu affectée lorsque cette propagation s'effectue dans ce plan. Hadley (1975a) et Soga et al. (1978), ont montré une corrélation qualitative entre la dilatance et les variations des vitesses d'onde élastique.

Le principe de l'auscultation dynamique consiste à placer à l'une des extrémités de l'éprouvette un émetteur piézo-électrique excité par un générateur d'impulsions électriques. Celui ci émet alors un train d'ondes qui se propage dans le matériau. A l'autre extrémité de l'éprouvette, un capteur réceptionne ce train d'ondes mécaniques, transformés en signaux électriques. Celles ci sont visualisées sur l'écran d'un oscilloscope. La mesure directe du temps de parcours de l'onde dans le matériau permet d'évaluer sa vitesse de propagation. Pour la détection du seuil de localisation, les vitesses sont mesurés dans une direction perpendiculaire de celle ou la formation de la bande de cisaillement est présumée se produire.

Dans l'essai uniaxial, cette technique a permis à Rao et Ramana (1974) de situer la localisation entre 75 et 78 % de la résistance en compression uniaxiale réalisé sur trois types de roche (pyroxenite, dunite et serpentin). L'analyse des vitesses d'onde élastique effectuée par Thill (1972) dans l'essai triaxial sur un marbre, montre qu'une atténuation remarquable se produit à 95% du pic. Lockner, Walsh et Byerlee (1977), sur le granite dans l'essai triaxial, font la même observation à 85 % du pic, à partir de la mesure de Vp. Toujours en utilisant la même technique, accompagnée d'une ou plusieurs autres techniques complémentaires, tel l'interférométrie holographique ou encore l'observation au microscope, Soga et al. (1978) situent la localisation dès 60 % du pic dans l'essai triaxial sur le granite. Sobolev et al. (1978) sur la même roche dans l'essai biaxial le considèrent à 80 % du pic. Nous reviendrons sur ces divergences.

En résumé, les caractéristiques de la méthode utilisant les vitesses de propagation des ondes élastiques montrent qu'elle est non destructive et dotée d'une bonne précision et qu'elle est très sensible à la présence de micro discontinuités. Elle présente aussi l'avantage d'être simple et rapide dans sa mise en oeuvre, et le peu de moyen matériel qu'elle exige lui permet d'être mobile et facilement transportable. Rappelons cependant que, malgré les avantages et les bons résultats qu'elle a permis d'obtenir, la méthode ultrasonore nécessite un état de référence. Avant de conclure sur la localisation, cette technique fait appel, sinon semble souvent tributaire d'une autre méthode complémentaire avant de se prononcer clairement sur la localisation.

I-4-2-2: LOCALISATION PAR EMISSION ACOUSTIQUE:

En observant le temps relatif d'arrivée de signaux acoustiques sur les capteurs placés à différents endroits de la surface ou répartis le long d'une génératrice de l'éprouvette, l'origine spatiale des microfissures peut être localisée. L'émission acoustique dans un échantillon résulte alors des événements acoustiques produits par les déformations locales qui ont lieu avec suffisamment d'énergie pour générer des pulsations acoustiques. Les événements acoustiques enregistrés durant la phase de chargement des éprouvettes sont supposés résultés de la création de microfissures.

Le principe est très simple et peut être résumé en quelques lignes. Lorsqu'on se place dans un milieu isotrope, les ondes ultrasonores se propagent avec la même célérité c (Vp) dans toutes les directions, et par conséquence, le front d'onde est une sphère centrée au point ou se trouve la source. Si on fixe deux capteurs à des distances R_1 et R_2 de la source, ils intercepteront l'onde à deux instants différents ($R_1 = ct_1$ et $R_2 = ct_2$); les capteurs étant fixes, quel que soit le lieu de la source, dans le plan qu'ils engendrent à eux trois, la distance entre les deux capteurs invariantes suggère que $\Delta t = (t_2 - t_1)$ aussi; il en résulte que la mesure de Δt ($\sim \Delta R$) permet de situer la source.

La position exacte de la source dans le plan est parfaitement déterminée avec trois capteurs et en pratique, pour améliorer la précision, la mesure des signaux se fait à l'aide de au moins quatre capteurs piézo-électriques résonnants. La chaîne d'enregistrement comprend généralement un préamplificateur, un amplificateur, un enregistreur de signaux transitoire et éventuellement un filtre passe-bas, le tout relié à un ordinateur pour le stockage et traitement des données brutes.

Les études sur la localisation ont été menées sur tous les types d'essais de compression (monotones, cycliques et fluage) et ont aussi concerné l'essai de traction et de flexion. Scholz (1968) par exemple dans son étude, observait que les sources de l'émission acoustique ont dans un premier temps une distribution aléatoire partout dans l'échantillon; mais lorsque la charge

atteint 92% du pic, ces sources commencent à se concentrer dans la zone où la bande de cisaillement s'est ensuite matérialisée. Des observations similaires avaient été faites par Byerlee et Lockner (1977) et Lockner et Byerlee (1992) qui, à une valeur élevée du déviateur maintenue constante (entre 85 et 90 % du pic) et pour une pression de confinement élevée, ont vu leurs sources se concentrer à l'endroit exact où la bande de cisaillement commence à se former (figure 1.6). Ces études sont basées sur le nombre et les fréquences statistiques des événements. Les origines spatiales (hypocentres) ne sont calculées que pour 100 à 200 événements sur 10^5 à 10^6 recueillis. Dans l'essai cyclique uniaxial, Sondergeld et Estey (1981) en captent 3360, et Yanagidani et al.(1985) dans l'essai de fluage 3933.

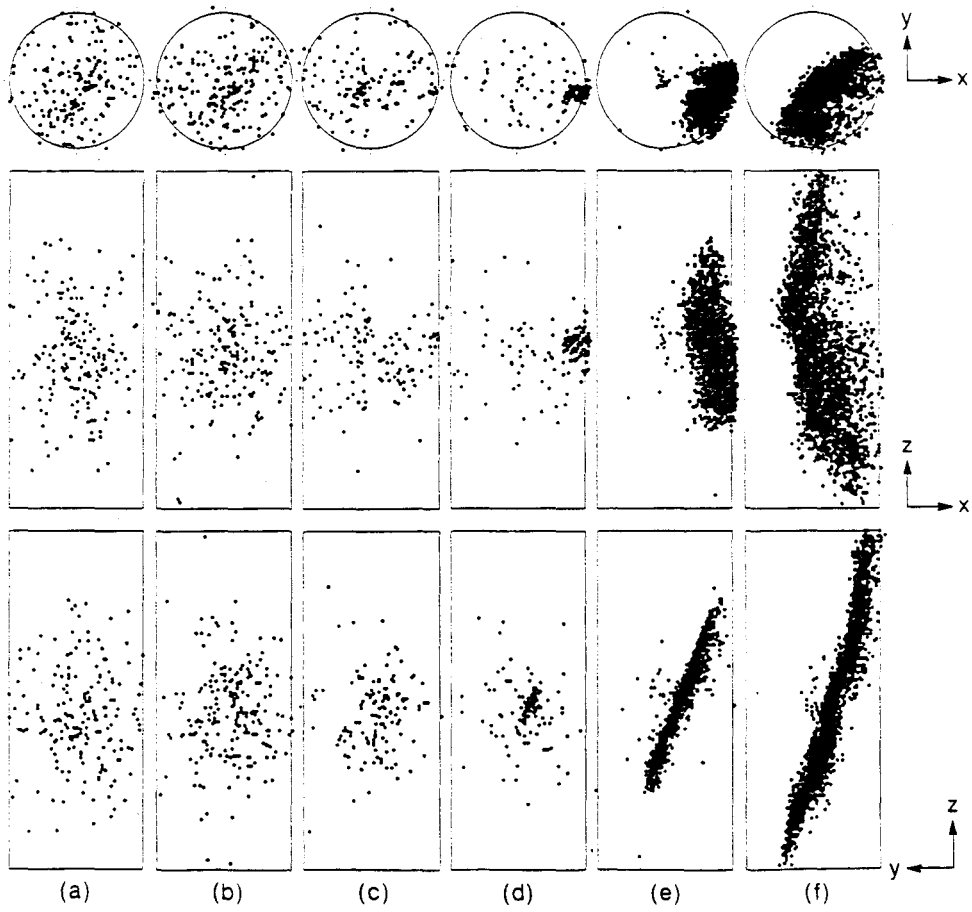


Figure 1.6 : Localisation des hypocentres par l'émission acoustique dans l'essai triaxial (Pc = 50 MPa) sur le granite. La charge axiale est maintenue constante (fluage) entre 85 et 90 % de la résistance à la rupture; [pré-nucléation: (a) à (c), localisation: (d) et propagation de la bande (e) et (f)] d'après Lockner et Byerlee (1992).

Comme nous venons de le préciser, de par leurs méthodologies, ces études ne s'intéressent pas à la nature vibratoire des émissions acoustiques mais seulement au nombre et à la fréquence statistique des événements. Plusieurs tentatives ont été faites pour mieux caractériser les émissions acoustiques par la détermination de leur fréquence et de l'énergie des pulsations acoustiques. L'objectif de telles études est de mieux caractériser les signaux en fonction de leur propriétés ondulatoires, pour en définir la signature acoustique (fréquence, amplitude), comme ont tenté de le faire par exemple Rossi et al. (1989) et Rossi et al. (1993). Beaucoup d'auteurs affirment avoir enregistré un déplacement fréquentiel juste avant que la rupture ne se produise (e. g. Terrien et al., 1992). Les difficultés expérimentales de cette approche, serait essentiellement liées à l'équipement (coûteux sinon difficile à mettre en oeuvre), aux propriétés acoustiques du matériau (intervalle de fréquence pas évident à définir) et sans oublier les bruits de fond, incontournables, qu'occasionne la machine d'essai (nécessité du filtrage).

Bien qu'elle nécessite un équipement et des moyens relativement important, cette méthode reste parmi toutes, celle qui semble dans l'étude de la localisation de la déformation, la plus performante des techniques quantitatives. Elle est capable de situer dans l'espace et le temps, l'évolution spatiale de la microfissuration et sa localisation.

conclusions

Ces deux méthodes quantitatives présentent l'avantage d'être non destructives et un champ d'action à trois dimensions, quasiment infini. L'une comme l'autre fournissent des résultats incontestables sur la localisation. Cependant, elles se heurtent à deux sortes de difficultés, liées essentiellement à leur caractère vibratoire. La première concerne l'aspect dispersif vis à vis de leurs vitesses de propagation et il semble que la transmission et la qualité des signaux dépendent de la texture de la roche. Contrairement aux roches à gros grains, les roches à grains fins permettent d'obtenir des signaux de bonne qualité et des mesures plus précises. La deuxième difficultés résulte des hypothèses de base (milieu isotrope ou/et infini). Les propriétés vibratoires peuvent refléter des anisotropies qui ne dépendent que de la direction de propagation et cela à cause de certaines propriétés vectorielles, cinématiques ou dynamiques dans le matériau anisotrope sous sollicitation plutôt que des changements d'états liés à la microfissuration.

Signalons pour conclure que les études expérimentales en mécanique des roches montrent que l'émission acoustique est un indicateur fiable de la microfissuration. L'hypothèse de la domination du développement de la fissuration axiale pour justifier les atténuations des vitesses d'onde élastique observées dans la roche au delà de 50 % du pic est cohérent avec les observations faites avec l'émission acoustique. L'avantage des études sur la microfissuration utilisant l'analyse des vitesses d'onde élastique (Vp), et que cette dernière met en évidence l'orientation des fissures.

I-4-3: LES METHODES DE CHAMP:

Ces méthodes permettent de caractériser partiellement ou entièrement le champ de déplacement ou de déformation dans l'échantillon. Les deux techniques présentées dans ce rapport sont la stéréophotogrammétrie abondamment utilisée pour l'étude de la localisation dans le cadre du Greco Géomatériaux et la granularité laser. Soulignons que les méthodes directes du § I-4-1 peuvent éventuellement être considérées comme des méthodes de champ.

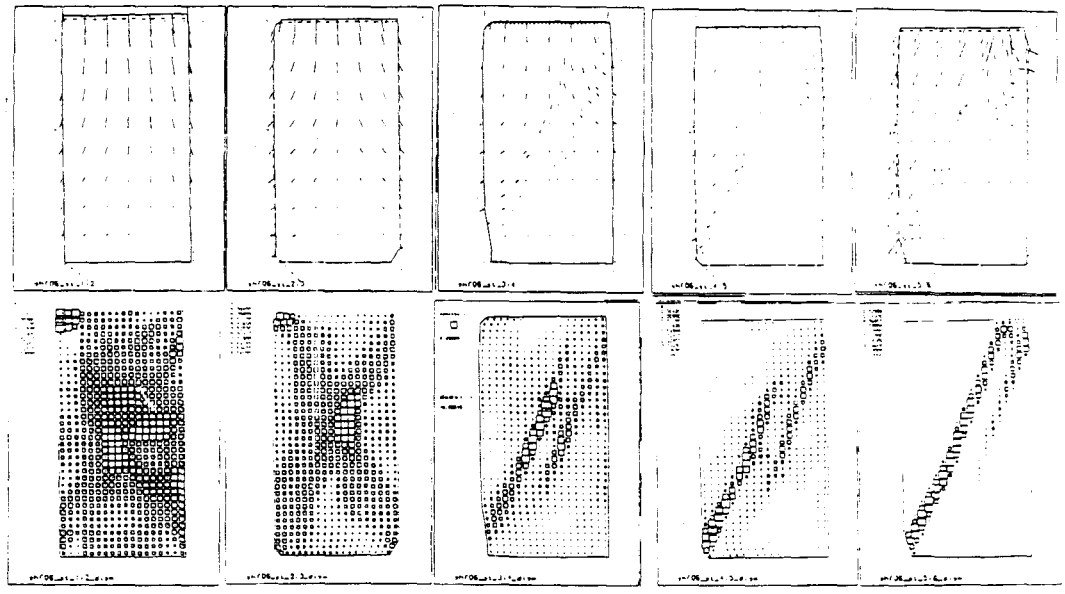
I-4-3-1: LA STEREOPHOTOGRAMMETRIE:

Le principe a déjà été décrit par plusieurs auteurs (Desrues, 1984; Torrenti et al., 1989; Torrenti et al., 1990; Hammad, 1991; Benaija, 1992; Tillard, 1992). La stéréophotogrammétrie est étroitement liée à la perception du relief par l'être humain. Ceci n'est possible que grâce à l'existence d'une vision binoculaire et au traitement de l'image effectuée par le cerveau. Ce sont les différences des signaux captés par chacune des rétines qui sont enregistrées, analysées par le cerveau puis interprétées comme un relief. Ce principe, est exploité au moyen d'un appareil photographique, prenant deux vues d'un même objet selon des points de vue différents (notion de parallaxe spatiale). Par projection stéréoscopique de ces vues, on arrive à créer le relief de l'objet photographié. Dans l'application de cette technique à la détection du seuil de localisation, l'appareil photographique est fixe, et c'est les déformations planes de l'échantillon qui sont perçues comme un faux relief. La méthode est appelée stéréophotogrammétrie du faut relief car elle est limitée aux problèmes plans.

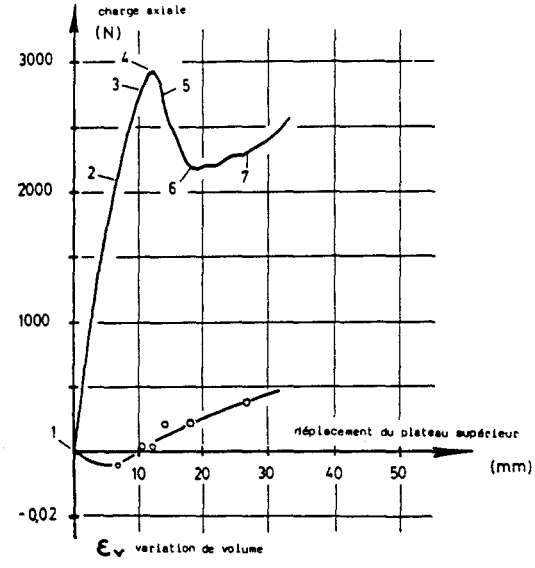
Les différents états de déformation peuvent être mémorisés à l'aide d'une série de clichés (figure 1.7). La stéréo comparaison est la technique qui, à partir d'un couple de photographies, permet d'obtenir un document qui décrit la géométrie de l'objet photographié. Cette opération nécessite l'identification d'un même point sur deux clichés. Une fois des repères fixes définis, les coordonnées (dans le plan) des points sur un négatif, sont obtenues à l'aide d'un appareil de précision appelé stéréo comparateur. La stéréo comparaison met en évidence un grand nombre de points non coïncidents, et de cette opération résulte les déplacement relatifs (figure 1.7).

Dans les différentes étapes, la stéréophotogrammétrie nécessite un grand nombre de précautions (qualité de la prise de vue, élimination des réflexions parasites etc.). Le traitement numérique est une composante essentielle pour caractériser aussi bien le champ de déplacement que la nature et les jeux de fissures. Les fissures discernables lors des opérations de stéréo comparaison peuvent être traitées numériquement par la détermination des discontinuités de déplacements (normale et tangentielle). Un logiciel, mis au point par Desrues (1987) permet de représenter graphiquement les discontinuités en déplacement des deux lèvres d'une fissure. Ainsi,

les vecteurs déplacements relatifs et leurs composantes normales et tangentielles sont représentés ce qui permet , à partir de ce traitement, de distinguer les fissures de traction des fissures de cisaillement. Cette donnée, est à notre sens fondamentale dans la compréhension des mécanismes qui mènent à la rupture fragile des géomatériaux.



Champs de vecteurs déplacement (haut), et de distorsion incrémentale (bas).



Variations de la force axiale en fonction du déplacement axial

Figure 1.7 : Etude de la localisation par la stéréophotogrammétrie appliquée à un sable dans l'essai biaxial de déformation plane (d'après Desrues, 1984, Essai shf06).

Desrues (1984) et plus récemment Hammad (1991) ont appliqué avec succès cette technique aux matériau granulaires, dans l'essai biaxial. Des applications ont été également tentées sur des matériaux cohérents tels le béton (Torrenti et Benaija, 1990; Benaija, 1992; Bascoul et al., 1993), sur la marne de Beaucaire (Tillard, 1992) et sur le grès (Benaija et al, 1990; Bascoul et al., 1993). Les résultats obtenus sont plutôt encourageants pour des applications étendues de cette technique aux roches.

I-4-3-2: GRANULARITE LASER (SPECKLE):

Le principe de la technique consiste à éclairer la surface de l'éprouvette à l'aide d'un faisceau de rayons parallèles (source à l'infini ou rayon laser). Chaque particule de cette surface émet une onde de même nature que la source, la différence entre la taille des irrégularités (grains, particules, cristaux, déplacement et/ou microfissuration) fait que cette onde diffusée, conserve sa longueur d'onde mais modifie la phase et l'amplitude de l'onde source. La méthode utilise le principe d'Huyghens-Fresnel, la diffraction à l'infini est établie au moyen d'un faisceau de rayons parallèles (laser) et d'une petite fente circulaire disposée entre l'éprouvette et l'écran. Les franges d'interférence obtenues sur l'écran permettent de tracer la distribution de l'intensité lumineuse. La direction des franges est perpendiculaire au vecteur déplacement local et sa norme est inversement proportionnelle à l'interfrange. Ainsi, le dépouillement des clichés enregistrés sur négatif holographique se fait point par point et permet d'obtenir le champ de déplacement réel par l'analyse spectrale des franges d'interférence, produites par la déformation locale sur la surface éclairée de l'éprouvette.

La précision de cette méthode semble très satisfaisante (meilleure que celle de la stéréophotogrammétrie) lorsque les déplacements restent inférieurs à 100 μm et médiocre au delà (Berthaud, 1991). Cependant la taille de la surface que l'on peut examiner reste relativement faible par rapport à celle de l'échantillon. Ceci fait que la localisation qui peut se manifester en un point quelconque peut passer inaperçue, à moins que ce lieu ne soit prévisible. Le champ d'action (surface étudiée) peut être élargi si on augmente la puissance du laser (coûteux). Les études sur la détection du seuil de localisation qui ont porté sur le béton (Benaija, 1992; Bascoul et al., 1992; Bascoul et al., 1993) et sur le grès (Benaija et al., 1990; Bascoul et al., 1993), indiquent que la localisation des déformations dans l'essai de compression uniaxiale a lieu bien avant le pic et que le granularité laser et la stéréophotogrammétrie donnent pratiquement les mêmes résultats. Notons cependant, que même si la granularité laser semble avoir une meilleure précision pour les faibles déplacements, son champ d'action et son champ d'application restent néanmoins plus réduits que celui de la stéréophotogrammétrie. Les deux techniques ont eu du succès dans l'essai biaxial de déformation plane et semblent présenter une relative facilité de mise en oeuvre et un coût modeste (Bascoul et al., 1993).

Rappelons enfin que ces deux techniques non destructives certes, peuvent permettre de suivre le développement de la microfissuration en caractérisant le champ de déplacement, partiellement dans le cas du Speckle et sur toute la surface de l'éprouvette dans le cas de la stéréophotogrammétrie, cela sans avoir recours à des déchargements. Leurs utilisations restent cependant limitées aux problèmes plans (déformations ou contraintes planes) et éventuellement à l'essai de compression uniaxiale.

I-4-4: LOCALISATION PAR MESURES DES DEFORMATIONS:

L'objectif ici est la détermination du seuil de localisation à partir de mesures fournies par des capteurs de déplacements ou des jauges d'extensomètrie. La méthode des déformations repose principalement sur la détection d'un indice, capable de décrire les variations sensibles de la dilatance, et de ce fait concerne les déformations latérales. Des mesures détaillées issues de techniques de mesures fiables, montrent que la déformation latérale et probablement la déformation volumique deviennent non homogènes lorsque naissent des zones d'intense cisaillement. L'amplitude de cette anisotropie augmente jusqu'à la rupture (Brace, Paulding et Scholz, 1966; Spetzler et Martin, 1974; Hadley 1975b; Liu et Livanos, 1976; Soga, Martin et Spetzler, 1976; Paterson 1978; Yanagidani et al. 1985; Santarelli, 1987, 1989 et 1990).

La technique couramment utilisée pour déterminer le seuil de localisation à partir de mesures de déformations est inspirée du travail de Hadley (1975b). Dans l'essai triaxial sur un granite et un Gabbro, l'auteur trace l'ellipse de déformations circonférentielles à différents niveaux de contrainte. Celle ci est contrainte à conserver la symétrie centrale mais libre. L'orientation des axes principaux de déformation est exprimée par l'angle que fait l'axe principal avec l'éventuelle trace de la bande de cisaillement (figure 1.8). Pour un niveau de contrainte proche de la contrainte maximale (de 90 % du pic), on observe que les points s'écartent remarquablement de l'ellipse de référence, ce qui indique que le champ de déformation a cessé d'être homogène par anisotropie de la dilatance. Les échantillons de Gabbro et de granite se sont rompus avec plusieurs intersections de paires de plans conjugués. Les variations des complaisances pseudo élastiques dans les directions latérales ont permis à l'auteur de conclure que la perte d'homogénéité des déformations met en cause directement les événements liés au plan perpendiculaire à l'axe de chargement. Elle attribue la différence entre les complaisances pseudo élastiques mesurées à une distribution non uniforme de la microfissuration axiale dans la direction latérale.

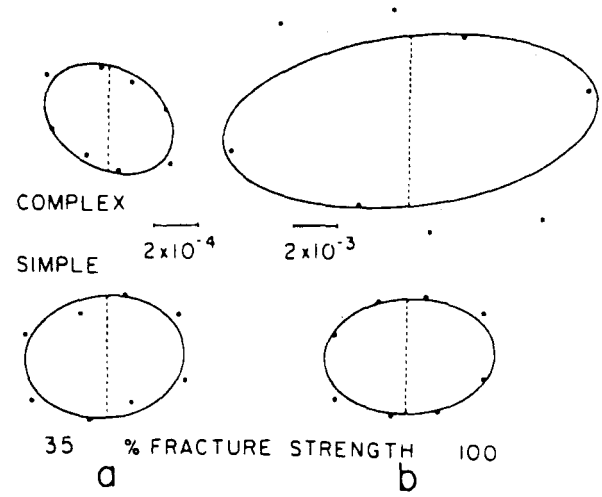


Figure 1.8 : Représentation des ellipses de déformation pour des éprouvettes (granite) chargées en dessous de 90 % (a) et au dessus de 90 % (b) de la résistance à la rupture, d'après Hadley (1975b).

La reprise par Santarrelli (1987) de ce procédé a consisté à caractériser l'uniformité du champ de déformation globale dans un plan perpendiculaire à l'axe de chargement. La procédure expérimentale adoptée consiste alors à déterminer le seuil de localisation des déformations de la non homogénéité du champ de déformation exprimé par les déformations latérales. Tant que la zone de discontinuité principale ou de localisation des déformations ne s'est pas manifestée, les déformations sont supposées uniformes.

On doit à Santarrelli (1989, 1990) la simplification de la procédure expérimentale. Elle consiste à mesurer la déformation radiale dans deux directions perpendiculaires appartenant à une section droite, de l'éprouvette. Si on note 1 l'axe de chargement, et (2 , 3) le plan perpendiculaire à cet axe (pour être dans des conditions optimales, ce plan est situé à mi hauteur de l'éprouvette), la courbe représentant la déformation radiale 2 en fonction de la déformation radiale 3 fournit des informations sur la localisation des déformations car:

(1) sa partie linéaire et l'amplitude de l'écart entre cette pente et 1 (angle de 45° dans un repère orthonormé) est un bon indicateur du degré de l'anisotropie transverse du matériau et du degré d'homogénéité des déformations. Cet écart peut être aussi un indicateur de l'homogénéité de l'essai, si l'isotropie transverse du matériau étudié est préétablie.

(2) La perte de linéarité, exprime une anisotropie de la dilatance ou une perte d'homogénéité dans le champ des déformations. Cette perte de linéarité constitue ainsi un critère expérimental simple de localisation des déformations.

Récemment, l'approche expérimentale basée sur les mesures de déformations a été mise en oeuvre par plusieurs auteurs. Viggiani et al. (1993) déterminent le seuil de localisation en comparant les déformations axiales locales et globales, obtenues à l'aide de mesures dites internes pour les déplacements mesurés sur une partie d'une génératrice, et externes pour celles mesurées sur toute la longueur de l'éprouvette. Les tests ont été menés sur une argile en conditions triaxiales drainées et non drainées. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de détecter à l'aide de ces mesures la perte d'homogénéité des déformations et leur corrélation avec les ruptures en bandes de cisaillement observées. Le seuil de localisation a été cependant, systématiquement signalé presque au pic.

Une autre étude, reposant sur les mesures de déformations en compression biaxiale, a été réalisée par Ord et al. (1991). Dans cette étude, réalisée sur un grès, un dispositif de grande sensibilité a été développée pour des mesures très précises de déplacements. L'hypothèse retenue pour la détection du seuil de localisation dans cette étude consiste à supposer que la localisation se produit en même temps que le glissement le long de la surface de rupture. Le glissement, bien que dépendant des propriétés des surfaces coulissantes est cependant très rapide, et le capteur sensé détecter le seuil de glissement est légèrement excité entre 80 et 90 % de la résistance à la rupture, puis très brutalement sollicité juste avant le pic.

La procédure expérimentale utilisée par Viggiani et al. (1993) et Ord et al. (1991) et leur méthodologie respective est très intéressante à développer. Mais, bien que l'une et l'autre reposent sur la mesure des déformations, les hypothèses de base s'écartent des manifestations directement associés à la dilatance. Nous reviendrons assez souvent sur la méthode des déformations établie sur l'anisotropie de la dilatance et son association avec l'évolution quantitative de la microfissuration, elle constitue l'élément de base dans l'étude expérimentale présentée ici.

I-5 : CONCLUSIONS

Les moyens d'investigation présentés dans ce chapitre visent soit à comprendre le processus de localisation des déformations soit à fournir potentiellement des indicateurs de cette localisation. Dans le cas particulier des roches, d'importants travaux sur la microfissuration ont permis de préciser des mécanismes de déformations (e. g. Hoeck et Bieniawski, 1965; Brace et al., 1966; Fairhust et CooK, 1966; Bieniawski, 1967; Wawersik et Brace, 1971; Gallagher et al., 1974; Hadley, 1975b; Olsson et Peng, 1976; Wong,, 1982b; Brodsky et Spetzler, 1984; Myer et al., 1992). On peut de façon schématique souligner que la compréhension du phénomène de la localisation des déformations réside essentiellement dans la compréhension des interactions entre microfissures responsables de la dilatance. Le rôle de la pression de confinement dans l'essai triaxial apparaît, dans ce contexte, de grande importance dans l'apparition des bandes de cisaillement. Un autre aspect de la rupture fragile reste profondément lié à la distribution des microfissures dans l'échantillon et l'évolution de cette distribution lorsque la contrainte augmente.

La plupart des études détaillées sur la morphologie des microfissures (e.g. Simmons et Richter, 1976, Tapponnier et Brace, 1976; Wong 1982a et Kranz, 1983) indiquent le rôle important joué par la structure du matériau (taille et géométrie des grains, nature des contacts intergranulaires, discontinuités préexistantes, minéralogie etc.). Ils mettent l'accent sur la microfissuration axiale ou légèrement inclinée, qui s'organise et semble à l'origine tant dans le développement de la rupture axiale que dans l'élaboration de la bande de cisaillement. Les efforts théoriques et les tentatives de modélisation numérique appliqués à une fissure individuelle ou à un jeu de fissures en développement dans un milieu continu ont permis d'identifier des paramètres et facteurs d'influence mis en jeu dans les interactions. Cependant, les constatations expérimentales montrent qu'en réalité, la propagation d'une fissure dans la roche, s'écartent considérablement de ces idéalisations.

La théorie de la bifurcation telle que formulée par Rudnicki et Rice (1975) et Rice (1976) dans le cas quasi statique est un cadre adapté pour l'étude de la localisation des déformations dans les roches fragiles. Dans ce cadre, il est apparu que les lois de comportement jouent un rôle central dans l'apparition du mode de déformation localisé et doivent donc intégrer les aspects physiques importants de la déformation des roches: non linéarités, anisotropie induite, dilatance par microfissuration et sensibilité à la pression moyenne.

Les méthodes expérimentales pour quantifier la localisation des déformations sont multiples et peuvent difficilement faire l'objet d'une comparaison systématique. Car le principe exploité dans chacune de ces techniques et les méthodologies expérimentales sur lesquelles

CHAPITRE II

ENDOMMAGEMENT MECANIQUE ET RUPTURE DU GRES DE FONTAINEBLEAU

chacune repose ne sont pas équivalentes. Les unes comme les autres peuvent être très performantes dans un domaine bien précis. A cet égard, les études comparatives menées par Benaija (1992) et par Bascoul et al (1993) nous paraissent exemplaires. Les méthodes quantitatives se distinguent par des résultats originaux et surtout par le fait qu'elles sont capables de suivre l'évolution de la localisation en trois dimensions. Ainsi, contrairement aux autres méthodes qui reposent sur l'examen d'une surface, l'émission acoustique et l'atténuation des vitesses d'ondes élastiques permettent de décrire quantitativement l'évolution de la microfissuration dans tout le volume de l'échantillon. Dans l'étude comparative réalisée par Benaija (1992), la stéréophotogrammétrie semble bien adaptée aux roches, même si pour la détection du seuil de localisation l'émission acoustique apparaît comme la mieux appropriée. Le travail de Bascoul et al. (1993) souligne également l'intérêt du granularité laser.

On peut souligner que les quelques divergences dans les résultats qu'on peut remarquer dans un même type d'essai, sur la même roche ne mettent pas forcément en cause la technique utilisée et pourraient aussi bien être imputables à l'homogénéité de l'essai qu'au système d'enregistrement automatique, ou imposé sous forme de clichés ou encore à la nature du contact entre un émetteur ou un capteur et la roche. Il faut aussi garder à l'esprit, que certaines données sont obtenues après que la contrainte principale a été supprimée, et dans le cas triaxial, la décharge de la pression hydrostatique qui consiste au retour à la pression atmosphérique. Soulignons aussi que parmi ces différentes techniques, certaines à plusieurs étapes de leurs procédures peuvent faire appel à la capacité de résolution et du savoir faire naturel et/ou professionnel de l'opérateur. Nous pensons en particulier à la stéréophotogrammétrie, même si des efforts importants ont été faits ces dernières années pour en simplifier l'utilisation (Desrues, 1989 et 1992).

En résumé, l'analyse bibliographique, montre que l'échantillon de roche naturelle a de toute évidence un comportement et une structure très complexe par rapport à la plupart des matériaux utilisés par l'ingénieur. L'analyse concernant la déformabilité et la rupture, systématiquement associée à la dilatance met l'accent sur le rôle essentiel joué pour ce type de matériau par la fissuration. La synthèse des techniques les plus utilisées à ce jour pour étudier le seuil de localisation ne sont pas équivalentes, tant du point de vue de leurs champ d'application que de leurs sensibilités (nature et/ou type d'essai, minéralogie et texture du matériau). Dans ce contexte, il semble utile de disposer d'une procédure expérimentale qui soit à la fois simple dans sa mise en œuvre, pratique dans le matériel qu'elle exige, et bien entendu efficace. Les mesures de déformations, qui peuvent compléter des procédures expérimentales plus lourdes, s'accordent bien à ces exigences.

INTRODUCTION

Nous avons souligné au premier chapitre le rôle important que joue la microfissuration dans le processus de déformation et de rupture fragiles des roches. La conséquence macroscopique de ce phénomène est l'endommagement. Malgré ses origines microscopiques, l'endommagement d'un élément de volume peut être quantifié à l'aide de mesures locales ou globales mettant en évidence les variations de "constantes" physiques macroscopiques (élastiques ou autres). La localisation des déformations dans les matériaux cohérents fragiles peut être vue comme une conséquence de la localisation de l'endommagement. Aussi, le but de ce second chapitre est double : fournir une caractérisation complète du comportement mécanique de base du matériau étudié et mettre en évidence la forte dégradation anisotrope du matériau sous les sollicitations étudiées.

L'approche expérimentale adoptée pour caractériser l'endommagement du grès de Fontainebleau repose sur l'évolution des modules élastiques du matériau contraint. Il est bien connu que le module de déformation est fonction de l'intensité de la microfissuration et de la quantité des espaces vides présents dans le matériau. Pour évaluer l'endommagement, la procédure expérimentale consiste à utiliser des cycles de chargement - déchargement. Nous donnerons à partir de nos résultats le degré d'anisotropie de l'endommagement et indiquerons les implications de celui-ci sur la rupture du matériau.

Un autre point important sera examiné à la fin de ce chapitre et concerne le rôle de la pression de confinement (pression latérale) et le mode de rupture qui en résulte. Aussi nous présenterons et discuterons les surfaces de rupture obtenues dans les différents essais. Cette dernière section constituera une transition au chapitre 3 consacré à l'étude proprement dit de la rupture en mode de déformations localisé dans le grès.

II - 1 MATERIAU ET EPROUVETTES

II-1-1 : CHOIX DU MATERIAU

Le matériau utilisé dans cette étude est le grès de Fontainebleau. Les principales raisons qui justifient ce choix peuvent se résumer en trois points :

(i) la simplicité chimique et cristallographique de ce grès en font un bon choix de matériau poreux (3 à 30 %) servant de support à de nombreuses expériences en mécanique des roches. En dehors de la cohésion qui lie ses grains de quartz, sa structure semble tout juste un

peu plus complexe que celle d'un sable. Le grès de Fontainebleau est essentiellement formé de grains de quartz ayant subi une longue érosion et un bon classement granulomètrique avant de se déposer. Le dépôt initial est formé de grains de quartz monocristallins, sub - sphériques et de diamètre moyen avoisinant les 250 µm.

(ii) la présence dominante du quartz (98 %), constitue également un avantage pour l'étude de la localisation des déformations. C'est dans les roches riches en quartz (quartzite, grès et granites), que les microfissures sont faciles à observer. En effet, les roches contenant du quartz sont connues pour avoir des fissures à grandes porosités (Nur et Simmons, 1970 ; Dunn et al., 1973 ; Gallagher et al., 1974). Dans ces roches, les microfissures sont visibles et se trouvent principalement dans le quartz, leur longueur est égale ou légèrement inférieure à la taille des grains.

(iii) l'industrie pétrolière est concernée de très près par les ruptures de puits dans les formations gréseuses, ruptures que l'on attribue à des phénomènes de localisation et dont l'entretien et la réparation nécessitent des sommes et des moyens considérables. La plupart des puits de pétrole sont forés dans des bassins sédimentaires où de nombreux problèmes de forabilité et de tenue de parois se posent. En tant que roche réservoir de pétrole, le grès fait ainsi l'objet de nombreuses études de laboratoire (Santarelli, 1987 ; Bourbie et al, 1989).

Le grès de Fontainebleau utilisé dans cette étude a une porosité comprise entre 9 et 11 % et un poids spécifique de 23,7 (± 0,2) KN / m^3.

II-1-2 : PREPARATION DES EPROUVETTES ET DEFINITIONS GEOMETRIQUES

Les échantillons utilisés pour la réalisation des essais sont des cylindres droits à bases circulaires. Ils sont carottés dans un même bloc de grès de fontainebleau sain. Les carottes ont un diamètre de 37,5 mm, la hauteur des éprouvettes est limitée à 75 mm (figure 2.1). Ces dimensions donnent un élancement de 2, et un diamètre de support permettant la mise en place de l'échantillon à l'intérieur d'une cellule adaptée, disponible.

Une rectifieuse est utilisée pour le traitement des surfaces de chargement. Celle-ci est équipée d'un étau rotulé, à mâchoires en V, assurant la fixation de l'éprouvette. Une tête diamantée mobile d'axe normal à celui de l'échantillon assure un polissage qui, compte tenu de la définition géométrique des contacts, s'effectue perpendiculairement aux génératrices. La rectification se fait par incrément de 5 µm ; ainsi la tolérance des imperfections sur le parallélisme des deux surfaces de chargement est inférieur à 10 µm, ce qui respecte la tolérance

exigée et recommandée par la Société Internationale de Mécanique des Roches (I.S.R.M., 1979 et 1983).

L'humidité peut avoir un effet significatif sur la déformabilité et sur la résistance de la roche. Elle peut également entraîner des problèmes d'adhésion des jauges de déformation. Les opérations de carottage, de découpe et de rectification se font à l'eau, le grès étant très abrasif. Les éprouvettes sont conservées dans une étuve déshydratante maintenue à la température constante de 50°C. Soulignons que le comportement du grès de Fontainebleau ne commence à être sensible au traitement thermique qu'au dessus de 300°C (Homand et al., 1987 et Henry et Homand, 1990).

A l'exception des éprouvettes utilisées dans l'essai hydrostatique et dans l'essai d'extension latérale où quatre jauges sont utilisées, six jauges de déformations sont collées à mi - hauteur des éprouvettes testées en compression (figure 2.1). Deux d'entre elles sont destinées à mesurer les déformations longitudinales, elles sont de longueur 5 mm et sont collées le long de deux génératrices diamétralement opposées. Les quatre autres, de longueur 2 mm, disposées perpendiculairement aux génératrices permettent la mesure des déformations latérales dans deux directions transversales orthogonales. La taille plus petite de ces dernières est choisie de manière à minimiser les effets de courbure.

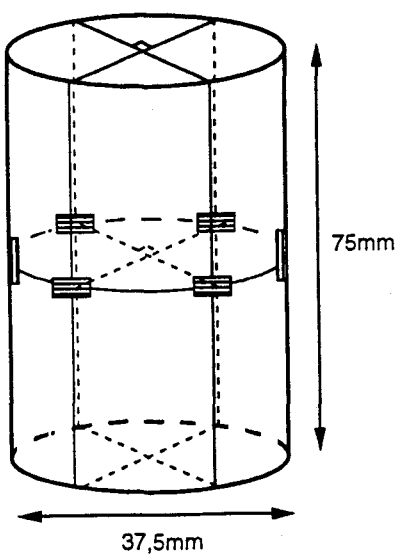


Figure 2.1 : Géométrie des éprouvettes et disposition des jauges de déformation.

Pour les essais triaxiaux, une gaine de silastène assure l'isolation de l'éprouvette de l'huile utilisée pour la mise en pression. La gaine, de diamètre interne 38 mm et d'épaisseur 3 mm, est suffisamment longue pour intégrer les deux embases et assurer la coaxialité éprouvette - embases. L'étanchéité aux endroits où les fils de liaison des jauges traversent la gaine, est réalisée à l'aide d'une bonne quantité de silicone (Rubson) pour éviter toute intrusion de l'huile utilisée pour la mise en pression.

II-2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

II-2-1 : MATERIEL UTILISE

Matériel de mise en pression

Le fluide utilisé pour les mises en pression est l'huile " haute pression " de désignation commerciale " Enerpac ". Son usage courant pour l'alimentation des pompes et systèmes hydrauliques, en font un produit disponible et relativement peu coûteux. Cette huile présente l'avantage de permettre des montées en pression élevées, d'être réutilisable et de protéger le matériel de l'oxydation.

La cellule triaxiale utilisée est capable de supporter une pression de 60 MPa. Son diamètre interne est de 100 mm et sa hauteur utile est de 130 mm. Elle est munie d'un piston mobile sur son plateau supérieur et d'une embase circulaire solidaire au socle, permettant la mise en place de l'éprouvette ; le tout est adapté à recevoir une éprouvette cylindrique à base circulaire de diamètre 37,5 mm sollicitée en compression drainée, non drainée, avec ou sans pression interstitielle. Elle présente également l'avantage d'être décentrée, ce qui permet d'une part, la possibilité de munir l'éprouvette d'un collier de mesure de déformations latérales ou circonférentielles, et, d'autre part, de faciliter la mise en place de l'échantillon et des connexions électriques nécessaires pour le traitement et l'enregistrement des signaux fournis par les capteurs.

La pompe " haute pression " de type Gilson utilisée pour l'application de la pression de confinement est une unité de mise en pression qui assure la montée et le maintien de la pression de confinement à l'intérieur de la cellule tout au long de l'essai. La mise en pression s'effectue par injection d'huile dans la cellule. Grâce à la possibilité de réglage du débit d'huile injecté, elle permet d'adapter la vitesse de montée en pression lorsque la procédure l'exige. Ainsi, lors d'une montée en pression, la vitesse d'injection est choisie très faible (légèrement inférieure à 1 MPa/mn). Une fois que la pression de confinement désirée est atteinte, la vitesse d'injection peut

être réglée à son maximum afin que toute décharge accidentelle puisse être rapidement corrigée. La pompe n'est cependant pas en mesure d'éliminer les surcharges en pression causées principalement par la pénétration du piston dans la cellule. L'affichage manométrique numérique dont elle est munie permet de détecter les surpressions que l'intervention de l'opérateur peut rétablir au moyen d'un détendeur (vanne de régulation).

Matériel de mise en charge

Pour assurer le chargement axial, la machine d'essai utilisée est une presse hydraulique de type " Instron " modèle 8033, dont la charge maximale est de 500 KN. Elle est munie d'un vérin et d'une traverse qui permettent la mise en place des diverses cellules utilisées au laboratoire. Cette machine est pilotée à partir d'une console qui permet à l'opérateur de suivre l'évolution de la charge et le déplacement du vérin par lecture directe sur l'écran. Les données peuvent également être recueillies et suivies à l'aide d'enregistrements potentiomètriques, et/ou sur table traçante, et/ou encore sur une chaîne d'acquisition automatique. A partir du clavier on peut directement intervenir sur les paramètres du test, ce qui facilite le contrôle de la machine et la gestion de l'essai. La machine peut être utilisée en asservissement pré programmé en force, position ou encore à l'aide d'un capteur de déplacement extérieur.

II-2-1 : MONTAGE EXPERIMENTAL ET CONDITIONS D'ESSAIS

Montage expérimental

Pour la réalisation des essais triaxiaux, le montage expérimental représenté par la figure 2.2 a été utilisé. L'éprouvette préalablement gainée et munie de son embase supérieure est introduite dans la cellule. Sur une sortie de la cellule est fixé un capteur de pression de grande sensibilité qui permet de surveiller la moindre variation de la pression de confinement. Cette dernière, appliquée à l'aide de la pompe Gilson s'effectue par une deuxième sortie. Par une troisième sortie étanche à l'araldite, un passage de fils assure le raccordement électrique entre les jauges et le système de traitement des variations de leurs résistances nominales. Ce système de type " Vishay 4000 " est relié à un ordinateur où un logiciel d'acquisition permet le traitement et le stockage des données sur disquette. Les données brutes recueillies peuvent alors être transférées sur un tableur (Excel), sur PC ou Macintosh.

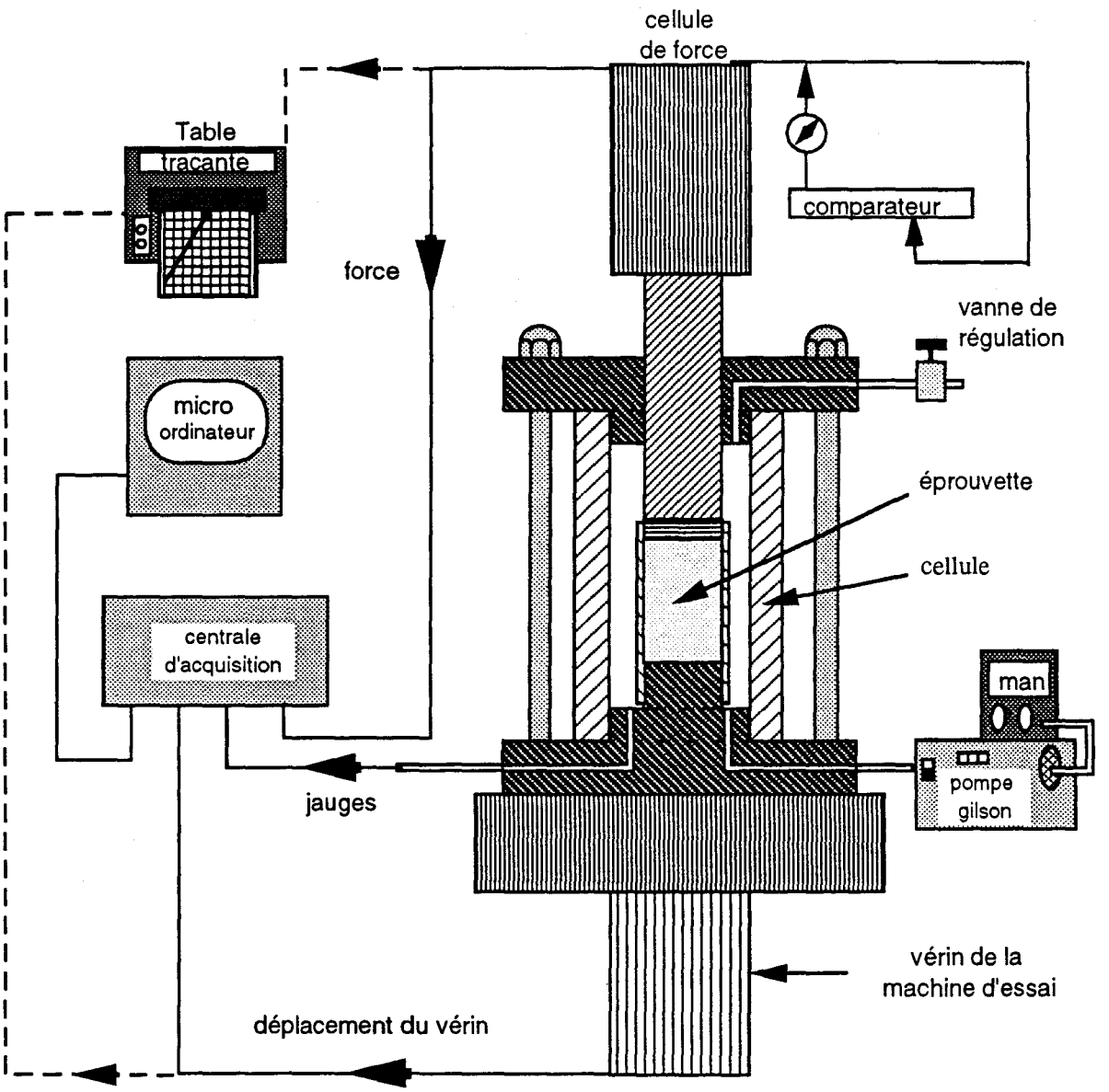


Figure 2.2 : Schéma de principe du dispositif expérimental.

Conditions d'essai

Quelque soit l'essai de laboratoire, le souci principal de l'expérimentateur concerne l'homogénéité des champs de contraintes et de déformation imposés à l'éprouvette. La plupart des travaux sur le sujet, indiquent que l'homogénéité des essais dépend des conditions de frettage et de l'élancement des échantillons. La réalisation dans une éprouvette, d'un champ homogène de compression se révèle très délicate et, surtout lorsqu'il s'agit de l'essai uniaxial ou triaxial à faible pression de confinement. Cependant, pour se rapprocher des conditions d'homogénéité, nous avons simplement respecté des tolérances très strictes lors de la confection des éprouvettes, et un élancement de 2. Un grand soin a été pris dans le but d'assurer un chargement uniforme. La coaxialité de l'ensemble éprouvette, embases, piston et vérin est une opération qui conditionne l'uniformité du chargement et la réussite de l'essai.

La mesure de déformations, si elle est simple dans son principe, doit cependant faire l'objet d'une étude des incertitudes et estimations que l'opérateur est amené à considérer ou à négliger. La prise en compte des incertitudes fait intervenir d'une part la variabilité naturelle du matériau dont les propriétés varient d'un point à l'autre, d'autre part celles engendrées par les instruments de mesure et bien entendu l'opérateur. A cela s'ajoute les procédures qui impliquent une interdépendance entre les erreurs et incertitudes qui à leur tour pèsent sur la sensibilité et peuvent sérieusement affecter les résultats expérimentaux.

Les essais ne sont retenus que si l'écart obtenus dans les réponses des 2 jauges longitudinales et des quatre jauges transversales 2 à 2 sont insignifiants (la tolérance admise est de 5% au maximum). Par ailleurs, un coefficient correcteur a été utilisé dans le but d'avoir le vrai déplacement axial dans l'éprouvette. Ce cœfficient a été déterminé sur un essai uniaxial réalisé dans la cellule triaxiale. Cet essai étalon, a été réalisé sur un échantillon métallique muni de deux jauges dont les réponses ont permis de comparer le déplacement réel à celui fourni par le capteur de déplacement de la presse. Les corrections sur l'effet transversal des jauges ont été abandonnées car nous les avons jugé négligeables (inférieures à 0,1 %) (I.S.R.M., 1979).

Les essais ont été réalisés avec un asservissement en déplacement du vérin. Afin de respecter les hypothèses de sollicitations quasi statiques, nous avons utilisé une vitesse de déformation de 5.10^{-6} / s. Pour éviter de forts gradients de pression sur la surface de l'éprouvette, l'application de la pression de confinement se fait très lentement (moins de 1 MPa / mn).

A l'exception de l'essai hydrostatique et de l'essai d'extension latérale, les essais sont menés jusqu'à la rupture. Une fois que celle-ci a lieu, l'éprouvette est déchargée en déplaçant très lentement le vérin (la même vitesse qui a servi lors du chargement) dans la direction opposée. La décharge latérale s'effectue très lentement par pallier, au moyen du détendeur (vanne de régulation) (figure 2.2). Cette opération s'est avérée nécessaire pour pouvoir observer les lignes de rupture et l'état d'endommagement de l'éprouvette au pic.

Les essais ont été réalisés à la température ambiante, soit généralement, entre 18 et 22° C.

II - 3 : ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE BASE

Après une brève description des modes opératoires, les essais de caractérisation du comportement fragile du grès de Fontainebleau sont présentés et interprétés. Une attention particulière sera accordée à la présence de la dilatance considérée à juste titre, comme précurseur de la rupture du matériau.

II-3-1 : L'ESSAI HYDROSTATIQUE

Modes opératoires

L'essai hydrostatique consiste à mesurer les déformations de l'éprouvette lorsque celle ci est soumise à un champ de contrainte isotrope. Il permet de juger de l'isotropie initiale du matériau et de quantifier les espaces vides dans celui ci. La réalisation de l'essai hydrostatique consiste à soumettre l'éprouvette à un champ de contrainte isotrope : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = Pc$. Nous avons sollicité le matériau jusqu'à une pression de 57 MPa. Cette restriction est imposée par les capacités de résistance de la cellule et la capacité de mise en charge de la pompe Gilson qui sont rappelons le, limitées à 60 MPa. La pression hydrostatique est appliquée très lentement (moins de 1 MPa / mn) avec en plus un arrêt de 5 à 10 minutes tous les 2 MPa. L'enregistrement des déformations se fait à la fin des arrêts, lorsque les mesures fournies par les jauges se stabilisent.

Résultats :

Les déformations longitudinales et transversales en fonction de la pression hydrostatique sont représentées sur la figure 2.3. Ces courbes montrent que sous sollicitations hydrostatiques, les réponses du matériau (ε_l , ε_t) sont identiques dans toutes les directions. Ce résultat déjà rapporté par d'autres auteurs (Ikogou, 1990 ; Sayehi, 1992) montrent que le grès de Fontainebleau est un matériau initialement isotrope.

Si on s'intéresse maintenant à la courbe de déformation volumique ε_v, on constate qu'elle a l'allure que présentent en général, les courbes de compressibilité classiques. On peut y distinguer une phase de serrage plus où moins développée et une partie linéaire. L'importance relative de chacune de ces deux phases, traduit l'état initial de la roche.

L'écart entre l'origine et l'intersection du prolongement de la partie linéaire avec l'axe horizontal permet de quantifier le volume spécifique des discontinuités ou porosité de fissures η_f dans l'état de référence. De même, la valeur σ_f (pression de fermeture des discontinuités) de la contrainte au point où débute la partie linéaire caractérise l'état de microfissuration. Plus les valeurs de η_f et de σ_f sont élevées plus le matériau est poreux ou éventuellement altéré. Pour le grès de Fontainebleau, les valeurs obtenues sont relativement faibles ; elles sont de l'ordre de $1{,}6.10^{-3}$ pour η_f et de 2 MPa pour σ_f.

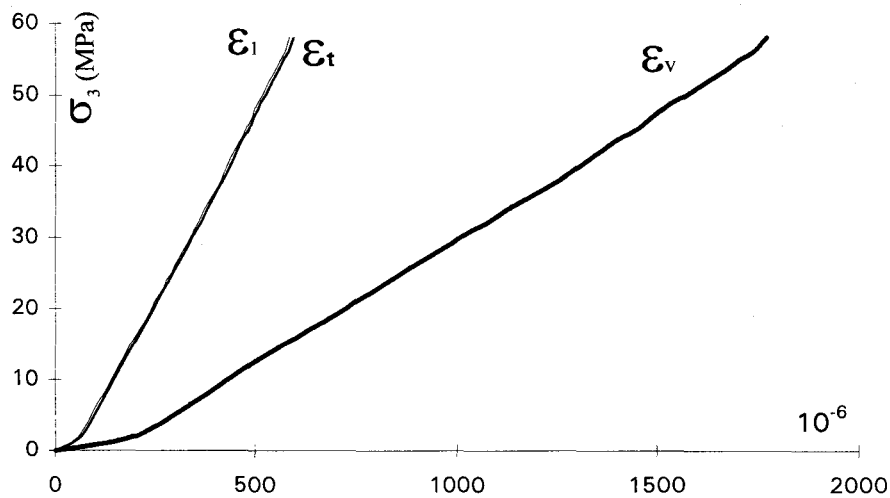


Figure 2.3 : Réponses du grès de fontainebleau sous sollicitations hydrostatiques dans l'essai axisymétrique de révolution.

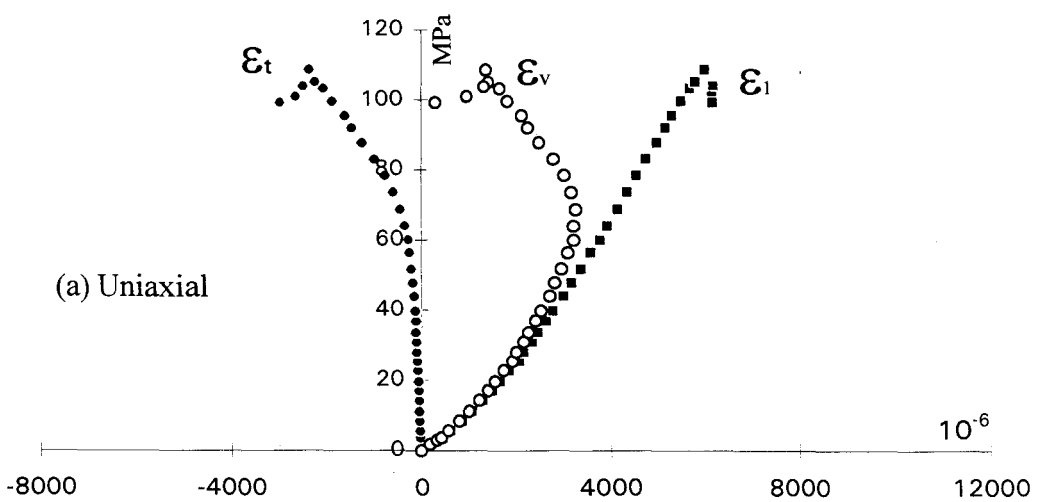
II-3-2 : ESSAIS DE COMPRESSION TRIAXIALE MONOTONE

Modes opératoires

Dans l'essai de compression uniaxiale monotone, l'éprouvette est soumise à un champ de contrainte unidimensionnel de compression σ_1 jusqu'à la rupture, σ_2 et σ_3 étant maintenues à la pression atmosphérique. Dans l'essai de compression triaxiale monotone, la pression de confinement est appliquée à l'aide de la pompe Gilson de façon similaire à la procédure employée pour l'essai hydrostatique. Afin d'éviter une perturbation de l'état de contrainte isotrope initial, le piston de la cellule n'est pas en contact avec l'embase supérieure de l'échantillon pendant cette opération. On maintient ensuite la pression de confinement constante à l'aide du couple pompe détendeur puis on augmente la contrainte axiale. Les pressions de confinement utilisés dans les essais triaxiaux sont 10, 20 et 30 MPa. Elles permettent d'obtenir pour le grès de Fontainebleau un comportement de type fragile. Mais la limitation vient essentiellement du fait qu'au delà de 30 MPa de confinement les contraintes à la rupture dépassent les capacités dynamiques de la presse utilisée.

Résultats :

La figure 2.4 donne les réponses du matériau (déviateurs de contraintes déformations) obtenues dans l'essai uniaxial (a) et pour les pressions de confinement 10 (b), 20 (c) et 30 MPa (d) dans les essais triaxiaux.



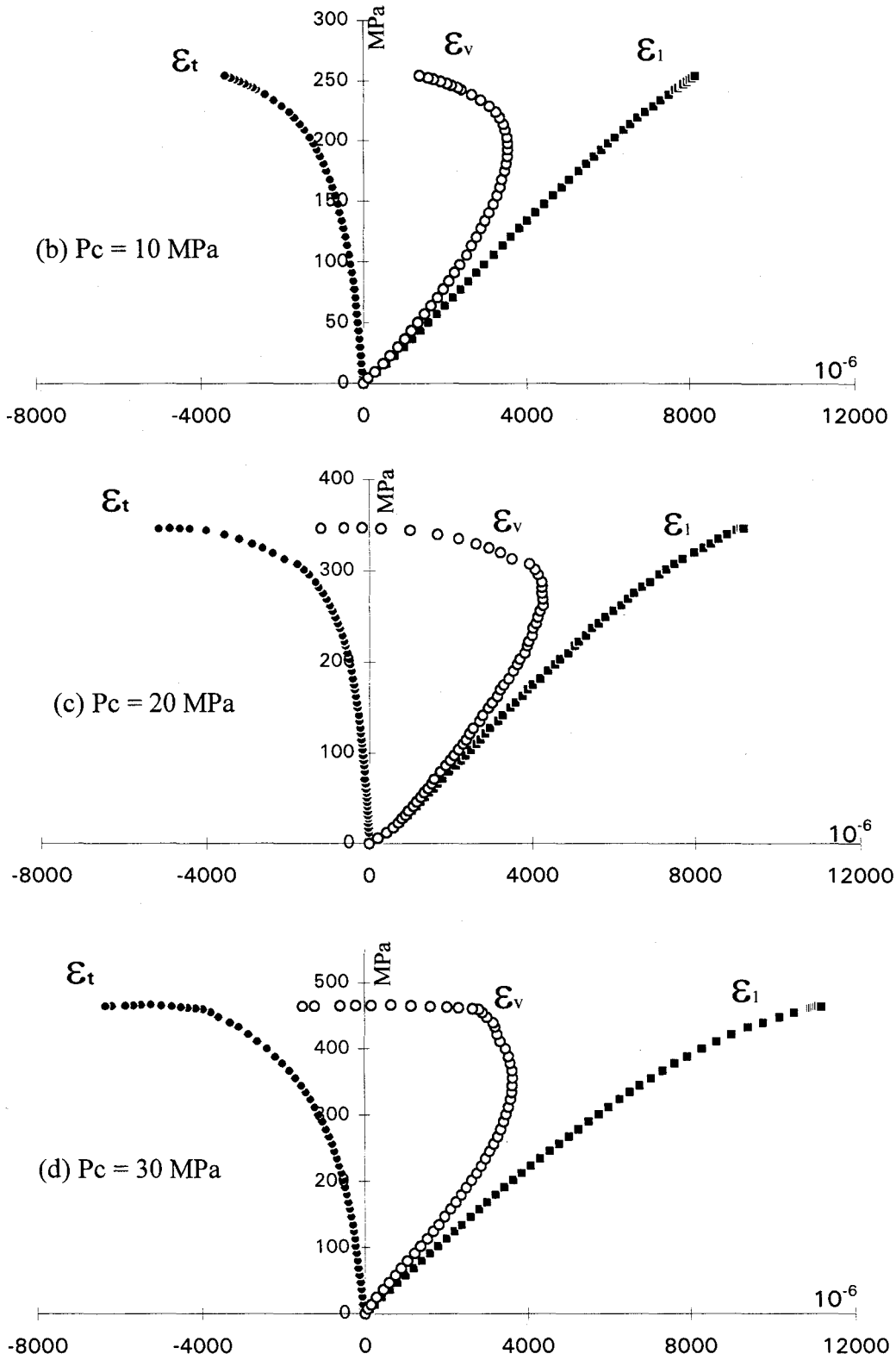


Figure 2.4 : Courbes contraintes déformations. Essais de compression uniaxiale (a) et triaxiales (b, c et d).

On y distingue plusieurs phases successives qui correspondent grossièrement à ce que l'on obtient dans le comportement fragile de la plupart des roches (Bieniawski, 1967 ; Paterson, 1978 pp. 159-160). Tout d'abord on a une phase de fermeture des pores et microfissures préexistantes. Cette première phase dite de serrage, importante dans l'essai uniaxial, est remarquablement réduite ou quasi inexistante dans les essais triaxiaux. Apparaît ensuite un deuxième stade où toutes les déformations sont élastiques linéaires. Cette phase dépasse rarement 40 % de la résistance à la rupture.

La perte de linéarité des courbes contraintes déformations latérales coïncide avec le seuil de microfissuration. C'est généralement autour de ce niveau de la contrainte déviatorique que les premières microfissures induites par la contrainte mécanique ont été rapportées dans la littérature. Désigné aussi par seuil de dilatance, il marque le début d'une phase d'amorçage et de propagation stable de la microfissuration. Les courbes contraintes déformations axiales, au demeurant linéaires, témoignent de la tendance des microfissures à se développer parallèlement à l'axe de chargement. A l'origine de la dilatance, cette microfissuration est supposée avoir une distribution relativement homogène dans l'éprouvette ; elle se développe ensuite sur une faible longueur, puis devient stable. Ici, cette phase de déformation s'étend jusqu'à un niveau qui varie de 65 % de la résistance à la rupture dans l'essai de compression uniaxiale à 75 à 80 % dans les essais triaxiaux.

Enfin, le seuil de non linéarité des déformations axiales, et en même temps ou presque, une forte concavité des courbes de déformations latérales, indiquent le début de la propagation instable de la microfissuration. Dans nos essais, ce niveau de contrainte coïncide approximativement avec celui où le taux de déformation volumique change de signe. Il en résulte une augmentation plus ou moins importante de la dilatance qui indique qu'un soudain changement du mode de propagation des microfissures s'est établi (Bieniawski, 1967). On attribue à ces manifestations macroscopiques l'augmentation du nombre, de la longueur et de la densité des microfissures induites lors de la phase précédente, ou encore l'apparition de nouvelles et, en particulier, les premières microfissures inclinées.

Au delà de ce niveau de contrainte, les microfissures atteignent des configurations instables, s'organisent par des interactions qui résultent des phénomènes physiques qui conditionnent la distribution des concentrations des contraintes locales. C'est autour de ce niveau du déviateur de contrainte que se produit le passage au mode localisé. Nous avons déjà souligné comment il est encore difficile de décrire les mécanismes de déformations durant cette phase et au cours de laquelle la microfissuration s'organise pour donner naissance à la surface de rupture. Ce point précis sera abordé aux chapitres 3 et 4 et fera l'objet d'une étude détaillée dans la section V-2 du chapitre 5 (observations microscopiques).

Durant cette phase de déformation, les réponses obtenues au niveau macroscopique ne concernent que l'état d'endommagement de la microstructure et l'intensité de la microfissuration. Les essais de fluage montrent que durant ce dernier stade de déformation qui précède la rupture, l'augmentation de la quantité des espaces ouverts dans la roches se poursuit résultant de l'allongement des "vieilles" fissures et la naissance de nouvelles. Les techniques telles les observations microscopiques (Kranz, 1979a, 1980) et l'émission acoustique (Lockner et Byerlee, 1992) témoignent de cette activité de la microfissuration, bien que les contraintes soient maintenues constantes. Ces études soulignent également l'effet de la pression de confinement (Kranz, 1980).

Interprétation en terme de dilatance

L'interprétation proposée pour les réponses mécaniques sous sollicitations triaxiales conduit à la notion de dilatance que l'on doit bien entendu attribuer à la microfissuration. Le concept et le terme dilatance dans les matériaux granulaires ont été introduit pour la première fois par Reynolds (1901). Il la définissait comme la variation du volume de la masse granulaire lorsque sa forme est altérée (Liu et Livanos ; 1976). Le travail de Brace, Paulding et Scholz (1966) constitue la première étude détaillée sur la dilatance dans l'essai triaxial. Leurs investigations portaient sur sa corrélation éventuelle avec les étapes successives dans les mécanismes et l'évolution de la microfissuration. Beaucoup de travaux sur la dilatance ont été stimulés par les hypothèses de son rôle central dans les mécanismes des séismes et son association avec leurs signes prémonitoires (Paterson, 1978 pp.114-120).

La dilatance est définie comme l'augmentation inélastique du volume lorsqu'on déforme l'échantillon (déformation volumique inélastique). L'évaluation de la dilatance exige le tracé d'une ligne de référence élastique virtuelle qui est habituellement une extrapolation de la partie quasi linéaire de la courbe de déformations volumiques, en ignorant la phase de serrage. La dilatance est l'écart qui existe entre cette courbe et la droite fictive qu'on aurait obtenue si la déformation volumique était élastique comme dans le cas du chargement hydrostatique. On définit le seuil de dilatance comme étant le niveau de contrainte où se situe la perte de linéarité de la courbe de déformations volumiques. Il est largement admis qu'il marque l'amorçage de la propagation ou de la prolifération des microfissures. En réalité, ce concept de seuil de dilatance n'a pas de signification physique réelle parce que la transition entre le stade de déformation purement élastique et celui du développement de la microfissuration est progressive. Les variations de la dilatance en fonction de la déformation axiale, relatives aux essais de compression présentés dans la figure 2.4, sont proposées dans la figure 2.5. On observe notamment une accélération de la dilatance à l'approche de la rupture. Cette observation suggère que la dilatance dans la roche peut être un sérieux indicateur de la rupture.

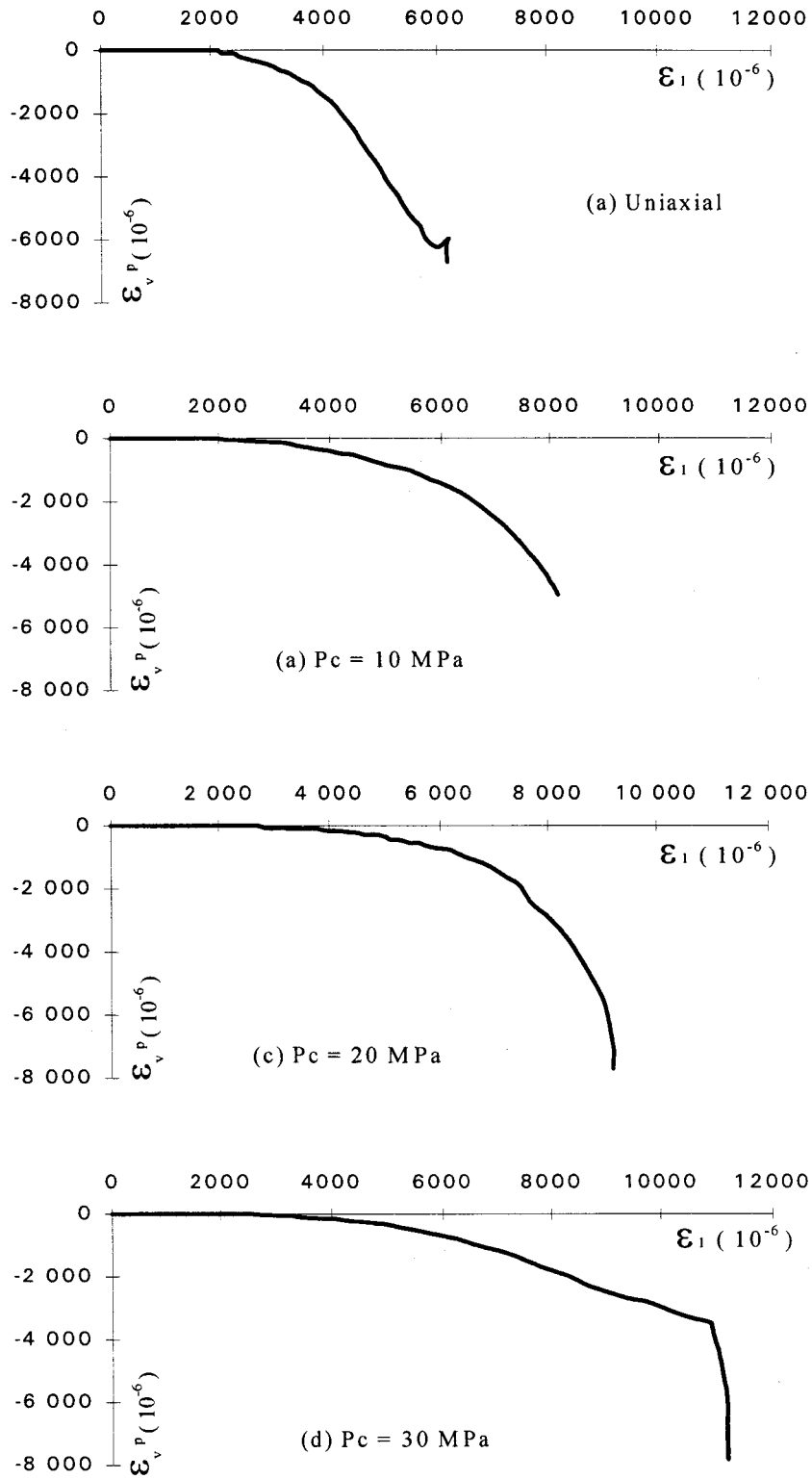


Figure 2.5 : Courbes de dilatance : déformations volumiques inélastiques en fonction de la déformation axiale. Essais de compression uniaxiale (a) et triaxiale (b, c et d).

II- 3 -3 :ESSAIS DE COMPRESSION AVEC CYCLES DE CHARGEMENT - DECHARGEMENT

Les essais triaxiaux ont permis de montrer le comportement non linéaire du grès de Fontainebleau, l'anisotropie induite par le chargement dans la réponse du matériau et enfin la présence d'une forte dilatance. Nous avions suggéré dans l'interprétation de ces essais le développement d'une microfissuration orientée dont la conséquence immédiate est l'endommagement anisotrope du matériau. Les essais cycliques présentés dans ce paragraphe visent à caractériser et quantifier de façon simple cet endommagement à partir des modules élastiques.

Modes opératoires :

Le mode opératoire initial est identique à celui utilisé dans les essais de compression monotone. Pour assurer une bonne stabilité des essais cycliques, la démarche suivie a consisté à déformer l'éprouvette jusqu'à un déviateur donné, puis à effectuer une décharge en utilisant la même vitesse de déformation. Les déchargements sont réalisés à des niveaux de déviateurs préalablement choisis. Les opérations de chargement et de déchargement sont séparées par une phase de relaxation de la contrainte déviatorique dont les durées varient de 1 heure à 2 heures et 30 mn. Cette procédure fait que les essais cycliques triaxiaux durent en moyenne 20 heures et exigent la présence et la vigilance de l'opérateur tout au long du test. La réalisation de cette phase de relaxation vise deux objectifs :

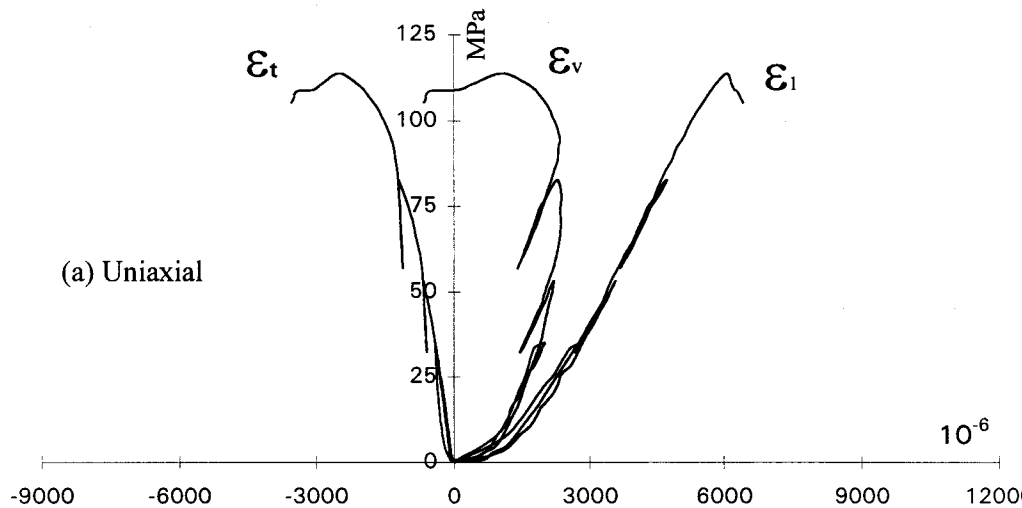
(1) limiter les boucles d'hystérésis dues aux glissements des lèvres des discontinuités (induites ou naturellement) présentes dans le matériau. En effet, la phase de relaxation des contraintes vise à réduire les effets de viscosité (boucles d'hystérésis) et donc à améliorer la détermination des modules élastiques. La pente initiale obtenue lors de la décharge qui suit la relaxation donne une valeur plus réaliste du module élastique.

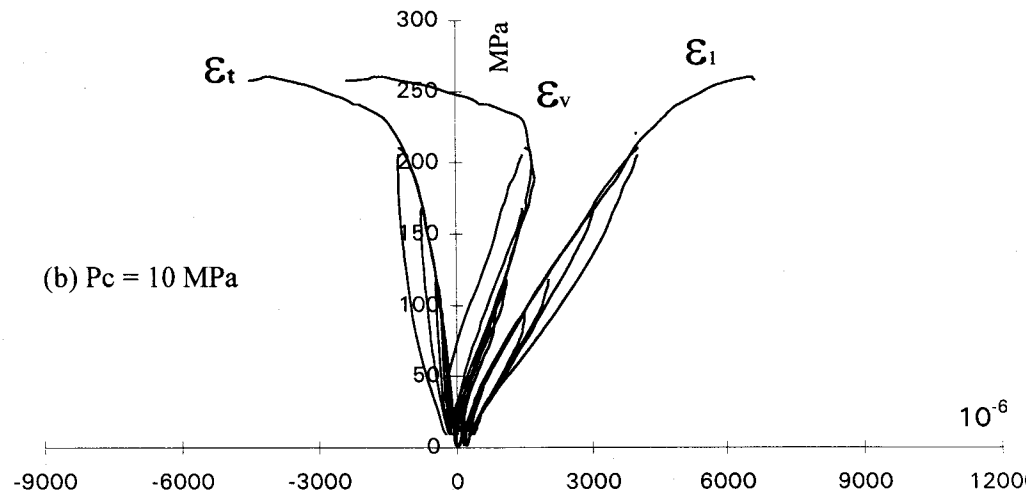
(2) l'obtention d'une enveloppe des courbes à peu près identique à celles obtenues dans l'essai monotone correspondant. Par ailleurs, cette relaxation des contraintes permet de situer l'essai dans le contexte des hypothèses de sollicitations quasi statiques (Cristescu, 1989).

Les cycles sont au nombre de 4 pour l'essai de compression uniaxiale et de 5 cycles dans le cas des essais de compression triaxiale.

Résultats des essais cycliques :

La figure 2.6 montre l'évolution des déformations axiales ε_1 et transversales ε_t en fonction du déviateur de contrainte (σ_1 - σ_3) dans l'essai uniaxial (2.6a) et dans les essais triaxiaux menés à 10 (2.6b), 20 (2.6c$_1$ et 2.6c$_2$) et 30 MPa (2.6d) de confinement. Au vu des objectifs fixés, les déchargements n'ont pas systématiquement été poursuivis jusqu'au retour à l'état hydrostatique. Toutefois, l'essai triaxial mené à 10 MPa (figure 2.6b) et 20 MPa (figure 2.6c$_2$) de confinement ont été réalisés de cette manière. On notera que le mode opératoire (décrit ci dessus) a permis de réduire les boucles d'hystérésis de façon remarquable, en comparaison avec les essais cycliques réalisés sur le même matériau par Ikogou (1990) et Sayehi (1992). Les essais où les déchargements ont été réalisés sur une étendue moins importante, tel les essais de compression uniaxiale (figure 2.6a) et triaxiale menés à 20 et 30 MPa (figures 2.6c$_1$ et 2.6d), la détermination des modules élastiques se fait sans ambiguïtés et avec davantage de précision.





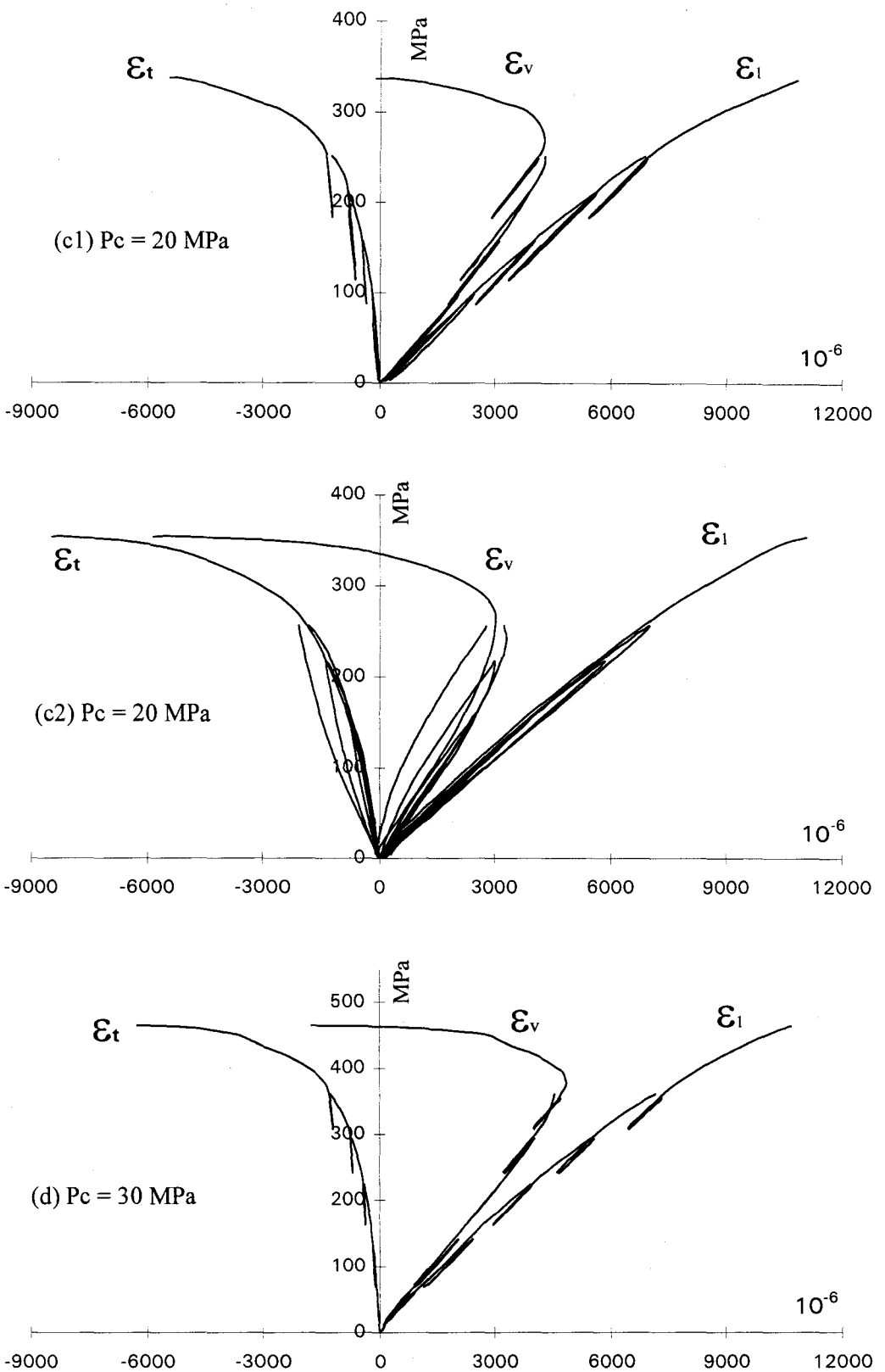


Figure 2.6 : Courbes contraintes déformations. Essais de compression uniaxiale (a) et triaxiale (b, c1, c2 et d) cycliques avec chargement déchargement rechargement. c1 et c2 représentent un exemple des deux types de chargement cyclique réalisés.

A première vue, on constate une très faible variation des pentes élastiques longitudinales alors que les décharges des déformations latérales montrent de grandes variations. Ceci montre la nature anisotrope de l'endommagement sous ce type de sollicitations. Notre objectif ici n'étant pas une étude poussée de l'endommagement anisotrope, nous nous limiterons ici à une méthodologie d'évaluation expérimentale simple.

II-4 : EVALUATION EXPERIMENTALE DE L'ENDOMMAGEMENT ANISOTROPE : EQUIVALENCE EN ENERGIE.

La définition d'une variable d'endommagement (dégradation d'origine microscopique du matériau) et par conséquent la mesure d'une telle variable est une tâche difficile (voir par exemple Lemaitre, 1990). La mesure de l'endommagement adoptée dans cette section est fondée sur le concept de contraintes effectives initialement introduite par Kachanov (1958) puis Rabotnov et généralisée au cas tridimensionnel par Lemaitre et Chaboche (1978). Ces derniers auteurs avaient de plus proposé la notion d'équivalence en déformation, souvent utilisée pour évaluer un dommage isotrope. De part le caractère anisotrope de l'endommagement en compression triaxiale, il est nécessaire d'interpréter les résultats des essais cycliques de chargement - déchargement à l'aide de l'équivalence en énergie proposée par Cordebois et Sidoroff (1979). Cette approche, que nous avons retenue et dans laquelle la variable d'endommagement D est un tenseur d'ordre 2, a déjà été mise en oeuvre par certains auteurs comme Benouniche (1979) sur un béton.

II-4-1 : EQUIVALENCE EN ENERGIE, PROCEDURE EXPERIMENTALE

Cordebois et Sidoroff (1979) ont proposé une généralisation de la notion de contraintes effectives pour un endommagement anisotrope sous la forme : $\tilde{\sigma} = M(D)\sigma$ où σ est la contrainte usuelle et M(D) est une application de l'espace des tenseurs (d'ordre 2 ici) dans lui même. Une particularisation de cette transformation permet d'écrire :

$$\tilde{\sigma} = (1-D)^{-1/2}\sigma\,(1-D)^{-1/2}$$

En postulant l'équivalence de l'énergie de déformation élastique entre le matériau sain soumis à la contrainte effective et le matériau endommagé sollicité à l'aide de la contrainte usuelle, les auteurs montrent que la loi de comportement peut s'écrire dans le repère principal

d'endommagement (ici repère des sollicitations) sous la forme (Cordebois et Sidoroff, 1979) : $\varepsilon = s{:}\sigma$

De façon explicite, la loi s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tilde{E}_1} & \frac{\tilde{\nu}_{21}}{\tilde{E}2} & \frac{\tilde{\nu}_{31}}{\tilde{E}3} \\ \frac{\tilde{\nu}_{12}}{\tilde{E}1} & \frac{1}{\tilde{E}_2} & \frac{\tilde{\nu}_{32}}{\tilde{E}_3} \\ \frac{\tilde{\nu}_{13}}{\tilde{E}_2} & \frac{\tilde{\nu}_{23}}{\tilde{E}_2} & \frac{1}{\tilde{E}_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

avec dans le cas d'un matériau initialement isotrope (de modules E et ν) :

$$\tilde{E}_i = E(1-D_i)^2 \quad \text{et} \quad \tilde{\nu}_{ij} = \nu \frac{1-D_i}{1-D_j} \qquad i,j = 1,2,3.$$

Ce système conduit aux valeurs principales du tenseur d'endommagement :

$$D_1 = 1-\left(\frac{\tilde{E}_1}{E}\right)^{1/2} \quad ; \quad D_2 = 1-\nu\frac{(1-D_1)}{\tilde{\nu}_{12}} \quad \text{et} \quad D_3 = 1-\nu\frac{(1-D_1)}{\tilde{\nu}_{13}}$$

On notera que D_2 et D_3 peuvent être également évalués (de manière indépendante de D_1) respectivement à partir des modules $\tilde{E}_2$ ou $\tilde{E}_3$, à condition que les décharges latérales soient de faibles amplitudes.

Pour l'essai triaxial de révolution, les deux directions transversales étant équivalentes on a $D_2 = D_3$. L'évaluation de la variation des caractéristiques élastiques permet ainsi dans le cas uniaxial de déterminer aisément les endommagements principaux. Dans le cas général de l'essai triaxial, la méthode est également applicable mais il est nécessaire de tenir compte du confinement (Gotuwka, 1994).

II-4-2 : RESULTATS ET CONCLUSIONS

Les essais triaxiaux avec cycles de chargement- déchargement à des niveaux de déviateurs préalablement choisis sont interprétés dans le cadre théorique que nous venons de présenter. Les courbes de la figure 2.7 montrent les variations des endommagement longitudinal et transversal pour différents essais triaxiaux. On constate que les raideurs longitudinales varient peu au cours du chargement ; l'endommagement longitudinal (D_1) maximal se stabilisant rapidement à une valeur proche de 0.2 dans tous les cas. Par contre, l'endommagement latéral D_2 varie de façon significative atteignant des valeurs proches de 0.8 à la rupture du matériau.

Le taux d'accroissement de D_2 dépend de façon cruciale de la pression de confinement. Dans le cas d'une pression faible (Pc = 10 MPa par exemple), on observe que la plus grande partie du dommage transversal est obtenue dans les premières phases de déformations. On note aussi l'existence d'une valeur asymptotique pour cet endommagement. Pour Pc = 20 et 30 MPa l'évolution est plus progressive et l'existence de valeur asymptotique moins évidente. Ceci est sans doute lié à l'effet de fermeture qu'exerce la pression sur les microfissures.

En résumé, malgré sa relative simplicité, la méthodologie expérimentale pour déterminer l'endommagement anisotrope en compression triaxiale du grès de Fontainebleau a montré son efficacité. Moyennant l'hypothèse de l'équivalence en énergie, la mesure de la raideur longitudinale et du pseudo coefficient de Poisson ont permis de caractériser de manière complète l'anisotropie de l'endommagement.

Les résultats obtenus montrent que l'endommagement latéral (D_2) augmente très fortement avec la déformation, tandis que la composante longitudinale de cet endommagement reste faible. L'augmentation observée pour D_2 est progressive en présence de confinement moyens (20 et 30 MPa), tandis que la majeure partie de la dégradation est obtenue dans les premières phases de déformations pour de plus faibles confinements (10 MPa). Cet endommagement doit être pris en compte dans les lois de comportement si l'on veut décrire correctement la localisation des déformations dans ce grès.

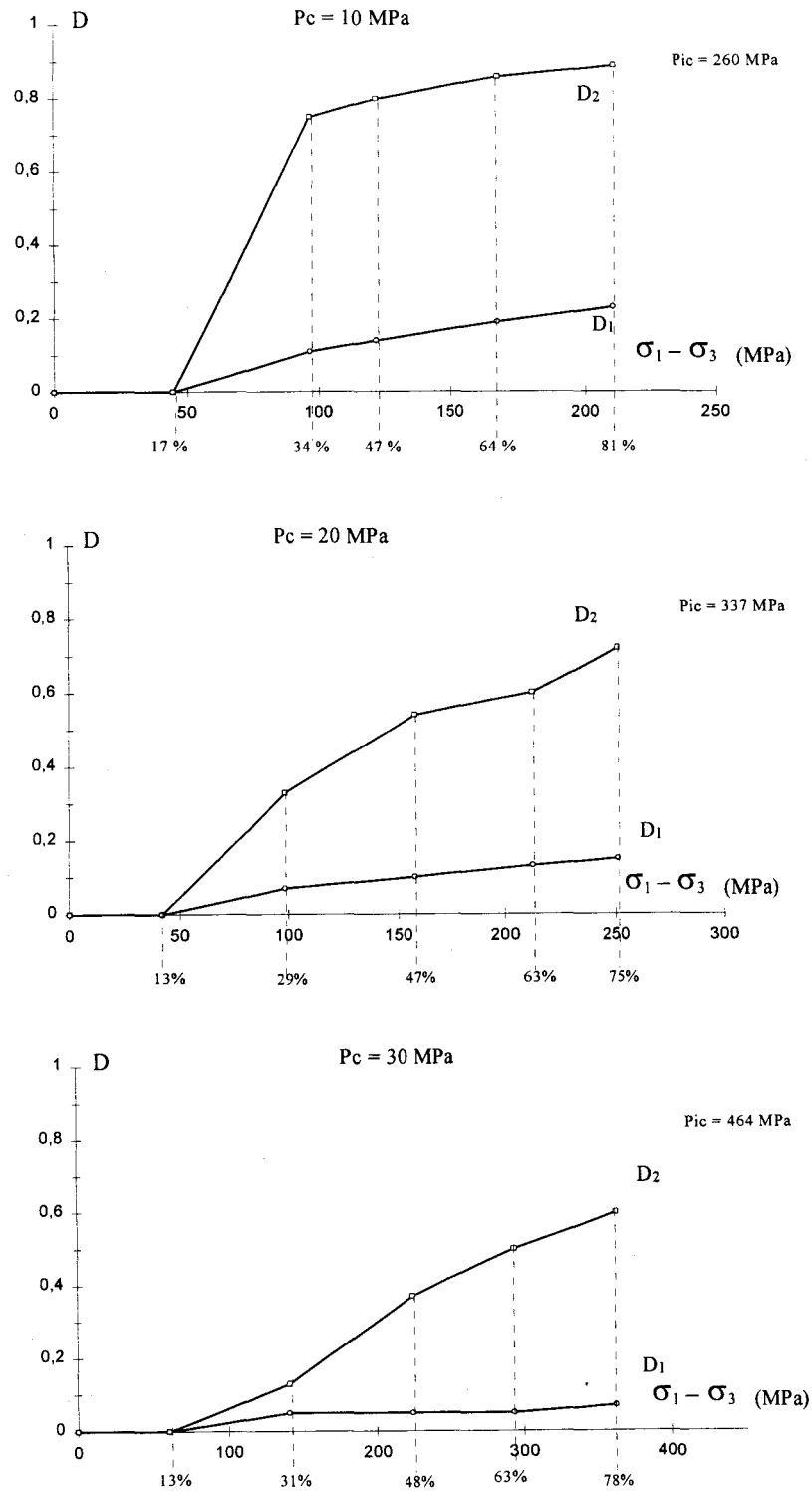


Figure 2.7 : Variations de D_1 et D_2 en fonction du déviateur de contrainte. Les niveaux de décharges par rapport au pic, où le calcul de D_1 et de D_2 a été réalisé, sont indiqués.

II-5 : AUTRES CHEMINS DE SOLLICITATIONS

La caractérisation du comportement mécanique de base étant réalisée, terminons les investigations expérimentales de caractérisation du matériau par deux chemins de sollicitations souvent utilisés pour une première validation des modèles : l'extension latérale et les sollicitations proportionnelles.

II-5-1 : L'ESSAI D'EXTENSION LATERALE

Le mode opératoire de l'extension latérale consiste à soumettre d'abord l'éprouvette à un état de contrainte isotrope donné. Il s'agit d'une pression hydrostatique égale ici à 56 MPa. L'extension latérale est réalisée en effectuant la décharge de la pression latérale seule. L'asservissement se fait en force contrôlée, la contrainte axiale est imposée constante, égale à 56 MPa. La décharge de la pression latérale est réalisée en agissant sur le détendeur et se poursuit jusqu'au retour à la pression atmosphérique. A chaque incrément, l'enregistrement des paramètres est effectué après un temps d'arrêt nécessaire à la stabilisation des jauges. Les variations des déformations en fonction de la pression latérale sont représentées sur la figure 2.8. On observe sur ce chemin des non linéarités importantes tant pour les déformations axiales que transversales.

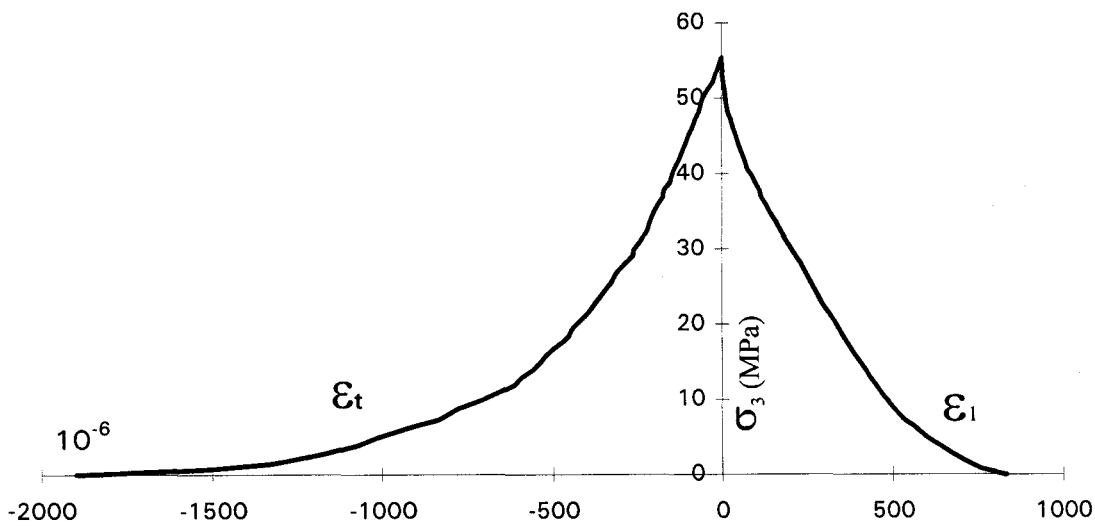


Figure 2.8 : Courbes représentant les réponses en déformations axiales ε_l et transversales ε_t obtenues dans l'essai d'extension latérale.

II-5-2 : LES ESSAIS PROPORTIONNELS

Le mode opératoire dans les essais proportionnels consiste à charger l'éprouvette simultanément dans la direction axiale et dans la direction latérale de sorte que le rapport contrainte axiale sur contrainte latérale soit maintenu égal à une constante, notée K. Le chargement latéral a été effectué par pallier de 1 MPa. Les essais proportionnels ont été réalisés pour deux valeurs courantes de K : 15 et 30. Les réponses obtenues pour ces deux essais sont présentées sur la figure 2.9. Les courbes montrent une plus grande linéarité des déformations axiales que dans les chemins précédents et la dilatance devient importante dès lors qu'on atteint 60 % de la résistance à la rupture.

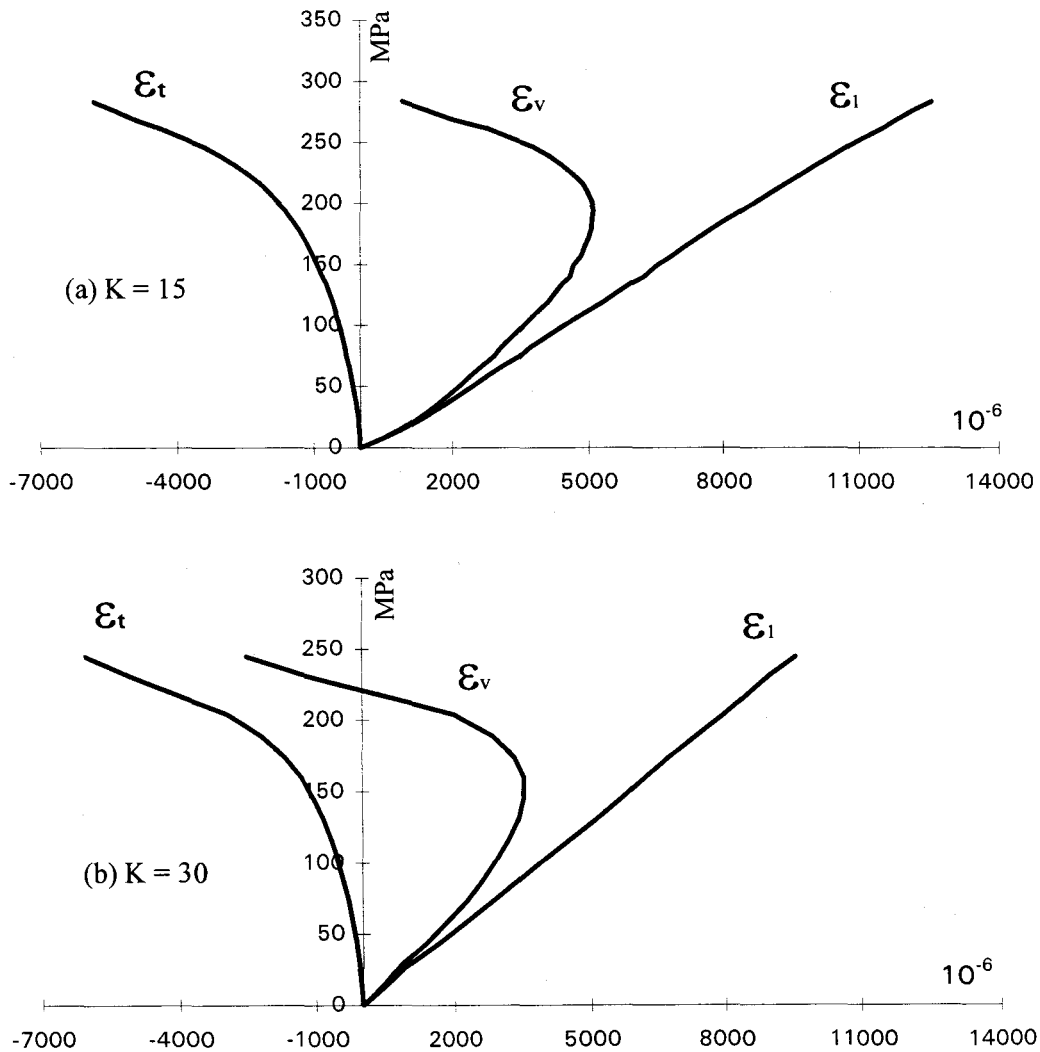


Figure 2.9 : Variations des déformations en fonction de la contrainte déviatorique. Essais de compression proportionnelle dans le cas K = 15 (a) et K = 30 (b).

II-6 : ANALYSE ET OBSERVATIONS SUR LES LIGNES DE RUPTURE

Pour avoir des lignes de rupture exploitables, au moment précis où la rupture se produit, la contrainte déviatorique, bien qu'ayant subi un saut, est stoppée. La décharge est réalisée à la même vitesse qui a servi au chargement axial. Lorsque le piston n'est plus en contact avec l'embase supérieure, le retour à la pression atmosphérique s'effectue très lentement en manipulant le détendeur. La soudaineté et la brutalité de l'événement de très courte durée de la rupture indiquent l'incapacité de la machine d'essai (rigidité) et de nous même à réagir assez rapidement pour éviter ce saut de contrainte afin de mieux contrôler la rupture. L'idéal serait que la machine d'essai permette de limiter l'énergie transmise à l'éprouvette, de façon à ne lui communiquer que la quantité minimale nécessaire pour que sa rupture se développe de manière progressive (Wawersik et Brace, 1971). Dans ce cas, l'énergie de déformation emmagasinée dans le système "éprouvette-machine d'essai" équilibre l'énergie nécessaire pour rompre la roche. Ceci pourrait éventuellement être contourné si l'asservissement de la charge appliquée était contrôlé par le déplacement transversal ; nous y reviendrons.

La manière et le mode selon lequel la rupture fragile se développe dans un échantillon soumis à des contraintes déviatoriques dépendent du chemin de sollicitation (uniaxial, triaxial, cyclique ou monotone) et de la pression de confinement. Il a été possible de distinguer plusieurs types de ruptures. Soulignons que la plupart des essais ont été plusieurs fois répétés (allant parfois jusqu'à 4 fois) et que les descriptions qui vont suivre font état des observations qui se sont reproduites le plus souvent. Lorsque les détails de nos descriptions des lignes de ruptures seront limitées, une photographie ou une schématisation en complétera l'illustration.

Essai de compression uniaxiale

Dans l'essai uniaxial, la rupture se développe le plus souvent selon des plans parallèles à l'axe de l'éprouvette et pour le grès étudié ici, on ne distingue pas réellement la formation de surfaces discrètes. Cette rupture axiale s'accompagne d'un endommagement total de l'éprouvette avec un détachement de plaques et la production d'une quantité relativement importante de sable. Certains des petits fragments de faibles épaisseurs sont projetés à plusieurs mètres, et lorsqu'on les examine, on ne constate aucune perte de cohésion. Les parties de l'éprouvette les moins endommagées laissent apparaître une série de surfaces verticales qui s'arrêtent avant les extrémités de l'éprouvette pour se diriger vers les coins. Concernant l'essai cyclique, on assiste au moment où la rupture se produit, à l'éclatement total de l'éprouvette à un point tel qu'il n'a pas été possible d'en donner une description objective.

A faible confinement

Dans l'essai à faible pression de confinement (10 MPa), en dehors d'une quantité de sable (moins importante) et de quelques rares fragments de petites tailles, qui sont restés prisonniers dans la gaine de silastène, la rupture est matérialisée par deux blocs prédominants. On observe souvent quelques fissures axiales sur l'un des deux blocs, le deuxième, semble intact. L'observation plus détaillée de la surface de rupture, après avoir chassé le sable, laisse apparaître un cône de hauteur environ le tiers de la hauteur de l'éprouvette . La restauration du deuxième bloc, même si elle ne le met pas clairement en évidence indique l'existence d'un autre cône de même nature (photos 2P1b). La reconstitution de l'ensemble de l'éprouvette montre que le sable produit provient essentiellement du centre de l'éprouvette. Cette constatation semble indiquer que la décohésion à l'origine de la production de ce sable, dont résulte l'augmentation remarquable de la dilatance avant le pic (figure 2.5), s'est probablement produite avant la rupture.

La présence de ces cônes met en cause l'homogénéité de l'essai. Même si l'uniformité dans l'application de la contrainte et la coaxialité de l'ensemble échantillon, embase et piston ont été soignées. L'existence de ces cônes indique la formation au cours du chargement d'un coin rigide qui résulte d'un frottement qui a pour conséquence de bloquer les déformations latérales et circonférentielles. On retiendra qu'une pression de confinement inférieure ou égale à 10 MPa n'est pas en mesure d'empêcher le frettage dont les conséquences ont été observées.

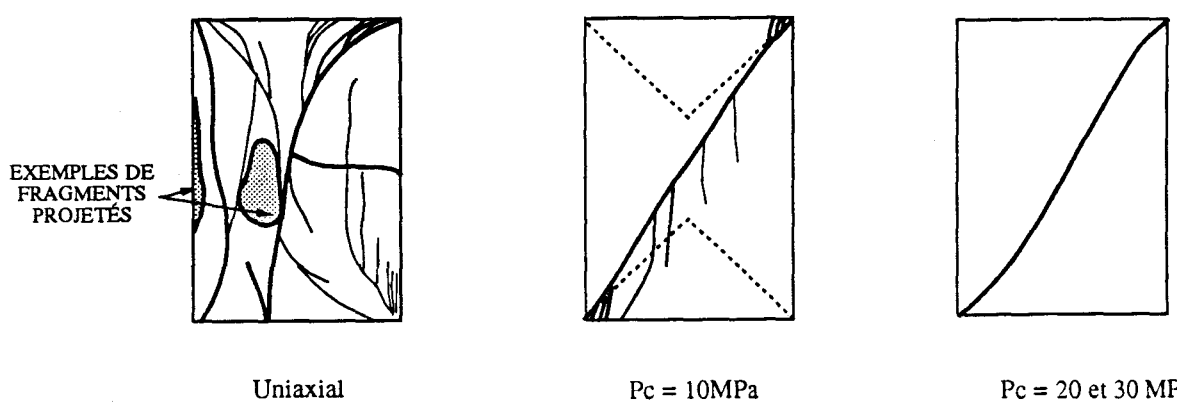


Figure 2.10 : Schématisation des types de rupture obtenus dans les essais monotones.

A pression de confinement élevée

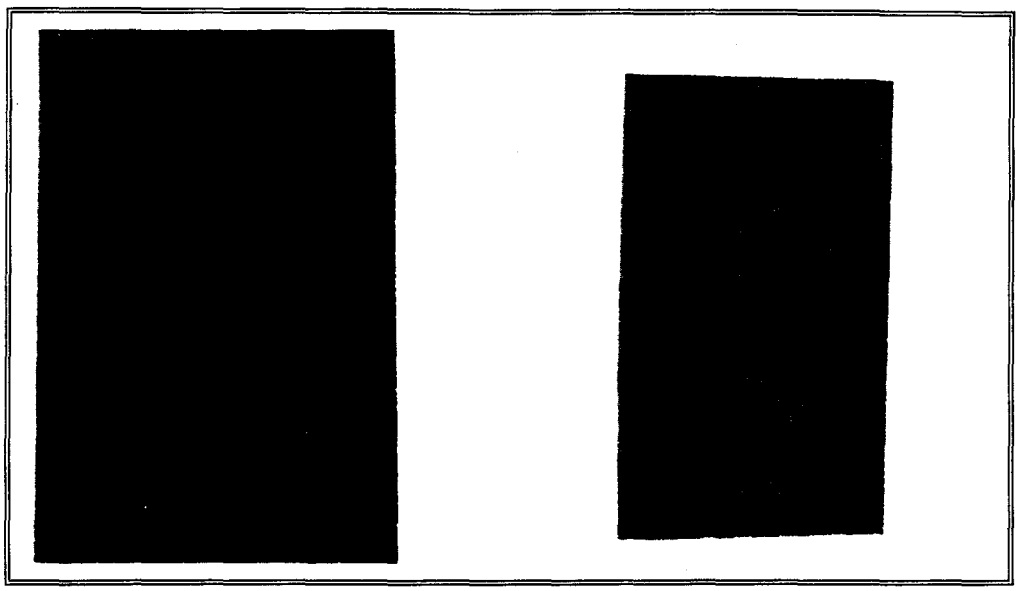
Lorsque la pression de confinement devient relativement élevée (20 et 30 MPa), les effets de frettage sont remarquablement réduits, et la rupture observée se développe d'une manière classique le long d'un plan unique faisant un angle compris entre 29 et 32° avec la direction de la contrainte principale majeure. Les contours des lignes de rupture montrent une forte dilatance locale visible sur toute la longueur, cette dilatance paraît s'accentuer lorsque les lignes de rupture franchissent la mi hauteur de l'éprouvette. L'examen des deux blocs que partage la bande de cisaillement, montre que leurs surfaces ne laissent apparaître aucun signe de faiblesse ou de décohésion.

Rupture dans les essais cycliques

En revanche, les éprouvettes testées dans les essais triaxiaux cycliques laissent apparaître une multitude de lignes (lignes de Luders), au point qu'il est difficile de distinguer celles qui émergent de la surface de rupture principale. Leurs orientations varient sur une même ligne, d'un point à un autre et d'une ligne à l'autre (voir photos 2P2a, 2P2b et 2P2c).

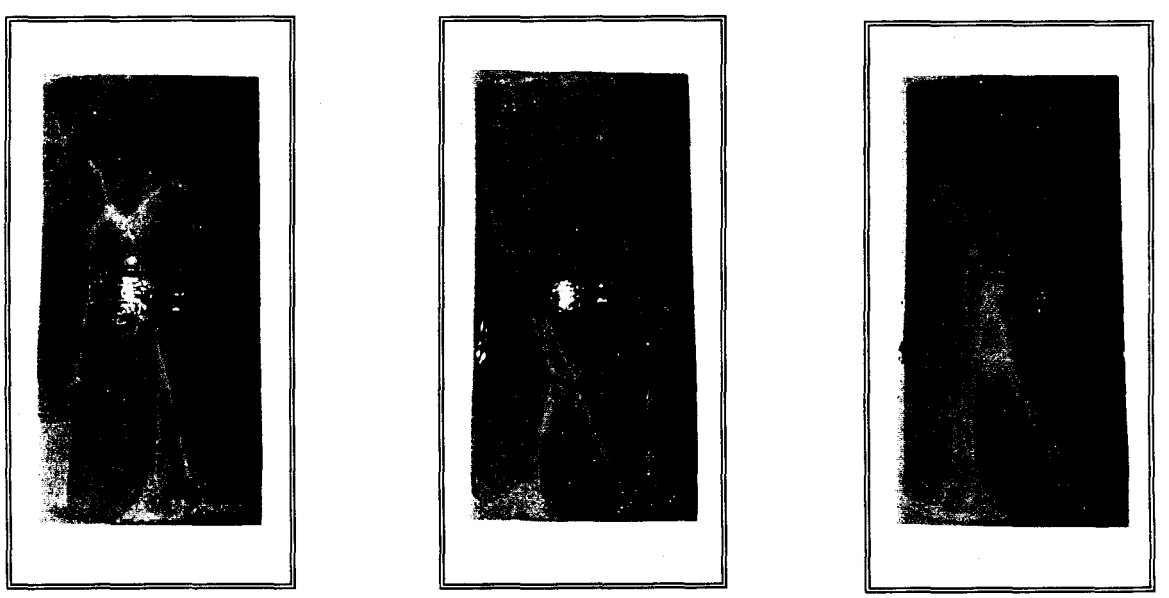
Discussions

A travers les constatations que suggérent les observations des lignes de rupture, la pression de confinement apparaît comme l'un des paramètres qui gouverne le mode et les mécanismes de rupture. Cependant, quelle que soit la pression de confinement, on constate à la rupture que le volume situé au centre de l'éprouvette semble avoir subit plus de dommage que le reste. Cette observation montre un autre aspect de la rupture fragile qui est lié à la distribution des microfissures dans l'échantillon et l'évolution de cette distribution lorsque la contrainte augmente. La zone centrale de l'éprouvette a sans doute fait l'objet d'une microfissuration très dense, et le sable et la dilatance locale qui en a résulté, témoignent que ce lieu est probablement à l'origine de l'initiation de la rupture. Ces constatations sont en accord avec les observations rapportés par la plupart des travaux expérimentaux (Paterson, 1978) et en particulier de Peng et Johnson (1972) qui ont également montré théoriquement, que proche de la rupture, la concentration de contrainte dans un milieu homogène se situe au centre de l'éprouvette. Cette distribution théorique des contraintes indique que le développement le plus intense de la microfissuration se situe au centre de l'éprouvette dans les essais de compression. Dans le cas des éprouvettes rompues dans les essais de compression uniaxiale, et triaxiale mené à 10 MPa de confinement, la quantité appréciable de sable libérée à la rupture, suggère qu'une intense fissuration des frontières de grains, à l'origine de cette décohésion a probablement résulté d'une localisation qui a siégé, bien avant que la rupture ne se produise, dans un volume interne de la roche.



Photos 2P1 : Cônes de frottement dans l'essai de compression triaxial monotone réalisé à 10 MPa de confinement.

(a) Pc = 10 MPa (b) Pc = 20 MPa (c) Pc = 30 MPa



Photos 2P2 : Lignes de rupture dans le cas des essais de compression triaxiale avec cycles de chargement - déchargement.

Concernant le type de rupture obtenu dans l'essai de compression triaxial mené à 10 MPa de confinement, diverses techniques ont été suggérées pour minimiser le frottement que provoque l'application de la contrainte sur la surface de chargement de l'éprouvette. A commencer par des jeux d'inserts ou embases spéciaux pour s'opposer au frottement. Il ressort notamment de ces études que les contraintes dans l'éprouvette sont non uniformes si les inserts ou embases, les plateaux de la presse et le piston de la cellule sont de rigidité très différentes de la roche testée. Peng et Johnson (1972) suggèrent que la meilleure technique pour obtenir un chargement uniforme est de sélectionner des inserts qui ont la même rigidité que le matériau testé. Il faut cependant éviter d'utiliser le même matériau car l'insert risque de se rompre avant l'éprouvette. A ce propos, il semble que les effets du frettage peuvent être réduits si on adopte un élancement assez grand. Cependant, les études expérimentales sur la localisation de la déformation ont montré qu'un élancement trop grand favorise l'apparition d'instabilités tel le flambage.

Il arrive aussi que les échantillons soient confectionnés en forme de double T. Mais là encore, il semble que ces essais, jugés non homogènes, sont souvent écartés dans les travaux sur la localisation comme le montre par exemple l'étude de Tillard (1992, pp.166-168). On peut, en marge de ces suggestions, disposer d'un système de rotule sur le vérin ou encore une embase à roulement en tête de l'échantillon. Les études expérimentales sur la localisation de la déformation ont montré que les surfaces d'instabilités qui résultent de la localisation apparaissent même pour des échantillons soigneusement antifrettés.

Les bandes de cisaillement multiples et le mode de rupture qui met en évidence deux ou plusieurs plans conjugués avec formation de zone de gouge n'ont pas été observées. Santarrelli (1987) observe ce type de rupture sur deux grès (Doddington et carbonifère) et un dolomite dans l'essai triaxial à faible pression de confinement. Les même observations ont été faites sur le marbre (Paterson, 1958), sur le calcaire (Farmer, 1983), sur le granite (Hadley, 1975b ; Brodsky et Spetzler, 1984) et sur le grès (Edmond et Paterson, 1972 ; Millien et Boehler, 1990). Cependant, la présence de plans de ruptures multiples dans la roche dans l'essai triaxial à faible pression de confinement a souvent été attribuée à une application non uniforme de la charge axiale comme le suggère Paterson (1978).

Ce type de rupture est fréquemment observé dans les sols (Desrues, 1984) et les argiles (Darve, 1985 ; Hicher et al., 1994). Dans ce type de matériaux, on observe généralement le développement de deux bandes de cisaillement croisées ; suivant que l'échantillon est dense (raide et dilatant) ou lâche (moins raide et peu dilatant), on aura respectivement soit une seule bande conduisant à un pic, suivie longtemps après par l'apparition d'une nouvelle bande, soit au contraire une apparition quasi simultanée de deux bandes, ne produisant pas de pic, et se

développant alternativement tout au long de l'essai (Desrues, 1984). Si la déformation continue, la contrainte se met à diminuer dans ce plan et provoque une détente dans toute l'éprouvette (Habib, 1985). Même si on considère que plusieurs plans sont susceptibles de devenir instables, la manifestation macroscopique sur les courbes contraintes déformations par la présence d'un pic, suivie très rapidement du glissement (ce qui est le cas ici) indique qu'il existe un plan et un seul où la plus grande résistance est atteinte avant les autres.

II- 7 : CONCLUSIONS

L'étude expérimentale présentée dans ce second chapitre concerne la caractérisation du comportement mécanique sous sollicitations triaxiales du grès de Fontainebleau. Nous avons d'abord montré, dans l'essai hydrostatique, que le matériau est initialement isotrope. Les réponses obtenues dans les essais triaxiaux montrent une non linéarité précoce de la déformation latérale que l'on peut attribuer à un développement orienté des microfissures. Cette anisotropie induite par le chargement a comme corollaire l'existence d'une forte dilatance au cours de la déformation. Cette dilatance s'accélère remarquablement lorsque la rupture devient proche. C'est probablement cette augmentation brutale de la dilatance, antérieure à la rupture macroscopique qui doit être considérée comme un précurseur de la rupture. Nous montrerons dans le chapitre 3 qu'elle constitue également un indicateur macroscopique fiable de la localisation des déformations.

Afin de mettre en évidence l'endommagement du matériau sous sollicitations triaxiales, des essais avec cycles de chargement - déchargement classiques ont été réalisés. L'approche expérimentale adoptée pour caractériser l'endommagement repose sur la mesure du module élastique. Les résultats obtenus sur le grès montrent que l'endommagement axial reste faible (inférieur à 0.2) tandis que l'endommagement latéral progresse fortement notamment au début du chargement pour atteindre ensuite une valeur quasi asymptotique.

La pression de confinement, est le paramètre qui gouverne non seulement le mode de rupture, mais également les mécanismes dont elle résulte aussi bien au niveau des mécanismes élémentaires comme nous le montrerons dans le chapitre 5, que des manifestations macroscopiques. La résistance, l'orientation du plan de rupture macroscopique, la dilatance sont influencées par la pression de confinement.

Enfin, l'observation visuelle des surfaces de rupture a permis de dégager un certain nombre de conclusions. En règle générale, le caractère fragile que présente le comportement d'une roche met en cause des imperfections, cavités, inclusions et autres hétérogénéités naturellement présentes dans ce type de matériau. Nos éprouvettes rompues ont montré de manière systématique, une partie centrale fort endommagée qui suggère que probablement, cette zone a fait l'objet d'une concentration de contrainte plus importante. A défaut d'hétérogénéité de structure relativement importante, ce qui semble être le cas du grès utilisé dans cette étude, le centre de l'éprouvette est " choisi " (effet de symétrie), en devenant le lieu où siège un développement intense de la microfissuration.

Dans les essais monotones, deux types de rupture ont été observés. Dans l'essai de compression uniaxiale, la plupart des éprouvettes montrent des structures conventionnelles de type ''colonnettes''. L'échantillon est fortement endommagé et se fragmente dans la direction de l'axe de chargement. Dès qu'une pression de confinement est appliquée, la rupture se présente sous la forme classique d'une bande de cisaillement. La surface de rupture unique, est inclinée d'environ 30° par rapport à la contrainte principale. En ce qui concerne les essais cycliques, les surfaces et lignes de rupture sont en général complexes, ce qui rend leur description relativement ardue.

CHAPITRE III

ANALYSE ET DETECTION EXPERIMENTALE DE LA LOCALISATION EN COMPRESSION MULTIAXIALE

INTRODUCTION

Le chapitre 2 a été consacré à une caractérisation du comportement mécanique du grès de Fontainebleau sous divers chemins de sollicitations. Nous avons particulièrement insisté sur la non linéarité des réponses mécaniques, interprétée comme la conséquence directe de l'endommagement fragile, par microfissuration du matériau. La dilatance qui en résulte, est apparue comme un indicateur important de l'état de déformation et de l'intensité de cette microfissuration du grès. Nous avons ensuite discuté dans une analyse succincte, des conditions (pression de confinement) et modes de rupture (bande de cisaillement) observées sur les échantillons testés.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à tous les phénomènes impliqués dans les processus de la rupture fragile, et en particulier au seuil de localisation des déformations. Ce niveau de la contrainte déviatorique est considéré ici comme le véritable point de l'amorçage de la rupture. La démarche expérimentale est basée sur la mesure multiple des déformations. Ce choix se justifie par les capacités de cette procédure expérimentale à fournir des résultats performants concernant la détection de la localisation des déformations dans les roches, avec les avantages pratiques de coût, de matériel et de simplicité de mise en oeuvre qu'elle offre. La procédure expérimentale consiste à caractériser l'état du champ de déformation et met en évidence les deux étapes fondamentaux dans le comportement fragile d'une roche: les déformations homogènes et non homogènes. Ce changement d'état du champ de déformation constitue l'une des manifestations de la localisation des déformations comme s'accorde à le souligner l'ensemble des études expérimentales (seuil de localisation ou anisotropie de la dilatance) et théoriques (point de bifurcation).

La méthode de déformation utilisée consiste à comparer les déformations dans deux directions différentes dans la section droite située à mi hauteur de l'éprouvette. Les mesures effectuées dans ce plan, se justifient par les réponses mécaniques (non linéarités) et s'appuie sur les observations des éprouvettes rompues du chapitre précédent. L'hypothèse retenue consiste à supposer que c'est dans ce plan que s'exprime la composante principale de la dilatance. Ajoutons aussi que l'examen des surfaces de rupture montrait un endommagement particulièrement important dans la région centrale de l'éprouvette (voir discussions à la fin du second chapitre et la conclusion). Ce choix permet donc d'être dans des conditions qui optimisent la sensibilité de la méthode.

La procédure expérimentale repose sur une estimation qui se veut objective de la divergence entre les déformations mesurées dans deux directions latérales (Hadley, 1975b). La comparaison est réalisée en utilisant la variation de la déformation latérale mesurée dans une direction donnée en fonction de la déformation latérale dans une autre direction (perpendiculaire) tel que l'a suggéré Santarrelli (1987; 1990). Cette méthodologie de détection sera d'abord appliquée aux cas conventionnels d'essais mécaniques sur éprouvettes cylindriques. Puis nous étudierons l'apparition de la localisation des déformations à l'aide d'un dispositif adapté et mieux approprié où le passage à une forme prismatique pour les éprouvettes sera justifié et jugé nécessaire.

III-1 : TENTATIVES DE DETECTION DU SEUIL DE LOCALISATION DANS LES CONDITIONS AXISYMETRIQUES

Ce paragraphe concerne la détection de la localisation des déformations dans les essais de compression réalisés dans l'étude présentée au deuxième chapitre. Rappelons que 6 jauges de déformation ont été collées sur chacune des éprouvettes (figure 3.1). Deux d'entre elles sont destinées à mesurer les déformations axiales et les quatre autres les déformations transversales. Ces quatre dernières jauges sont collées à mi hauteur de l'éprouvette, perpendiculairement à 4 génératrices diamétralement opposées deux à deux. Elles définissent ainsi deux directions orthogonales notées direction 2 (ε_t^2) et direction 3 (ε_t^3).

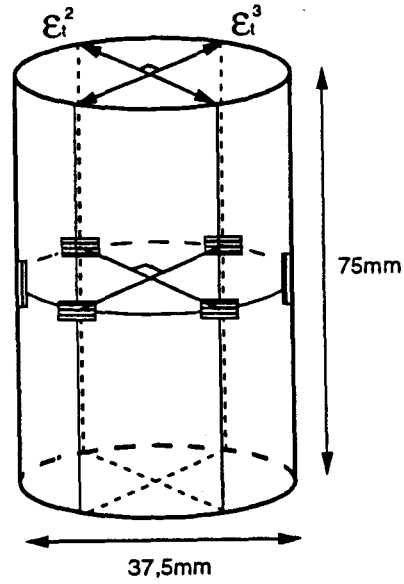


Figure 3.1 : Définition géométrique conventionnellement choisies pour les déformations transversales ε_t^2 et ε_t^3.

Chaque paire de jauges assure la mesure de la déformation le long d'une ligne perpendiculaire à la ligne diamétrale qui joint les points milieux des jauges. La moyenne des deux mesures dans chacune des deux directions est notée respectivement ε_t^2 et ε_t^3. Ces deux directions sont à priori équivalentes, et pour une présentation cohérente des résultats, on notera conventionnellement ε_t^3 la direction où la déformation maximale, enregistrée à la rupture, est la plus élevée.

III - 1 - 1 : COMPRESSION TRIAXIALE MONOTONE :

La variation de ε_t^3 en fonction de ε_t^2 est présentée par pression de confinement dans la figure 3.2. Les courbes obtenues présentent une partie linéaire de pente 1 (première bissectrice du plan). Ce résultat escompté, indique deux points essentiels dans cette étude. Le premier point rassure en ce qui concerne l'homogénéité des essais. Le second point est que ce résultat confirme l'isotropie transverse du matériau, tout au moins dans la phase des déformations homogènes. A partir de ces courbes, on peut distinguer deux types de réponse. Celui de l'essai uniaxial (figure 3.2a) et l'essai triaxial mené à 30 MPa (figure 3.2d) de confinement où on observe au delà d'un seuil, une brutale déviation convexe. Et, celui relatif aux essais triaxiaux menés à 10 et 20 MPa de confinement (fig.3.2b et 3.2c) pour lesquels la linéarité se poursuit jusqu'au pic (voir aussi l'annexe 1 : A1-2).

Si on s'intéresse au premier type de réponse, on distingue une partie linéaire qui caractérise un stade où les déformations sont quasi identiques, suivie d'une phase où on peut observer de façon remarquable qu'à partir d'un niveau de déformation donné, la perte d'homogénéité des déformations. Le point précis où cette perte de linéarité de la courbe ε_t^3 - ε_t^2 a lieu est noté "A", il sera désigné pseudo seuil de localisation. Car comme nous le verrons, l'observation de ce seuil n'est pas systématique dans les éprouvettes cylindriques. Reporté sur les courbes contraintes - déformations, ce point A se situe autour de 88 % de la résistance à la rupture dans le cas de l'essai de compression uniaxiale. Concernant l'essai triaxial à 30 MPa de confinement, la non linéarité de la courbe ε_t^3 - ε_t^2 (figure 3.2d) se produit à 90 % de la résistance à la rupture.

En ce qui concerne l'essai triaxial, il semble que le seuil de localisation est masqué et la déviation observée ne se manifeste que bien plus tard comme cela semble être le cas pour Pc = 30 MPa (figure 3.2d). En effet, dans les essais triaxiaux menés à 10 MPa (figure 3.2b) et 20 MPa (figure 3.2c) de confinement, la partie linéaire des courbes ε_t^3 - ε_t^2 se poursuit jusqu'au pic. Il résulte de ces constatations que dans ces essais triaxiaux la perte d'homogénéité des déformations est souvent difficile à évaluer à partir de ces courbes. D'où le terme pseudo seuil précédemment employé pour désigner les points A obtenus dans ce paragraphe.

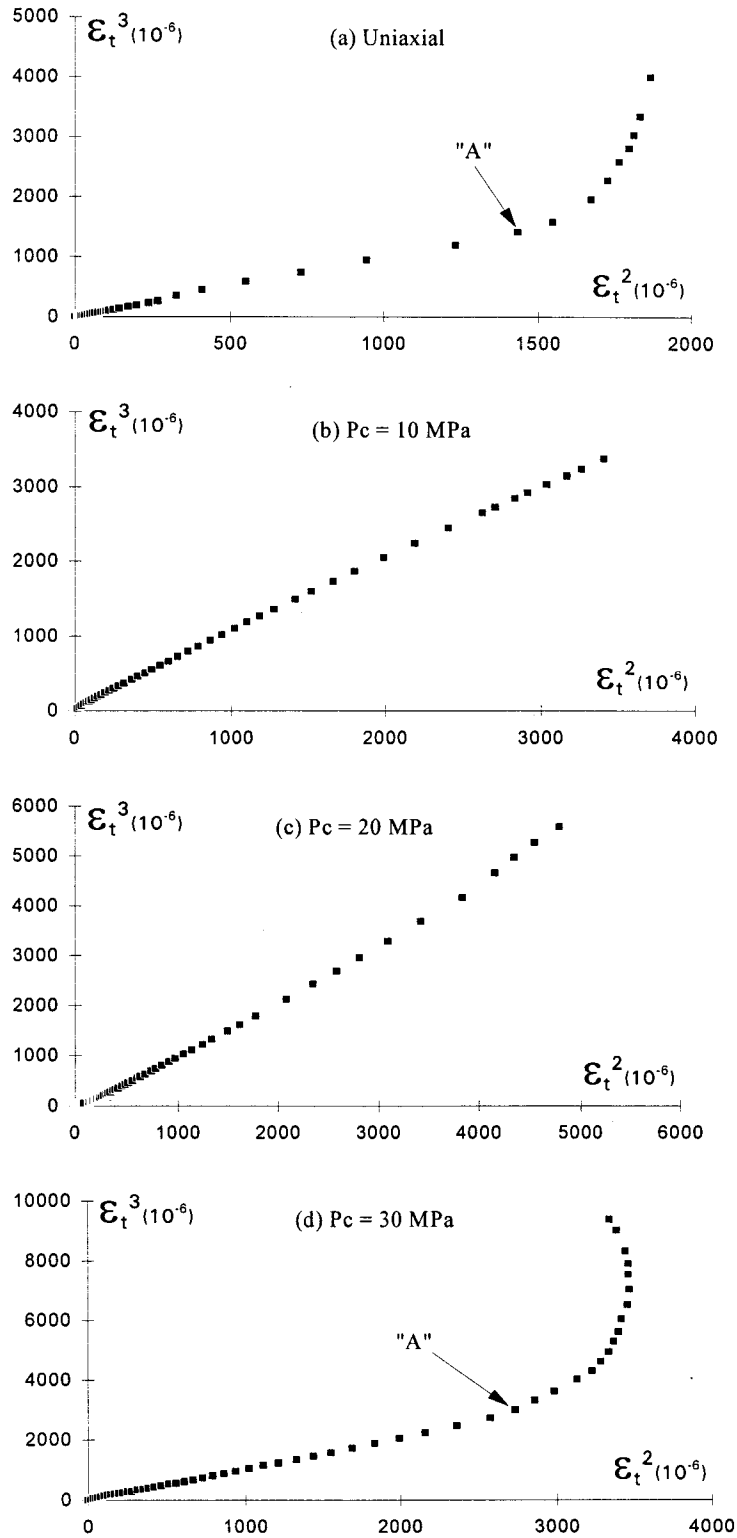


Figure 3.2 : Variations des déformations transversales en fonction des déformations latérales dans les essais uniaxial (a) et triaxiaux (b, c et d) monotones.

La difficulté à situer le véritable seuil de localisation dans l'essai triaxial provient principalement de la rupture franche selon un plan unique observé dans ce type de test. Pour contourner cette difficulté, il faut se placer dans des conditions optimales de mesure des déformations, dictés par la direction choisie par le plan que matérialise la bande de cisaillement. Pour cela, il faut par exemple s'affranchir de l'aléa imposé par le choix hasardeux des deux directions 2 et 3; la probabilité pour que la séparation latérale des deux blocs s'effectue dans l'une de ces deux directions n'est pas garantie. Ce cas de figure, ne s'applique pas à l'essai de compression uniaxiale où la rupture se développe sur des surfaces verticales. L'orientation idéale de la bande de cisaillement par rapport à la disposition des jauges est schématisée par la figure 3.3.

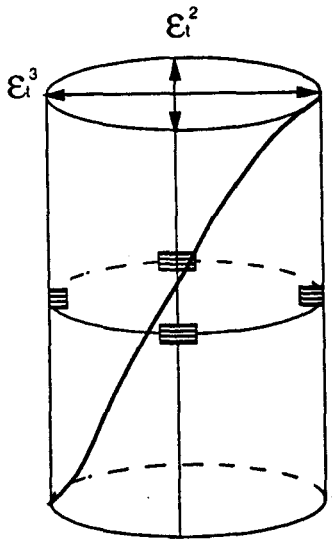


Figure 3.3 : Schématisation de la direction idéale de la bande de cisaillement par rapport à celles des déformations transversales ε_t^2 et ε_t^3, aléatoirement adoptées.

III-1-2 : COMPRESSION TRIAXIALE CYCLIQUE :

L'étude de la détection du pseudo seuil de localisation a été également menée sur les essais cycliques. Les courbes ε_t^2 - ε_t^3 obtenues sont représentées dans la figure 3.4 par pression de confinement. Elles montrent une partie linéaire de pente 1 et on notera au passage l'absence de boucles d'hystérésis durant toute la phase des déformations homogènes.

Le pseudo seuil A obtenu dans l'essai cyclique uniaxial (figure 3.4a) est enregistré à exactement 89 % de la résistance à la rupture. Ce résultat est en parfait accord avec celui identifié par le seuil de localisation dans l'essai monotone et confirme les hypothèses selon lesquelles la rupture axiale contribue à une meilleure détection du moment précis où les déformations deviennent non homogènes. Dans l'essai triaxial cyclique mené à Pc = 10 MPa (figure 3.4b), le pseudo seuil est obtenu à 82 % de la résistance à la rupture. Ce niveau du déviateur est à retenir,

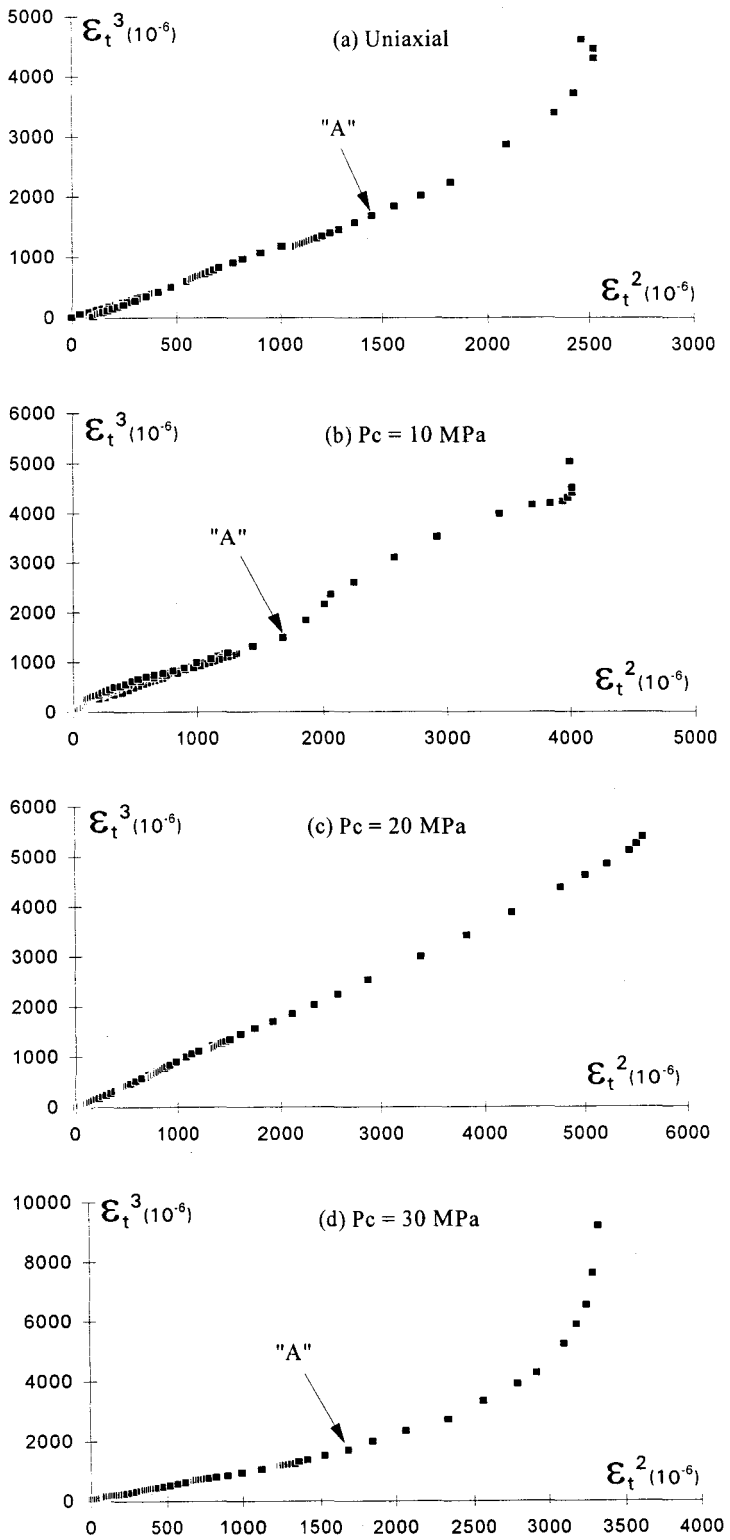


Figure 3.4 : Variations des déformations transversales en fonction des déformations latérales dans les essais uniaxial (a) et triaxiaux (b, c et d) cycliques.

pour être éventuellement confirmé dans la suite de ce chapitre, au même titre que celui obtenu dans les essais de compression uniaxiale. Pour Pc = 30 MPa, on note un pseudo seuil légèrement plus précoce à 85 % de la résistance à la rupture. Ces niveaux plus réalistes pour le seuil, obtenus dans les essais triaxiaux cycliques (pour Pc = 10 et 30 MPa) sont à attribuer aux surfaces de discontinuités plus nombreuses (voir les photos 2.P2) observées sur les éprouvettes rompues dans ce type d'essai.

III-1-3 : CHEMINS DE SOLLICITATIONS PROPORTIONNELLES :

Dans les essais proportionnels la même démarche a permis de situer le pseudo seuil de localisation (figure 3.5). On notera qu'on retrouve une partie linéaire de pente égale à 1. Le point A se situe à 79 % et 83 % de la résistance à la rupture pour respectivement le rapport K = 15 et K= 30. On peut prudemment conclure à partir de ces deux résultats que le seuil de localisation augmente avec K. Les résultats de la compression uniaxiale (K infini) confirment toutefois cette tendance.

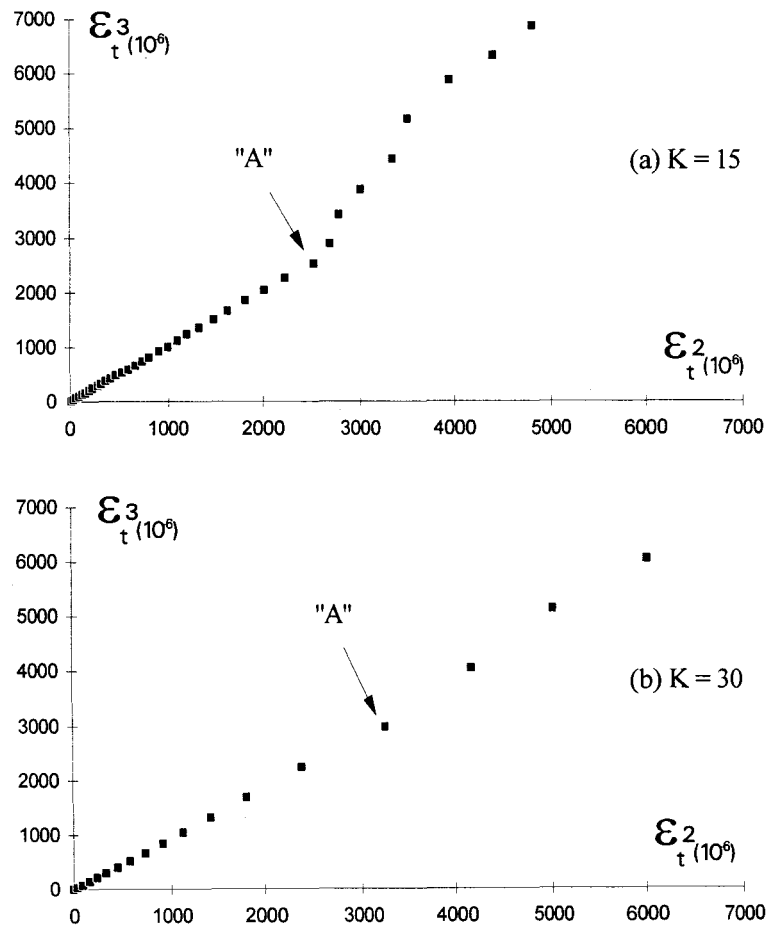


Figure 3.5 : Courbes des déformations transversales. Essais proportionnels K = 15 (a) et K = 30 (b).

III-1-4 : CONCLUSIONS:

La méthodologie expérimentale utilisée pour évaluer l'état d'homogénéité du champ de déformations a consisté à comparer des déformations transversales mesurées dans deux directions perpendiculaires. Les mesures ont été effectuées dans une section droite située à mi hauteur des éprouvettes cylindriques. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes de déformations transversales ε_t^3 - ε_t^2, la perte de linéarité de ces courbes caractérise la transition à l'état de déformation non homogène qui résulte d'une localisation des déformations.

Toutes les courbes présentent une partie linéaire plus ou moins étendue dont la pente est quasiment égale à 1. Ce résultat a permis de confirmer l'homogénéité de nos essais et soutient les hypothèses d'isotropie transverse du grès de Fontainebleau. Les essais triaxiaux, où la linéarité des courbes se poursuit jusqu'au pic montrent que la perte d'homogénéité des déformations peut être masquée dans certains cas. Le taux de déformation transversale progresse dans les mêmes proportions dans les deux directions que nous avions aléatoirement privilégiées. L'explication que l'on peut donner à cette situation est associée à l'orientation du plan de cisaillement dans l'éprouvette cylindrique et dont le contrôle nous échappe. Cela est moins vrai en effet pour les essais uniaxiaux dans lesquels la rupture est axiale (avec des déformations essentiellement latérales) et pour lesquels les seuils ont pu être détectés. D'autre part, les mesures ont été faites à l'aide des jauges de déformations qui, quoique précises, ne fournissent que des informations locales, combinant le circonférentiel et le radial, si bien que la distinction entre ces déformations semble ici, prendre tout son sens.

Ainsi l'étude expérimentale visant la détection du seuil de localisation dans les essais triaxiaux de révolution est conditionnée par la direction du plan de rupture. L'utilisation d'un collier de mesure de la déformation latérale globale dans la suite de cette étude permettra d'améliorer la procédure expérimentale grâce à la mise au point d'un dispositif adapté. A part l'utilisation du collier de mesure, une première idée d'amélioration substantielle a consisté à mener la suite des investigations expérimentales sur des plaques rectangulaires. Nous verrons que cette forme de l'éprouvette convient mieux pour la détection du seuil de localisation par la méthode des déformations développée ici.

III-2 : ESSAIS SUR PLAQUES RECTANGULAIRES

L'étude expérimentale présentée dans ce paragraphe est consacrée à la détection du seuil de localisation dans les essais de compression uniaxiale et triaxiale réalisés sur des plaques rectangulaires de grès de Fontainebleau. Les dimensions géométriques retenues et les orientations adoptées sont indiquées ci dessous (figure 3.6).

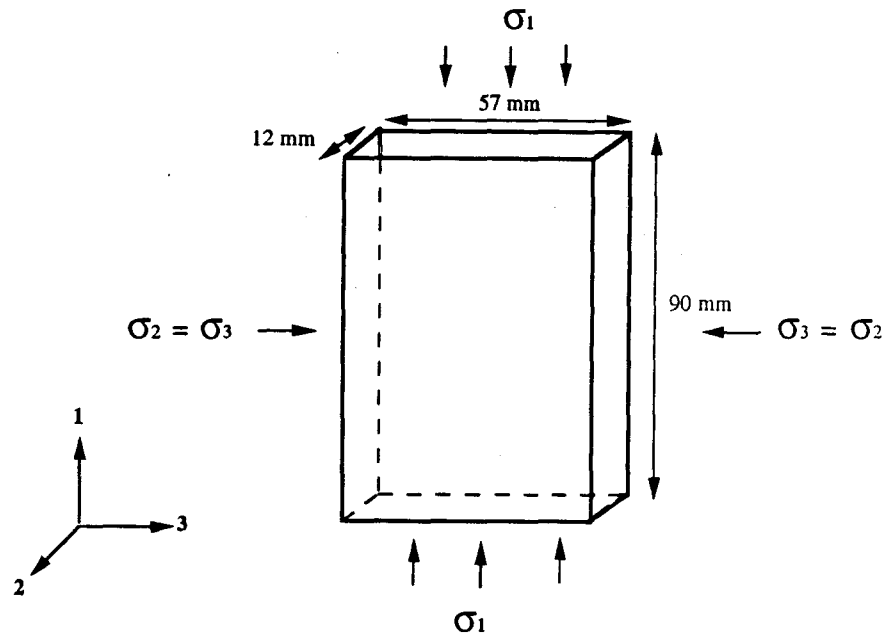


Figure 3.6 : Définitions géométriques des éprouvettes et orientations adoptées.

La forme prismatique choisie, favorise nos investigations en offrant des avantages que l'on peut résumer en trois points :

Le premier avantage est la connaissance préalable des plans dans lesquels est susceptible d'apparaître la bande de localisation. Ces plans sont bien entendu définis par la direction de chargement et l'une ou l'autre des directions latérales (clairement définies). De ce fait, le désavantage principal, rencontré lors de l'étude sur échantillons cylindriques, est contourné.

Le deuxième avantage consiste en la possibilité d'utiliser un collier de mesure directionnel que nous avons muni d'un capteur de déplacement très sensible. Ce collier, placé à mi hauteur de

l'éprouvette et dirigé selon la direction 3, nous permet grâce à un étalonnage soigné de mesurer avec une bonne précision la déformation globale dans cette direction.

Le troisième intérêt, qui résulte de la nouvelle forme géométrique adoptée, est la levée de l'ambiguïté sur la mesure des déformations dans chacune des trois directions de l'espace. Accessoirement, la déformation volumique, qui permet d'évaluer la dilatance sera dans ce cadre donnée sans équivoque par $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$.

On peut ajouter aussi que cette forme géométrique rend plus aisée l'observation des lignes et surfaces de rupture et plus particulièrement l'estimation de l'orientation et de l'épaisseur de la bande. L'utilisation des plaques rectangulaires exige cependant un soin particulier tant au niveau de la confection des éprouvettes (découpes et rectification) qu'au niveau de certaines conditions particulières qui nécessitent une préparation spécifique, préalable à la mise en charge.

III-2-1: MONTAGE ET PROCEDURES EXPERIMENTAUX :

Choix des dimensions géométriques des éprouvettes

Les échantillons, prélevés dans un même bloc, sont découpés dans une matrice de marbrier les dotant de dimensions géométriques quasi identiques. La rectification des surfaces est réalisée sur la même rectifieuse utilisée pour les éprouvettes cylindriques. La différence réside dans la nécessité ici, d'avoir un plan de référence. Entre les mâchoires de l'étau utilisé pour la fixation de l'éprouvette, est insérée une plaque d'aluminium prise comme référence pour le parallélisme. Un équerre coulissant le long de cette surface permet d'ajuster l'orthogonalité. On accorde également une tolérance de rectification des surfaces, du parallélisme et de la perpendicularité conforme aux recommandations et exigences de l'I.S.R.M. (1983). Les dimensions adoptées lors de la confection des éprouvettes tiennent compte de deux facteurs:

(i) la limitation de l'épaisseur et de la largeur des éprouvettes est dictée par les dimensions du support solidaire au socle de la nouvelle cellule triaxiale que nous serons amenés à utiliser. Le support, à l'intérieur de cette cellule, étant destiné à servir d'embase inférieure et à la mise en place d'un échantillon cylindrique de diamètre 65 mm.

(ii) L'usage de plaques rectangulaires d'épaisseur faible expose à des instabilités de type flambement. L'élancement doit tenir compte de l'épaisseur et de la largeur de l'éprouvette. L'utilisation d'un diamètre équivalent relatif au périmètre d'un cercle de référence, exige pour un élancement de 2, l'usage d'une hauteur d'environ 90 mm pour une largeur de 57 mm et une épaisseur de 12 mm (figure 3.6).

Sur chacune des éprouvettes, 8 jauges sont collées comme indiqué sur la figure 3.7. Trois jauges dans la direction 1 (longitudinale), deux dans la direction 2 (transversale) et trois dans la direction 3 (latérale). Les deux jauges situées au centre de l'éprouvette sont destinées à mesurer la déformation moyenne de la matrice dans la direction longitudinale et latérale. Elles doivent également permettre d'évaluer les déformations locales au centre de l'éprouvette où est supposé apparaître la bande de localisation. Les six autres jauges qui peuvent être divisées en deux groupes de trois sont destinées aux mesures des déformations dans chacun des deux blocs que la bande est sensée séparer. La comparaison des diverses déformations mesurées dans la même direction en des points différents de la surface de l'éprouvette doivent permettre des corrélations ou témoigner simplement de l'homogénéité de l'essai durant le test.

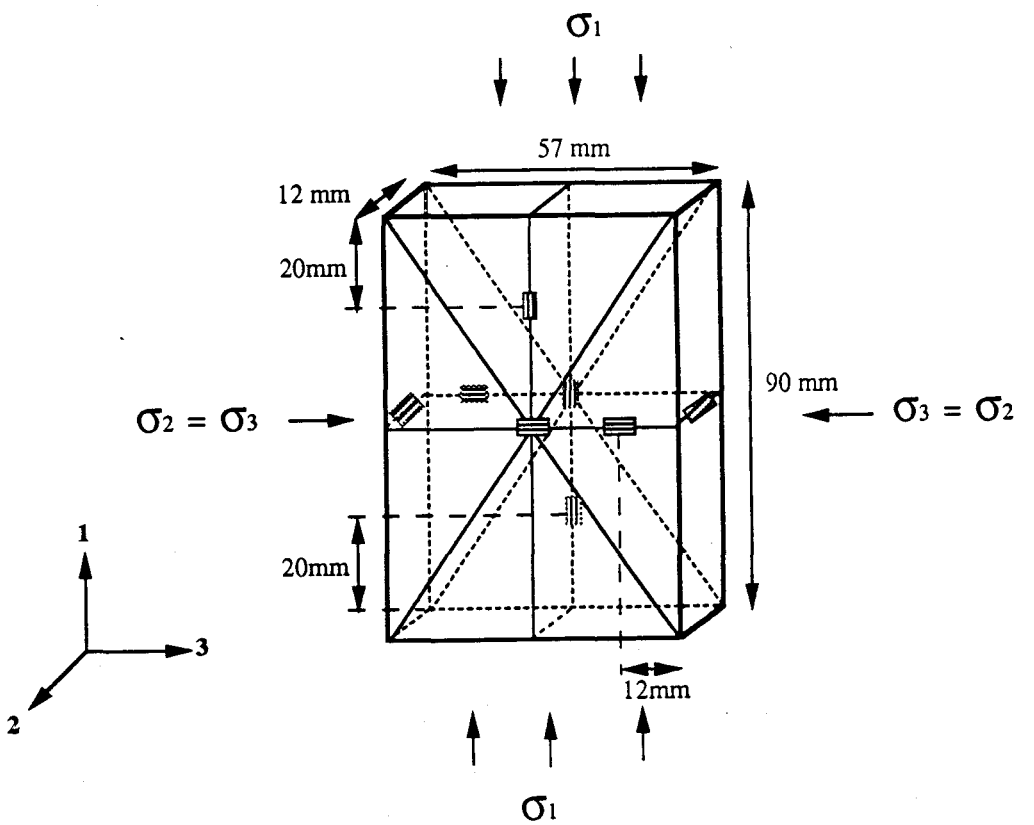


Figure 3.7 : Disposition des jauges de déformation sur les plaques rectangulaires.

Préparations préliminaires

Sur les deux surfaces latérales, à mi hauteur de l'éprouvette sont collés 2 plots relais. Il s'agit de deux cylindres découpés et rectifiés au tour sur une tige d'acier de 8 mm de diamètre; leur hauteur est légèrement inférieure à l'épaisseur du silastène (3 mm) pour qu'après durcissement de celui-ci, ces plots relais restent apparents. Des plots de même forme, munis d'une empreinte sphérique où s'insèrent les billes d'acier servant à la mise en place du collier peuvent être alors collés sur les plots relais.

L'opération suivante consiste à isoler l'éprouvette de l'huile "haute pression" utilisée pour l'application de la pression de confinement lors des essais triaxiaux. Après avoir collé les embases pour garantir la coaxialité et assurer un chargement uniforme, et avoir prévu les sorties et connexions électriques des jauges, l'éprouvette est introduite dans un moule en aluminium démontable en trois parties.

Le silastène, utilisé sous sa forme liquide, est obtenu à l'aide du mélange homogène de 4 produits de bases de type "R.T.V.". Lors de la mise en pression, l'éclatement d'une bulle d'air piégée dans le silastène, risque de compromettre l'isolation de l'éprouvette. Pour dégazer le silastène, on l'introduit sous une cloche à vide jusqu'à l'arrêt total de l'ébullition (environ 2 heures). On casse le vide dans la cloche et on procède à un premier remplissage; l'écoulement étant très lent, on réintroduit le silastène et le moule sous la cloche. Cette opération peut être répétée trois fois, voire même quatre avant que l'embase supérieure de l'éprouvette ne soit entièrement recouverte. En général, pour un durcissement rapide du silastène, on l'introduit dans l'étuve à 100°C pendant 6 heures. Parce que cette opération risque de nuire aux propriétés des jauges (résistance nominale), nous avons choisi de laisser le silastène étancher à la température ambiante ; le démoulage est réalisé après un minimum de 48 heures.

Le silastène est taillé au cutter pour mettre à découvert les embases et les plots relais sur lesquels sont collés les plots destinés à la mise en place du collier. Au différents endroits, tels les points de sortie des fils de liaisons des jauges, la frontière plots - silastène et embases - silastène, ou même tout endroit douteux, une couche de silicone (Rubson) est appliquée pour s'assurer de l'isolation totale de l'éprouvette.

Mise en place du collier de mesure (figure 3.8)

Le type de collier (figure 3.8) utilisé pour la mesure des déformations latérales, est inspiré du collier de Bishop et Henkel (1962). Il est constitué de deux bras semi-circulaires pivotant autour d'une articulation. En un point situé au milieu de chaque bras, une bille d'acier assure le contact sur les plots solidaires à l'éprouvette. Un joint torique, permet le maintien en équilibre du collier et l'effort statique qu'il communique permet de maintenir un écart constant entre l'extrémité des bras. Hormis la vis jouant le rôle d'axe d'articulation et les deux billes d'acier, le collier est en Plexiglas ; ce qui en fait un outil léger, ne nécessitant pas la compensation de son poids.

Sur les extrémités libres des deux bras articulés du collier, est fixé un capteur de déplacement L.V.D.T. de type 100MHR conçu pour mesurer des déplacements dans un intervalle d'amplitude 5 mm. Le noyau du capteur est inséré et maintenu stable par l'effet statique d'un petit ressort auquel s'oppose celui du joint torique. Pour garantir la stabilité statique, la raideur du ressort est très élevée par rapport à celle du joint torique.

L'excitation et le traitement de la réponse du capteur sont assurés par un conditionneur convertisseur de haute sensibilité qui fournit une tension continue proportionnelle au déplacement du noyau dans le corps du capteur. L'ensemble collier - capteur est étalonné à vide sur un banc d'étalonnage muni d'un comparateur sensible au micron. Le noyau du capteur n'est utilisé que sur une petite partie de l'étendue de sa course. L'amplitude de cet intervalle permet de mesurer des déplacements de l'ordre de 2 mm, ce qui est plus que suffisant. Dans cet intervalle, la sensibilité est optimale, la tension de sortie du conditionneur est parfaitement proportionnelle au déplacement du noyau ; la mesure du déplacement se fait avec une erreur inférieure à 4 μm.

Précisons que la présence du collier n'est pas d'une nécessité absolue pour mesurer la déformation latérale, lorsque la possibilité de coller une jauge au centre de l'éprouvette se présente comme c'est le cas ici ; on obtient dans le cas d'essais homogènes, des déformations quasiment identiques (Haïed et al., 1992). Toutefois, contrairement aux jauges, le collier permet de s'affranchir des hétérogénéités locales, et intégrer toutes les discontinuités induites par la contrainte mécanique lors de la montée en charge. La mise en place du collier sur l'éprouvette et l'introduction de l'ensemble à l'intérieur de la cellule sont des opérations très délicates qui conditionnent de beaucoup la réussite de l'essai. Elles nécessitent souvent la présence d'une tierce personne.

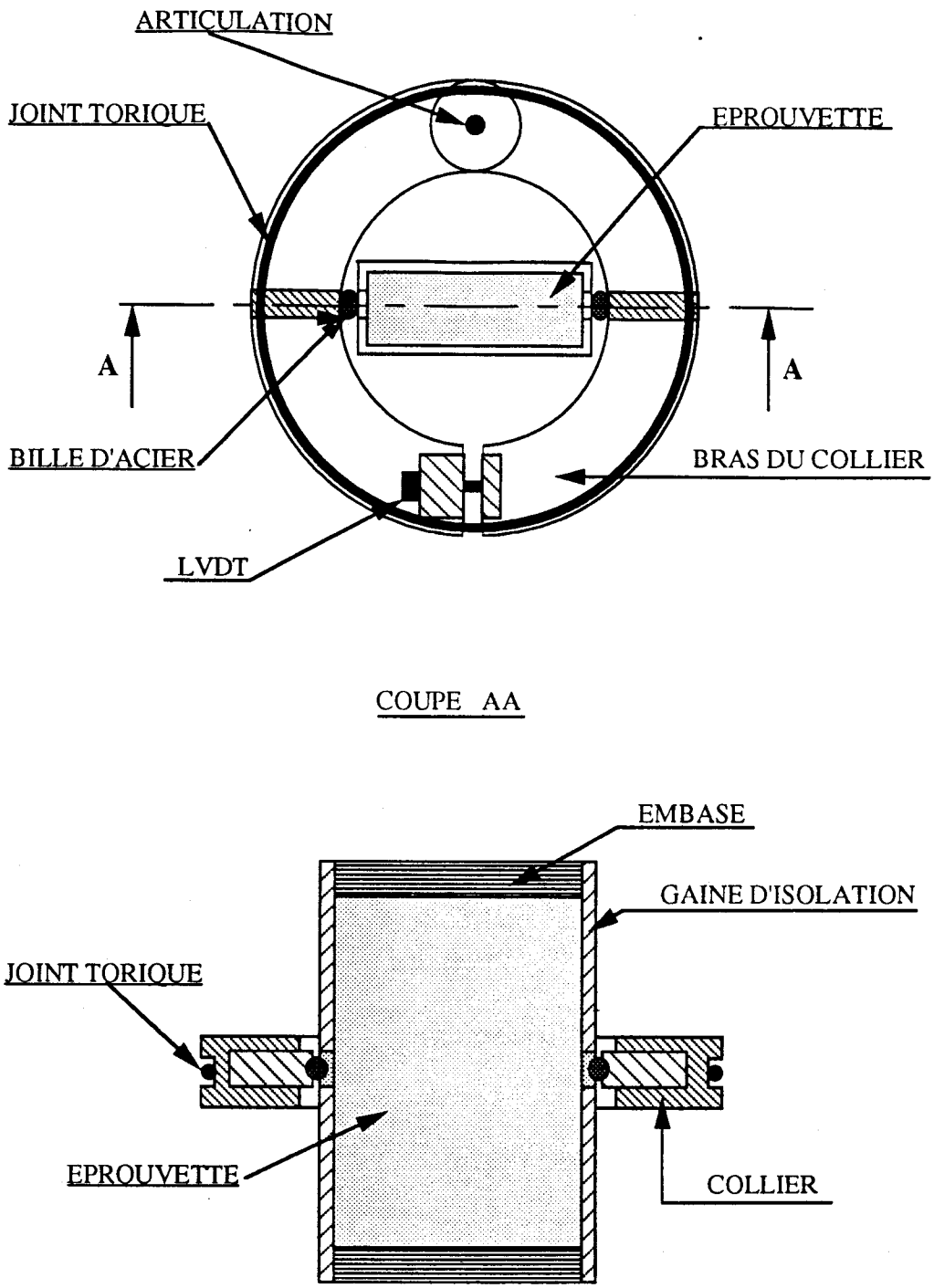


Figure 3.8 : Présentation et mise en place du collier utilisé pour mesurer la déformation latérale ε_3.

Montage expérimental

La cellule utilisée pour la réalisation des essais triaxiaux sur les plaques est une cellule triaxiale classique axisymétrique, capable de supporter des pressions de l'ordre de 100 MPa. Elle a un diamètre interne de 150 mm et une hauteur utile de 205 mm. Elle est munie d'un piston mobile de mise en charge sur son plateau supérieur et d'une embase circulaire solidaire au socle. L'ensemble est adapté pour recevoir une éprouvette cylindrique de diamètre 65 mm.

Pour la réalisation des essais triaxiaux, le montage expérimental représenté par le schéma de principe illustré par la figure 3.9 a été utilisé. Trois des cinq sorties de la cellule ont été utilisées pour les connections électriques. Les passages de fils sont étanchés à l'araldite. Deux sont nécessaires aux liaisons des jauges de déformation avec le système d'acquisition, la troisième assure le raccordement électrique entre le capteur de déplacement et le conditionneur convertisseur. Les deux autres sorties sont utilisées respectivement pour la mise en pression et le capteur de pression.

Procédure

La machine d'essai utilisée est la même presse hydraulique de type Instron modèle 8033 qui a servi à la réalisation des essais axisymétriques. Dans l'essai uniaxial, l'éprouvette est soumise à un champ de contrainte unidimensionnelle à la pression atmosphérique. Les essais triaxiaux ont été réalisés à des pressions de confinement de 10, 20, 30 et 40 MPa. La pression de confinement est appliquée très lentement (moins de 1 MPa / mn) à l'aide de la pompe Gilson. Le piston de la cellule n'est pas en contact avec l'embase supérieure pendant cette opération pour éviter toute perturbation de l'état isotrope initial souhaité. Les essais sont monotones, la charge axiale croissante est appliquée jusqu'à la rupture. Dès que la rupture se produit, l'éprouvette est déchargée puis ramenée à la pression atmosphérique. Soulignons cependant que pour chaque type d'essai, le test a été plusieurs fois répété (en moyenne 4 à 5 fois). Nous en discuterons les raisons.

L'asservissement est réalisé en déplacement axial contrôlé ; la vitesse de déplacement est réajustée en fonction de la hauteur de l'éprouvette pour conserver la même vitesse de déformation utilisée dans les essais axisymétriques ($5.10^{-6}.s^{-1}$).

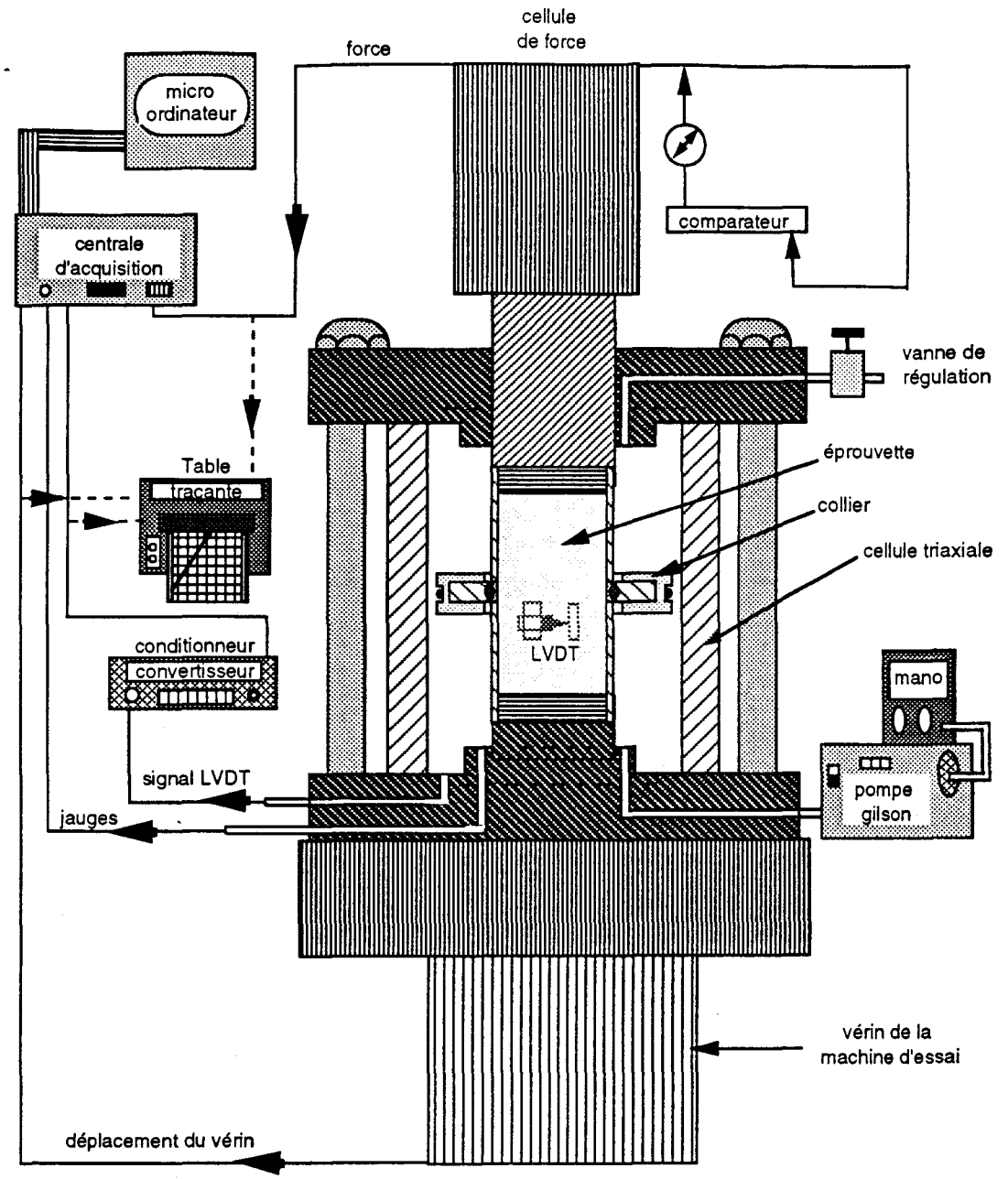


Figure 3.9 : Schéma de principe du montage expérimental.

Objectifs

Les essais homogènes, que nous envisageons ici ayant pour objectif principal la détection du seuil de localisation des déformation du grès de Fontainebleau dans le domaine fragile, on utilisera la même gamme de pression de confinement moyenne et relativement élevée jusqu'à 40MPa. On s'intéressera aux variations ou transitions que la pression de confinement est susceptible de provoquer dans les modes de rupture, dans les conditions d'apparition d'une bande de cisaillement ainsi que son effet sur l'épaisseur et l'orientation moyennes des bandes de déformations localisées.

III-2-2 : LIGNES DE RUPTURE

Deux modes de rupture (différents par l'aspect extérieur des lignes de rupture) ont été observés : la rupture constituée principalement de plusieurs surfaces de discontinuités suivant la direction axiale et la rupture qui consiste en la séparation plus ou moins franche de l'échantillon en deux blocs par une surface unique inclinée.

Compression uniaxiale

Dans l'essai uniaxial, toutes les éprouvettes se sont rompues de la même manière. La rupture axiale observée est généralement précédée de jets de sable provenant de l'un des deux coins supérieurs de l'échantillon. Cette décohésion des grains provient essentiellement de l'interface avec l'embase supérieure. Le coin responsable se détache avec violence, suivi immédiatement d'autres fragments provenant de la surface de l'éprouvette et en particulier de la zone centrale. Leur détachement vient suite à une macrofissure de traction, car, bien que ne présentant aucun signe visible d'endommagement, la surface interne rompue est souvent quasi verticale. La rupture donne le plus souvent lieu à un nombre important de macrofissures verticales. L'observation détaillée de la zone de décohésion totale ne met pas en évidence une quantité importante de sable, comme cela a pu être observé dans le même test et dans les mêmes conditions sur les échantillons cylindriques. L'examen des fragments les plus importants en volume laissent apparaître, comme dans le cas des cylindres, une série de surfaces verticales qui s'arrêtent avant les extrémités de l'éprouvette pour se diriger vers les coins. Sur les plaques rectangulaires où l'observation est plus aisée, on peut constater que lorsque l'une des extrémités de certaines lignes de rupture atteignent un coin ou une embase, l'autre extrémité finit sa course sans atteindre la deuxième tête de l'éprouvette. La figure 3.10 représente une esquisse très schématique des lignes observées sur la surface de l'éprouvette et partiellement reconstituées, quelques 3 à 5 secondes avant l'éclatement total de l'éprouvette.

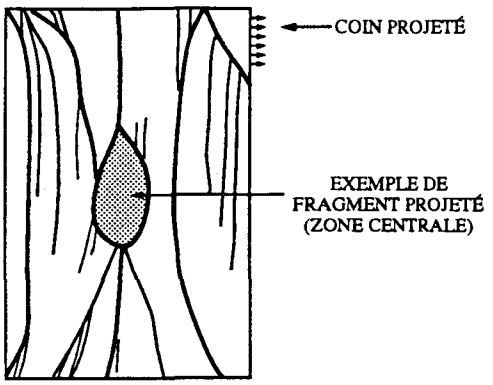


Figure 3.10 : Schématisation des lignes observés (quelques secondes avant la rupture) sur la surface de l'éprouvette dans l'essai de compression uniaxiale.

Compression triaxiale

Dans tous les essais triaxiaux, la rupture se développe d'une manière classique sur une surface inclinée unique. Dans l'essai triaxial mené à 10MPa (photo 3P1a), on constate cependant quelques fragments qui se sont détachés suite à des fissures de traction s'amorçant d'un point de la bande et finissant sur une embase. Ces fissures, longues de 2 à 4cm, sont constituées de séries de surfaces discrètes qui semblent se concentrer lorsqu'on s'approche du coin de l'éprouvette traversé par la bande. L'angle que fait la bande de cisaillement est compris entre 29 et 32° par rapport à l'axe de chargement.

On note que les éprouvettes rompues lors d'essais non homogènes (divergence importante des déformations locales dans une même direction), présentent des surfaces de ruptures inclinées de presque 40° par rapport à l'axe principal (photos 3P2). L'examen de toutes les éprouvettes rompues (Photos 3P1) dans les essais triaxiaux homogènes montre, comme dans le cas des essais axisymétriques une dégradation importante au centre de l'éprouvette. Cet endommagement semble s'atténuer avec l'augmentation de la pression de confinement mais reste apparent dans l'essai triaxial à 40 MPa (Photo 3P1d). Cependant, lors du dégainage de l'éprouvette, on constate dans tous les cas, la présence d'une petite quantité de sable, emprisonnée dans le silastène. On note également que la largeur des bandes diminue avec l'augmentation de la pression de

confinement. Celles-ci varient d'un peu plus de 2 mm dans l'essai de compression triaxiale mené à 10 MPa de confinement à moins de 1 mm dans celui mené à 40 MPa.

L'examen des lignes de rupture montre une forte dilatance locale (zone fortement blanchie), visible sur la totalité de leur longueur. Cette zone de dilatance locale où les grains de quartz sont fort endommagés, écrasés voir même broyés, s'étend sur toute sa longueur et paraît plus importante lorsque la bande traverse la zone centrale de l'éprouvette. L'observation visuelle des deux blocs séparés par la bande ne montre aucune trace visible de faiblesse ou signe de décohésion. Signalons aussi que, comme pour les éprouvettes cylindriques rompues dans les essais triaxiaux monotones, aucune ligne de Luders n'est observée.

La différence fondamentale entre le cylindre et le prisme réside dans la forme géométrique des surfaces de rupture. Pour les plaques rectangulaires, les surfaces de rupture obtenues ne permettent pas de définir un plan comme cela pouvait presque être considéré pour les échantillons cylindriques. La surface est régulière et non accidentée mais ne semble pas présenter l'aspect d'une surface engendrée par le déplacement d'une courbe par translation d'une lèvre à l'autre. En revanche, des similitudes peuvent être notées entre les diverses surfaces obtenues aux différentes pressions de confinement testées. Il apparaît de l'observation de ces surfaces, que le terme plan de rupture n'est pas approprié pour les éprouvettes prismatiques, car on a affaire à une surface gauche de type topographique mais régulière (Photos 3P3). Cette constatation suggère que dans le cas des plaques rectangulaires, le calcul théorique des orientations locales de la bande de cisaillement, exige outre la prise en compte des 3 composantes n_i de la normale locale mais probablement de la rotation des axes principaux de contrainte.

En résumé, l'analyse et l'examen macroscopique des lignes de rupture des plaques rectangulaires montrent que le passage du mode de rupture axiale vers la rupture en bande de cisaillement s'effectue pour une pression de confinement inférieure à 10 MPa. De façon approximative, on retiendra que dans l'essai triaxial, la rupture a lieu en bande de cisaillement inclinée d'environ 29 à 32° par rapport à l'axe de chargement. Cette orientation définit un angle qui augmente avec la pression de confinement; les détails concernant ces orientations peuvent être consultés dans le tableau 4.2. En revanche, on note une diminution appréciable des épaisseurs des bandes en fonction de la pression de confinement.

(a) Pc = 10 MPa*

(b) Pc = 20 MPa

(c) Pc = 30 MPa

(d) Pc = 40 MPa

Photos 3P1 : Rupture en bande de cisaillement observées dans les essais de compression triaxiale.

(*) Il s'agit des deux faces de la même éprouvette.

Pc = 20 MPa

Pc = 30 MPa

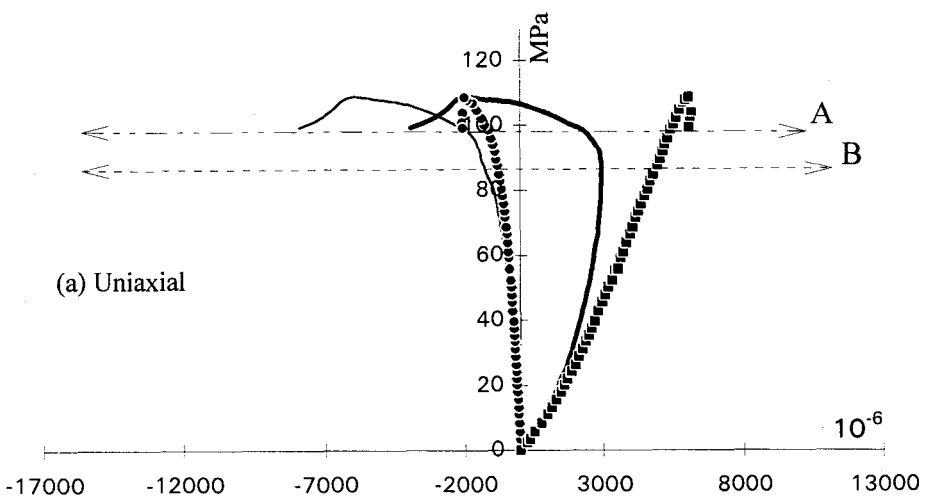
Photos 3P2 : Exemples de rupture en bande de cisaillement fort inclinées par rapport à l'axe de chargement obtenues dans des essais triaxiaux non homogènes.

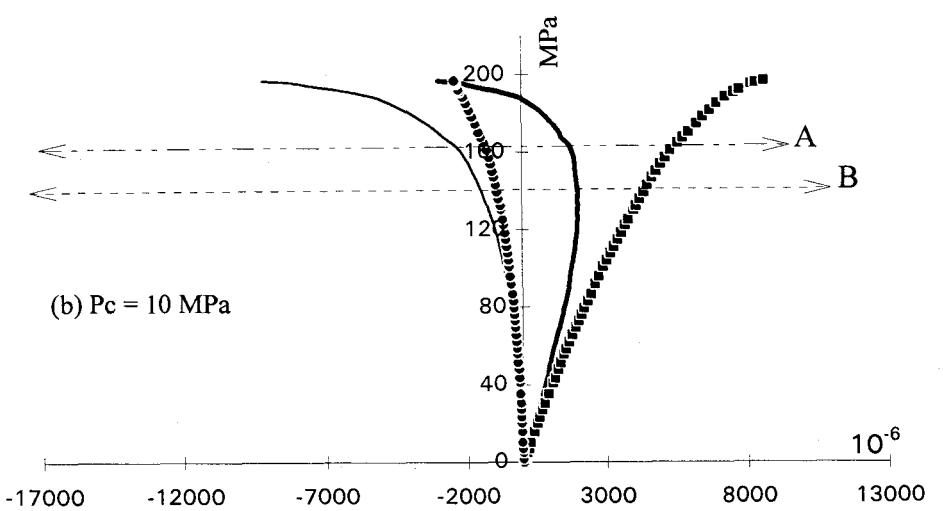
Photos 3P3 : Observations d'un exemple de surfaces engendrées par la bande de cisaillement dans un essai triaxial (Pc = 20 MPa).

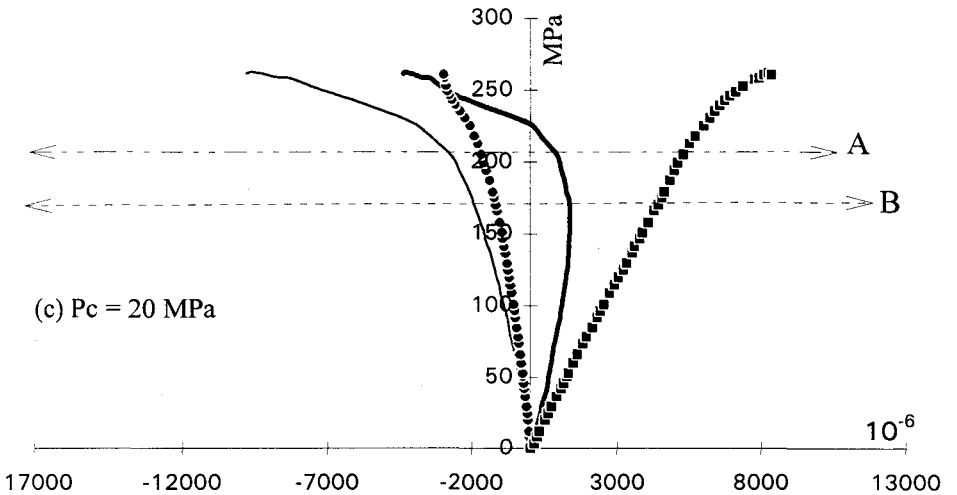
III-2-3 : ANALYSE ET INTERPRETATION DES REPONSES MECANIQUES

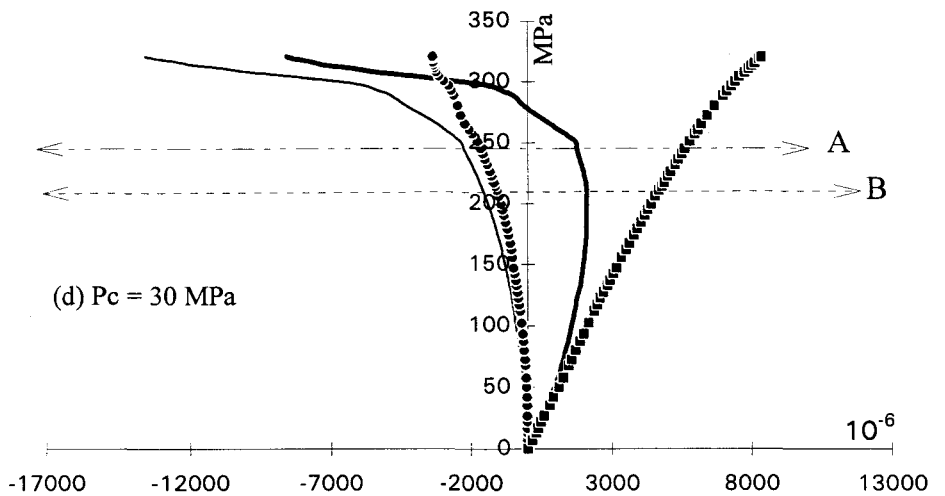
Commentaires sur les courbes de déformations

La variation des déformations axiales (ε_1), transversales (ε_2), latérales (ε_3) et volumiques (ε_v) en fonction de la contrainte déviatorique sont présentées ci dessous, dans la figure 3.11 pour les différentes pressions de confinement. Les courbes contraintes déformations ont une allure classique où les quatre phases observées dans l'essai axisymétrique (chapitre 2) sont reproduites. L'annexe 2 (pp. IV) donne une première idée sur les différences observées dans le comportement mécanique global avec ces essais sur cylindres droits.









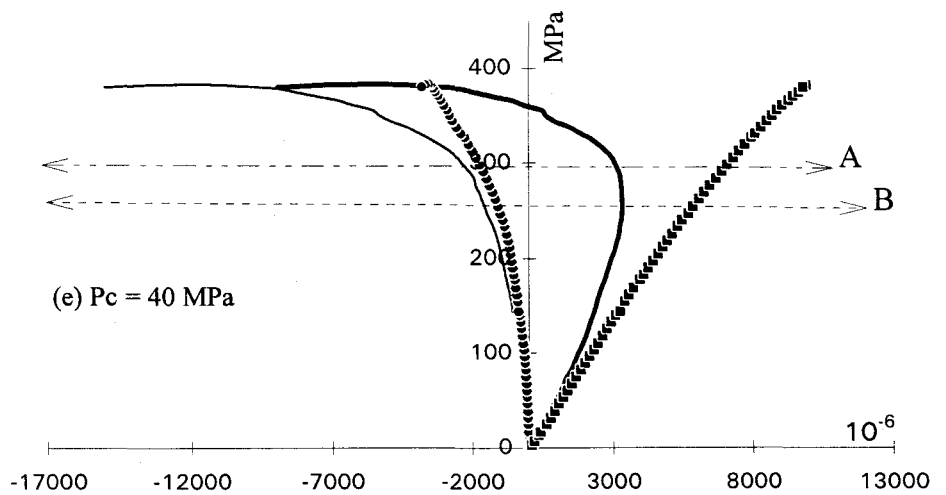


Figure 3.11: Courbes contraintes déformations. Essais uniaxial (a) et triaxiaux (b, c, d et e) sur plaques rectangulaires. Les niveaux de contraintes et de déformations enregistrées aux seuils de localisation A et au début de la propagation instable de la fissuration B sont indiqués.

Rappelons les niveaux particuliers de contraintes A et B, qui apparaissent sur les courbes contraintes déformations, nécessaires à notre discussion. Nous reprenons les notations du §II où le point A désigne le seuil de localisation supposé correspondre à la perte d'homogénéité des déformations. Le point B correspond au niveau du déviateur de contraintes où le taux de variation de la déformation volumique change de signe. Rappelons que ce point est considéré par Bieniawski (1967) comme le seuil de propagation instable de la microfissuration. Martin et Chandler (1994) attribuent à ce point B la contrainte d'endommagement par fissuration car un chargement croissant ou constant et permanent conduirait à la rupture après un temps relativement court (quelques heures à quelques jours) (Bieniawski, 1967; Kranz, 1979a, 1980; Lajtai et al., 1994; Martin et Chandler, 1994). Le point B, facilement discernable sur les courbes contraintes déformations volumiques, semble dépendre de la pression de confinement. Si on le repère par rapport à la résistance à la rupture, il se situe à 80 % dans l'essai uniaxial, à environ 70 % dans l'essai triaxial mené à 10 MPa de confinement, et stagne autour de 65 % pour 20, 30 et 40 MPa de confinement. Dans ces essais le point correspondant à la perte de linéarité des déformations axiales se confond presque ou systématiquement avec B. Soulignons néanmoins que la détermination précise de ce point (seuil des non linéarités longitudinales) est quelque peu subjective car sa position exacte est parfois difficile à établir sans ambiguïtés.

Seuil de microfissuration

Les points de perte de linéarité des déformations transversales ε_2 (entre 20 et 30 %) et celui où s'effectue celle des déformations latérales ε_3 (entre 30 et 40 %) ne sont pas spécialement reportés sur les courbes de comportement. L'un ou l'autre de ces niveaux du déviateur sont généralement associés dans l'essai axisymétrique au seuil de microfissuration ou seuil de dilatance. Dans la présente étude on s'intéressera plutôt à la dilatance qui intègre les deux déformations ε_3 et ε_2. Lorsqu'on observe cependant séparément ces courbes de déformations, on note que les premières microfissures se développeraient de manière axiale mais perpendiculairement à la direction 2 (pour lequel le seuil de microfissuration est légèrement plus bas). L'augmentation ultérieure très rapide des déformations latérales ε_3 indique que l'extension dans la direction 3 devient rapidement prépondérante. En marge de ces commentaires, Il faut cependant garder à l'esprit que les déformations transversales ε_2 sont mesurées à l'aide de jauges et que cette perte de linéarité précoce peut être en partie imputée à la nature locale des informations traitées.

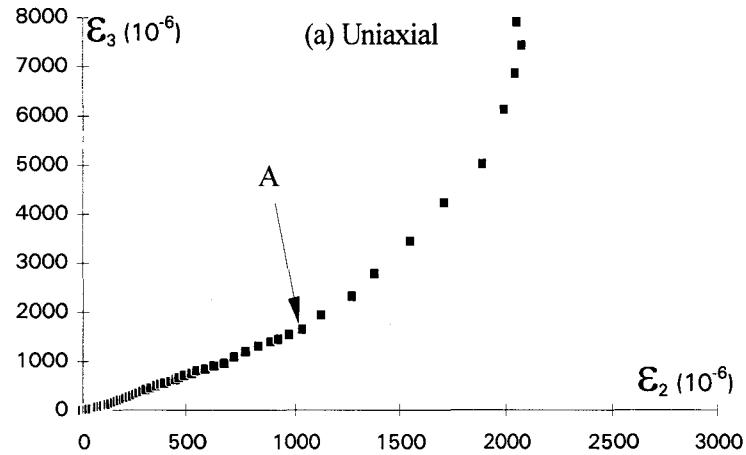
Remarques

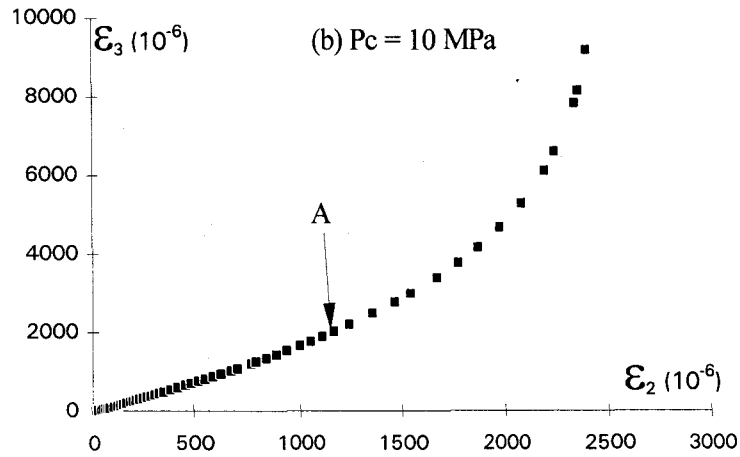
Il est vrai que comme le font habituellement la plupart des auteurs, nous allons systématiquement présenter les résultats en situant les différents niveaux de contraintes par rapport à la résistance à la rupture. Le lecteur comprendra que lorsqu'on commente en terme de

contraintes, les comparaisons et généralisations restent relatives au test et aux conditions d'essai. Un tableau synoptique comportant toutes les informations concernant les niveaux de contraintes et de déformations regroupe les détails (Tableau 4.1), il sera présenté au chapitre 4 (p. 115).

Perte d'homogénéité des déformations et seuil de localisation

Les courbes représentant les variations de la déformation ε_3 en fonction de ε_2 sont présentées sur la figure 3.12. Les similitudes remarquables sur ces courbes supposent qu'elles traduisent des manifestations macroscopiques de dilatance, qui résultent de certains mécanismes physiques de même nature, propres au comportement fragile. On observe comme dans les essais effectués sur les cylindres que ces courbes présentent une partie linéaire importante suivie d'une déviation convexe dont le début détermine ici, sans ambiguïté le point A. Cette déviation provient d'une accélération soudaine des déformations ε_3 qui se poursuit jusqu'à la rupture. La déformation transversale, bien qu'accélérée est nettement moins importante que la déformation latérale ε_3. Le point A obtenu peut dans ce cas être considéré comme le véritable seuil de localisation, contrairement aux pseudo seuils obtenus dans les essais triaxiaux de révolution.





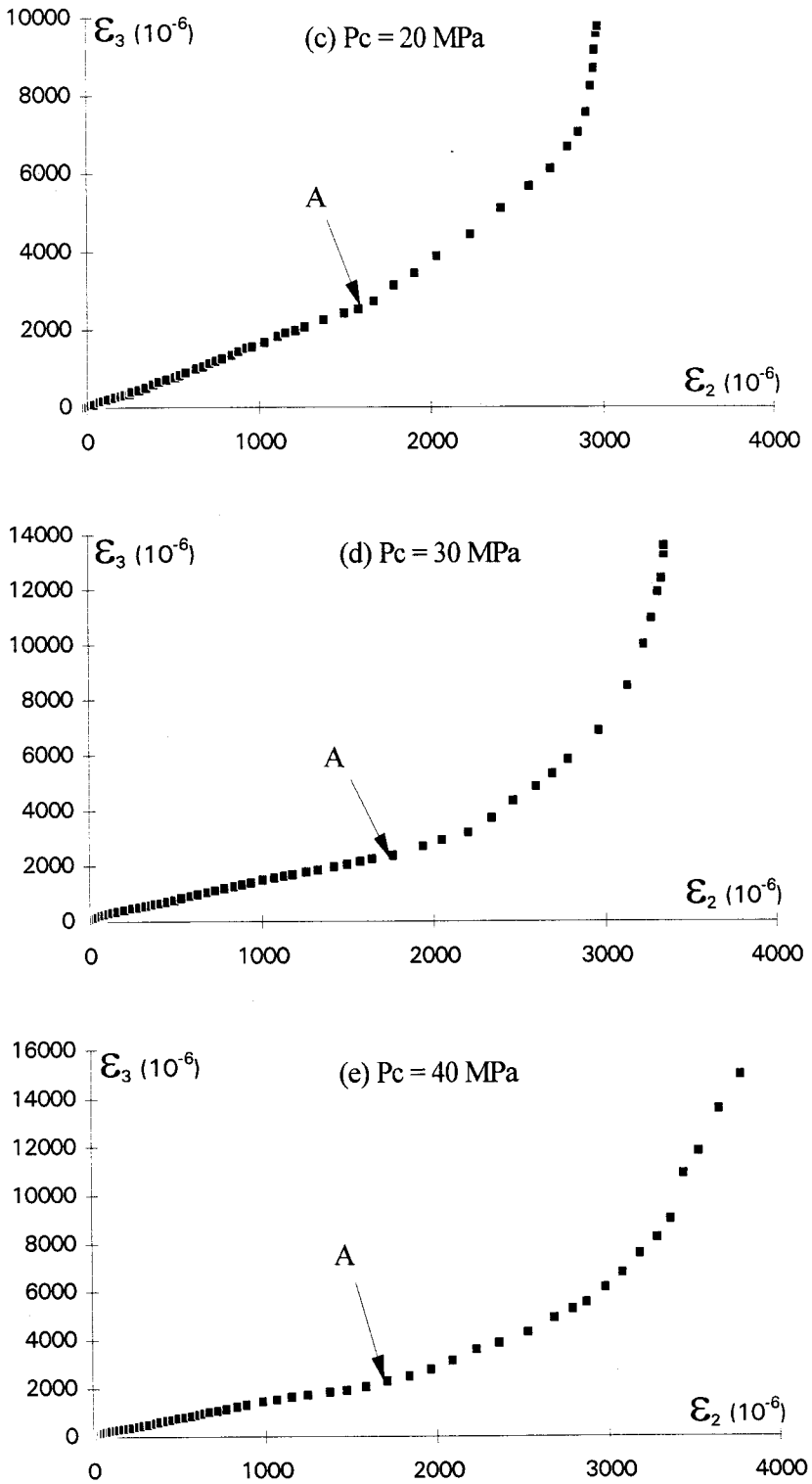


Figure 3.12: Variations des déformations transversales en fonction des déformations latérales. Essais uniaxial (a) et triaxiaux (b, c, d et e).

En deçà du seuil A, la pente de la partie linéaire des courbes est supérieure à 1. Elle se maintient à 1,7 dans l'essai uniaxial et dans les essais triaxiaux menés à 10 et 20 MPa de confinement et diminue à 1,3 et 1,2 dans respectivement les essais triaxiaux réalisés à 30 et 40MPa de confinement. Dans l'essai uniaxial, le seuil de localisation A se situe à 96 MPa, soit 88% de la résistance à la rupture. Cette valeur est en parfaite concordance avec le pseudo seuil déterminé dans les conditions axisymétriques. Cette constatation n'a rien de surprenant au vu du mode de rupture de même type obtenu dans les essais sur plaques. Dans l'essai triaxial, le seuil de localisation A dépend essentiellement de la pression de confinement. A 10, 20, 30 et 40 MPa de confinement, le seuil de localisation est repéré respectivement à exactement 82, 79, 76 et 77 % de la résistance à la rupture. On notera aussi cette tendance au seuil à paraître plus tôt par rapport à la rupture, lorsqu'on augmente la pression de confinement.

Propagation instable de la fissuration

Dans l'essai uniaxial, comme dans tous les essais triaxiaux, le point B se situe systématiquement au dessous du seuil de localisation (figures 3.11). L'écart absolu entre ces deux points augmente avec la pression de confinement. Ces observations indiquent que la propagation instable de la microfissuration précède la localisation des déformations. Il est tout à fait acceptable que les phénomènes physiques qui engendrent les instabilités élémentaires (interactions, propagations, etc.) précèdent l'instabilité d'ordre général qui prend place après la localisation (coalescence et matérialisation de la bande de cisaillement). Ces deux points doivent chacun leurs singularités à des manifestations macroscopiques de phénomènes physiques d'origine et d'ordre différents, bien qu'il existe et cela est compréhensible, une interdépendance entre ces deux points A et B. Le point B indique une transition qui se rapporte aux instabilités de structure tandis que le point A manifeste l'instabilité de la structure. En fait, il faut préciser l'échelle des phénomènes auxquelles on s'intéresse. Nous reviendrons sur ces notions pour les définir sans ambiguïtés.

Les déformations

Pour les niveaux de déformations aux seuils de localisation, il n'est pas très judicieux de les comparer aux déformations maximales enregistrées, car les déformations au delà du seuil de localisation ne constituent qu'une réponse spécifique associée à l'état de la structure endommagée par zone et non une caractéristique mécanique propre au matériau. Ces déformations maximales ainsi que celles enregistrées au seuil de localisation sont données dans le tableau 4.1. On note que les déformations pré localisation sont relativement très faibles. A titre indicatif, on observe par exemple des proportions de 50 % à 16 % de la valeur maximale pour les déformations

transversales ε_2 lorsque la pression passe de 0 à 40 MPa, et de 28 % à 16 % de la déformation latérale ε_3 maximale pour le même intervalle. Les proportions obtenues pour les déformations axiales sont plus importantes; on note 86 % du maximum dans l'essai de compression uniaxiale et entre 60 et 70 % dans les essais triaxiaux.

Si on s'intéresse de près aux valeurs et niveaux de déformations enregistrées aux seuils de localisation, on constate qu'il apparaît à des valeurs déformations souvent comparables (voir tableau 4.1). On peut considérer que pour les déformations axiales, la localisation survient pour des valeurs comprises entre 5.30 et 5.60 10^{-3} (à l'exception du confinement de 40 MPa). Cet intervalle est de 1.60 à 1.70 10^{-3} pour les déformations transversales ε_2 (pour Pc=20, 30 et 40 MPa) et de 2.20 à 2.30 10^{-3} pour les déformations latérales ε_3 (pour Pc=10, 30 et 40 MPa). Ces constations confortent, notamment pour ε_2 et ε_3, la pertinence de la notion de déformation critique que certains auteurs comme Stacey (1981) ont proposé pour décrire la rupture des roches.

Les déformations volumiques au seuil de localisation montrent une dispersion telle, que l'on n'a pas pu mettre en évidence une valeur critique. Néanmoins, lorsqu'on recoupe, dans les groupes de type d'essai où, dans l'une au moins des trois directions, une déformation spécifique au seuil a été observée, on s'aperçoit que seul l'essai triaxial mené à 30 MPa de confinement, réuni cette condition dans les trois directions. Ce résultat ne peut être considéré comme isolé, on notera que la déformation volumique au seuil de localisation dans ce test est de 1.75 10^{-3}; la valeur la plus proche a été enregistrée dans l'essai triaxial mené à 10 MPa de confinement où on obtient 1.80 10^{-3}. L'étude du chapitre 4 nous permettra d'établir pour cette déformation volumique critique un intervalle d'amplitude bien défini.

Comparaison des déformations locales

Cette comparaison concerne les informations obtenues à partir des deux groupes de trois jauges de déformations collées sur chacun des deux blocs qu'est sensé séparé la bande de cisaillement. Le but recherché est de préciser si des déformations différentes sont observées pour chacun des deux blocs et si une corrélation est possible avec le seuil de localisation obtenu à l'aide des mesures globales. L'analyse comparative de ces déformations entre elles s'est révélée peu concluante. En effet, deux types de réponses ont été enregistrés: celles où les déformations dans les deux blocs sont comparables jusqu'à la rupture et celles qui divergent continûment dès le début de l'essai. Ces dernières indiquent la non homogénéité de l'essai dont les raisons inconnues tels les problèmes liés à la non uniformité de la contrainte sur les surfaces de chargement (frettage ou non coaxialité) ou peuvent simplement résulter de l'humidité qui a affecté le collage

des jauges, ou encore à leurs orientations qui ne coïncident pas exactement avec la direction. Bien entendu, ces essais ont été écartés et remis à l'ordre du jour.

Ces résultats restent positifs car, outre la non homogénéité de certains essais qu'ils ont permis de déceler, ces déformations locales indiquent peut être que les mécanismes de glissement ne se développent que lorsque la bande de cisaillement se matérialise (au pic). En effet, si les déformations axiales locales divergeaient, cela signifierait que la division des deux blocs est principalement régie par le glissement ce qui conduirait à des mécanismes post localisation dominés par le développement et propagation de fissures de cisaillement. Maintenant, si à partir d'un niveau de la contrainte déviatorique donné, une divergence importante apparaissaient entre les déformations latérales globales et locales d'une part, et/ou entre les deux déformations transversales locales d'autre part, elle aurait indiqué une discontinuité dans l'évolution de la dilatance. Cela pourrait être interprété comme si, pendant qu'un bloc se déplace en coulissant (dilatance faible), l'autre continu à supporter une charge plus importante (dilatance plus élevée), en garantissant le glissement relatif . Là encore, les divergences notées pour ces deux directions auraient pu nous amener à conclure qu'au delà du niveau de la contrainte déviatorique où elles se produisent, le mécanisme dominant serait principalement dominé par le cisaillement. Une contradiction resterait à relever car il aurait fallu également en déduire que la surface de rupture devient instable avant le pic! Nous reviendrons plus loin sur cet aspect (chapitre 5).

III - 3 : CONCLUSIONS:

Les investigations visant la détection du seuil de localisation repose sur l'évaluation de l'homogénéité des déformations. L'idée retenue repose sur des mesures globales dans le plan défini par la section droite située à mi hauteur de l'éprouvette, perpendiculaire à la direction de chargement. Cette hypothèse fait suite à l'examen des échantillons rompus dans l'essai triaxial de révolution et qui mettait systématiquement en évidence une partie centrale fortement endommagée. La procédure expérimentale a consisté à représenter les variations des déformations transversales ε_2 en fonction des déformations latérales ε_3.

L'application de cette procédure dans les essais triaxiaux sur éprouvettes cylindriques n'a pas été très concluante, les courbes ε_2 - ε_3 restent souvent quasiment linéaires jusqu'à la rupture. Grâce à un dispositif adapté, l'usage de plaques rectangulaires a permis d'obtenir des résultats encourageants. L'analyse des essais de compression réalisés sur ces éprouvettes a permis de déterminer les seuils de localisation mais aussi de caractériser les modes de rupture, l'inclinaison des bandes par rapport à la contrainte principale majeure et enfin l'épaisseur des bandes.

Les courbes ε_2 - ε_3 obtenues montrent une phase linéaire où les déformations sont homogènes. La pente de cette partie linéaire est égale à 1 pour les éprouvettes cylindriques. Dans les éprouvettes prismatiques cette pente varie de 1,7 dans l'essai uniaxial à 1,2 dans l'essai triaxial réalisé à pression de confinement élevée (40 MPa). Le seuil à partir duquel les déformations deviennent non homogènes (perte de linéarité de ε_2 - ε_3) précède une augmentation remarquable des déformations latérales ε_3. Il indique que la plus grande partie de la dilatance se développe après le seuil de localisation. Cette observation expérimentale semble importante au niveau théorique comme le suggère Santarelli (1990), si on se rapporte par exemple à l'étude de Rice (1976) et Vardoulakis, Sulem et Guenot (1988).

Cette accélération des déformations latérales résulte incontestablement d'une fissuration axiale, plus importante en nombre, plus longues et probablement plus ouvertes dans cette direction. Reportés sur les courbes contraintes déformations, les seuils de localisation sont d'autant plus précoces par rapport au pic que la pression de confinement est élevée. On enregistre la localisation à 88 % de la résistance à la rupture dans l'essai uniaxial, et entre 82 et 76 % dans les essais triaxiaux. Le point B où la pente de la courbe de déformations volumiques change de signe précède systématiquement le seuil de localisation (80 % de la résistance à la rupture dans l'essai uniaxial, entre 65 et 70 % dans les essais triaxiaux). Enfin, les résultats obtenus semblent indiquer que la localisation des déformations apparaît lorsque les déformations atteignent certaines valeurs critiques que nous avons évaluées. Ces valeurs sont entre 5.30 et 5.60 10^{-3} pour les déformations axiales, entre 1.60 et 1.70 10^{-3} pour les déformations transversales ε_2 et entre 2.20 et 2.30 10^{-3} dans la direction latérale ε_3. La déformation volumique critique oscille autour de 1.80 10^{-3}.

L'examen des lignes et surfaces de rupture a permis de distinguer deux types de rupture. Elle se développe le long de plusieurs plans parallèles à l'axe de chargement dans l'essai de compression uniaxiale. Dans les essais triaxiaux sur plaques, la rupture se développe le long d'une surface unique, inclinée par rapport à la direction de la contrainte principale majeure d'un angle compris approximativement entre 29 (Pc = 10 MPa) et 32° (Pc = 40 MPa). Les épaisseurs des bandes de cisaillement varient de presque 2 mm (Pc = 10 MPa) à moins d'un millimètre (Pc = 40 MPa). L'examen des surfaces de rupture montre qu'elles présentent un aspect qu'on peut qualifier de topographique mais régulière. Elles semblent toutes contenir des plans verticaux, probablement engendrées par la coalescence d'une fissuration importante de traction qui se sont propagés dans leur propre plan. Contrairement aux éprouvettes cylindriques, les plaques ne mettent en évidence ni des lignes de Luders, ni des cônes de frottement.

La nécessité de contrôler les bandes de cisaillement, et en particulier de suivre leurs évolutions durant la phase post localisation est un des objectifs que nous nous sommes fixés dans cette étude. Nous poursuivons donc cette étude avec les mêmes types d'essais que précédemment mais sur des plaques percées d'un trou cylindrique de faible diamètre et traversant l'éprouvette de part en part. Pour le contrôle de la position initiale de la bande, nous avons choisi de placer cette imperfection au centre de l'échantillon. Nous montrerons à travers les résultats obtenus que ce point de faiblesse permet de concrétiser les conditions de sensibilité optimales de la méthode mise au point pour la détection du seuil de localisation.

CHAPITRE IV

LOCALISATION DANS DES EPROUVETTES CONTENANT UNE IMPERFECTION

INTRODUCTION

Le grès de Fontainebleau est une roche monominérale et très homogène. Mais il n'est pas exclu que des imperfections (sous forme de micro cavités, d'inclusions ou autres hétérogénéités) soient naturellement présentes dans ce matériau. D'après la théorie de la bifurcation, les déformations peuvent se localiser dans l'éprouvette même si le matériau est parfaitement homogène et même quand les conditions de chargement sont parfaites.

Lorsqu'on décharge l'éprouvette après l'avoir sollicité légèrement au dessus du seuil de localisation, aucune trace visible de rupture ou d'endommagement local n'est repérable sur la surface de l'éprouvette. Ceci est probablement dû au fait, que la zone de localisation se développe en premier lieu en coeur plutôt qu'en peau des éprouvettes. La théorie classique prévoit que la rupture s'initie à l'intérieur de la roche plutôt que sur les parois. Rappelons aussi que le positionnement du dispositif de mesure des déformations à mi hauteur de l'éprouvette repose sur l'hypothèse que c'est dans la partie centrale que les déformations localisent. Cette hypothèse est faite au vu des dommages substantiels observés dans la zone centrale de la quasi totalité des éprouvettes rompues dans les essais triaxiaux. Soulignons enfin, que l'observation directe (visuelle et microscopique) des zones de localisation et la réalisation de mesures locales dans ces zones, font partie de nos objectifs.

Pour remédier aux diverses situations que nous venons d'évoquer, nous avons décidé d'inciter la localisation des déformations en un lieu bien précis de l'éprouvette. La démarche utilisée consiste à utiliser des plaques identiques percées au centre d'un trou cylindrique d'axe perpendiculaire à l'axe de chargement et traversant l'éprouvette sur toute sa largeur.

L'étude menée dans ce chapitre consiste à présenter les résultats obtenus sur les plaques percées seuls ou en parallèle avec ceux relatifs à l'éprouvette non percée. Aussi les mêmes thèmes y serons développés (rupture, comportement mécanique, seuil de localisation etc.). On fera ensuite une synthèse de quelques constatations liés aux effets de la pression de confinement. Cette seconde partie est consacré aux paramètres dont dépend ou résulte la localisation et concerne les contraintes critiques (seuil de localisation et résistance à la rupture), les déformations critiques, les orientations des bandes de cisaillement et enfin les modules d'écrouissages au seuil de localisation. L'influence de l'imperfection induite sera ensuite étudiée. On abordera dans cette dernière section les effets de l'imperfection sur l'orientation et la largeur des surfaces de rupture et on insistera particulièrement sur l'influence de sa taille relative, par rapport à la structure.

IV-1 : CHOIX ET LIEU GEOMETRIQUES DE L'IMPERFECTION

La condition nécessaire qui doit guider le choix de l'hétérogénéité à introduire, est que cette dernière ne perturbe pas l'homogénéité des essais. Les réponses macroscopiques (comportement mécanique et lignes de rupture) doivent rester globalement inchangées. La présence de cette imperfection ne doit avoir pour rôle qu'un effet concentrateur des contraintes localement. De sorte que la zone de fissuration la plus intense dans l'éprouvette soit piégée; ce qui nous permettra d'en contrôler l'évolution. Pour des raisons de commodité et de symétrie, nous avons donc choisi un trou circulaire dont le diamètre a été fixé à 3 mm (figure 4.1). Les éprouvettes sont percées dans l'eau, introduites dans l'étuve déshydratante et subissent le même protocole expérimental, résumé dans le paragraphe III - 2.

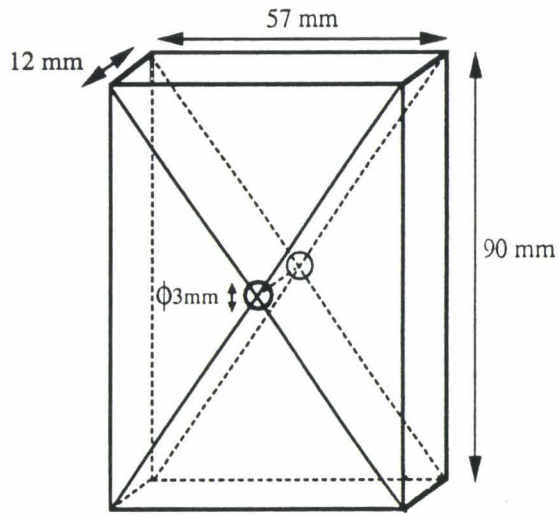


Figure 4.1 : Définitions géométriques de l'ouverture cylindrique.

L'idée d'utiliser une plaque percée d'un trou cylindrique perpendiculaire à l'axe de chargement à été introduite pour la première fois et exploitée par Nadaï en 1950 sur les métaux et matériaux composites (Nadaï, 1950). Récemment, Petit et Barquins (1990) sur le PVC et le PMMA utilisent des éprouvettes percées et obtiennent une localisation en croix dans la zone de déformation plastique naissante autour du trou. Dans les roches ou matériaux proches, on peut citer à titre d'exemple les travaux de Lajtai et al. (1975) sur le plâtre de Paris, Lajtai et al. (1994) sur un sel (de potasse) ou encore Rummel (1971) sur le calcaire, même si l'objectif de ces

BU UMBB

auteurs est plutôt de mettre en évidence la formation de fissures s'amorçant sur la frontière d'une cavité cylindrique de taille macroscopique. Des études se sont également intéressés aux conditions de propagation d'une fissure de traction s'amorçant sur une ouverture cylindrique dans le verre (Sammis et Ashby, 1986) et dans le calcaire (Henry, 1980) D'autres auteurs comme Bieniawski (1967), Horii et Nemat-Nasser (1985), Labuz et al. (1985) ou Nolen et Gordon (1987) se servent d'une ou plusieurs entailles pour tenter de comprendre les mécanismes physiques de nucléation, d'interaction ou de coalescence de fissures.

Le choix du centre de l'éprouvette pour placer cette imperfection se justifie, car d'abord, il permet d'être loin des surfaces de chargement. Il permet aussi accessoirement d'optimiser la sensibilité de la méthode qui repose sur l'usage du dispositif de mesure adapté à la mi hauteur de l'éprouvette pour que celui-ci puisse enfin intégrer la composante latérale des déformations inélastiques prévues autour de la cavité.

Vardoulakis et Graff (1982) suggéraient qu'une encoche (entaille) sur les cotés, ou un trou cylindrique permettent de bien contrôler la bande de cisaillement. Vardoulakis et Graff (1985) utilisent des résultats d'essais biaxiaux réalisés sur des éprouvettes de sable comportant une imperfection en densité au centre et sur des éprouvettes munies d'une entaille (sur le côté). Ils concluent, à l'issue des observations et de la modélisation effectuée, que les caractéristiques de bande (inclinaison de la bande et déformation de cisaillement au seuil de localisation) obtenues dans l'éprouvette avec imperfection au centre se prêtent mieux à l'analyse en terme de bifurcation.

IV-2 : OBJECTIFS EXPERIMENTAUX:

Les objectifs de base de l'étude expérimentale sur les plaques rectangulaires percées (figure 4.1) peuvent être résumés en trois points :

(i) La détection du seuil de localisation dans des essais similaires à ceux réalisés sur les plaques non percées. Une comparaison sera systématiquement effectué entre les résultats de ces deux séries d'essai.

(ii) La mesure de déformations locales dans la bande : la présence du trou de faible dimension permet de détecter le moment où les déformations localisent dans des conditions optimales. L'imperfection induite est sensée induire une concentration de contraintes qui déclenchera la localisation au centre de la plaque. Sachant que la bande naissante partira de l'un des points de la circonférence du trou, on peut envisager d'effectuer des mesures locales en ces points. Quatre jauges ont été placées (figure 4.2), tangentes à la circonférence et perpendiculaires

senestre (J2 et J4), chaque paire de jauges est assignée à donner des informations concernant chacune des deux bandes naissantes.

(iii) Le défaut introduit permet enfin de contrôler la progression post localisation de la bande. Des décharges sont réalisées à 85 %, 90 % et 95 % du pic de contraintes. Ces éprouvettes feront l'objet d'observations directes, visuelles et microscopiques dans la seconde partie du chapitre 5.

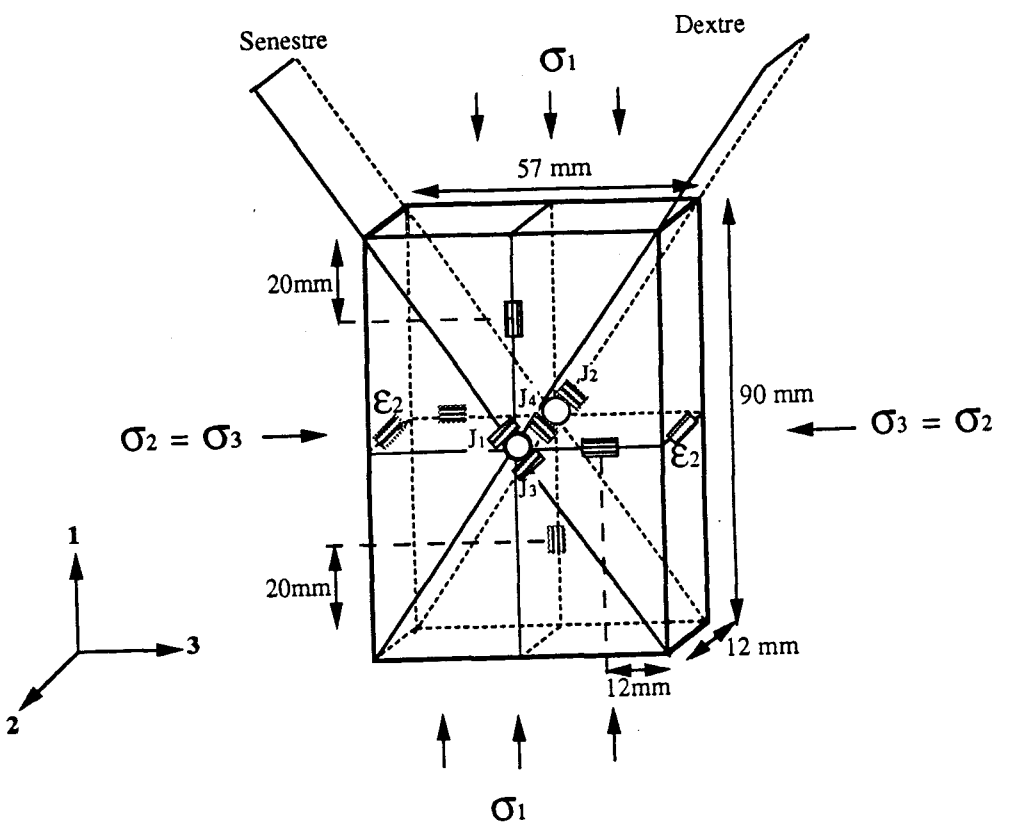


Figure 4.2 : Présentation de la disposition des jauges de déformation sur la plaque rectangulaire contenant l'ouverture cylindrique, dans le **cas de l'essai de compression triaxiale**. Les jauges J1, J3 d'une part, J2, J4 d'autre part sont disposées perpendiculairement selon les directions senestre ou dextre de la bande de cisaillement.

Tous les essais présentés dans cette section sont monotones et, lorsque nos capacités à réagir assez rapidement le permettent, la charge axiale est stoppée (arrêt soft) dès que la rupture se produit (marquée par une détonation d'intensité acoustique très élevée). Lorsque le piston n'est plus en contacte avec l'embase supérieure, la pression hydrostatique est ramenée très lentement (1 à 2 MPa / mn) à la pression atmosphérique.

IV-3 : LIGNES DE RUPTURES

L'aspect général des lignes de ruptures observées sur les plaques percées montre le rôle important joué par le trou et la pression de confinement dans l'amorçage des surfaces de discontinuité. Toutes les éprouvettes rompues indiquent que, les lignes de rupture se sont propagées à partir de deux points distincts de la circonférence du trou, diamétralement opposés. Ces deux points se trouvent être les extrémités du diamètre parallèle à l'axe de chargement dans le cas de l'essai de compression uniaxiale (figure 4.3a). Dans les essais triaxiaux, ces deux points sont localisés aux extrémités du diamètre perpendiculaire à l'axe de chargement (figure 4.3b). Cette transition s'effectue pour une pression de confinement inférieure à 10 MPa.

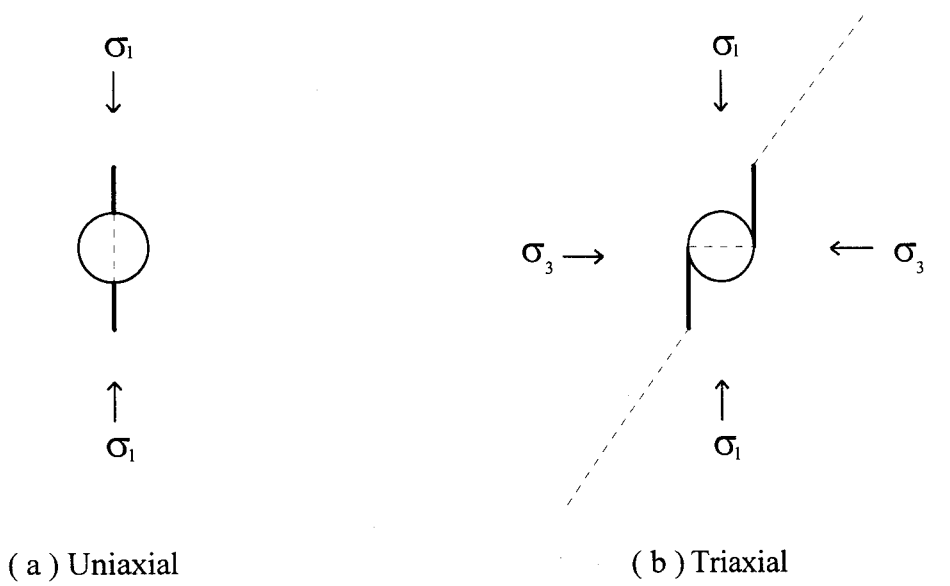


Figure 4.3 : Points où s'amorce la rupture dans le cas de la compression uniaxiale (a) et dans le cas de la compression triaxiale (b).

Compression uniaxiale

Dans l'essai uniaxial, la rupture des plaques non percées s'annonçait très proche lorsqu'un coin de l'éprouvette commençait à s'ébrécher. Ici, la rupture finale est précédée par l'apparition soudaine de deux macrofissures, chacune partant d'un point de l'extrémité du diamètre parallèle à l'axe de chargement (figure 4.3a et photo 4P2a). Elles sont visibles l'une après l'autre, séparées par un intervalle de temps très court. Après un court intervalle de temps, celle qui est apparue la première se propage très rapidement, en ligne droite dans la direction axiale vers l'embase. L'autre, se propage sur une plus faible distance et s'arrête dès que la première atteint l'embase.

Il semble que leurs apparitions aient permis une relaxation locale au voisinage trou ; mais une relaxation générale dans l'éprouvette ne s'est produite que lorsque la propagation de la première surface de discontinuité a atteint l'embase. Cette relaxation a donné naissance au pic. La rupture se poursuit avec une évolution probable mais non visible de ces deux macrofissures et création de nouvelles, celles ci partent d'une embase à l'autre. Une réaction rapide permettant l'arrêt soft de l'un des essais à partir de la console de pilotage de la presse, nous a permis d'obtenir le cliché de la photo 4P2a. Ces observations nous ont incité à disposer les jauges locales dans l'essai uniaxial de la manière particulière illustrée ci dessous par la figure 4.4.

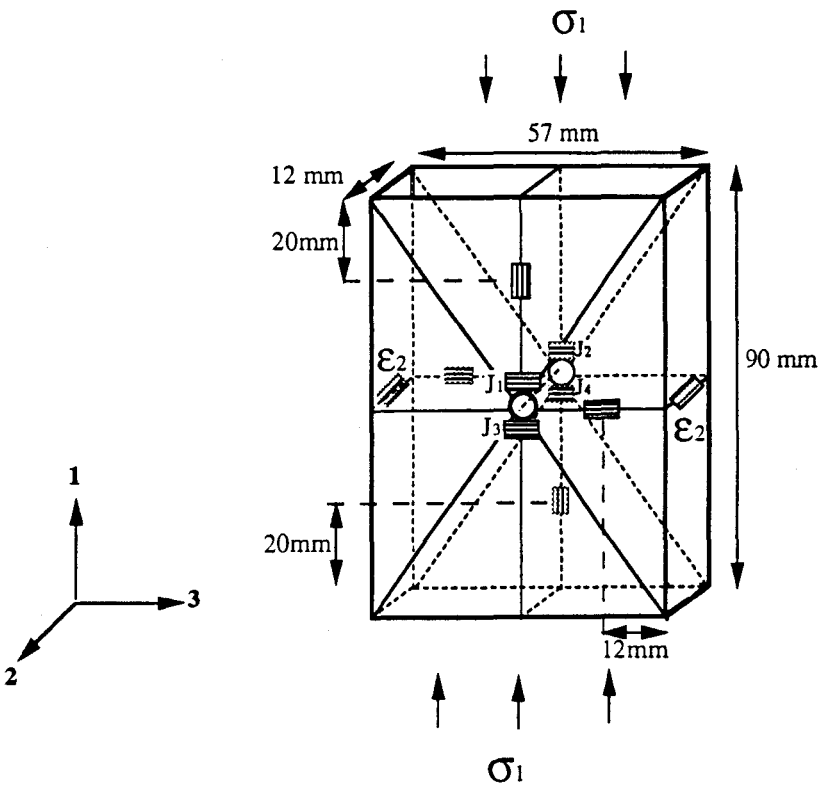


Figure 4.4 : Disposition des jauges de déformation localement, sur le contour circulaire de la cavité, dans le **cas de l'essai de compression uniaxiale**.

Compression triaxiale

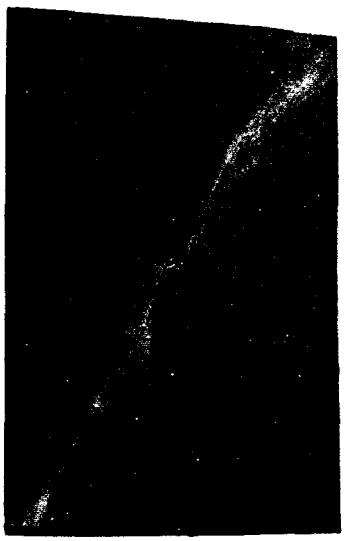
Dans les essais triaxiaux, la rupture se développe le long d'une surface unique, inclinée par rapport à l'axe de chargement (photos 4P1). Cette surface s'amorce sur les extrémités du diamètre transverse du trou (figure 4.3b) où s'est développée la localisation bien avant la rupture. On observe que, au delà d'une zone voisine du trou, la bande s'est développée puis propagée le long de la diagonale mais vraisemblablement lorsque le glissement s'est produit, elle a mis en évidence un coin fortement altéré. Cet endommagement est à attribuer à la déviation forcée occasionnée par le cône de frottement qui reste cependant, difficile à mettre en évidence sur les éprouvettes prismatiques. Ces cônes (discrets) sont probablement à l'origine de l'inclinaison plus élevée de la bande de cisaillement à l'approche des coins comme cela semble se deviner pour l'éprouvette rompue dans l'essai triaxial mené à 10 MPa (photo 4P1a).

Par ailleurs, lorsqu'on s'intéresse aux épaisseurs des bandes de cisaillement, on constate que celles ci ont parfois remarquablement augmenté. Les lèvres des bandes paraissent plus large par rapport à celles observées dans les plaques non percées, et en particulier pour l'essai mené à 10 MPa de confinement. Cet épaississement est provoqué par une deuxième bande qui s'initie sur la première avant que celle ci n'ait atteint le coin de l'éprouvette. Cette observation (photo 4P2b) a été possible grâce à la rapidité avec laquelle un arrêt " soft " a été réalisé au pic. Cet élargissement est réduit ou inexistant lorsque la pression de confinement est élevée. Des observations similaires ont été rapportées par Petit et Barquins (1990) sur plaque de PVC munie d'un défaut tubulaire. La projection d'un enregistrement sur film vidéo (journée de réflexion organisée par le Comité Français de Mécanique des Roches, le 18 juin 1990) montre bien comment de la première bande s'initie la seconde dont la largeur croît avec le chargement. En revanche, on assiste à une diminution appréciable de l'inclinaison de la bande (par rapport à l'axe de chargement) dans les essais sur plaques percées. Cet angle reste compris entre 24 et 28° (au lieu de 28° à 32° dans les plaques non percées). L'augmentation de l'inclinaison de la bande en fonction de la pression de confinement constitue une tendance qui se confirme.

(a) Pc = 10 MPa

(b) Pc = 20 MPa

(c) Pc = 30 MPa

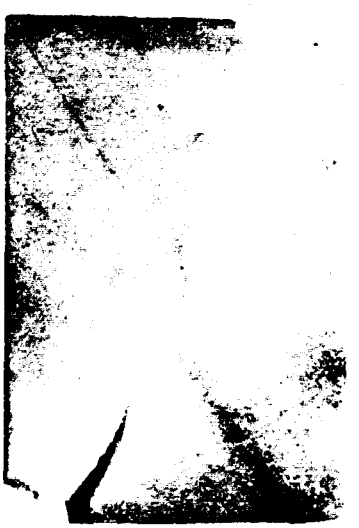


(d) Pc = 40 MPa

Photos 4P1 : Ligne de rupture obtenues sur les éprouvettes percées soumises à l'essai triaxial monotone.

(a)

(b)



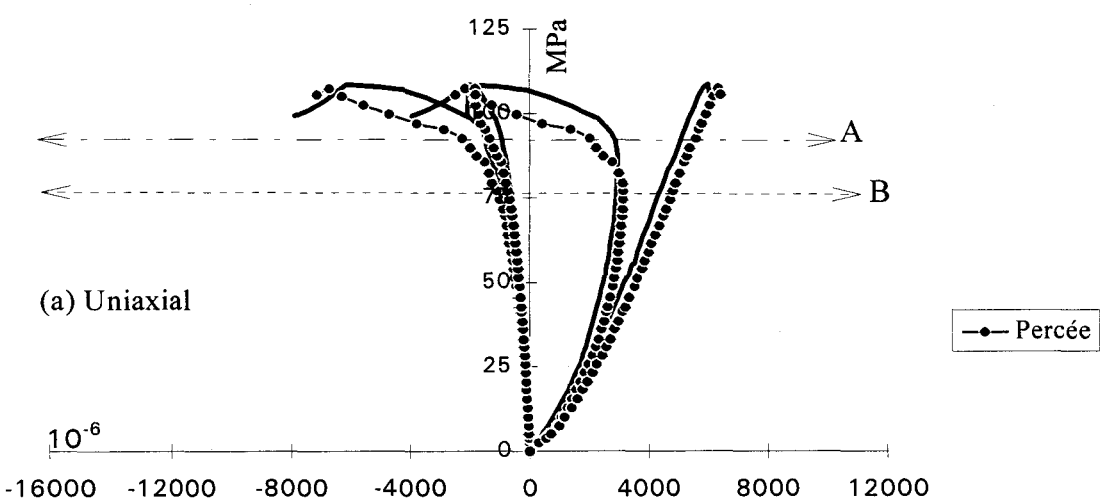
Photos 4P2 : (a) Amorçage de la rupture dans l'essai de compression uniaxiale. (b) Observation d'une deuxième bande qui s'initie sur la première : essai triaxial Pc = 10 MPa.

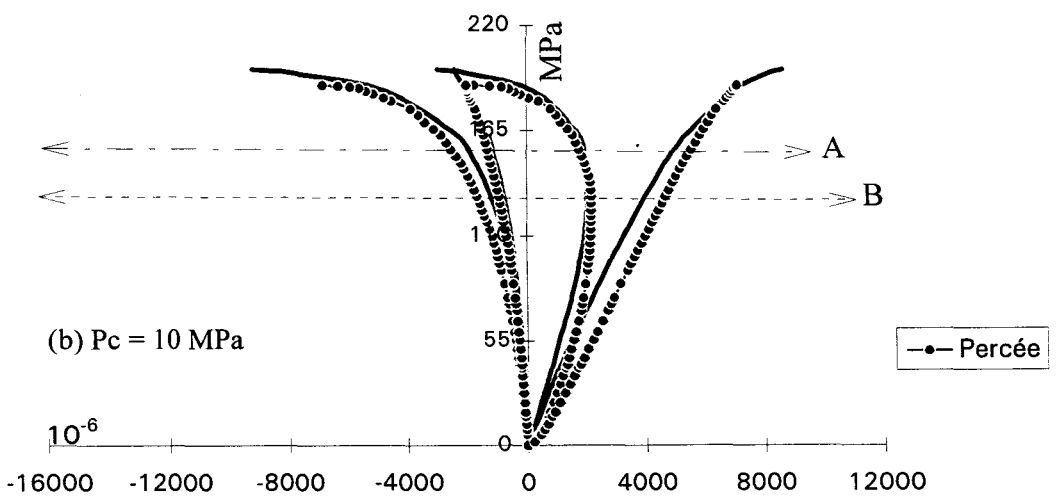
IV - 4 : RESULTATS DES MESURES DE DEFORMATIONS

IV - 4 - 1 : COMPARAISON AVEC LES ESSAIS SUR PLAQUES NON PERCEES

Courbes réponses et comportement

Les réponses mécaniques des essais sur plaques percées sont présentées sur la figure 4.5. Pour les besoins de la comparaison, les résultats obtenus dans les essais sur plaques non percées sont également reproduits sur les mêmes graphes. On constate que le trou n'affecte que très peu la réponse du matériau. En effet, seule une légère diminution (inférieure à 7 % dans tous les essais) du module élastique est enregistrée. La résistance à la rupture n'accuse qu'une légère diminution (inférieure à 4 %). Les détails concernant les paramètres (modules élastiques et coefficients de Poisson), les déformations (maximales et critiques) et les contraintes (au pic, au seuil A et au point B) sont données dans le tableau 4.1.





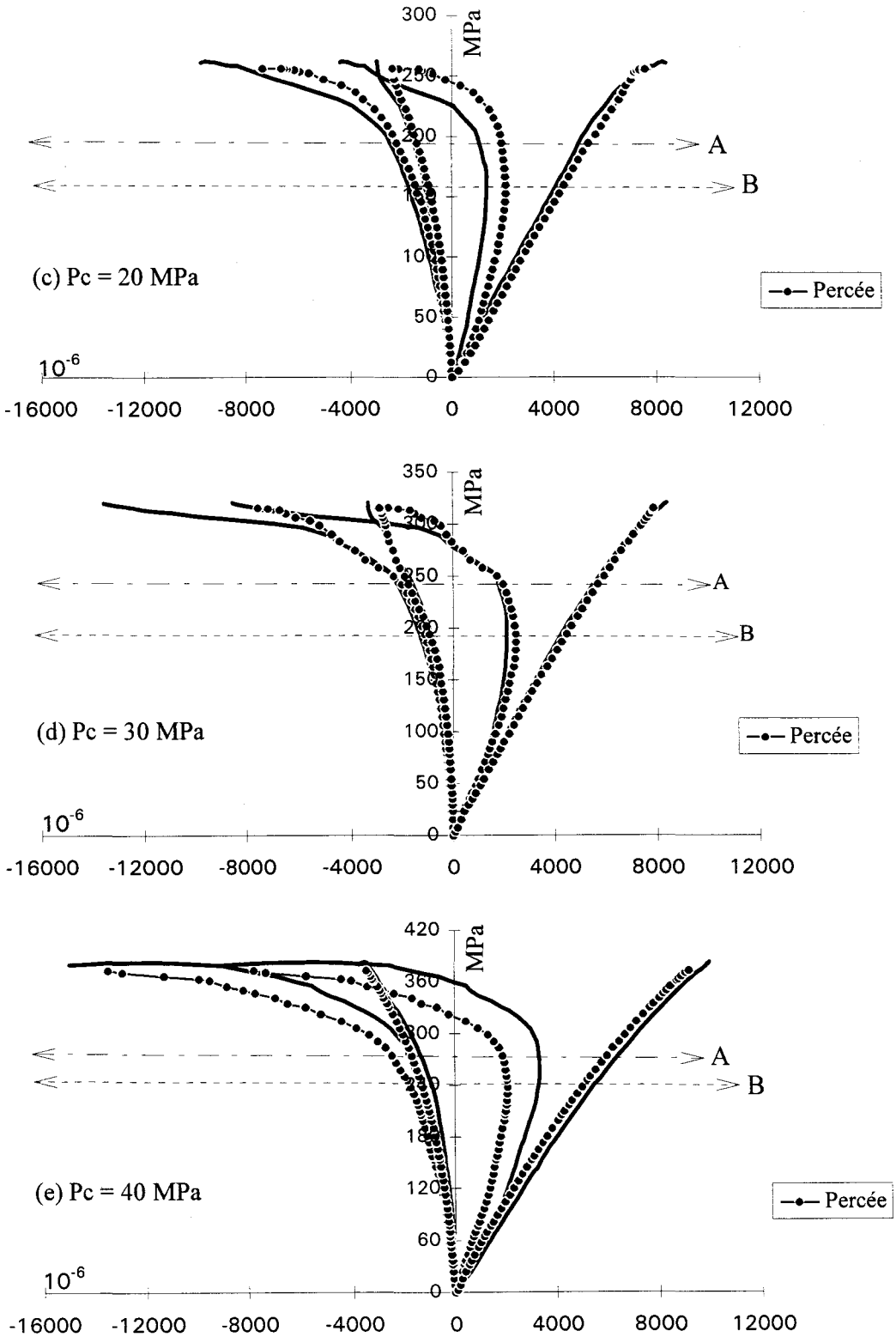


Figure 4.5 : Courbes contraintes déformations. Essais uniaxial (a) et triaxiaux (b, c, d et e) sur plaques rectangulaires percées et non percées. Les points A et B concernent les plaques percées.

Seuil de dilatance et propagation instable (point B)

Le seuil de dilatance, se maintient au même niveau (entre 30 et 40 % de la résistance à la rupture). En revanche, le point B, qui marque le début de la propagation instable de la fissuration est plus bas par rapport à celui obtenu sur les plaques non percées. Il chute à 72 % (80 % auparavant) de la résistance à la rupture dans l'essai uniaxial, à 69 % (75 % auparavant) dans l'essai triaxial mené à 10 MPa de confinement et se stabilise autour de 62 % pour Pc = 20, 30 et 40 MPa.

Cependant, il faut prendre en considération que ce point B ne se confond avec celui où les courbes contraintes déformations axiales deviennent non linéaires que lorsque la pression de confinement dans l'essai triaxial est assez élevée (Pc = 30 et 40 MPa). Cette perte de linéarité des déformations axiales reste au même niveau que le point B obtenu sur les plaques non percées dans l'essai uniaxial et dans les essais triaxiaux menés à 10 et 20 MPa. L'explication de cet écart est à attribuée à l'augmentation des déformations latérales et transversales durant la propagation stable de la fissuration. Durant cette phase, les déformations latérales intègrent également les discontinuités qui se concentrent au voisinage de la cavité, auxquelles s'ajoutent probablement les déformations élastiques du trou. Lorsque la pression de confinement est assez élevée (cette transition s'effectuant entre 20 et 30 MPa), les microfissures autour de la cavité sont moins ouvertes et la déformation élastique du trou nettement moins importante.

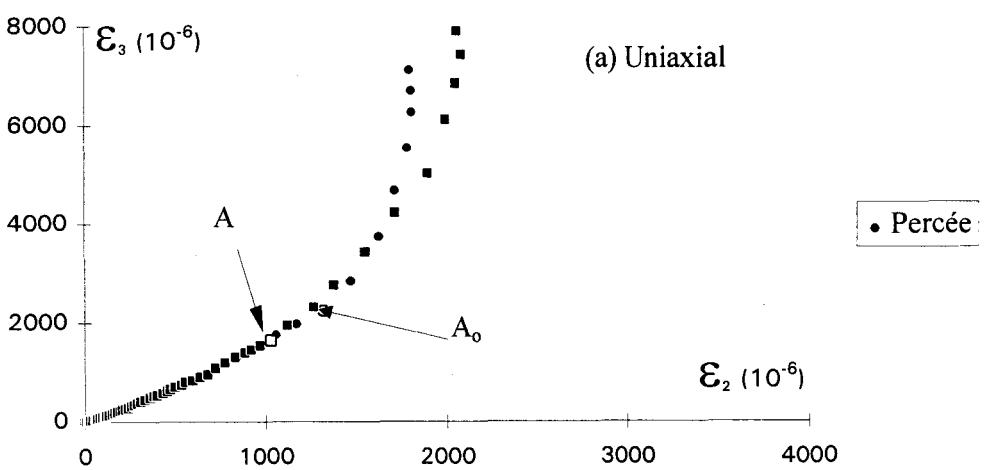
Seuil de localisation

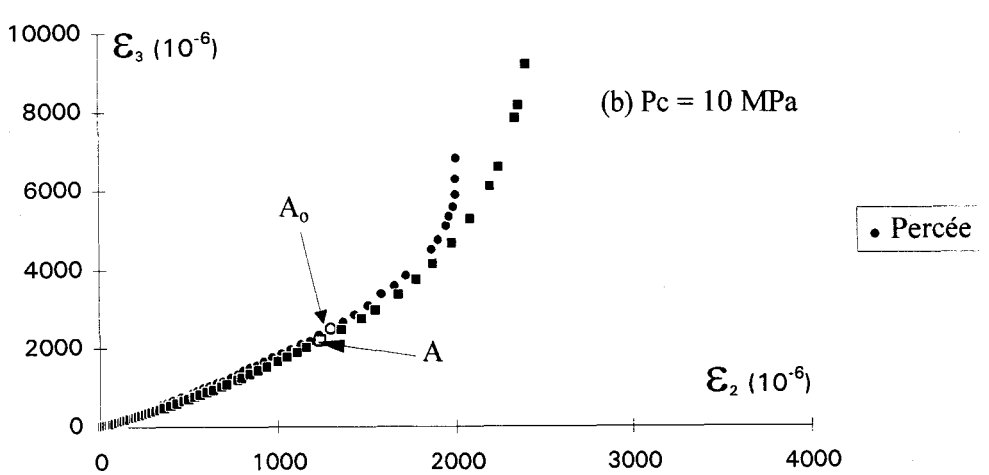
Les variations de la déformation transversale ε_2 en fonction des déformations latérales ε_3 pour les plaques percées sont représentées elles aussi sur le même graphe que celles relatives aux plaques non percées. L'ensemble est présenté par pression de confinement dans la figure 4.6. Les pentes de la partie linéaire OA restent voisines, et tendent aussi vers 1 lorsqu'on augmente la pression de confinement. Les pentes de la partie linéaire OA sont également données dans le tableau 4.1.

Dans l'essai uniaxial, le seuil de localisation est repéré à 86 % de la résistance à la rupture. Dans les essais triaxiaux, ils se situent à 82, 76, 75 et 73 % de la résistance à la rupture, pour respectivement les pressions de confinement 10, 20, 30 et 40 MPa. On notera encore, que l'écart entre le pic et le seuil de localisation augmente dans les mêmes proportions en fonction de la pression de confinement. En dehors de l'essai triaxial mené à 30 MPa de confinement, on observe une légère diminution du niveau du seuil de localisation. Cette diminution du seuil peut être attribuée soit à l'imperfection induite soit aux conditions optimales de sensibilité qu'offrent les essais sur plaques percées.

Le début de la propagation instable (point B) se trouve toujours situé au dessous du seuil de localisation. L'écart entre ces deux niveaux de contraintes est sensiblement identique à celui enregistré dans les plaques non percées. En revanche, le niveau de la contrainte déviatorique où le point B est repéré se trouve plus précoce (d'environ 10 à 20 MPa), en comparaison avec les niveaux enregistrés pour B sur les plaques non percées dans les mêmes conditions (cf. tableau 4.1).

Même si celles ci ne représentent qu'une réponse de la structure endommagée par zone au delà du seuil de localisation, les déformations maximales obtenues sont pratiquement toutes inférieures à celles obtenues pour les plaques non percées. Cette diminution qui affecte les trois directions est notée dans tous les essais (voir à ce propos le tableau 4.1). On note aussi, que le rapport déformation au seuil de localisation sur la déformation maximale décroît avec la pression de confinement.





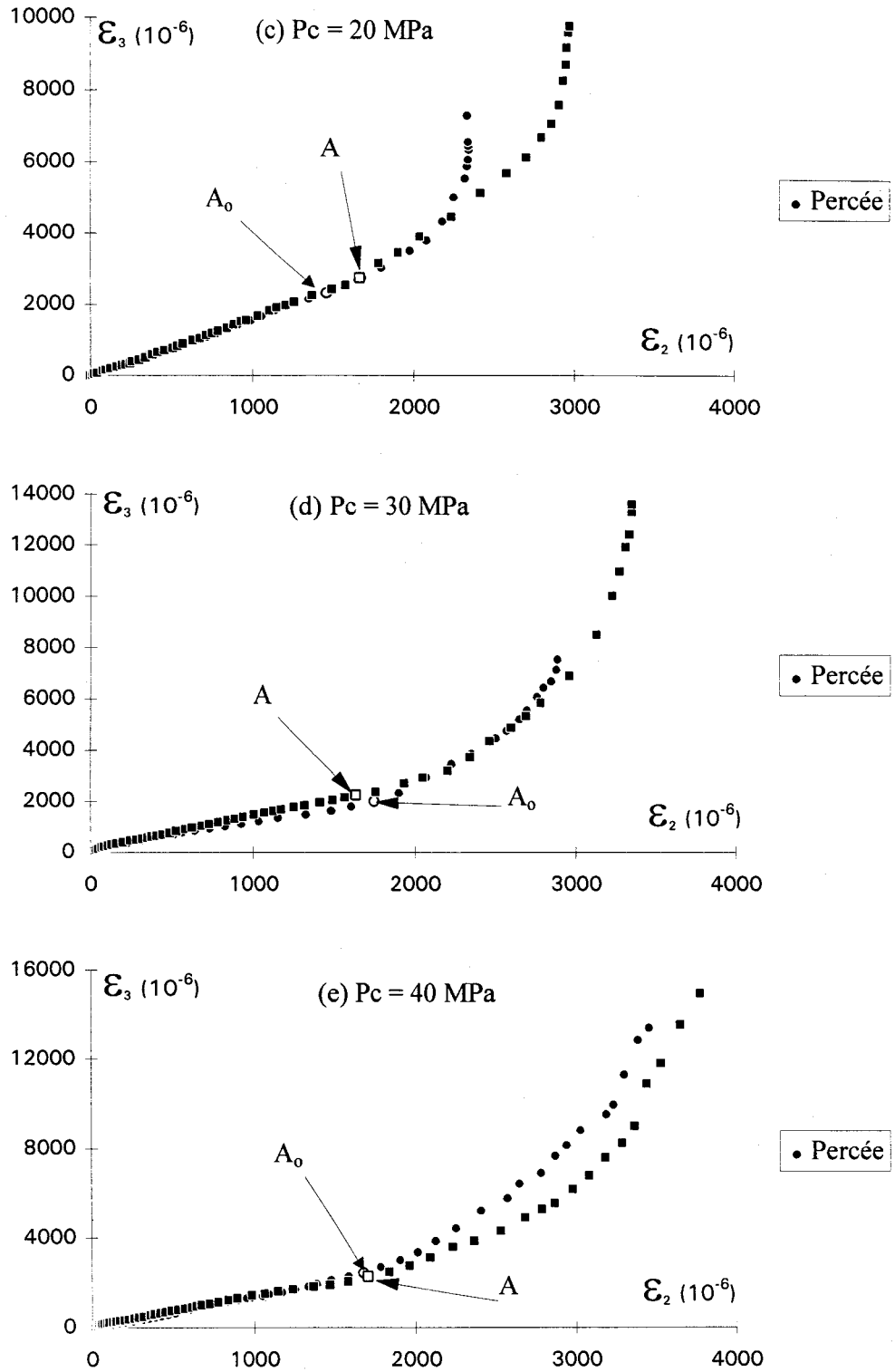


Figure 4.6 : Courbes déformations transversales-déformations latérales. Essais uniaxial (a) et triaxiaux par pression de confinement (b, c, d et e). Les seuils obtenus pour les plaques percées sont notés Ao (rond à fond blanc). Les seuil A concernent les plaques non percées (carré à fond blanc).

Ici, comme pour les plaques non percées, les déformations obtenues aux seuils ont été évaluées (cf. tableau 4.1 p. 115). Pour les cinq tests, on note une déformation axiale comprise entre 5.40 et 6.00 10^{-3}. Dans la direction transversale, la déformation obtenue au seuil est comprise entre 1.30 et 1.40 10^{-3} dans l'essai uniaxial et les essais triaxiaux menés à respectivement 10 et 20 MPa de confinement et entre 1.60 et 1.70 10^{-3} pour Pc = 30 et 40 MPa. Il n'a cependant pas été possible de définir un intervalle de faible amplitude pour les déformations latérales au seuil. On notera cependant, que dans l'ensemble des essais de compression, la déformation latérale critique reste comprise entre 1.90 et 2.50 10^{-3}.

Lorsqu'on s'intéresse à la déformation volumique au seuil de localisation, il apparaît que celle ci reste comprise entre 1.80 et 2.00 10^{-3}. Toutefois, la déformation volumique critique obtenue pour le cas des plaques non percée se trouve comprise dans l'intervalle des déformations volumiques critiques définie ci dessus qui rappelons le est de l'ordre de 1.80 10^{-3}. Ces constations confortent le bien-fondé de la notion de déformation volumique critique que certains auteurs avaient proposé pour décrire la rupture des roches. Brady (1969) par exemple, dans le cadre de la mécanique de la rupture, suggérait une théorie statistique basée sur la prolifération de la microfissuration qui suppose que la rupture à lieu lorsque la déformation volumique atteint une valeur critique.

IV - 4 - 2 : LES DEFORMATIONS LOCALES :

Les mesures locales effectuées ont principalement pour but d'établir une éventuelle corrélation avec les résultats obtenus concernant le seuil de localisation. Ces mesures ont aussi pour objectifs de renseigner sur les réponses locales de la zone où les déformations sont localisées. La disposition et la direction de la déformation qu'elles sont sensées mesurer (figures 4.2 et 4.4) montrent que les réponses attendues sont associées à la déformation dans la direction normale à la bande présumée. En fait, la corrélation consiste à supposer qu'avant que la bande ne se matérialise, ces mesures locales donnent des signes précurseurs en terme de dilatance locale.

Compression uniaxiale

Rappelons que la disposition des jauges adoptée pour les mesures de déformations locales dans l'essai uniaxial est celle de la figure 4.4. La figure 4.7 représente les déformations locales en fonction de la contrainte axiale. Pour des raisons de commodité, nous n'avons pas respecté les conventions habituellement en vigueur en mécanique des roches: les déformations dilatantes sont considérées positives. Signalons que, malgré les informations que ces mesures locales

fournissent, elles restent cependant, des déformations mesurées dans une direction parallèle à la direction latérale. Les niveaux de la contrainte axiale où les points A et B ont été repérés sont reportés sur le graphe. Les courbes montrent une phase de déformation que l'on peut qualifier d'homogène suivie dès le point B, d'une phase de contraction s'achevant quasiment en A.

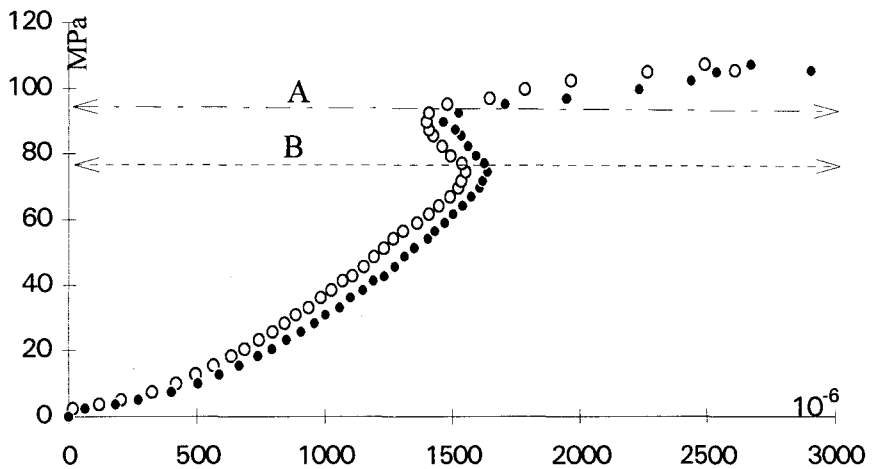


Figure 4.7 : Courbes contraintes déformations locales. Essai de compression uniaxiale. On notera la singularité de ces réponses et leurs concordances avec les points A et B.

Compression triaxiale

Les courbes déformations locales en fonction du déviateur de contraintes obtenues dans les essais triaxiaux sont présentées sur la figure 4.8, elles sont classées par pression de confinement. Chacune des deux courbes est obtenue par la moyenne des deux jauges de la direction sénestre ou dextre. On observe que l'aspect de ces courbes présente des affinités qui indiquent qu'il existe autour du trou une similitude dans le comportement local en réponse au champ déviatorique externe. Ces courbes mettent en évidence deux niveaux du déviateur où s'opère la transition d'une contraction à une extension locale. Sur ces graphes ont été reportés les niveaux du déviateur où le seuil de localisation A et le début de la propagation instable de la fissuration ont été repérés. Sur les quatre essais triaxiaux, le point B semble pour l'une des deux directions jouer le même rôle dans cette transition locale, où il marque le passage d'un mode contractant à un mode d'extension localement. En fait, le point B qui doit sa détermination à partir des réponses macroscopiques de la structure, marque également une transition localement au voisinage d'une hétérogénéité de structure.

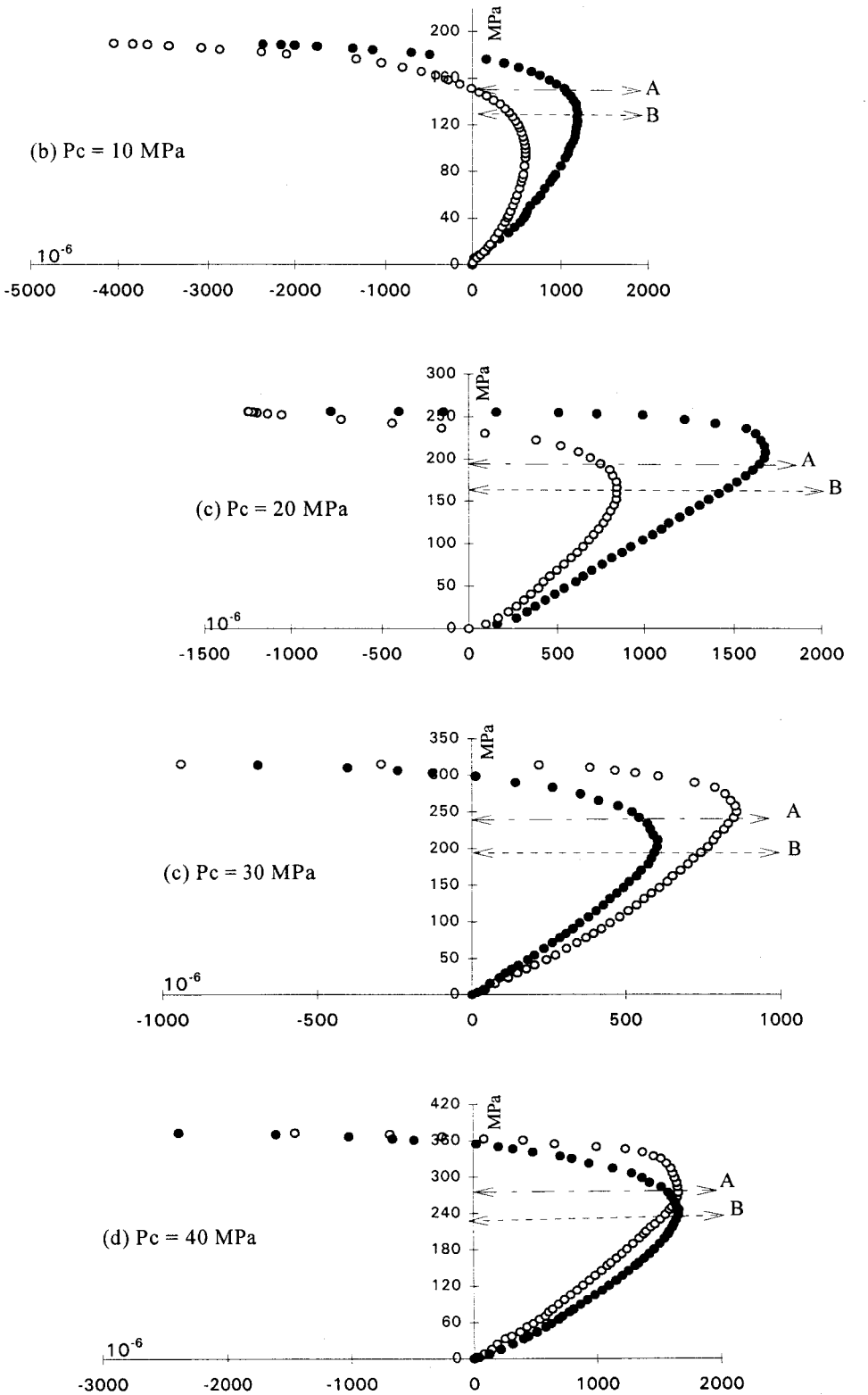


Figure 4.8 : Courbes déformations locales en fonction de la contrainte déviatorique obtenus dans le cas de l'essai triaxial.

Rappelons que ce niveau du déviateur au point B a enregistré une diminution appréciable par rapport à celle du seuil de localisation dans le cas d'éprouvettes percée. Il semble qu'à ce niveau de la contrainte déviatorique la transition observée au niveau du comportement global est étroitement lié à une transition qui se produit localement dans une zone critique, de faiblesse dominante, induite ou naturelle, dans le matériau contraint.

Dans l'autre direction, les déformations locales progressent et subissent cette transition à un niveau du déviateur très proche (Pc = 20 et 30 MPa) ou exactement (Pc = 40 MPa) celui où le seuil de localisation a été enregistré (dans l'essai triaxial mené à 10 MPa de confinement, cette corrélation n'a cependant pas été possible). La réponse dans cette deuxième direction locale indique qu'au niveau du seuil de localisation ou presque, se déclenche à nouveau une transition. Celle ci, probablement générée par l'évolution d'une fissuration dans un volume interne de l'éprouvette, indique clairement la domination d'un mode d'extension qui se développe dans une direction proche de la perpendiculaire à la surface de rupture. L'apparition ou l'émergence en surface de cette microfissuration (comme nous le verrons dans un exemple au chapitre 5), conduit à une accélération de cette extension qui se poursuit jusqu'à la rupture, menant parfois à la destruction de la jauge.

Dans les essais triaxiaux menés à 20 et 40 MPa de confinement, la surface de rupture s'est développée dans la direction où les déformations locales ont effectivement dévié au seuil de localisation. Cette éventualité s'est peut être produite pour les autres essais (10 et 30 MPa) mais n'a cependant pas pu être confirmée.

En conclusion, l'étude des déformations locales dans la direction de l'extension des lignes de rupture montrent que le seuil de propagation instable de la fissuration et le seuil de localisation indiquent chacun une étape dans les processus d'amorçage et dans le développement de la rupture. L'analyse s'est cependant limité à rechercher une corrélation avec les réponses macroscopiques suggérées par la dilatance et l'orientation présumée des lignes de rupture. Cette étude locale a permis de dégager deux points essentiels concernant la phase qui précède la rupture fragile de la roche dans les essais de compression. Le premier point est que B semble étroitement lié à l'état de la microstructure. Le deuxième point est que le niveau de contrainte où le seuil de localisation est enregistré marque une transition dans la zone de localisation, et indique que ce seuil marque une autre étape importante dans l'évolution et le mode de propagation de la microfissuration. Le mode d'extension brutal enregistré par ces jauges de déformations est incontestablement imputable au début de la matérialisation physique de la surface de rupture.

Tableau 4.1

	Pression de confinement (MPa)	Déviateur de contrainte au pic (MPa)	Module élastique E (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Déformations maximales* (10^{-6})			Déviateur de contrainte au point B (MPa)	Déviateur de contrainte au seuil de localisation A (MPa)	Niveau de déformation* au seuil de localisation A (10^{-6})			Pente OA
					ε_1	ε_2	ε_3			ε_1	ε_2	ε_3	
Cylindres	Uniaxial	109	23,0	0,19	6200	1850	—	70	95	5300	1600	1600	1
	10	254	33,3	0,11	8150	3400	—	198	—	—	—	—	1
	20	347	45,0	0,10	9200	4800	—	262	—	—	—	—	1
	30	467	47,0	0,14	11200	3500	—	356	—	—	—	—	1
Plaques rectangulaires	Uniaxial	109	23,1	0,12	6100	2050	7900	88	96	5300	1050	1650	1,7
	10	197	29,5	0,12	8600	2400	9200	140	161	5300	1250	2200	1,7
	20	262	39,5	0,27	8350	2950	9800	170	206	5300	1650	2750	1,7
	30	321	46,0	0,17	8350	3350	13600	211	238	5600	1650	2250	1,3
	40	383	44,5	0,15	9950	3800	15000	254	298	7100	1700	2300	1,2
Plaques rectangulaires percées	Uniaxial	107	22,9	0,21	6450	1800	7100	77	93	5600	1350	2250	1,8
	10	189	30,8	0,19	7100	2000	6850	130	155	5600	1300	2500	1,8
	20	256	37,0	0,18	7600	2350	7300	159	194	5400	1350	2150	1,6
	30	316	43,8	0,13	7900	2900	7500	194	238	5600	1700	1900	1,2
	40	373	42,9	0,15	9150	3450	13450	238	274	6000	1700	2450	1,3

(*) Arrondies aux 50 microdéformations les plus proches.

IV - 5 : SYNTHESE DE QUELQUES OBSERVATIONS LIES AUX EFFETS DE LA PRESSION DE CONFINEMENT.

La pression de confinement agit aussi bien sur la déformabilité que sur le niveau de contrainte du pic et du seuil de localisation. Elle semble également intervenir dans l'orientation et l'épaisseur des lignes de rupture. Ce paragraphe se propose de souligner quelques unes des influences directement liées à ce paramètre, et en particulier les niveaux de contraintes et de déformations critiques. Les courbes illustrant les variations et évolutions des réponses mécaniques en fonction de la pression de confinement dans les essais de compression peuvent, pour compléter ce récapitulatif être consultées dans l'annexe 1. Les divers résultats concernant les paramètres mesurés, en terme de contraintes et déformations ont été reportés dans le tableau 4.1.

IV - 5 -1 : LES CONTRAINTES CRITIQUES

La figure 4.9 illustre l'évolution des déviateurs de contraintes au pic et au seuil de localisation A en fonction de la pression de confinement (plaques percées et non percées).

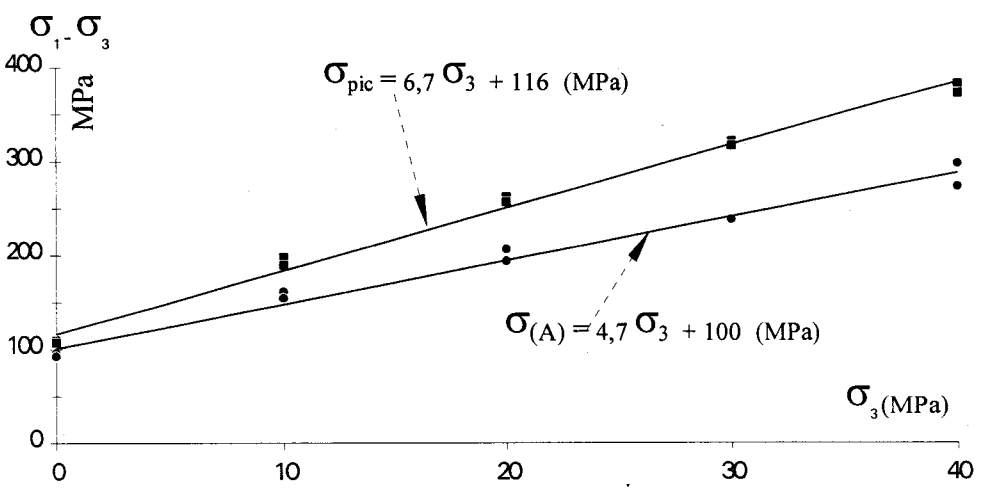


Figure 4.9 : Variations des déviateurs de contraintes aux pic et aux seuils de localisation en fonction de la pression de confinement. Les résultats concernent les essais de compression réalisés sur plaques rectangulaires percées et non percées.

Elle montre que dans l'intervalle de pression de confinement étudié (0 à 40 MPa), la résistance à la rupture et le seuil de localisation obéissent chacun à une loi de type linéaire. Les variations des pics et des seuils de localisation enregistrés dans les essais réalisés sur plaques rectangulaires percées et non percées peuvent être décrites respectivement par les relations :

$$\sigma_{pic} = 6.7\sigma_3 + 116 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_A = 4.7\sigma_3 + 100 \text{ (MPa)}$$

La pente plus faible dans le cas de la relation qui lie la contrainte déviatorique au seuil A à la pression de confinement (σ_3), illustre qualitativement cette tendance de la localisation à se produire de plus en plus tôt avant le pic lorsqu'on augmente la pression de confinement.

IV - 5 -2 : LES DEFORMATIONS CRITIQUES

La figure 4.10 représente le niveau de déformation axiale, latérale et transversale enregistrés au seuil de localisation en fonction de la pression de confinement. Les données rassemblent celles relatives au plaques percées et non percées.

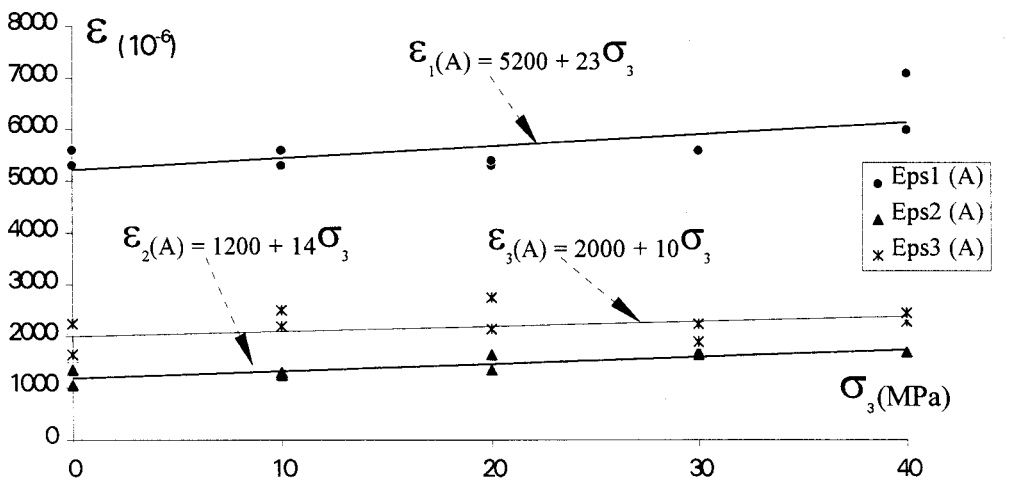


Figure 4.10 : Déformations enregistrées au seuil de localisation A en fonction de la pression de confinement. Les résultats concernent les essais de compression, réalisés sur plaques rectangulaires percées et non percées.

Les courbes de tendance les plus réalistes se confondent avec des droites. Celles ci définissent des relations linéaires, entre les déformations enregistrées au seuil de localisation et la pression de confinement (0 à 40 MPa) qui s'écrivent:

$$\varepsilon_f = 5200 + 23\sigma_3 \quad (10^{-6})$$

$$\varepsilon_2^c = 1200 + 14\sigma_3 \quad (10^{-6})$$

$$\varepsilon_3^c = 2000 + 10\sigma_3 \quad (10^{-6})$$

On notera que ces droites présentent des pentes très faibles qui varient selon la direction, de 23 à 10 10^{-6} / MPa, et proposent de ce fait, des déformations critiques peu dépendantes de la pression de confinement. Elles montrent de manière évidente que dans une direction donnée, le niveau de déformation enregistré au moment où les déformations localisent, oscille autour d'une valeur moyenne. Celle ci est estimée à environ 5.50 10^{-3} dans la direction longitudinale, autour de 1.50 10^{-3} dans la direction transversale, et 2.10 10^{-3} pour les déformations latérales. On retrouve sans surprise, les 1.90 10^{-3} de la déformation volumique moyenne critique déjà signalée.

IV - 5 -3 : ORIENTATIONS DES SURFACES DE RUPTURE *(tableau 4.2)*

Le tableau 4.2 donne les orientations des surfaces de rupture mesurées sur les éprouvettes rompues dans les essais de compression monotones, ces orientations sont notées θ_{exp}. Dans ce même tableau sont également reportés les angles de frottement (ϕ) et de dilatance (ψ).

L'angle de frottement interne ϕ_{max} est obtenu à partir des cercles de Mohr au pic. La même démarche a permis d'obtenir l'angle de frottement au seuil de localisation noté ϕ_s. Les valeurs obtenues, relatives au pic et au seuil de localisation sont indiquées dans le tableau 4.2.

L'angle ϕ_{max} obtenu pour le grès de Fontainebleau est de 58° pour les échantillons cylindriques (figure 4.11 (I)) et 50° pour les plaques rectangulaires (figure 4.11 (II)). La cohésion C est comprise entre 17 et 20 MPa.

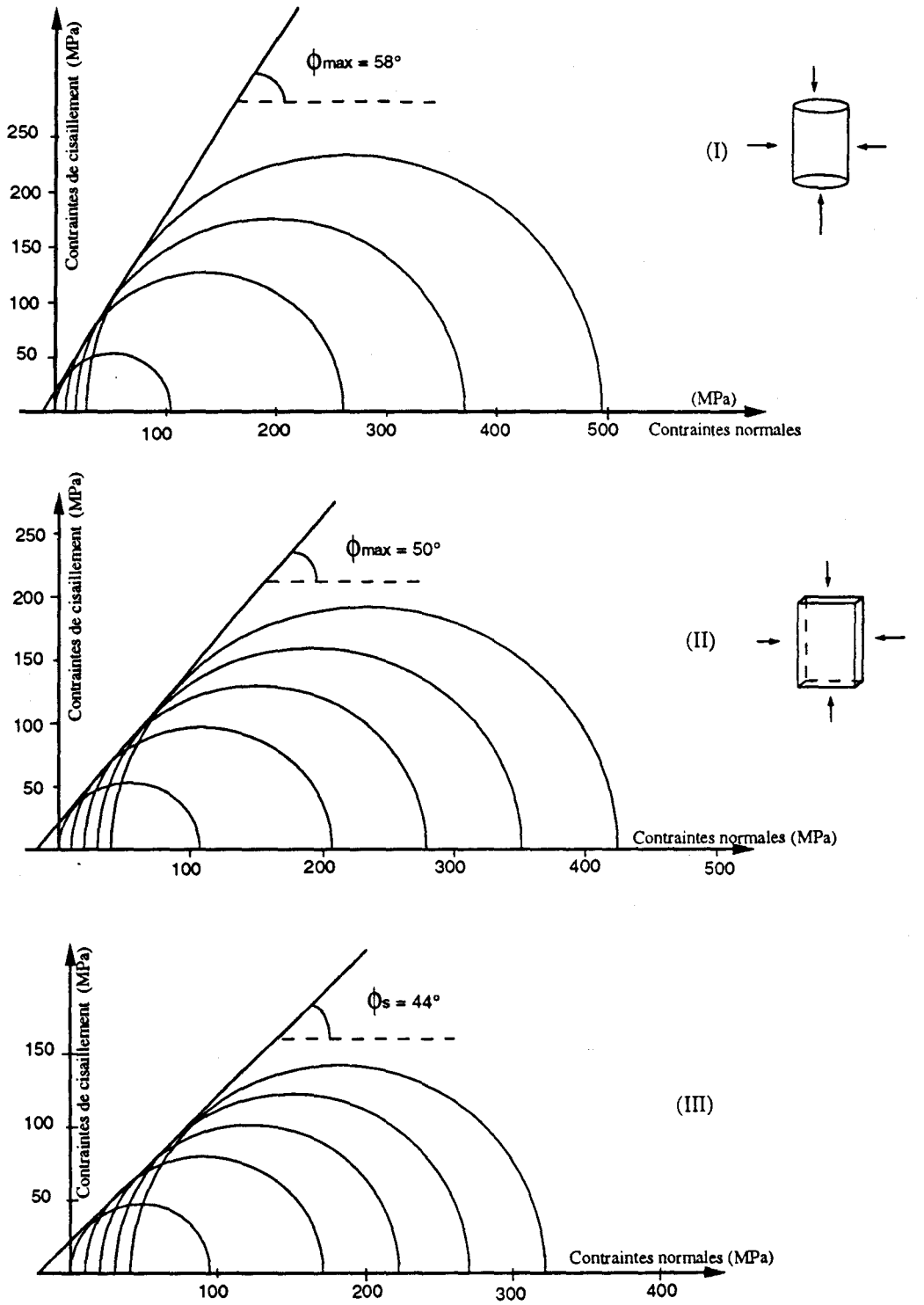


Figure 4.11 : Cercles de Mohr. Détermination graphique de la cohésion et de l'angle de frottement interne au pic ϕmax dans les essais de compression sur l'éprouvette cylindrique (I) et sur plaques rectangulaires (II). (III) représente les cercles de Mohr au seuil de localisation.

L'angle de dilatance ψ du matériau est établi pour chaque test de compression par la relation :

$$\sin\psi = -\frac{\dot{\varepsilon}_v^p}{\dot{\gamma}^p} \qquad (1)$$

où $\dot{\varepsilon}_v^p$ est le taux de déformation volumique plastique et $\dot{\gamma}^p$ est le taux de déformation plastique de cisaillement. L'angle de dilatance ψ est déduit à partir de la représentation graphique de ε_v^p en fonction de γ^p (cf. Annexe 4). Les mesures sont réalisées en considérant la tendance générale ou moyenne qui semble assez homogène (ψ_{moy}). Par ailleurs, la valeur de l'angle de dilatance notée ψ_s est précisée au seuil de localisation. Dans le tableau 4.2 sont reportées les valeurs mesurées de ψ sur la base de la relation (1).

L'orientation des surfaces de rupture par rapport à l'axe principal θ_{exp} est comparée :
(i) à l'angle de Coulomb θ_C qui, rappelons le, exprime l'orientation de la facette d'obliquité maximale du vecteur contrainte (maximum du rapport contrainte de cisaillement sur contrainte normale). Il est défini par

$$\theta_C = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \qquad \text{où } \phi \text{ est l'angle de frottement interne.}$$

(ii) à l'angle θ_R défini à partir de considérations cinématiques par Roscoe (1970). Il suppose que si la bande de cisaillement est une surface de glissement (bloc sur bloc), alors les lignes de rupture sont des lignes d'extension nulle (pas de déformation dans la direction de la bande). θ_R s'exprime en fonction de l'angle de dilatance ψ :

$$\theta_R = \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}$$

(iii) et à l'angle θ_A défini par Arthur et al. (1977) sur la base des caractéristiques statiques et cinématiques de la bande :

$$\theta_A = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{4}(\phi + \psi)$$

Les orientations les plus proches des donnés expérimentales sont indiqués à 1° près, en caractères gras dans le tableau 4.2. Les résultats obtenus sont assez variés mais indiquent cependant que θ_C, θ_R et θ_A restent pratiquement toujours inférieures à l'orientation expérimentales. Cela est principalement dû à l'angle de frottement interne ϕ et surtout à l'angle de dilatance ψ relativement élevés pour le grès. Toutefois, il apparaît de manière évidente que l'orientation de Roscoe semble la plus proche des orientations expérimentales et en particulier dans le cas des plaques percées.

Tableau 4.2

	Pression de confinement (MPa)	θ_{exp}	Angle de frottement		Angle de dilatance		$\theta_C = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$		$\theta_R = \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}$		$\theta_A = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{4}(\phi + \psi)$	
			ϕ_{max}	ϕ_s	ψ_{moy}	ψ_s	Max.	au seuil	Moy.	au seuil	Max./Moy.	au seuil
Cylindres	Uniaxial	Inf. à 10°	58°	54°	80°	90°	16°	18°	**5°**	**0°**	11°	**9°**
	10	30°	58°	—	50°	—	16°	—	20°	—	18°	—
	20	31°	58°	—	44°	—	16°	—	23°	—	20°	—
	30	31°	58°	—	44°	—	16°	—	23°	—	20°	—
Plaques rectangulaires	Uniaxial	Inf. à 10°	50°	43°	—	72°	20°	23°	—	**9°**	—	16°
	10	29°	50°	44°	32°	32°	20°	23°	**29°**	**29°**	25°	26°
	20	30°	50°	44°	43°	36°	20°	23°	24°	27°	22°	25°
	30	32°	50°	44°	53°	40°	20°	23°	19°	25°	19°	24°
	40	32°	50°	44°	50°	37°	20°	23°	20°	27°	20°	25°
Plaques rectangulaires percées	Uniaxial	Inf. à 10°	49°	46°	—	90°	21°	22°	—	**0°**	—	11°
	10	25°	49°	43°	32°	32°	21°	**24°**	29°	29°	**25°**	**26°**
	20	26°	49°	41°	44°	40°	21°	**25°**	23°	**25°**	22°	**25°**
	30	28°	49°	42°	54°	37°	21°	24°	18°	**27°**	19°	25°
	40	28°	49°	40°	57°	36°	21°	25°	17°	**27°**	19°	26°

IV - 5 - 4 : LE MODULE D'ECROUISSAGE AU SEUIL DE LOCALISATION *(tableau 4.3)* :

Le module tangent est mesuré directement sur les courbes déformations de cisaillement en fonction des contraintes de cisaillement, au seuil de localisation à partir des courbes τ - γ présentées dans l'annexe 3. Le module d'écrouissage (h_{exp}) est obtenu à l'aide du module de cisaillement G (Tableau 4.3) et du module tangent en utilisant la relation :

$$h_{exp} = \frac{T}{1 - T/G}$$

La figure 4.12 schématise les différentes étapes qui ont permis la détermination des divers paramètres utilisés dans ce paragraphe.

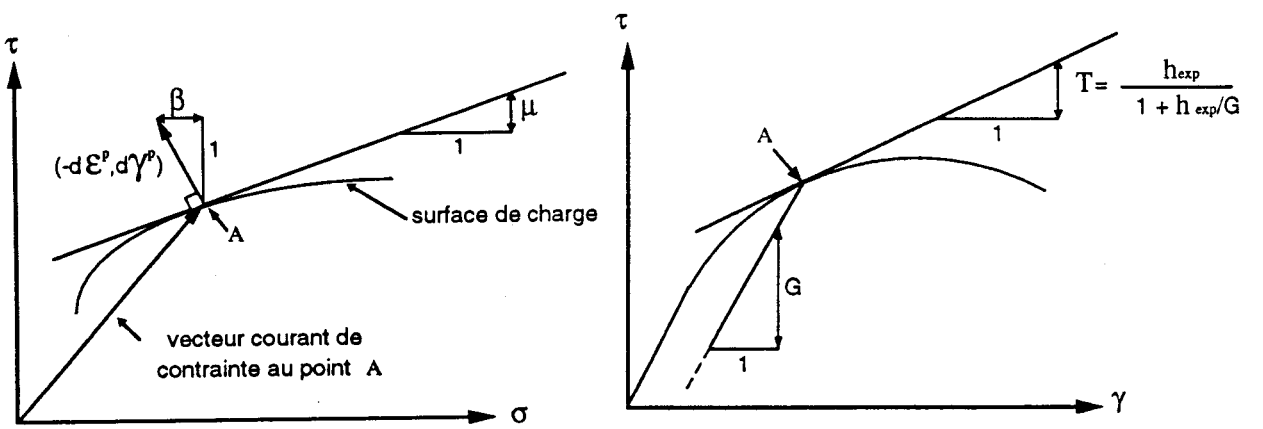


Figure 4.12 : Illustration simplifiée de la méthodologie utilisée pour la détermination expérimentale des paramètres.

Le module d'écrouissage critique h_c est calculé à l'aide de l'équation 8.7 de Vermeer et de Borst (1984) formulée sur la base du critère de Mohr - Coulomb :

$$h_c = \frac{E(\beta - \mu^*)^2}{16(1-\nu^2)} = \frac{G(\beta - \mu^*)^2}{8(1-\nu)}$$

Le module d'écrouissage maximal critique h_{max} est calculé à partir de la relation (21) de Rudnicki et Rice (1975), proposée pour les roches et basée sur le critère de plasticité de type Drucker - Prager :

$$h_{max} = \frac{G(1+\nu)}{9(1-\nu)}(\beta-\mu^*)^2 \qquad \text{où} \quad \beta = \sin\psi_s \quad \text{et} \quad \mu^* = \sin\phi_s$$

Les modules h_{max} et h_c sont donnés dans le tableau 4.3 pour chaque type d'essai où le seuil de localisation a été déterminé. Ils sont calculés dans le cas de l'incompressibilité plastique, soit $\beta = 0$. Cette hypothèse permet de fixer la borne supérieure de l'écrouissage critique lorsque la surface de rupture (bande de cisaillement dans le cas triaxial) commence à se matérialiser.

Les valeurs de h_c et h_{max} obtenues restent globalement comprises entre 0,75 et 1,25 GPa et semblent augmenter avec la pression de confinement. Cette tendance est également observée pour le module d'écrouissage expérimental (h_{exp}). On note cependant, que les modules h_c et h_{max} ne sont pas comparables à h_{exp} et présentent des ordres de grandeur différents, d'un facteur multiplicatif de l'ordre de 3 à 15 ($2 < h_{exp} < 20$). Ce résultat expérimental suggère que la localisation se produit plus tôt que ne le prévoit les théories de la plasticité classique. Cela peut être due aux hétérogénéités (discontinuités) naturelles et/ou induites, présentes dans la structure de la roche, chose que n'intègre pas ces théories dans leur formulation. Le début précoce de la matérialisation de la surface de rupture débute dans, ou sur une hétérogénéité locale dans le matériau et précède de ce fait les prédictions théoriques. Ce résultat met en question les prédictions théoriques et la sélection des modèles constitutifs pour une description plus réaliste de la réponse du matériau.

En conclusion, bien que des efforts considérables soient déployés dans cette perspective (e.g. GRECO), les modèles ne sont pas encore en mesure d'expliquer de tels résultats expérimentaux même lorsqu'on suppose que l'angle de dilatance est nulle ($\beta = 0$). Un résultat expérimental du même type a été obtenu sur un grès (grès de Gosford) par Ord et al. (1991) dans l'essai biaxial.

La théorie de la plasticité associée prédit en particulier que la localisation ne peut se produire que dans la phase d'écrouissage négatif (post pic). Toutefois, l'utilisation d'une loi d'écoulement non associée et non coaxiale semble donner pour le grès des résultats encourageant comme le montre par exemple les travaux de Sulem et al. (1993). L'introduction de "vertex" (surface de charge irrégulière) ou d'une plasticité non coaxiale ou coaxiale non linéaire à permis à Diouta et al. (1994) et Diouta (1995) de reproduire de façon satisfaisante nos données expérimentales relatives à la détermination du seuil de localisation.

Tableau 4.3

	Pression de confinement (MPa)	Module de cisaillement G (GPa)	μ *	β	Module tangent T (GPa)	h_{exp} (GPa)	h_c (GPa)	h_{max} (GPa)
Cylindres	Uniaxial	9,7	0,81	1,00	5,2	13,8	0,98	1,04
	10	15,0	—	—	—	—	—	—
	20	20,5	—	—	—	—	—	—
	30	20,6	—	—	—	—	—	—
Plaques rectangulaires	Uniaxial	10,3	0,72	0,95	4,4	7,7	0,76	0,76
	10	13,2	0,69	0,53	4,5	6,9	0,89	0,89
	20	15,6	0,68	0,59	5,0	7,3	1,23	1,39
	30	19,7	0,66	0,64	8,3	14,2	1,29	1,34
	40	19,4	0,64	0,60	8,1	14,1	1,16	1,19
Plaques rectangulaires percées	Uniaxial	9,5	0,72	1,00	1,9	2,3	0,78	0,84
	10	13,0	0,68	0,53	5,8	10,5	0,93	0,98
	20	15,7	0,66	0,64	7,7	15,1	1,04	1,09
	30	19,4	0,67	0,60	8,6	19,4	1,25	1,26
	40	18,7	0,64	0,59	8,5	15,6	1,13	1,15

Tout au long de cette étude, il nous a semblé nécessaire, pour justifier la pertinence de nos hypothèses, que l'usage d'éprouvette percée optimise l'efficacité et la sensibilité de la méthode. Les effets liés à la taille du trou n'ont pas été discutés ; nous allons maintenant nous y consacrer.

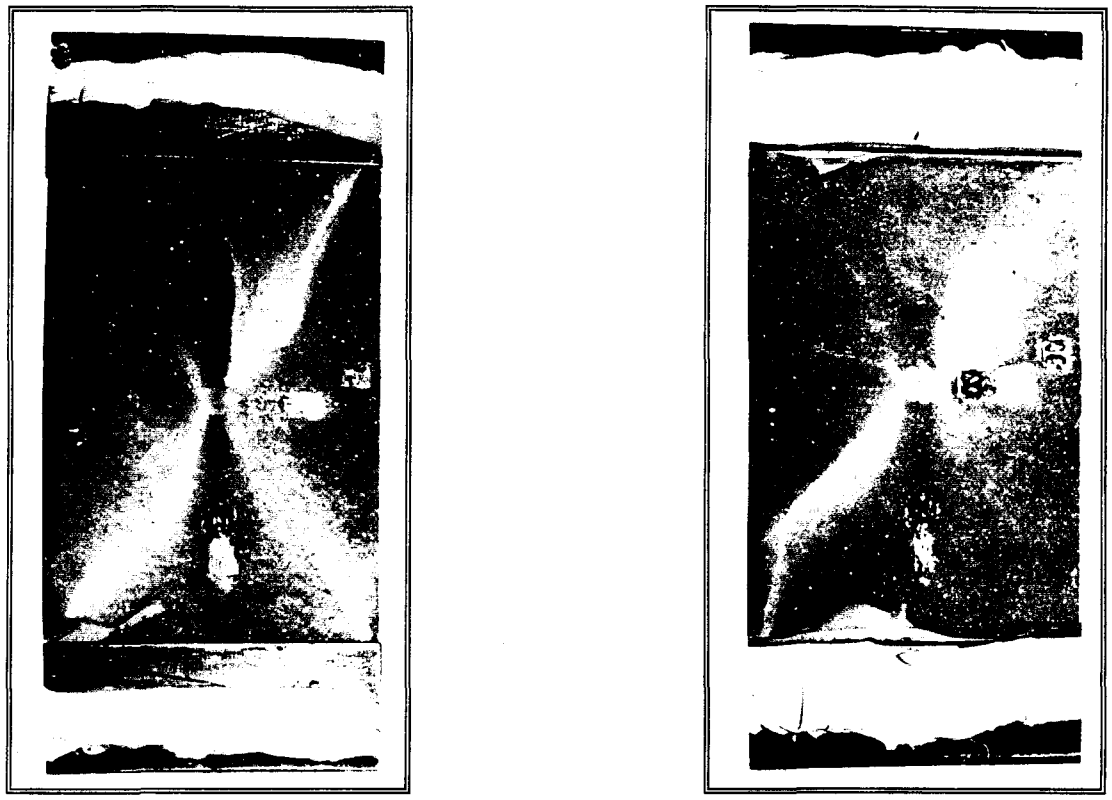
IV - 6 : EFFETS DE L'IMPERFECTION

Il ressort des comparaisons réalisées, que le trou (de dimension 3 mm considéré faible par rapport à la taille de l'éprouvette) n'a pas fondamentalement modifié les réponses mécaniques des éprouvettes testées. Cependant, certains paramètres ont été plus ou moins affectés. Il s'agit des lignes de rupture, et plus particulièrement des conditions d'amorçage (satisfaisant), l'épaisseur et l'inclinaison des bandes de cisaillement. Le trou étant réalisé au centre des plaques, la démarche expérimentale adoptée ici pour caractériser son impact a consisté à comparer les résultats obtenus lorsqu'on modifie son diamètre. Il nous semble plus aisé de distinguer les effets d'une imperfection en exagérant sa taille. Ainsi, pour mieux marquer les évolutions, les diamètres utilisés sont 4 mm et 6 mm. Avouons cependant, que les mèches utilisées pour la réalisation des ouvertures cylindriques (carbure de tungstène) de diamètre inférieur à 3 mm ne sont pas disponibles dans le commerce.

IV- 6-1 : LIGNES DE RUPTURE

Les lignes de rupture obtenues (photos 4P3) présentent globalement des caractéristiques similaires à celles observées pour les éprouvettes percées de 3 mm schématisé par la figure 4.3b. L'amorçage de ces lignes se fait aux mêmes points, sur les extrémités du diamètre transverse de la cavité cylindrique. Dans le cas de l'imperfection de 4 mm de diamètre, on observe (photo 4P3a) des lignes qui partent de ces mêmes points, dont l'orientation est proche de celle de la contrainte principale et qui semblent se diriger vers une tête de l'éprouvette sans l'atteindre. Pour l'éprouvette contenant l'ouverture cylindrique de 6 mm de diamètre, ces lignes supplémentaires, indépendantes également de celles qui définissent la surface de rupture, plus fines semblent parfois se diriger vers un coté latéral (photo 4P3b). L'orientation moyenne des surfaces de ruptures est de 29° pour D = 4 mm (photo 4P3a), et estimée proche de 34° pour D = 6 mm (photo 4P3b). Leurs épaisseurs varient de 1 à 1,5 mm pour D = 4 mm et de 2 à 3 mm pour D = 6 mm.

(a) D = 4 mm (b) D = 6 mm



Photos 4P3 : Ligne de rupture de plaques rectangulaires percées de 4 et 6 mm de diamètre. Essais de compression triaxiale menés à 20 MPa de confinement.

IV - 6 - 2 : ANALYSE ET INTERPRETATION DES REPONSES MECANIQUES

Pour des raisons de comparaisons, les courbes contraintes déformations obtenues dans les mêmes conditions sur la plaque non percée et percées de 3 mm sont également présentées sur les mêmes courbes de déformation dans la figure 4.13. A l'exception de l'augmentation brutale des déformations latérales au pic, on observe un comportement classique de type fragile. La résistance à la rupture ne subit de diminution appréciable que pour la plaque contenant le trou de 6 mm de diamètre. En effet, en comparaison avec la plaque non percée, cette diminution est insignifiante pour un diamètre D = 3 mm; elle est de 7 % pour D = 4 mm, et d'environ 28 % pour D = 6 mm. Le module élastique, est très sensible à la taille de l'imperfection. Il est de 40 GPa pour la plaque non percée, de 37 GPa pour les plaques contenant un trou de 3 ou 4 mm de diamètre, et accuse une forte baisse à 29 GPa pour D = 6 mm (figure 4.13 (I)). Les détails concernant les paramètres (modules élastiques et coefficients de Poisson), les déformations (maximales et critiques) et les contraintes (au pic, au seuil A et au point B) sont données dans le tableau A5-1 de l'annexe 5.

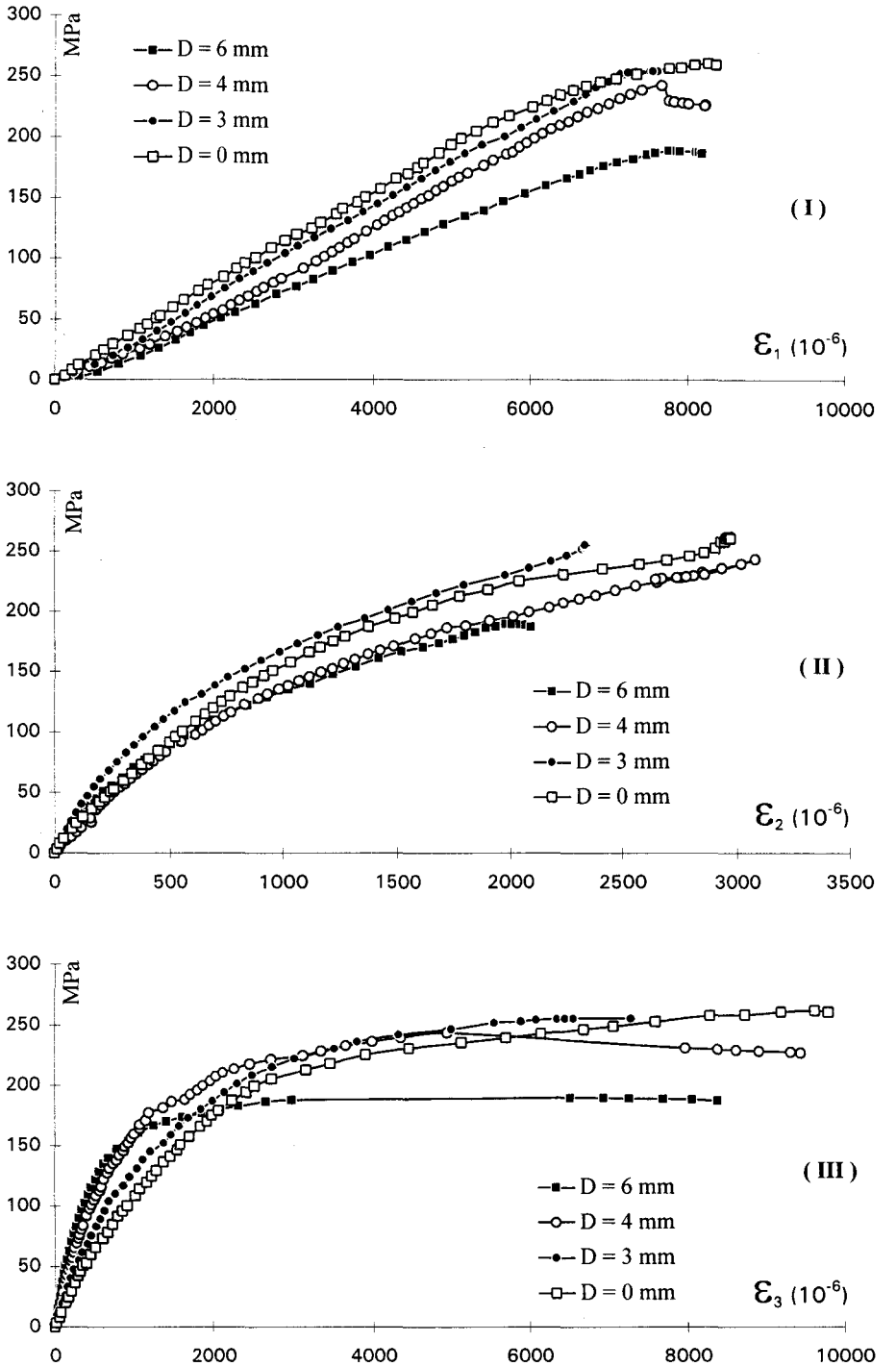


Figure 4.13 : Courbes déformations axiales (I), transversales (II) et latérales (III) en fonction de la contrainte déviatorique. Résultats d'essais triaxiaux (Pc = 20 MPa) représentant l'effet de l'ouverture cylindrique sur le comportement mécanique de base. Le diamètre du trou variant de 0 (plaque non percée) à 6 mm.

La figure 4.14 représente la variation des déformations transversales en fonction des déformations latérales. L'allure générale de ces courbes semble globalement inchangée par rapport à celles obtenues dans les études précédentes. Elles présentent cependant, une différence remarquable avec ces dernières pour ce qui concerne la partie linéaire OA. En effet, on observe une diminution importante de la pente de la partie linéaire OA. Dans l'essai triaxial mené à 20 MPa de confinement sur les plaques percées (D = 3 mm) ou non, cette pente était d'environ 1,7. L'augmentation du diamètre à 4 mm et à 6 mm de diamètre, conduit à une modification sensible dans la réponse transverse du matériau, les pentes obtenues étant respectivement 0,7 et 0,6. Ce qui nous paraît remarquable et inattendu est le passage de la pente supérieure à 1 qui semblait spécifique à la forme prismatique d'épaisseur faible, à une pente nettement inférieure.

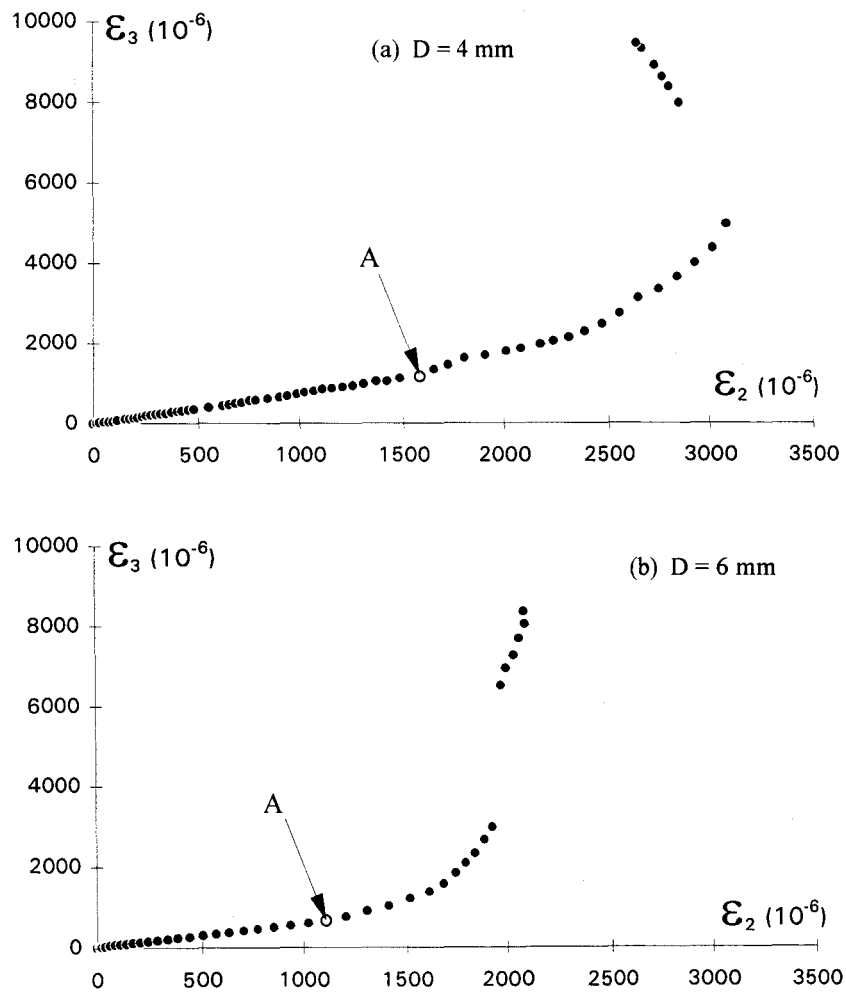


Figure 4.14 : Courbes déformations transversales - déformations latérales pour plaques rectangulaires contenant une ouverture cylindrique de diamètre 4 (a) et 6 mm (b). Essais de compression triaxiale menée à 20 MPa de confinement. On notera la discontinuité brutale des taux de déformations qui s'est produite au pic.

Les faibles pentes observées résultent essentiellement des déformations latérales, relativement faibles durant la phase des déformations homogènes (figures 4.14b et 4.13(III)). Les déformations latérales maximales obtenues pour les quatre tests (D = 0; 3; 4 et 6 mm) restent comparables (figure 4.13 (II)). Toutefois, au seuil de localisation, la déformation latérale ε_3 critique atteint 34 % de son maximum pour l'éprouvette non percée, elle ne dépasse pas 29 puis 14 et 8 % dans les cas respectifs d'une plaque contenant l'ouverture cylindrique de 3, 4 et 6 mm de diamètre. Ceci suggère que lorsque la cavité est de taille macroscopique, la localisation de la déformation a lieu pour des déformations latérales très faibles; il en résulte que la majeure partie de la dilatance (plus de 70 %) se développe après la perte d'homogénéité des déformations.

Bien que leurs valeurs absolues diminuent, les déformations transversales ε_2 au seuil ne semblent pas affectées par la taille du trou. Elles restent voisines de 55 % de la valeur maximale enregistrée avec ou sans défaut et indépendamment de la taille du trou. La même remarque peut être formulée pour les déformations longitudinales critiques enregistrées à 65 et 70 % des maximales. Les valeurs restent comprises entre 5.40 et 5.50 10^{-3}, et appartiennent à l'intervalle des déformations axiales critiques déjà défini (pour les détails voir Tableau A5.1, annexe 5).

Les parties, post localisation, observées sur les représentations graphiques des figures 4.13(III) et 4.14, montrent une discontinuité brutale dans l'évolution des déformations latérales. Le début de celles ci coïncide exactement avec le pic du déviateur de contraintes. Ce "saut" est incontestablement imputable à l'enregistrement d'une instabilité de surface dans la phase post localisation. Cette macrofissure qui s'est amorcée sur un point de la périphérie du trou (extrémité du diamètre transverse) s'est probablement matérialisée et propagée sur une petite distance avec un scénario sans doute, qualitativement comparable à celui observé dans l'essai de compression uniaxiale, décrit au paragraphe III-2-1 (chapitre 3). Le calcul du déplacement engendré par ce "saut" est compris entre 260 µm (D = 4 mm) et 300 µm (D = 6 mm). Ce déplacement latéral post pic est sensiblement proche, voir, légèrement supérieur au diamètre moyen d'un grain estimé à 250 µm. C'est durant la phase post pic (de faible étendue) que la formation de la bande s'est poursuivie et on note que durant cette phase, son épaisseur est devenue 5 (D = 4 mm) voire 10 (D = 6 mm) fois plus importante.

Par ailleurs, on note que la déformation longitudinale au pic, égale à 7.60 10^{-3} est exactement la même pour les trois diamètres étudiées.

La petite phase post pic a permis de contrôler la rupture et on voit ici pourquoi en règle générale, la rupture des roches très poreuses ou fort altérées se contrôle mieux. Il semble que la présence d'un point de faiblesse quelconque, de taille assez importante dans une roche homogène tel le grès utilisé dans cette étude mènerait à une conclusion du même type. A ce propos, Rummel (1975) a étudié l'effet des ouvertures cylindriques jouant le rôle d'un défaut dans un calcaire homogène à grain très fin. Il montre qu'à partir d'une valeur donnée du diamètre, la transition du mode de comportement class II au comportement de type class I s'effectue.

Propagation instable de la fissuration

Les points B et A sont obtenus au même niveau de la contrainte déviatorique pour les deux diamètres (cf. tableau A5-1). Cette observation vient encore confirmer que le point B est fortement dépendant de l'état d'altération initial de la structure et en particulier des défauts présents dans le matériau. Dès que ce point de faiblesse dépasse une taille critique, le début de la propagation instable de la fissuration est retardé et se manifeste en même temps que la localisation. La seule explication que l'on peut attribuer à cette manifestation tardive est une pénurie des interactions entre les régions de l'éprouvette où se sont éventuellement développés des zones de densité de fissuration élevée. Celles ci, siègent habituellement autour des hétérogénéités naturellement présentes dans le matériau et sur les surfaces de chargement de l'éprouvette. Dans le même sens que les conclusions du chapitre 3, cette observation fournit une explication concernant l'écart qui s'accentue entre les points A et B lorsqu'on augmente la pression de confinement dans les essais triaxiaux. En effet, la pression de confinement stabilise les microfissures qui se développent sur le contour des cavités et inclusions naturellement présentes ou artificiellement induites mais ne diminue pas leurs effets de concentration de contraintes relatifs à leurs tailles et orientations.

N'oublions pas que le rôle de cette imperfection consiste principalement à modifier la répartition géométrique et spatiale du lieu des contraintes localement élevées et en conséquences, d'agir sur la distribution de la microfissuration. La domination imposée de par ces capacités à concentrer les contraintes localement réduisent les interactions entre les autres zones car l'ouverture cylindrique est de taille suffisante pour représenter le véritable point de faiblesse. Ainsi, l'intervalle définie par le début de la propagation instable et le seuil de localisation, durant lequel les interactions par zone sont actives, et qui font que généralement B précède A, est réduit à zéro.

Il semble donc, que pour un matériau homogène, contenant une ouverture cylindrique, il existe un diamètre suffisamment important, à partir duquel le début de la propagation instable de la fissuration peut être assimilé au seuil de localisation des déformations.

En marge de cette analyse, au vu de sa situation géographique dans l'éprouvette, et de sa définition géométrique, ce défaut introduit de manière ponctuelle, peut simuler à grande échelle, sinon renseigner, sur le rôle de concentrateur de contraintes des pores ou toute inclusion molle dans une roche homogène. La forme, l'emplacement et l'évolution de la fissuration qui résultent de la concentration de contraintes sur la zone périphérique proche de la paroi de l'ouverture cylindrique feront l'objet d'une étude détaillée que nous développerons dans la deuxième partie du chapitre 5.

NB : Les détailles concernant les résultats obtenus sur les plaques rectangulaires percées de l'étude développée dans ce dernier paragraphe IV-6 sur les influences de l'ouverture cylindrique, sont présentés dans l'annexe 5. On y trouvera les tableaux A5-1, A5-2 (orientations) et A5-3 (modules d'écrouissages) qui regroupent les mêmes informations et de structures identiques aux tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 respectivement (Annexe 5 pp. XVI - XIX).

IV - 7 : CONCLUSIONS

L'analyse des réponses mécaniques des plaques rectangulaires percées d'un trou circulaire au centre montre certains aspects liés à la présence et à la taille des hétérogénéités, propres aux mécanismes de la rupture fragile. Les essais sur plaques percées ont permis d'amorcer la rupture à partir des deux extrémités du diamètre transverse de l'ouverture cylindrique. Ce défaut n'a pas d'effet sur le seuil de localisation même lorsque sa taille devient relativement importante. Son influence est négligeable tant sur le moment où la localisation se produit que sur la résistance à la rupture. Cependant, les phénomènes physiques macroscopiques qui en résultent, et notamment les faciès de rupture ont été quelque peu affectés. L'examen des lignes de rupture montrent que le trou joue un rôle central tant au niveau de l'inclinaison et de l'épaisseur moyenne des bandes que de leur amorçage. On observe une diminution appréciable de l'orientation des bandes par rapport à la direction de la contrainte principale majeure. Bien que leur tendance à augmenter avec la pression de confinement soit toujours observée, cet angle varie de 24 à 28° dans les essais sur plaques percées.

Même si on tient compte de l'imperfection et indépendamment de sa taille (3 mm < D < 6 mm), la localisation a lieu autour de 88 % dans l'essai de compression uniaxiale, elle se produit à 82 % de l'essai triaxial mené à 10 MPa de confinement et entre 75 et 80 % de la résistance à la rupture pour une pression de confinement comprise entre 20 et 40 MPa.

Il se dégage également des différentes constatations concernant les déformations enregistrées au seuil de localisation, l'existence d'un seuil critique de déformabilité, peu sensible à la pression de confinement. Il est d'environ 5.50 10^{-3} pour la déformation axiale, 1.50 10^{-3} pour la déformation transversale et 2.00 10^{-3} dans la direction latérale. La déformation volumique critique spécifique, a été évaluée autour de 1.90 10^{-3}.

Outre l'avantage d'imposer que la localisation des déformations s'effectue loin des extrémités de l'éprouvette, les plaques percées de trous cylindriques ont permis une étude de l'évolution de la bande de cisaillement. La mesure des déformations locales dans une direction perpendiculaire aux lignes de rupture (bande de cisaillement dans le cas triaxial) a permis de faire des corrélations avec le seuil de localisation et de concrétiser la transition entre les deux modes fondamentaux: contraction - extension. Au delà du seuil de localisation des déformations qui fait l'objet de cette étude, le point où le taux de déformation volumique change de signe a suscité un intérêt particulier. En fait, lorsqu'on cherche à comprendre en quoi ce niveau de la contrainte déviatorique caractérise une étape importante dans les processus qui mènent à la rupture fragile, il semble important de préciser l'échelle des phénomènes auxquelles on s'intéresse. Ce point B semble également jouer un rôle dans cette transition, où il marque le passage d'un mode contractant à un mode d'extension localement. En fait, le point B qui doit sa détermination à partir des réponses macroscopiques, marque également une transition localement au voisinage d'une hétérogénéité de structure. Si cette dernière est de nature à constituer un point de faiblesse prépondérant, le point B pourrait éventuellement constituer un indicateur fiable de la non homogénéité des déformations, et se substituerait au seuil de localisation. Il serait intéressant de vérifier si pour une roche à texture hétérogène ou altérée, les mêmes conclusions pourraient être formulées.

INTRODUCTION

La méthodologie expérimentale adoptée dans le cadre de notre étude nous a permis de déterminer les conditions d'apparition et les caractéristiques des zones de localisation dans le grès sous sollicitations multiaxiales. Les essais ont été d'abord menés sur des éprouvettes cylindriques puis améliorés sur des plaques rectangulaires non percées ou percées. Certains caractères communs ont été observés dans ces essais, mais nous avons également noté quelques variations d'un essai à l'autre.

Ce dernier chapitre traite d'abord de l'influence spécifique à la forme et à la géométrie des éprouvettes et en particulier de quelques uns des paramètres qui nous ont paru importants à considérer avant de clore cette étude. Plus précisément nous nous intéressons à l'influence de la forme (cylindrique, prismatique) et à l'épaisseur des éprouvettes rectangulaires utilisées. Le dernier volet du chapitre est consacré au rôle joué par la microstructure et les mécanismes de fissuration post localisation. A cet effet, le microscope électronique à balayage sera utilisé, des microphotographies ont été réalisées et quelques unes sélectionnées pour compléter nos descriptions seront présentées. Ces observations porterons sur les zones de localisation dans l'essai triaxial.

V-1 : EFFETS DE FORME

L'étude concernant le rôle de l'épaisseur de l'éprouvette a été réalisée en gardant inchangées les autres dimensions. Trois épaisseurs ont été sélectionnées: 14,9 ; 17 et 20,2 mm. Rappelons que l'épaisseur utilisée dans les essais précédents était de 12 mm, cette épaisseur servira de référence pour distinguer les éprouvettes trapues.

Les épaisseurs ne sont pas choisies de manière arbitraire ; chacune de ces dimensions tient compte d'un contexte particulier. L'épaisseur de 14,9 mm confère une section de chargement à l'éprouvette qui s'ajuste à la surface rectangulaire maximale que permet le dispositif de mise en place dans la cellule triaxiale. Les plaques épaisses de 14,9 mm feront l'objet d'une étude sous sollicitations uniaxiale et triaxiale (à 20 MPa de confinement). L'échantillon dont l'épaisseur est de 17 mm fait que la plaque rectangulaire est assortie d'un volume comparable à celui de l'éprouvette cylindrique utilisée dans les études précédentes, celle dont l'épaisseur est de 20,2 mm est dotée d'une surface de chargement égale. Les essais sont monotones et conduits dans les mêmes conditions que précédemment, jusqu'à la rupture.

V-1-1 : ESSAIS DE COMPRESSION UNIAXIALE

L'observation directe, et l'examen des éprouvettes rompues à l'issue de ces essais de compression uniaxiale n'appelle pas d'autres commentaires que ceux du chapitre 4. A l'exception d'une quantité de sable libérée à la rupture légèrement plus importante, le processus conduisant à la rupture reste globalement inchangé. Le détachement de fragments et la décohésion selon des plans parallèles à l'axe de chargement, précédés du même phénomène d'amorçage de la rupture sur les extrémités du diamètre du trou parallèle à l'axe de chargement, sont obtenus de manière identique à ce qui est décrit au paragraphe IV - 3 du chapitre 4. Les courbes contraintes déformations sont représentées sur la figure 5.1.

Observations et comportement

La résistance à la rupture en légère augmentation pour e = 14,9 mm (de 109 à 117 MPa), diminue à 108 puis à 92 MPa pour respectivement e =17 et 20,2 mm. On attribue généralement cette diminution à l'augmentation du volume des échantillons. Hoek et Brown (1980) observaient en compression uniaxiale dans un granite une très forte diminution de la résistance à la rupture lorsqu'on augmente le volume de l'éprouvette. Ces auteurs ont obtenu une diminution de l'ordre de 80 % lorsque le diamètre de l'éprouvette passe de 10 à 200 mm.

Les courbes de déformations axiales restent quasiment linéaires jusqu'au pic, notamment pour les épaisseurs les plus élevées (17 et 20,2 mm) (figure 5.1a). Une légère diminution du module élastique (23 à 21 GPa) avec l'épaisseur a été enregistrée. Les détails concernant les paramètres (modules élastiques et coefficients de Poisson), les déformations (maximales et critiques) et les contraintes (au pic, au seuil A et au point B) sont données dans le tableau A5-1 de l'annexe 5.

Les déformations latérales maximales ε_3 subissent une diminution considérable (figure 5.1b). Elles sont réduites de 18 %, 37 % et 40 % pour respectivement e = 14,9; 17 et 20,2 mm. En revanche, par rapport à l'éprouvette de référence (figure 5.1c), on enregistre une augmentation sensible des déformations transversales ε_2 maximales (de 24 %, 43 % et 63 % pour les 3 épaisseurs). Ces deux variations opposées peuvent facilement s'expliquer par une uniformisation des valeurs des déformations latérales et transversales puisque la largeur étant inchangée, le rapport épaisseur sur largeur tend alors vers 1.

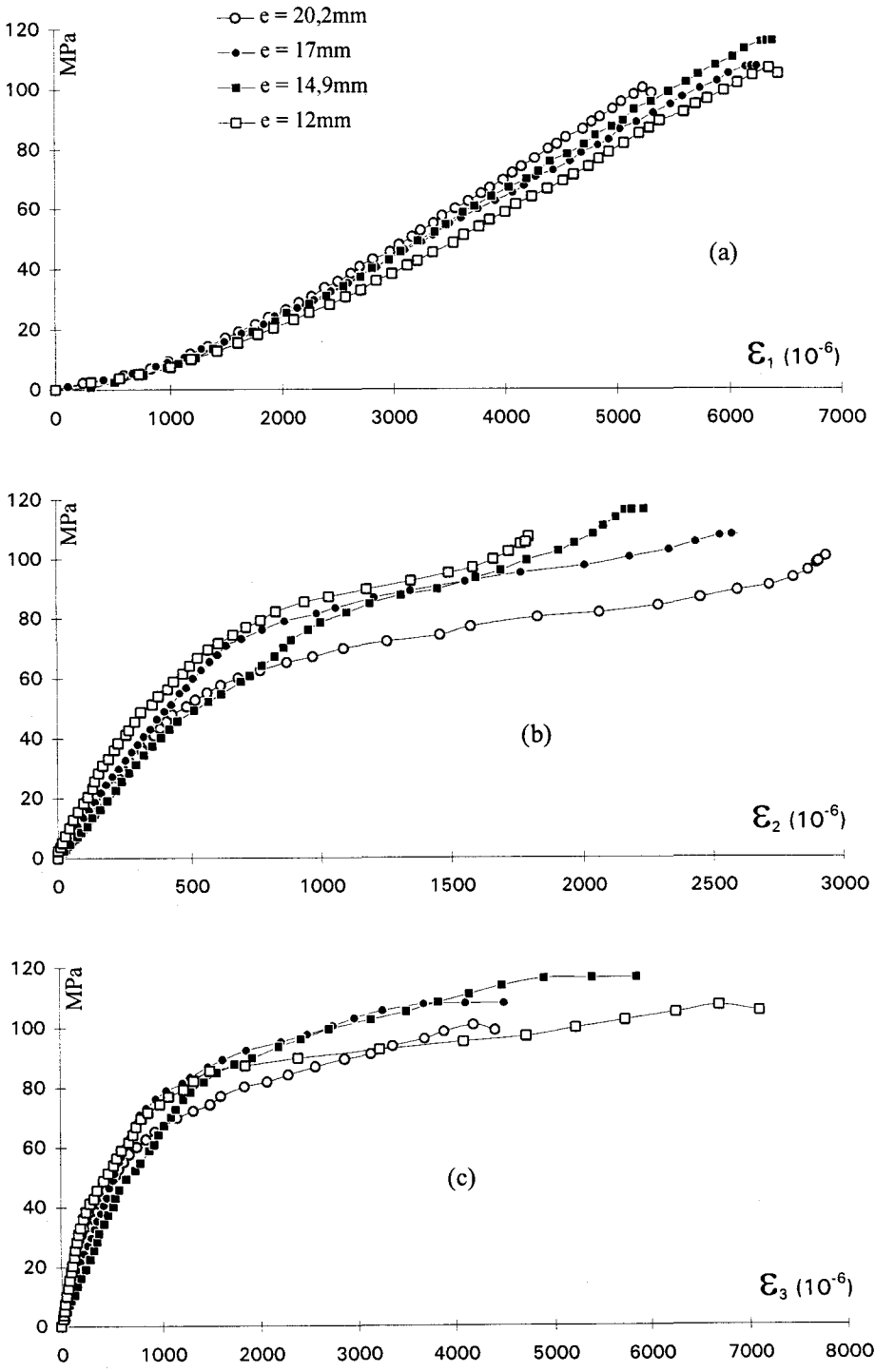


Figure 5.1 : Courbes contraintes déformations axiales (a), transversales (b) et latérales (c). Résultats obtenus dans les essais de compression uniaxial sur plaques rectangulaires contenant l'ouverture cylindrique de diamètre 3mm pour différentes valeurs de l'épaisseur e (12; 14,9; 17 et 20,2 mm).

Seuil de localisation

La pente de la partie linéaire OA des courbes qui représentent les variations de la déformation transversale ε_2 en fonction de la déformation latérale ε_3 (figure 5.2) illustre bien la tendance que nous venons de souligner. Le rapport de proportionnalité entre les déformations transversales et les déformations latérales durant la phase des déformations homogènes est fonction de l'épaisseur de l'éprouvette. Les essais triaxiaux du chapitre 3 ont montré que ce rapport tend asymptotiquement vers 1 en fonction de la pression de confinement. De 1,8 obtenu pour ce rapport dans l'essai de référence (e = 12 mm), on passe à 1,4 pour e = 14,9 mm, 1,2 pour e =17 mm et quasiment à 1 pour e = 20,2 mm. Malgré le fait que cette dernière épaisseur ne représente que 35% de la largeur, il semble qu'elle soit suffisante pour que durant la phase de déformations homogènes les déformations latérales est transversales soient équivalentes. Ceci dit, le niveau de déformations latérales enregistré au seuil de localisation dans les conditions axisymètriques (1.60 10^{-3}) restent sensiblement inférieur à celui obtenu pour la plaque d'épaisseur 20,2 mm (2.30 10^{-3}). De façon générale, en terme de contraintes, le seuil de localisation est pratiquement enregistré au même niveau par rapport à la résistance de celui obtenu dans l'essai uniaxial de référence (86 %). Sa dépendance avec l'épaisseur est faible (85 % pour e = 14,9 mm; 85 % pour e = 17 mm et 84 % pour e = 20,2 mm).

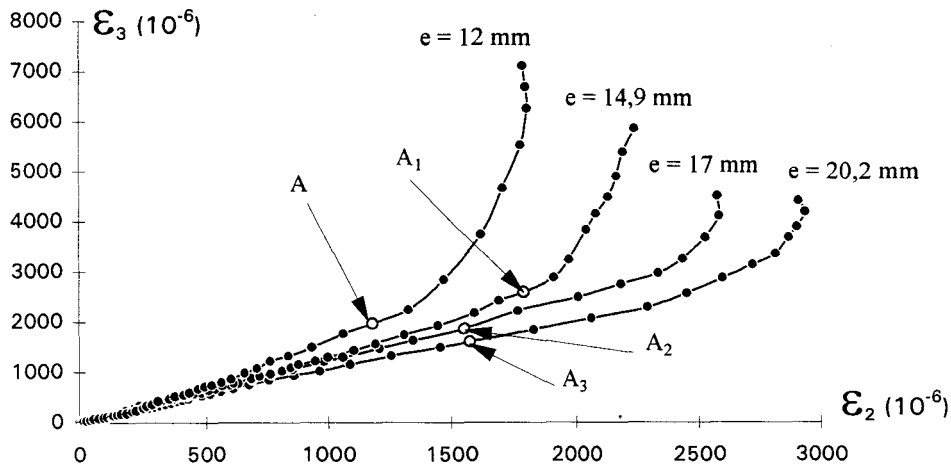


Figure 5.2 : Courbes des déformations transversales en fonction des déformations latérales. Essais de compression uniaxiale sur plaques percées (D = 3 mm) avec variation de l'épaisseur e. Les seuils sont notés A (e = 12 mm), A_1 (e = 14,9 mm), A_2 (e = 17 mm) et A_3 (e = 20,2 mm).

Début de la propagation instable de la microfissuration

Le niveau de contrainte en B (voir Annexe 5, tableau A5-1) semble peu influencé lorsqu'on augmente l'épaisseur ou même lorsque la forme de l'éprouvette est modifiée. Il reste compris entre 60 et 70% de la résistance à la rupture pour l'ensemble des essais de compression uniaxiale sur les plaques rectangulaires percées. Rappelons qu'il a été repéré à 65 % de la résistance à la rupture de l'échantillon cylindrique dans l'essai de compression uniaxiale monotone (et à 70 % uniaxial cyclique). Cependant, s'agissant de la plaque non percée, ce point B n'est repéré qu'à environ 80%.

Le début de la propagation instable de la microfissuration dans l'essai de compression uniaxiale est généralement considéré constant pour un matériau donné (Bieniawski, 1967; Martin et Chandler, 1994); il ne dépendrait que légèrement de la rigidité de la machine d'essai (Bieniawski, 1967; Paterson, 1978). Nos résultats montrent que dans l'essai de compression uniaxiale, le point B se rapporte plus au matériau, qu'à la forme géométrique des éprouvettes étudiées ici. Si on fait abstraction de l'éprouvette non percée, il serait intrinsèque au matériau, et se situerait en moyenne autour de 65 % (± 5%) de la résistance à la rupture du grès de Fontainebleau dans l'essai de compression uniaxial.

Déformations locales

La disposition adoptée pour les jauges destinées à la mesure des déformations locales est celle utilisée dans l'essai de compression uniaxiale sur l'éprouvette de référence, présentée dans la figure 4.4 du chapitre précédent. La figure 5.3 montre la variation de ces déformations locales en fonction de la contrainte axiale, pour les trois épaisseurs utilisées. Les points A et B sont reportés sur ces courbes.

En marge de l'analyse déjà réalisée à ce propos dans le chapitre 3, on note ici que les événements qui marquent la fin du mode contractant et le début du mode d'extension se font de manière de plus en plus brutale lorsqu'on augmente l'épaisseur. Et on peut se poser la question de savoir si le volume de la zone de localisation n'est pas fonction des dimensions géométriques, voire du volume de l'éprouvette.

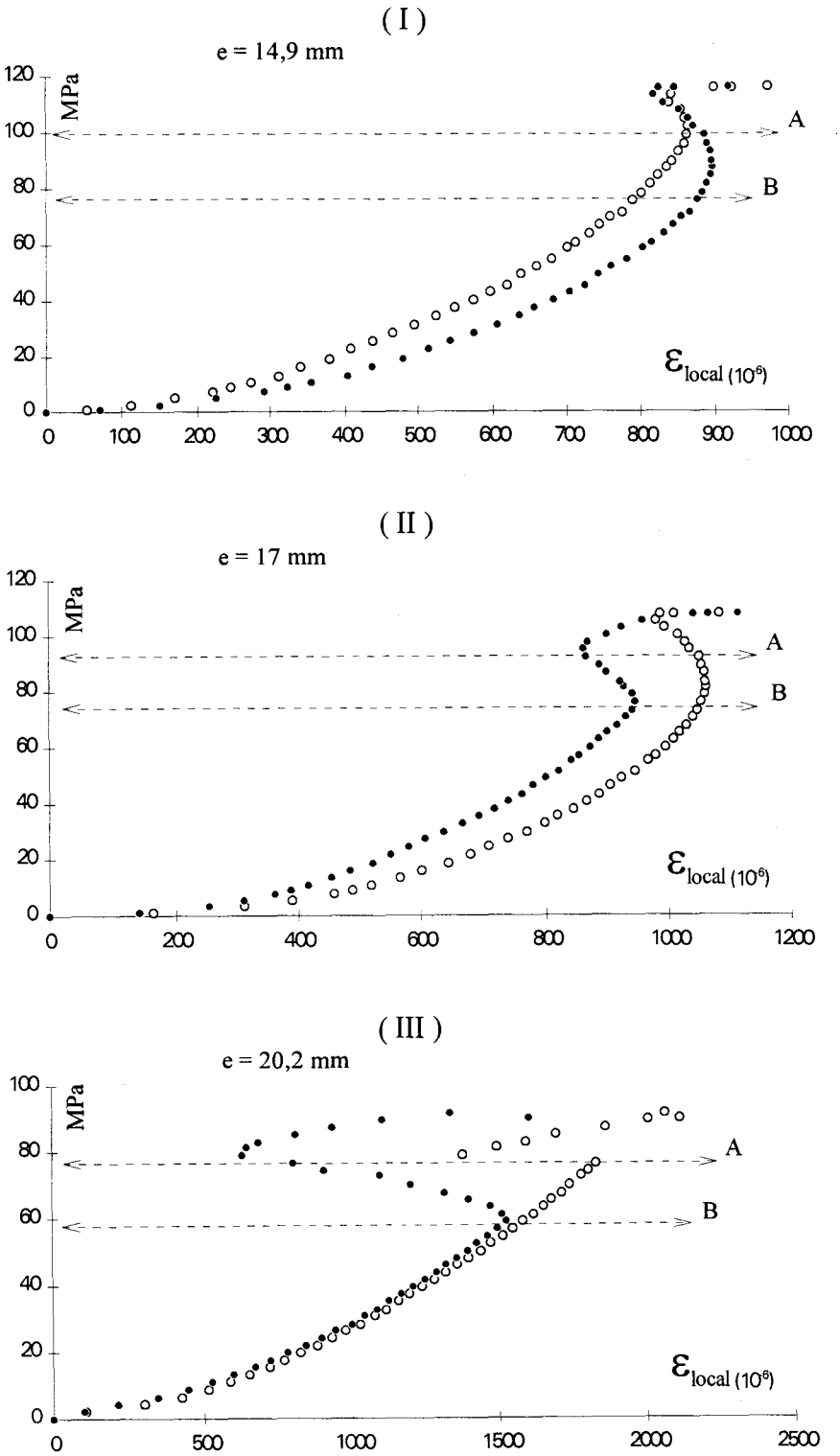


Figure 5.3 : Courbes contraintes déformations locales dans l'essai uniaxial, concernant les plaques rectangulaires d'épaisseur 14,9 mm (I), 17 mm (II) et 20,2 mm (III).

Comparaisons cylindre et prisme dans l'essai de compression uniaxiale

On note, dans l'essai de compression uniaxiale, qu'indépendamment de la forme cylindrique de l'éprouvette (à base circulaire ou rectangulaire):

(i) si on ne modifie pas la surface de chargement (e = 20,2 mm), on conserve la valeur de la déformation transversale ε_2 maximale et comme nous l'avons souligné la pente 1 de la partie linéaire OA (attribuée à la taille relativement importante de l'épaisseur de l'éprouvette).

(ii) si le volume est du même ordre de grandeur (e = 17 mm), on observe une déformation axiale maximale inchangée. Au seuil de localisation, on enregistre un niveau de déformation pratiquement identique dans les trois directions. Il en résulte une déformation volumique de même ordre qui est de 2.00 10^{-3} pour la plaque rectangulaire et 2.10 10^{-3} pour l'éprouvette cylindrique de révolution. Notons que l'une comme l'autre de ces valeurs restent tout juste supérieures à la déformation volumique critique établie pour les essais triaxiaux (1.90 10^{-3}) au chapitre précédent. En terme de contraintes, la résistance à la rupture (108 / 109 MPa), le début de la propagation instable de la fissuration (71/73 MPa) et le seuil de localisation (92 / 95 MPa) sont quasiment inchangés.

V-1-2 ESSAIS DE COMPRESSION TRIAXIALE

Comme nous l'avions signalé (et justifié) en introduction, l'étude du rôle de l'épaisseur dans l'essai triaxial a été réalisé uniquement sur l'éprouvette d'épaisseur 14,9 mm, à une pression de confinement de 20 MPa. Sur ces plaques épaisses, la rupture s'est développée de manière classique le long d'une surface inclinée. Son amorçage sur les extrémités du diamètre transverse et l'orientation des lignes de rupture rappellent les observations faites sur les éprouvettes de référence (e=12 mm). La seule différence cependant, concerne la surface de rupture qui pour la plaque épaisse semble moins topographique, légèrement gauche et régulière. Cette surface de rupture peut presque être assimilée à "un plan" au même titre que dans les échantillons cylindriques.

Les courbes contraintes déformations figure 5.4 ci dessous montrent (comme dans l'essai uniaxial) que l'augmentation non négligeable de l'épaisseur (au moins 25 %) ne modifie pas de façon conséquente la réponse du matériau. La résistance à la rupture passe de 262 à environ 270 MPa pour l'éprouvette épaisse. Le module élastique se maintient à environ 40 GPa. La présence du trou avait eu pour effet sa diminution à 37 GPa dans l'éprouvette de référence, ce module était de 38 GPa pour la plaque épaisse percée. Habituellement associé aux vides présents dans le matériau, les variations insignifiantes observées sur le module élastique ne permettent pas de

conclure sur l'amplitude de susceptibilité de ce paramètre à l'égard du trou, lorsqu'on augmente l'épaisseur dans l'essai triaxial.

Les détails concernant les paramètres (modules élastiques et coefficients de Poisson), les déformations (maximales et critiques) et les contraintes (au pic, au seuil A et au point B) peuvent être également consultées dans le tableau A5-1 de l'annexe 5.

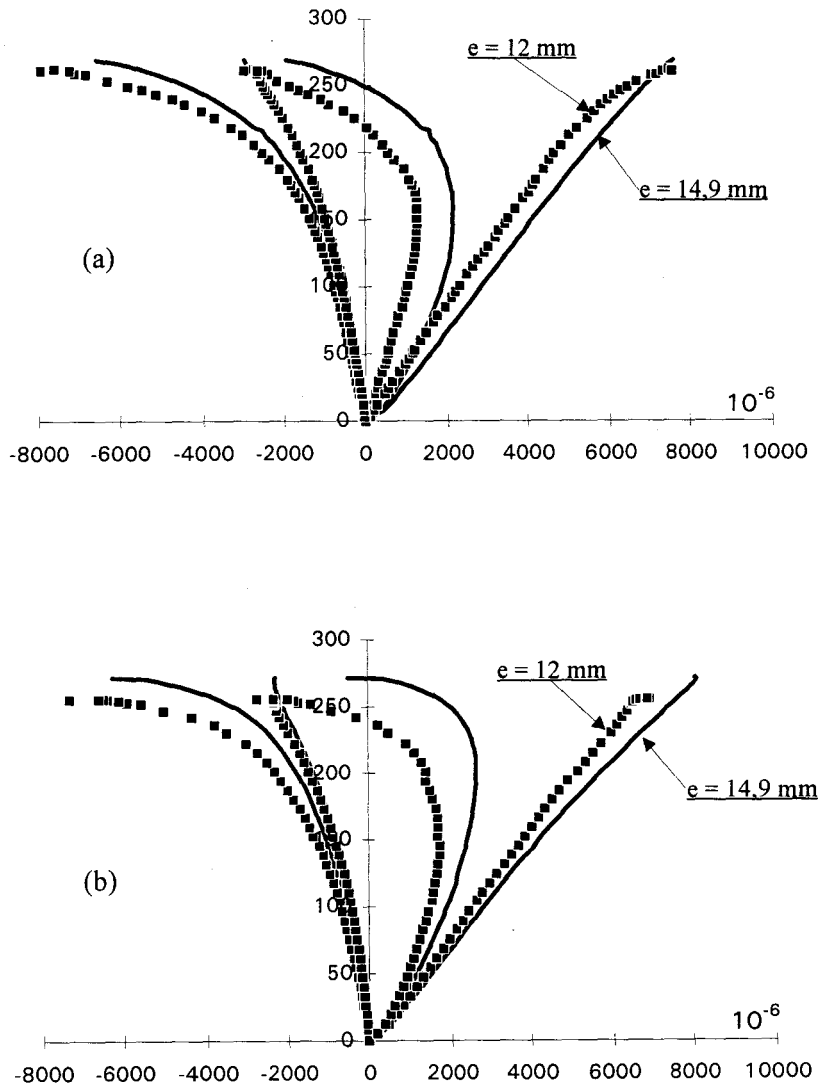


Figure 5.4 : Courbes contraintes déformations dans l'essai triaxial mené à 20 MPa de confinement. Essais sur plaques rectangulaires d'épaisseur 14,9 mm non percées (a) et percées (b).

La figure 5.5 représente les courbes de déformations transversales en fonction des déformations latérales. La pente de la partie linéaire OA diminue de 1,7 à 1,4 lorsqu'on augmente l'épaisseur. Cette diminution ne change pas avec la présence du trou. D'ailleurs la même pente de 1,4 a été enregistrée sur la même éprouvette (épaisseur 14,9 mm) dans l'essai uniaxial traité dans le paragraphe précédent. Il semblerait qu'à partir d'une certaine épaisseur, la pression de confinement n'a plus d'effet sensible sur le coefficient de proportionnalité qui lie les déformations transversales aux déformations latérales durant la phase des déformations homogènes. Une observation importante est celle concernant le seuil de localisation enregistré au même déviateur de contrainte (211 MPa) que sur la plaque de référence non percée et qui se situe donc à 78 % de la résistance à la rupture.

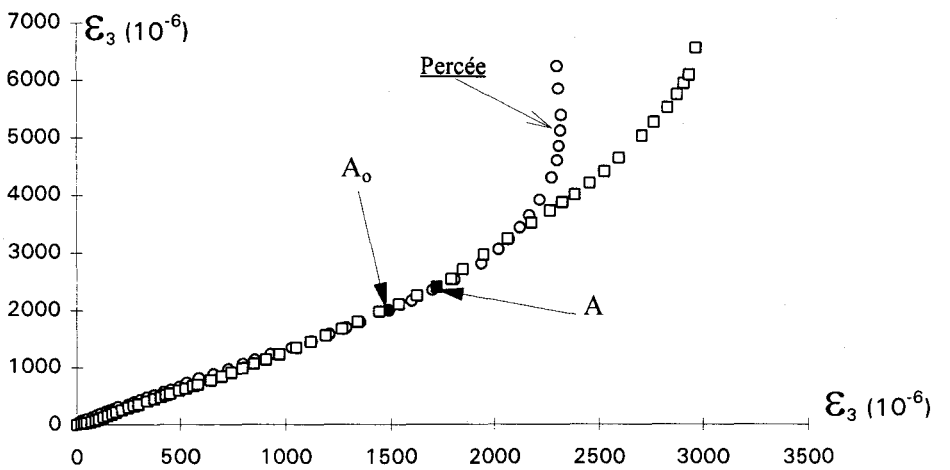


Figure 5.5 : Courbes déformations transversales - déformations latérales. Repérage des seuils de localisation A (non percée) et Ao (percée) dans l'essai triaxial (Pc = 20 MPa) sur plaques rectangulaires d'épaisseur 14,9 mm.

Encore plus contrasté qu'en compression uniaxiale, l'essai triaxial montre que la déformation latérale ε_3 maximale diminue remarquablement (33 %) tandis que les déformations transversales restent pratiquement inchangées (cf. tableau A5-1). Rappelons que dans l'essai uniaxial il a été observé que la déformation latérale maximale croît avec l'épaisseur des plaques. Il semble donc que la pression de confinement agit directement sur le taux de déformation transversale dans la réponse structurale post localisation, qui précède la rupture. Et cela résulte

bien entendu de la forme rectangulaire de l'éprouvette dont la surface la plus importante est orientée perpendiculairement à la direction 2, direction qui définie les déformations transversales. Il semble que l'action de la pression de confinement diminue l'amplitude de la déformabilité transversale, au profit de celle qui se développe dans la direction latérale. Cette action sera d'autant plus importante que l'épaisseur sera faible. Il en résultera comme le montreront les observations microscopiques dans la dernière partie de ce chapitre, une microfissuration axiale plus abondante, et du point de vu macroscopique, une déformation latérale conséquente.

Comparaisons entre cylindre et prisme dans l'essai de compression triaxiale

Dans les essais triaxiaux, outre les différences enregistrées entre les déformations transversales ou latérales, l'observation la plus remarquable concerne la résistance du prisme rectangulaire (voir Annexe 2 et les détails dans le tableau 4.1), systématiquement inférieure à celle de l'échantillon cylindrique dans les essais triaxiaux et cet écart se creuse en fonction de la pression de confinement. La forme géométrique a de toute évidence un effet sur la résistance à la rupture du grès de Fontainebleau (Voir à ce sujet les courbes contraintes déformations présentées dans l'annexe 1 et 2).

Exception faite du début de la propagation instable de la fissuration (point B), les différentes manifestations qui marquent les étapes successives dans l'évolution de la microfissuration se situent toutes dans un rapport inchangé par rapport à la résistance à la rupture. Sur les trois essais triaxiaux monotones (Pc = 10, 20 et 30 MPa) qui ont été réalisés sur les éprouvettes cylindriques, le début de la propagation instable est enregistré entre 75 et 80 % de la résistance à la rupture. Sur les plaques rectangulaires, soumises dans l'essai triaxial aux mêmes pressions de confinement, le point B reste compris entre 65 et 70 % de la résistance à la rupture.

Il est clair que l'apparition d'instabilités locales liées à l'évolution de la microfissuration est plus précoce dès lors qu'on s'écarte des conditions axisymétriques, et cela indépendamment de l'élancement. Dans les conditions axisymètriques, le matériau homogène développe une microfissuration également homogène et de surcroît, si l'uniformité de la charge est assurée, la distribution de cette microfissuration est nécessairement centrosymétrique durant la phase de propagation stable de la fissuration. Le point B, précoce dans l'essai triaxial pour l'échantillon prismatique résulte essentiellement d'une déformation latérale relativement importante; l'ordre de grandeur des différences peut être estimé à partir des déformations maximales données dans les tableaux 4.1 et A5-1 de l'annexe 5. Les différences observées entre ces déformations latérales suggèrent qu'une microfissuration plus importante en nombre et/ou probablement plus ouverte, est à la base non seulement de la précocité du point B mais également de la rupture prématurée

du matériau. Cependant, si l'action stabilisatrice de la pression de confinement s'effectue en prolongeant la phase de propagation stable de la fissuration (donc retard dans l'apparition du point B), il n'en est rien en ce qui concerne la non homogénéité des déformations. L'analyse de nos résultats expérimentaux a montré que le seuil de localisation est indépendant de la forme et la taille de l'éprouvette.

Déformations locales

La disposition adoptée pour les jauges destinées à la mesure des déformations locales est celle utilisée dans les essais triaxiaux sur l'éprouvette de référence de la figure 4.2. La figure 5.6 montre les variations de ces déformations locales en fonction de la contrainte déviatorique. Les points A et B sont reportés sur ces courbes. A l'exception de la jauge signalée cassée à 92 %, probablement par une petite fissure macroscopique qu'on étudiera dans les observations visuelles (photos 5Pi.b) et microscopiques (microphotographies MP.12 et MP.13), dans la dernière partie de ce chapitre, ces courbes n'appellent pas d'autres commentaires que ceux développés dans le chapitre 4 (§ IV -4).

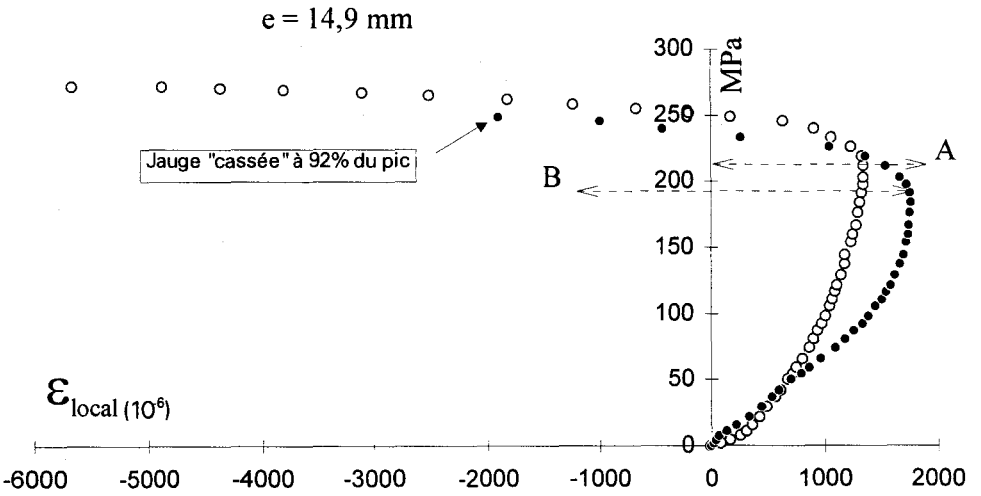


Figure 5.6 : Courbes contrainte déviatorique en fonction des déformations locales (senestre et dextre) dans l'essai triaxial mené à 20 MPa de confinement, concernant la plaque rectangulaire d'épaisseur 14,9 mm.

V- 1 - 3 : CONCLUSION

En examinant les résultats expérimentaux obtenus, il apparaît que les étapes successives dans le processus de la rupture fragile du grès ne sont pas modifiées lorsqu'on change la forme de l'éprouvette. Le prisme rectangulaire, de volume comparable à celui du cylindre, montre une analogie remarquable tant du point de vue des contraintes que du point de vue déformabilité. Cette étude expérimentale a néanmoins montré que les paramètres géométriques liés à la forme et aux dimensions de l'éprouvette agit sur la résistance à la rupture et le début de la propagation instable de la microfissuration. Il a été clairement établi que dans l'essai de compression uniaxiale, la modification de la géométrie cylindrique, n'altère aucun paramètre ou presque si le volume est conservé. Ce résultat confirme la nécessité d'une prise en compte de l'effet d'échelle dans la description de la rupture. Cet effet d'échelle joue par exemple sur l'énergie de déformation élastique et donc sur le taux de restitution d'énergie impliquée dans la propagation des microfissures comme le suggèrent Labuz et al. (1991) et Martin et Chandler (1994). L'étude présentée dans ce paragraphe a permis aussi d'établir que le seuil de localisation, pour un type d'essai donné, dépend plus du matériau que de la forme géométrique de l'éprouvette.

NB : Les résultats détaillés, obtenus sur les plaques rectangulaires épaisses, qui ont été traitées dans cette étude sont présentés dans l'annexe 5. On peut y consulter les tableaux A5-1, A5-2 (orientations) et A5-3 (modules d'écrouissages) qui fournissent les mêmes informations et de structure identique aux tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 respectivement (Annexe 5 pp. XVI - XIX).

V - 2 : OBSERVATIONS VISUELLES ET MICROSCOPIQUES

Les observations visuelles ont porté sur les surfaces externes des éprouvettes munies de l'ouverture cylindrique de diamètre 3 mm. Ces observations sont réalisées sur les échantillons chargés dans l'essai triaxial monotone jusqu'à un déviateur de contrainte élevé, puis déchargés. Le déchargement s'accomplit à la même vitesse qui a servi à la mise en charge. Lorsque le piston n'est plus en contact avec l'embase supérieur, la détente permettant le retour à la pression atmosphérique est réalisé de manière progressive, très lentement (moins de 1 MPa / mn).

Sachant que cette zone de localisation ne commence à se matérialiser en surface que lorsque le déviateur de contrainte est proche du pic, trois niveaux de déchargement ont été sélectionnés pour chaque pression de confinement utilisée. La première série d'observation concerne les éprouvettes déchargées entre 94 et 96 % de la résistance à la rupture et la deuxième entre 88 et 90 %. Ces deux niveaux ont permis de bien distinguer les zones de densité de microfissuration élevée (Haïed et al., 1993a, 1993b). Cependant, dans une dernière série d'essai où les décharges ont été opérées à environ 85 % de la résistance à la rupture, aucune trace n'a pu être décelée de manière visuelle sur la surface des éprouvettes. Les pressions de confinement dans cette étude sont celles utilisées dans les essais triaxiaux des chapitres 3 et 4 (10, 20, 30 et 40 MPa).

L'observation des surfaces est réalisée dans un premier temps à l'oeil nu. Elle est ensuite complétée en effectuant des observations plus fines sur les zones de localisation, à l'aide du microscope électronique à balayage. On tentera ensuite, grâce aux possibilités d'investigations qu'offre ce puissant appareil, d'identifier les mécanismes responsables de la rupture fragile par localisation des déformations dans le grès de Fontainebleau.

V - 2-1 : OBSERVATIONS VISUELLES

Les éprouvettes déchargées entre 88 et 90 % et entre 94 et 96 % de la résistance à la rupture sont présentées par pression de confinement sur les photographies 5P1 (Pc = 10 MPa), 5P2 (Pc = 20 MPa), 5P3 (Pc = 30 MPa) et 5P4 (Pc = 40 MPa). La forme et les contours des zones de localisation sont mis en évidence grâce à leur aspect blanchâtre (dilatance locale) qui indique une altération locale relativement importante du matériau. Bien que leurs frontières soient limitées à une distance au plus égale à environ trois fois le diamètre du trou, leurs contours sont très hésitants et restent difficiles à définir de manière précise.

L'altération importante autour des points d'amorçage sur les extrémités du diamètre transverse témoigne dès 88 % de la résistance à la rupture, que le processus de rupture est amorcé

à ce niveau de la contrainte déviatorique. Au voisinage de ces points, il semble que les contraintes locales ont des composantes horizontales (traction) assez importantes pour que se produisent les ruptures locales observées.

Quelle que soit la pression de confinement, un petit faisceau quasi vertical indiquant une concentration de la microfissuration reflète que la microfissuration qui y domine oscille autour d'une orientation proche de la parallèle à l'axe de chargement. Lorsque la pression de confinement est inférieure à 30 MPa, cette zone est constituée de deux paires de ramifications, dont chacune semble s'étendre vers l'une des directions senestre ou dextre que va privilégier la surface de rupture. La vue d'ensemble présente une forme particulière dite en croix. Cette forme est caractéristique de la zone de déformations inélastiques qui résulte de la distribution des contraintes autour d'un trou circulaire dans un matériau élastique, homogène dans les hypothèses de la contrainte appliquée à l'infini (Nadaï, 1950; Petit et Barquins, 1990).

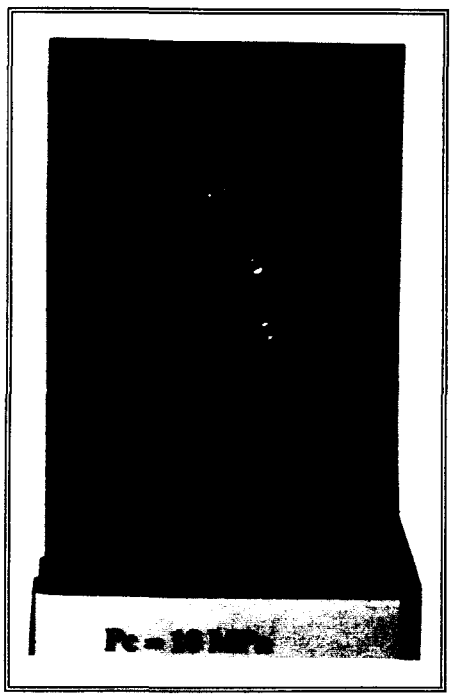
Entre 88 et 90%

L'examen de la surface de l'éprouvette déchargée entre 88 et 90 % de la résistance à la rupture laisse parfois apparaître, un faisceau blanchâtre qui s'étend de l'extrémité de l'une des ramifications vers un coin. En revanche, les essais triaxiaux menés à pression de confinement élevée (30 et 40 MPa), montrent souvent que l'observation de la zone de localisation à elle seule indique sans ambiguïté la direction de la surface de rupture. En fait, une seule paire de ramification est présente à ce niveau de la contrainte déviatorique, privilégiant ainsi une seule direction (voir photos 5Pi a). La deuxième paire est très difficile à distinguer à l'oeil nu. Une pression de confinement élevée a aussi pour conséquences une diminution de la largeur de ces ramifications et une concentration plus forte de la microfissuration. Accessoirement, ces effets leur confèrent une forme élancée, des contours moins accidentés et des extrémités plus fines.

Entre 94 et 96%

Entre 94 et 96 % de la résistance à la rupture, l'examen de la taille et de la forme de ces zones de localisation n'indiquent pas systématiquement une évolution externe, visible. On peut parfois distinguer dans la ligne médiane des ramifications l'amorçage d'une petite fissure à l'extrémité du diamètre transverse (photos 5Pi b). Elle est de taille macroscopique (nettement visible sur la photo 5P2b) et sa longueur et son orientation sont du même ordre de grandeur que la taille et l'orientation moyennes d'une ramification. A ce niveau de la contrainte déviatorique, la trace qui indique la présence de la surface de rupture devient évidente dans au moins l'une des deux directions. A partir des extrémités de l'une ou des deux ramifications définissant une direction, cette trace semble se matérialiser et se diriger vers le coin de l'éprouvette. Elle s'élargit jusqu'à un maximum qui peut aller jusqu'à 12 mm puis se termine souvent en pointe avant

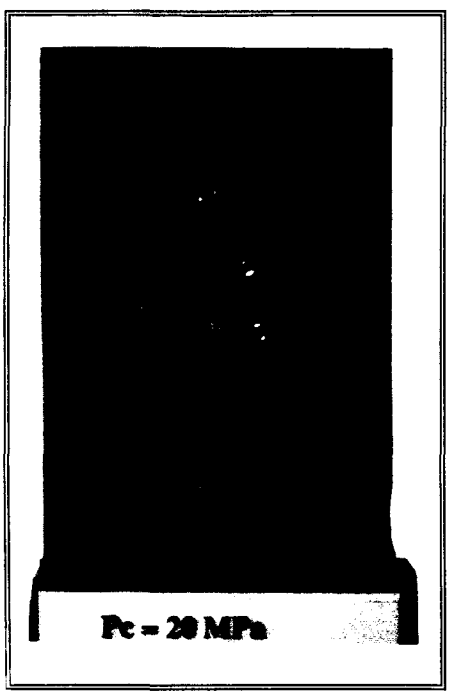
(a) 88 - 90 %



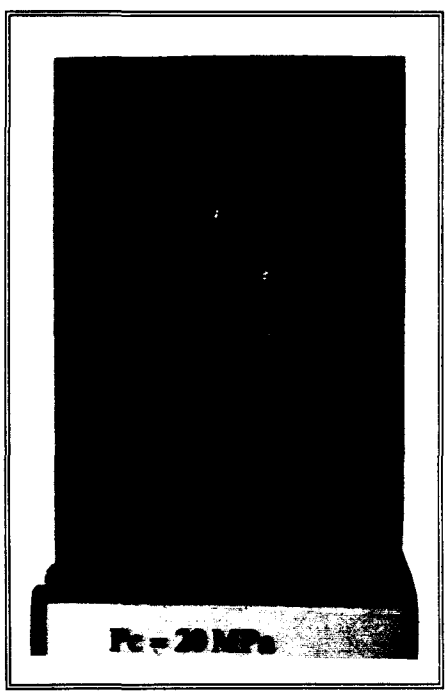
(b) 94 - 96 %

Photos 5P1 : Eprouvettes déchargées à 88 - 90 % (a) et 94 - 96 % (b) de la résistance à la rupture dans l'essai de compression triaxial : **Pc = 10 MPa**.

(a) 88 - 90 %

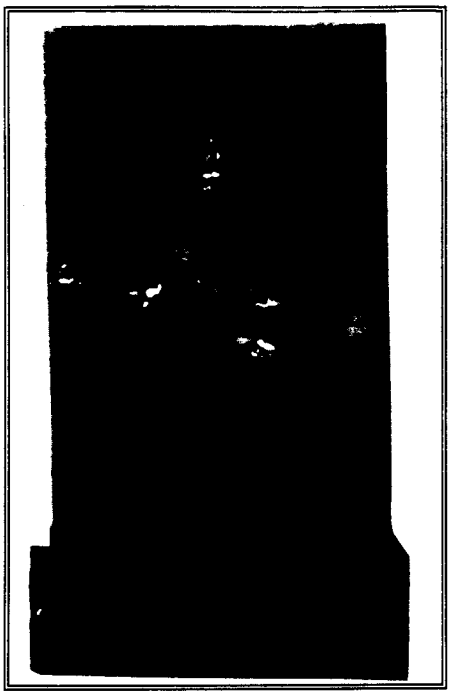


(b) 94 - 96 %

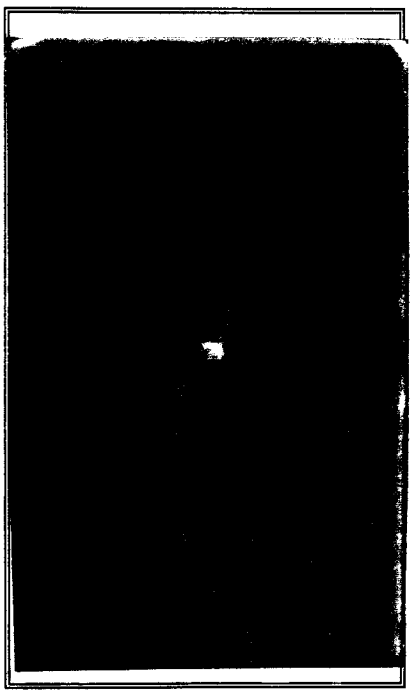


Photos 5P2 : Eprouvettes déchargées à 88 - 90 % (a) et 94 - 96 % (b) de la résistance à la rupture dans l'essai de compression triaxial : **Pc = 20 MPa**.

(a) 88 - 90 %

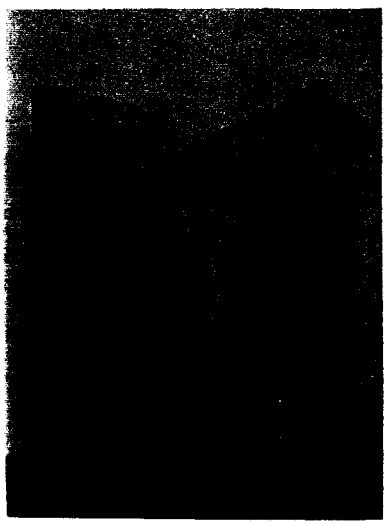


(b) 94 - 96 %



Photos 5P3 : Eprouvettes déchargées à 88 - 90 % (a) et 94 - 96 % (b) de la résistance à la rupture dans l'essai de compression triaxial : **Pc = 30 MPa**.

(a) 88 - 90 %



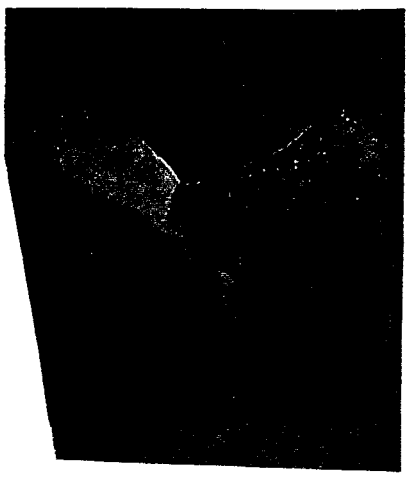
(b) 94 - 96 %

Photos 5P2 : Eprouvettes déchargées à 88 - 90 % (a) et 94 - 96 % (b) de la résistance à la rupture dans l'essai de compression triaxial : **Pc = 40 MPa**.

d'atteindre l'extrémité de l'éprouvette. Dans l'autre direction, une trace de même type semble s'amorcer sur l'extrémité de la paire de ramifications qui définissent l'autre direction. Cette trace n'évolue que sur une faible distance.

La forme et les dimensions inchangées de cette zone de déformations inélastiques entre 88 et 96 % de la résistance à la rupture suggèrent que si cette zone constitue un lieu de concentration de contraintes locales, l'émergence en surface de la microfissuration qui en résulte coïncide avec une relaxation locale de la zone. Cette émergence semble s'effectuer avec une certaine rapidité puisqu'elle n'est pas visible à 85 % de la résistance à la rupture.

La photographie 5P5 représente une prise de vue de dessus de l'éprouvette de la photo 5P4a. Elle montre, de manière évidente que ces faisceaux larges en surface résultent d'une zone très fine, qui part du centre d'une section droite vers la surface de l'éprouvette. La petite fissure observée sur la surface des échantillons déchargés à 94 / 96 % de la résistance à la rupture ne correspond probablement pas à une fissure nouvelle mais à l'émergence de cette zone mince de fissuration interne. L'examen des surface de rupture (chapitre 3) et de la photographie 5P5 indiquent que cette fissure interne n'est présente que dans une des deux directions. Dans le but de voir si sur les éprouvettes déchargées à 85 % comme nos constatations le suggèrent, cette zone très fine est présente, une série de lames mince a été réalisée. Les résultats obtenues n'ont malheureusement pas su réellement confirmer nos hypothèses. Toutefois, nos conclusions s'accordent avec les constatations faites sur les réponses locales étudiées au chapitre 4 qui montraient qu'au seuil de localisation, se produit une transition dans la réponse locale (contraction - extension) dans l'une seulement des deux directions étudiées (dextre ou senestre).



Photos 5P5 : Vue de dessus de l'éprouvette de la photo 4P4a, permettant l'observation de la zone initiale de localisation.

Signalons ici que les mesures concernant la bande de cisaillement (orientation et épaisseur), sur les éprouvette percées n'ont pas tenu compte de cette zone. Cette zone dans ce contexte bien précis, considérée " non utile ", s'étend sur une distance qui varie de deux à trois fois le diamètre du trou. Cette conséquence n'est pas propre à la présence du trou, et, beaucoup d'auteurs ne tiennent pas compte de l'orientation de la bande lorsqu'elle traverse le centre de l'éprouvette.

En conclusion, les observations à l'oeil nu montrent que la rupture a pour origine une concentration de contrainte locale transverse à l'endroit d'un point faible ou d'une hétérogénéité dans le matériau. Les vices de structure naturellement présents dans la roche ou les défauts géométriques (induits volontairement ou accidentels) engendrent systématiquement des concentrations de contraintes locales. Celles ci, ne sont pas nécessairement de même signe et/ou de même amplitude que la contrainte macroscopique externe et jouent un rôle déterminant dans l'amorçage et les mécanismes responsables de la rupture fragile de la roche. Sur la frontière de ces défauts, les sollicitations extérieures induisent des concentrations de contraintes qui engendrent de grandes déformations inélastiques. Ces zones de faiblesse locale semblent se déformer davantage par rapport au reste de l'éprouvette et montrent que la rupture s'amorce sur la frontière du point de faiblesse prépondérant.

V - 2 -2: OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Le microscope électronique à balayage (M.E.B.) est idéal et convient parfaitement à l'étude des fissures dans une roche à cause du grossissement et de sa résolution à trois dimensions. Nous nous appliquerons particulièrement ici à examiner l'état de la microstructure en divers points de la surface de l'éprouvette et estimer les dommages occasionnés par l'application de la contrainte déviatorique dans la phase post seuil de localisation qui précède la rupture macroscopique. Nous tenterons de dégager les mécanismes d'amorçage et de propagation et d'interaction de la microfissuration localisée à l'origine des surfaces de rupture. Toutes les microphotographies présentées ici sont de haut en bas, orientées dans la direction de la contrainte principale majeure.

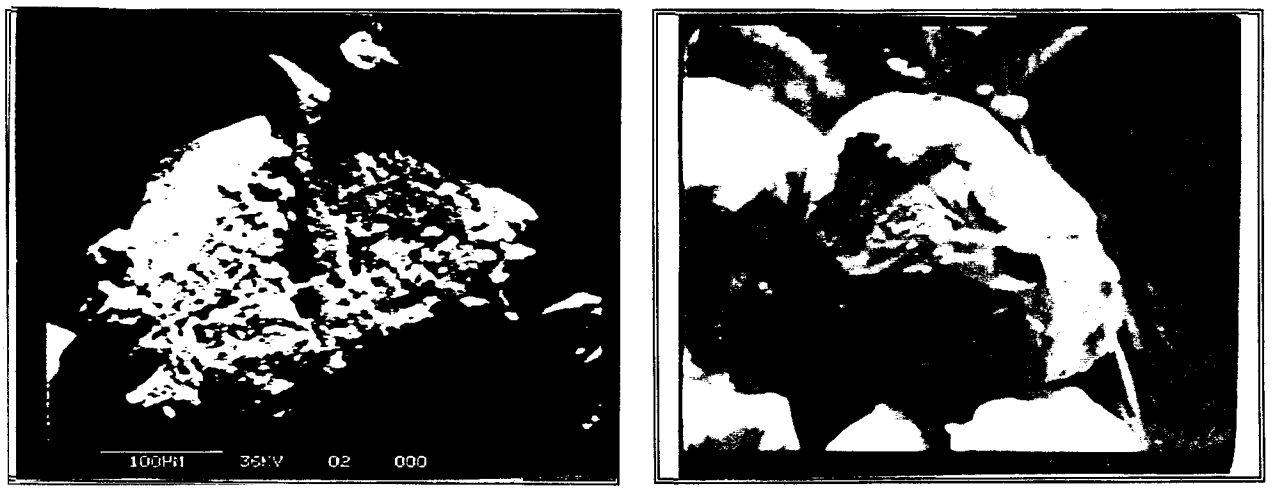
Les surfaces étudiées sont rendues conductrices par ionisation. Le métal utilisé est l'or. Après cette opération, l'éprouvette est insérée dans le porte objet, introduite dans la colonne d'observation du M.E.B.. L'examen des surfaces est réalisé lorsqu'un vide poussé dans la colonne est établi.

V-2-2-1 : OBSERVATIONS GENERALES

Observation du sable libéré et grains piégés à la rupture

L'observation a d'abord porté sur les grains de sable libérés lors de la rupture (MP.1). La microphotographie MP.1a montre un exemple de ces grains qui ont subi des dommages considérables, sans doute causés par le cisaillement macroscopique à la rupture. Les grains fortement altérés, présentent cette particularité d'être fissuré (rarement plus d'une fissure) et semblent morcelés, séparés d'une portion plus ou moins importante de leurs volumes initiaux (MP.1a). Leur surface de rupture (MP.1a) n'indiquent cependant pas avoir fait l'objet d'un cisaillement pur. Lorsqu'une partie du grain est encore bien cémentée ou coincée par d'autre grains comme cela peut se produire dans le cas illustré par la microphotographie MP.4, la rotation forcée de la partie déchaussée résulterait des mouvements de grains frontaliers. Par ailleurs, une quantité relativement faible de grains ne montre aucun ou peu de dommage (MP.1b). Il s'agit probablement de grains qui dans la zone de déformations inélastiques ont été chassés avant la rupture par des déplacements relatifs de grains voisins. Même si leur forme ne paraît pas altérée, la surface de ces derniers présente des secteurs accidentés probablement causés par l'écrasement aux points de contact et les frottements qui résultent du glissement qui a eu pour conséquence leurs extractions.

(MP.1a) (MP.1b)



Microphotographies 1 : Etat d'endommagement des grains de sable libérés à la rupture dans l'essai triaxial (Pc = 20 MPa).

Observation du contour de la cavité

La vue d'ensemble permettant l'examen de la totalité du contour du trou (microphotographie MP.2) montre que les zones qui environnent les extrémités du diamètre transverse présentent un aspect chaotique proche de la forme dite en " oreilles de chien ". Dans cette direction, le diamètre est augmentée de prés de 0,8 mm sur une profondeur d'environ 0,5 mm. L'absence d'une quantité relativement importante de grains en est responsable et ceux qu'on observe sur la surface de ces zones, partiellement déchaussés indiquent qu'une importante fissuration de frontières de grains et intergranulaires ont dominé cette région. Probablement soumises à des contraintes de traction élevée, les microfissures responsables de cette décohésion se sont développées et propagées plus tôt que les autres.

MP.2

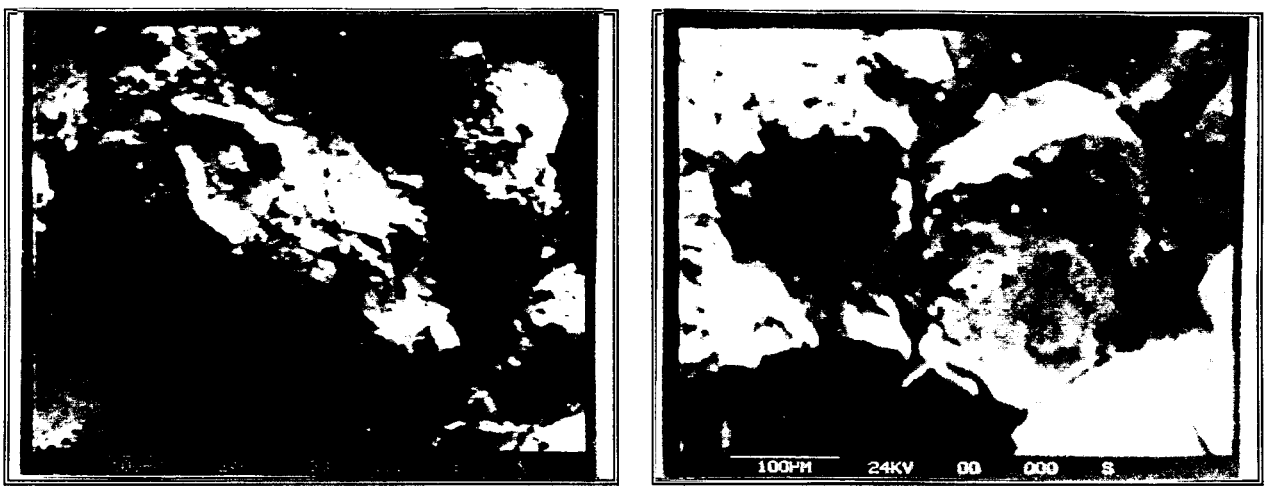
Microphotographie 2: Observation du contour de la cavité. Eprouvette déchargée entre 88 et 90 % de la résistance à la rupture de l'essai triaxial réalisé à 20 MPa de confinement.

Zoom

Le fort grossissement permet de distinguer dans l'ensemble de cette zone allant jusqu'à l'extrémité d'une ramification, des populations de fissures intergranulaires et des fissures de frontières de grains. Les frontières de grains semblent écrasées, et, bien que les fissures de frontière de grains soient majoritaires, leurs extrémités ne sont pas faciles à distinguer (MP.3). Les glissements de grains qui les produisent, ont parfois déchaussé la totalité du grain (MP.4) qui a probablement constitué une partie du sable produit à la rupture. Les microfissures que l'on observe le long des frontières de grains et dans les grains de quartz sont le plus souvent des

fissures d'extension (mode I). L'orientation de la majorité des fissures intergranulaires est proche de la direction de la contrainte principale majeure macroscopique.

(MP.3) (MP.4)



Microphotographies 3 et 4 : Importance des fissures de frontière de grain et des fissures intergranulaires axiales uniques traversant un (gros) grain (Pc = 20 MPa).

Longueurs, largeurs et coefficient de forme moyens

La longueur moyenne de ces fissures est généralement de l'ordre de grandeur du diamètre moyen d'un grain. En règle générale, ce sont les grains les plus gros qui sont le plus souvent traversés et par conséquent, les longueurs varient de 100 à 400 µm. Leur largeur moyenne dépasse rarement les 4 µm. Les plus larges font environ 15 µm (rares) et sont repérés dans des grains entièrement déchaussés, coincés entre deux ou plusieurs grains frontaliers (MP.1a et MP.4).

Le coefficient de forme, défini quantitativement par le rapport des dimensions extrêmes (ici, rapport longueur de la fissure sur sa largeur) calculé sur 172 fissures intergranulaires varie sensiblement entre 2 et 4.10^{-2}. D'après nos observations, les largeurs de fissures varient peu ; par conséquent, le coefficient de forme ne dépend en général que de la longueur.

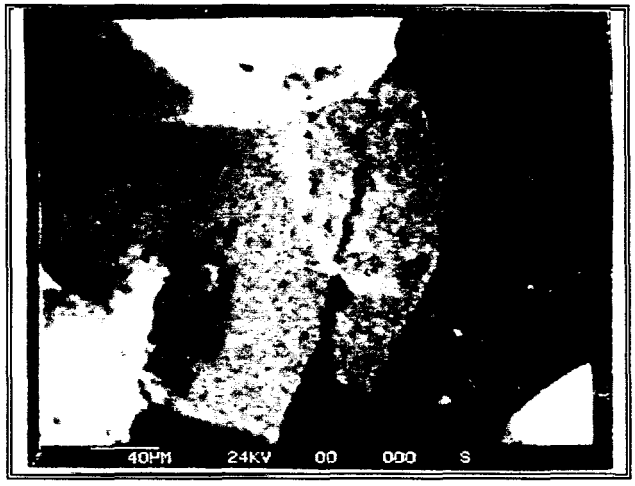
Observations en profondeur et fissures de cisaillement

L'observation de certains grains situés en profondeur (deuxième plan), visibles à cause de l'absence d'un ou plusieurs grains de surface, semble indiquer une fissuration de grains plus importante (MP.5 et deuxième plan de MP.3). Sur une surface légèrement supérieure à 8 mm^2, nous avons réussi à chasser à l'air comprimé les grains superficiels déchaussés. L'éprouvette est remétallisée à l'or puis réintroduite dans le M.E.B.. Contrairement à la surface de la zone de

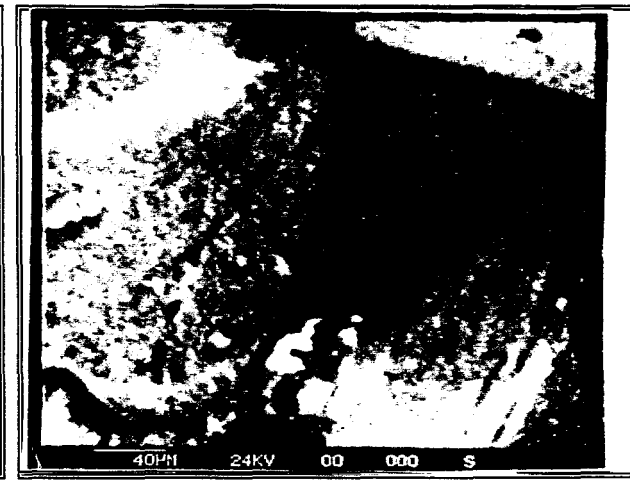
localisation où elles sont absentes, on distingue quelques fissures de cisaillement. La plupart d'entre elles, isolées, sont uniques dans un grain comme on peut le voir sur la microphotographie MP.6 et MP.7 (en bas à droite). Celles que nous avons observées (une dizaine) font un angle compris entre 17 et 25° par rapport à l'axe de chargement. En général, seule l'une de leurs deux extrémités est en contact avec le grain voisin, l'autre, souvent plus large donne sur un vide interstitiel (MP.6). Des décollements de lèvres de fissures indiquent des frottement de surface en contact qui résultent de déplacements et on suppose que le mouvement relatif de ce type ne peut s'opérer que par cisaillement.

MP.5

(MP.6)



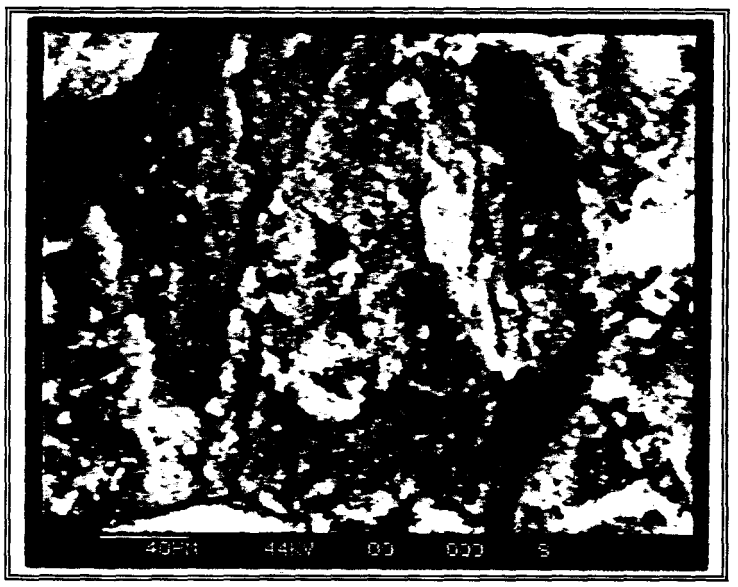
(MP.7)



Microphotographies 5, 6 & 7: Observation au coeur de la roche déformée entre 88 et 90 % de la résistance à la rupture de l'essai triaxial réalisé à 20 MPa de confinement. Fissuration plus abondante (MP.5) et fissures de cisaillement (MP.6 et MP.7).

A l'intérieur de la roche, dans la zone de localisation, on observe une quantité considérable de fissures intergranulaires et intragranulaires et aucune des frontières de grains n'est épargnée. Celles dont on peut distinguer les extrémités sont organisées en réseau dans le même grain (MP.8). Elles présentent la particularité d'être plus fines que celles observées uniques dans le grain sur la surface externe de l'éprouvette. Nous avons dénombré jusqu'à 19 fissures de ce type dans un même grain. Elles sont tantôt enchevêtrées, tantôt disposées en réseau et font sur une grande partie de leur longueur un angle inférieur à 10° par rapport à la direction de la contrainte principale majeure. A l'approche des frontières du grains, elles s'inclinent d'un angle qui varie de 17 à 30° pour se diriger vers des points de contact indiquant les lieux de concentration de contraintes locales élevées. Les fissures intergranulaires les plus larges se croisent souvent au milieu du grain (MP.8, voir aussi MP.5).

MP.8



Microphotographie 8: Observation au coeur de la roche déformée entre 88 et 90 % de la résistance à la rupture de l'essai triaxial (20 MPa), d'un grain appartenant à la zone de localisation.

Densités de fissuration moyenne

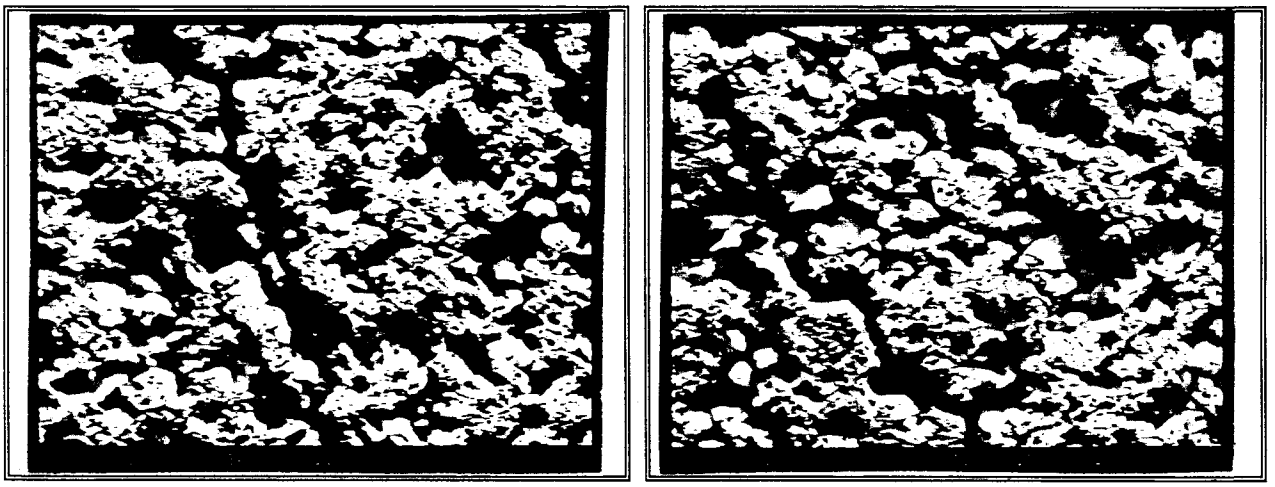
Dans la zone de localisation, l'estimation de la densité de fissuration varie considérablement entre la surface externe et le volume interne où les processus de localisation ont débuté. Bien qu'il permette l'exploration en surface dans les trois dimensions, le M.E.B. ne permet pas, l'évaluation d'une densité volumique de microfissuration. Cependant, une densité surfacique, établie sur la base du nombre moyen de fissures par grain et de la surface moyenne engendrée par un grain a été évaluée. On obtient sur la surface externe de l'éprouvette une densité

de 30 microfissures/mm^2 (90 fissures pour 50 grains) et sur une surface interne située entre le deuxième et le troisième plan, une densité de l'ordre de 250 microfissures / mm^2 (moyenne de 15 fissures / grain). Ces données sont fournies à titre indicatif et doivent être considérées avec circonspection. Signalons que ces densités ne tiennent compte ni de la dimension ni de l'envergure des dommages que chacune de ces fissures est amenée à provoquer. Ajoutons aussi que les fissures de frontières de grains dont les extrémités restent difficiles à distinguer ne sont pas recensées.

Plus proche du pic

L'examen de l'éprouvette déchargée entre 94 et 96 % de la résistance à la rupture met en évidence la présence d'une fissure transgranulaire de taille macroscopique (visible à l'oeil nu sur la photo 5P2b). De largeur moyenne inférieure à 100 µm, cette fissure évolue à partir de l'extrémité du diamètre transverse sur une distance d'environ 6 mm. Elle garde une orientation constante sur presque toute sa longueur (MP.9), faisant environ 10° avec la direction de la contrainte principale. Sur le dernier millimètre où sa propagation a cessé d'évoluer, elle exprime une tendance générale à s'incliner, qui lui donne un aspect particulier en s'échelonnant (MP.10). Les gros grains sont traversés, les petits contournés. Cette configuration permet à la fissure d'adopter une direction moyenne voisine de 30° par rapport à l'axe de chargement, comme pour épouser l'orientation de la bande de cisaillement future. L'observation de la zone voisine à cette fissure, n'indique pas de différence du point de vue microfissuration avec l'éprouvette déchargée entre 88 et 90 % de la résistance à la rupture.

(MP.9) (MP.10)

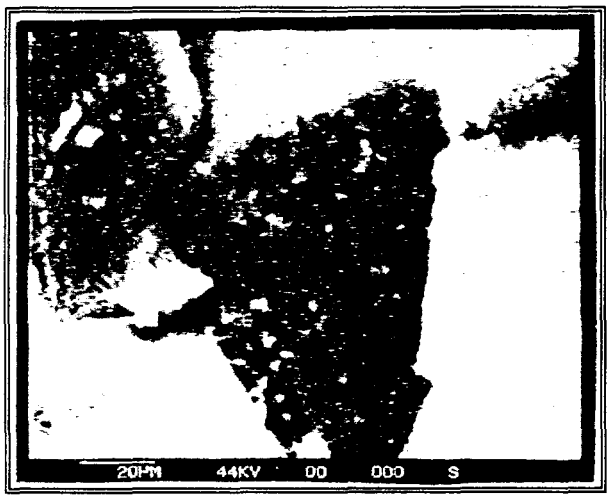


Microphotographies 9 & 10: Observation de la surface externe de la roche déformée entre 94 et 96 % de la résistance à la rupture de l'essai triaxial réalisé à 20 MPa de confinement. Fissure macroscopique transgranulaire (MP.9) et son extrémité (MP.10).

Fissuration et pression de confinement

Bien que la surface de la zone de localisation soit de taille moins importante à pression de confinement élevée (40 MPa), on y observe cependant une concentration de fissures plus élevée. Les fissures de frontière de grain sont toujours importantes en quantité, et les fissures intergranulaires sont plus nombreuses dans le grain (MP.11). Les fissures intergranulaires plus nombreuses constituent une conséquence directe liée à la réduction du vide interstitiel (pores). La pression de confinement plus élevée va en effet permettre des contacts physiques substantiels entre les grains frontaliers (MP.12) et les chargements grains sur grains deviennent davantage favorisés.

(MP.11)



(MP.12)

Microphotographies 11 & 12 : Observation d'une fissuration (axiale) plus abondante en surface (MP.11) et des frontières de grains fort endommagés (MP.11 et MP.12) dans l'essai triaxial mené à haute pression de confinement (Pc = 40 MPa).

Observation de la zone périphérique

Sur la périphérie de la zone de localisation, on note une présence dominante de fissures de frontières de grains mais les grains sont rarement fissurés. Les quelques fissures observées dans les grains de quartz (MP.13), partent d'une frontière de grain et finissent leur course avant d'atteindre l'autre. Ces fissures présentent généralement une terminaison fine qui indique que la décharge a stoppé leurs propagations.

On comprend bien que comme les grains sont de même nature, les fissures vont avoir tendance à les traverser. Dans la zone de localisation, le plus souvent, les microfissures traversent les grains de quartz et les contournent rarement. Cette tendance à l'air de s'inverser lorsqu'on examine la périphérie de cette zone. En revanche, à une distance équivalente à moins de trois à quatre grains de cette frontière, la structure du matériau ne semble présenter que quelques rares perturbations mais pas de dommage visible. Les rares microfissures observées (pas plus de 2 ou 3), souvent isolées, ne semblent pas particulièrement impliquées dans les mécanismes de la rupture macroscopique.

(MP.13)

Microphotographie 13 : Type de fissures ne traversant pas la totalité des grains observé dans la zone périphérique.

Conclusions

L'analyse des observations a permis de souligner le rôle essentiel joué par les hétérogénéités dans l'amorçage et la propagation de la fissuration. Les mécanismes qui dominent la phase post seuil dans le grès de Fontainebleau, soumis à des sollicitations triaxiales résultent essentiellement de mécanismes de traction. C'est cette composante de la contrainte de traction locale qui est à l'origine de l'amorçage, la propagation et le développement des premières microfissures dans la direction verticale. Elle donne naissance à une fissuration de grains de quartz et à des fissures de frontières de grains ; la dilatance locale observée visuellement, en est une conséquence directe. La fissuration axiale qui en résulte est à la base de la formation de la bande de cisaillement qui se fait par des liaisons entre les extrémités de fissures intergranulaires. Ces connexions s'établissent par la coalescence que permettent d'autres fissures de même type et les fissures de frontières de grains.

L'examen des échantillons déchargés au delà du seuil de localisation, suggère que durant la phase des déformations qui précède la rupture, la fissuration est gouvernée par la propagation d'un nombre considérable de fissures de traction parallèles à la contrainte principale majeure. La coalescence s'effectue à travers les grains, mais le plus souvent le chemin emprunté passe par les frontières de grains favorablement orientés. La densité de fissures autour du trou dans la zone de localisation dépend essentiellement de la profondeur au coeur de la roche, où les observations rendues possibles ont été réalisées. L'augmentation du niveau du déviateur où le déchargement de l'éprouvette a été réalisée met en évidence la naissance d'une fissure de taille macroscopique mais n'indique pas de manière évidente une densité de microfissuration plus élevée. En revanche, l'augmentation de la pression de confinement conduit à une fissuration intergranulaire plus importante.

Rappelons que toutes les données d'observation sont obtenues après que la contrainte macroscopique a été supprimée, et il nous incombe de souligner deux points essentiels :

(i) concernant le déchargement de la contrainte axiale, bien que la pression de confinement soit maintenue jusqu'à ce qu'elle soit complètement achevée, il n'est pas exclu que les décollements des lèvres de fissures observés résultent de déplacements relatifs lors du retour à l'état hydrostatique.

(ii) et s'agissant de la décharge de la pression hydrostatique, l'estimation des largeurs des fissures pourraient être erronées car il est probable que celles ci résultent d'un état d'équilibre durant cette opération comme le suggère Kranz (1979b).

V-2-2-2 : MECANISMES ELEMENTAIRES

Les thèmes développés dans ce paragraphe sont synthétisés à partir de l'ensemble des observations réalisés à l'oeil nu et surtout au M.E.B.. On y analyserons et discuterons essentiellement la manière avec laquelle les liaisons et connexions aboutissent à la coalescence qui mène à la formation de la bande de cisaillement.

Amorçage

Les points de chargement des grains de quartz par d'autres, orientés différemment, ou encore une hétérogénéité sont les principales causes de l'amorçage des microfissures observées dans le grès sollicité en compression triaxiale.

Les fissures transgranulaires s'amorcent sur les points de contact de frontières de grains et les fissures intergranulaires traversent souvent ces points de contact. Lorsque la contrainte macroscopique externe est appliquée, ces points et lignes de contacts constituent probablement des lieux où siègent de grandes concentrations de contraintes. Les fissures intergranulaires, lorsqu'elles traversent un grain adoptent proche des extrémités, la direction perpendiculaire aux frontières des deux grains en contact. En raison des interactions, ces fissures s'amorcent (probablement soudainement) sur un point de contact ou à partir d'une hétérogénéité de manière instable. Puis à un niveau de la contrainte déviatorique donnée, elles se développent dans la direction axiale. Une fois que la fissure est créée, la zone proche qui l'entoure est relaxée produisant une chute de la contrainte locale. Elle aura ensuite tendance à se propager dans la direction où se situe le maximum de contrainte locale (un autre point de contact ou un vide interstitiel).

Propagation et trajectoires

Sur son chemin de propagation, la présence d'un ou plusieurs grains de taille ou d'orientation différentes, d'un vide interstitiel, d'une autre fissure et parfois même d'une hétérogénéité provoque des déviations qui résultent d'une perturbation de la distribution locale des contraintes. Une fissure intergranulaire, ne se propage dans une direction donnée que si ce chemin la mène vers le point le plus proche où la contrainte locale est la plus élevé. Les liaisons consistent globalement à assurer un lien entre les points, les lignes et les surfaces de contact entre grains de quartz frontaliers. Les connexions observées s'effectuent le plus souvent via les frontières de grains. La trajectoire s'organise de sorte à privilégier la frontière la plus proche de la parallèle à l'axe de chargement, à moins qu'un autre point de contact ou un vide interstitiel ne provoque sa déviation.

LIAISONS ET CONNEXIONS

Il s'agit de trouver les mécanismes physiques à l'origine de la formation de la bande de cisaillement dans l'échantillon de grès soumis à un champ de contraintes déviatorique. Concernant ce point précis, nos observations microscopiques suggèrent deux parmi les quatre possibilités de connexions suggérés par la littérature et que nous avons souligné au premier chapitre. La figure 5.7 résume les deux types de liaison possibles retenues. La combinaison de ces deux modes de liaison est également envisagée.

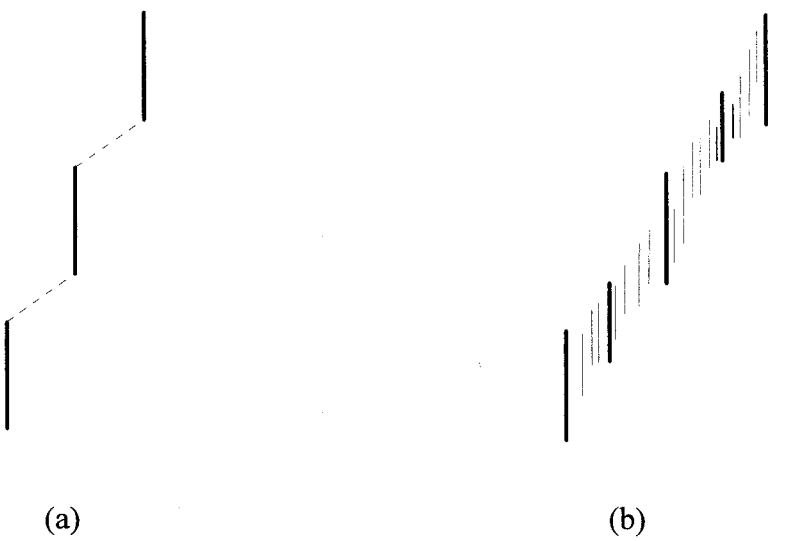


Figure 5.7 : Schématisations des deux types de connexions élémentaires impliquées dans la formation de la bande de cisaillement dans les essais de compression réalisés sur le grès.

Nos observations ont montré la rareté des fissures de cisaillement dans le grès, même lorsqu'on atteint des niveaux de contrainte comprises entre 94 et 96 % du pic. Ces constatations indiquent que les fissures axiales constituent le mode principal qui précède le cisaillement macroscopique dans l'essai triaxial. Nous avons recensé moins de 10 fissures de cisaillement sur environ les 200 microfissures étudiées. Il semble donc que l'une ou l'autre des schématisations proposées, représentée par la figure 5.7, serait proche des mécanismes de connexion menant à la formation de la bande de cisaillement dans le grès de Fontainebleau dans l'essai de compression triaxiale.

Comme nous l'avons souligner dans le chapitre 1, dans la littérature, une polémique existe sur la manière avec laquelle les fissures de liaisons s'organisent dans cet échelonnement à partir de fissures axiales. Certains considèrent que la liaison des extrémités des fissures de traction s'effectue par des fissures de cisaillement inclinées (figure 5.7a), d'autres suggèrent que les fissures axiales se regroupent en réseaux et que des fissures de liaison joignent les parois de ces fissures provoquant des colonnes de matériau qui gauchissent (combinaison des deux modes de la figure 5.7). Une troisième école propose plutôt que ces connexions résultent du déploiement latéral de fissure axiales très courtes, légèrement désaxés qui se chevauchent formant ainsi un réseau de fissures connectées en échelon (figure 5.7b).

Dans un grain, nos observations ont parfois laisser apparaître que les liaisons entre deux fissures axiales s'amorçant sur un point de contact se faisait d'une manière qui rappelle l'une ou l'autre des deux schématisations de la figure 5.7. Dans certains cas, il a été observé des lignes en zigzag qui joignent les extrémités de ces deux fissures. Un exemple est illustré sur le grain en bas à gauche de la microphotographie MP.12. Dans le cas de la microphotographie MP.7, on peut distinguer sur le grain situé à gauche que les deux microfissures axiales qui partent des deux points de contact, étaient en voie de raccordement. La connexion de leurs extrémités semble s'organiser par plusieurs fissures intragranulaires inclinées qui ne se chevauchent pas. Lorsque la pression de confinement est élevée, on observe aussi dans le grain des connexions qui s'établissent par des fissures fort inclinées ou même parfois, quasiment horizontales, reliant les parois de fissures intergranulaires (MP.5).

On peut avancer l'hypothèse que le seuil de localisation des déformations coïncide avec la sélection d'une surface de rupture et sont des événements quasi simultanés. Le prolongement de la zone où les déformations ont localisé, par un développement de la microfissuration menant à la formation de cette surface s'effectue en fait de manière progressive. Les observations microscopiques indiquent que quelle que soit la trajectoire sinueuse suivie par une fissure transgranulaire impliquée, sa propagation d'un point à l'autre montre une tendance qui épouse progressivement l'orientation moyenne des surface de rupture observées. Cela sous entend bien évidemment qu'une interdépendance est imposée par les interactions, qui arbitre cette coalescence et conforte l'hypothèse d'une orientation de bande de cisaillement intrinsèque au matériau, pour un chemin de sollicitation donné.

V-2-3 : CONCLUSIONS

La zone de localisation siège dans un volume interne de l'éprouvette et se développe autour d'une hétérogénéité prépondérante, imposée ici au moyen d'une petite ouverture cylindrique. Elle se présente sous forme d'une zone très fine dont la configuration évolue et conduit à son émergence en surface. Lorsque ses dimensions deviennent importantes, elle s'étend rarement au dessus d'une distance supérieure à trois fois le diamètre du trou. Elle va se développer de façon à privilégier la relaxation totale de la zone qui l'entoure et provoquer une détente partielle des zones voisines à densité de microfissuration élevée.

L'interaction de microfissures et les hétérogénéités de contraintes fournissent une explication de la formation de zones de déformations intenses à partir des fissures axiales. Les déviations dans les chemins de propagation observées résultent principalement de l'état de la microstructure locale et en particulier, de l'orientation et la morphologie des grains et des discontinuités voisines les plus proches, naturelles ou récemment induites par la contrainte déviatorique. Les observations indiquent clairement que la bande de cisaillement se forme plus par un processus d'extension que par des mécanismes de cisaillement. Cependant, il est clair que l'interaction entre les fissures axiales seules, n'explique pas les phénomènes de rupture observées. Les interactions entre microfissures ou entre microfissures et frontières de grain ou encore entre microfissures et vides interstitiels peuvent être considérés comme les principaux facteurs contrôlant la rupture macroscopique.

Néanmoins, l'examen des surfaces des échantillons précontraint suggère que durant la phase des déformations qui précédent la rupture, la fissuration met en cause la propagation d'un nombre considérable de fissures de traction de direction parallèles à la contraintes principale. Toutefois, au vu des résultats expérimentaux concernant les lignes et surfaces de rupture, nous admettrons qu'une fois le pic atteint, la déformation qui précède le saut de contrainte observé est principalement régie par le glissement causé par une propagation (très rapide) de fissures de cisaillement inclinées comme le suggèrent Wawersik et Brace (1971), Rice (1980) et Wong (1982b).

CONCLUSIONS

L'étude présentée dans ce mémoire a porté sur la localisation des déformations dans le grès de Fontainebleau. Il s'agit d'une roche homogène, de porosité moyenne et présentant, de par la proportion importante de quartz entrant dans sa composition minéralogique, une susceptibilité à la microfissuration. Le phénomène de localisation est vu comme une transition qui marque le passage d'un mode de microfissuration diffuse à un mode de fissuration localisée. La détermination expérimentale de cette transition, s'est délibérément située à l'échelle macroscopique. L'analyse des réponses s'est en grande partie appuyée sur la détection du moment où les déformations deviennent non homogènes, par anisotropie de la dilatance. Les essais de laboratoire ont concerné une large gamme de test en sollicitations multiaxiales et nous permettent de disposer maintenant de données en nombre relativement important sur le grès utilisé dans cette étude.

Nous avons dans un premier temps procédé à une caractérisation du comportement mécanique de base du matériau sous compression multiaxiale conventionnelle. L'isotropie initiale a été clairement mise en évidence. En compression triaxiale, le matériau a un comportement isotrope transverse, fortement non linéaire et dilatant. Ce comportement est associé à un développement orienté de la microfissuration. Afin d'évaluer la dégradation anisotrope liée à cette microfissuration, une série d'essais cycliques a été réalisée. L'endommagement latéral atteint des niveaux importants à l'approche de la rupture (environ 0,8), tandis que l'endommagement axial reste faible (0,1 - 0,2). Une modélisation adéquate du comportement du grès en vue d'une analyse en terme de bifurcation doit donc intégrer cette dégradation. A ce propos, les études menées en parallèle par Diouta (1995) sur nos données expérimentales n'ont abouti qu'au prix d'une modélisation micromécanique non coaxiale proposée par Nemat-Nasser (1993), la plasticité non associée s'étant révélée insuffisante.

La méthodologie de détection de la localisation adoptée, repose sur une procédure expérimentale simple, pratique dans sa mise en oeuvre et n'exigeant pas un équipement matériel particulier. Elle est essentiellement basée sur les mesures multiples de déformations (Hadley, 1975b; Santarelli, 1987, 1989 et 1990). Malgré sa simplicité, elle a montré son efficacité, particulièrement dans les essais de compression multiaxiale réalisée sur les plaques rectangulaires. A cet effet, un collier de mesure mis au point, a été utilisé pour mesurer les déformations latérales avec une grande précision.

L'analyse des réponses macroscopiques a permis de déterminer les seuils de localisation, de caractériser les modes de rupture, d'évaluer l'orientation moyenne des surfaces de rupture et d'estimer l'épaisseur des bandes de cisaillement. Il est apparu dans ce contexte que la pression de

confinement est le paramètre qui conditionne non seulement le mode de rupture, mais intervient également dans les mécanismes microscopiques et les manifestations macroscopiques de la rupture. La résistance, le seuil de localisation, l'orientation et l'épaisseur des lignes de rupture, la microfissuration et la dilatance qui en résulte sont fonction de la pression de confinement.

Nous avons ainsi pu obtenir dans les essais sur plaques rectangulaires des seuils de localisation que l'on peut grossièrement situer à 90 % du pic de contrainte dans l'essai de compression uniaxiale et entre 75 et 80 % dans l'essai triaxial. Dans ces derniers, les bandes de cisaillement font environ 30° par rapport à la contrainte principale majeure. Les épaisseurs des bandes de localisation, varient de 1 à 2 mm; elles sont difficiles à évaluer de manière objective, les bandes étant souvent délimitées par une zone blanchâtre à épaisseur variable. La pression de confinement influe peu sur les orientations alors que son effet sur les épaisseurs des bandes (diminution) et sur le seuil de localisation (de plus en plus tôt par rapport au pic) n'est pas négligeable.

Afin de mieux contrôler les conditions de localisation et d'améliorer le dispositif de mesures par l'adjonction de mesures locales, des essais ont été ensuite réalisés sur des plaques rectangulaires contenant une petite ouverture cylindrique. Il n'a pas été enregistré de modification notable dans les réponses du matériau et les seuils de localisation. En revanche, les orientations moyennes des bandes sont nettement diminuées (24-28°). La mesure de la déformation locale dans la direction perpendiculaire des lignes de rupture nous a permis de confirmer que le seuil de localisation marque une transition dans l'une des directions entre les deux modes fondamentaux: contraction - extension. Dans l'autre direction, cette transition est marquée par le début de la propagation instable de la fissuration.

Dans les essais sur plaques (percées ou non), les variations des résistances et des seuils de localisation en fonction de la pression de confinement peuvent être décrites par des lois linéaires. Nous avons également mis en évidence des niveaux de déformations critiques et nous avons établi en particulier, une déformation volumique critique de l'ordre de 2.00 10^{-3}, pratiquement indépendante de la pression de confinement. Les grandes différences observées sur les modules d'écrouissages expérimentaux et les modules d'écrouissage théoriques suggèrent qu'une bonne modélisation (réaliste) des phénomènes de déformation et de rupture observée, exige que l'on s'appuie davantage sur des variables représentatives de l'état du milieu à l'échelle de la microstructure.

L'influence de la taille de l'imperfection introduite a été étudiée. L'analyse des réponses, a notamment permis de souligner certains aspects propres aux mécanismes de la rupture fragile liés à la présence et à la taille des hétérogénéités. On a noté en particulier, que les points d'amorçage de la rupture sur le contour du trou varient selon le type de test de compression. La rupture s'amorce des deux extrémités du diamètre parallèle à l'axe de chargement dans le cas de la compression uniaxiale. Dans l'essai triaxial, elle s'amorce systématiquement sur les deux extrémités du diamètre transverse, la transition entre ces deux modes d'amorçage s'effectue pour une pression de confinement inférieure à 10 MPa. Il est compréhensible qu'une hétérogénéité de structure relativement importante soit à l'origine d'une rupture prématurée Lorsque l'ouverture cylindrique devient de taille relativement importante. Mais le seuil de localisation, confondu avec le début de la propagation instable de la fissuration garde cependant une position inchangée par rapport au pic de contrainte. Ces constatations suggèrent que les mécanismes de propagation instable sont à la base des processus qui mènent à la localisation des déformations.

L'étude de l'influence de l'épaisseur des plaques rectangulaires et de la forme géométrique des éprouvettes a été conduite afin d'en évaluer le poids. Elle a permis d'établir que le seuil de localisation, dépend essentiellement du matériau et du chemin de sollicitation. S'agissant des autres manifestations macroscopiques du comportement fragile, on note en particulier que les niveaux de contraintes qui marquent les étapes successives du développement de la microfissuration restent inchangés si le volume de l'éprouvette est maintenu, et cela indépendamment de sa forme géométrique.

Indépendamment des conditions particulières traitées, le seuil de localisation s'écarte systématiquement du pic lorsqu'on augmente la pression de confinement. Si on réalise une estimation pondérée, qui tient compte de la forme de l'éprouvette (cylindrique ou prismatique), de l'imperfection induite de taille macroscopique ou non, la localisation se produit entre 85 et 90% de la résistance à la rupture dans l'essai de compression uniaxiale. Dans les essais triaxiaux, elle a lieu à 82 % pour une pression de confinement de 10 MPa et autour de 75 % de la résistance à la rupture pour une pression de confinement comprise entre 20 à 40 MPa.

L'examen des bandes de localisation naissantes a été réalisé sur des éprouvettes contenant l'ouverture circulaire de diamètre 3 mm, déchargées dans l'essai triaxial à des niveaux élevées de la contrainte déviatorique (88 - 96 %). L'examen de ces zones à l'œil nu puis leur exploration en profondeur avec le M.E.B., montrent d'abord que la localisation se développe au coeur de l'éprouvette dans une zone très fine. La rupture à pour origine une concentration de contrainte locale transverse à l'endroit d'un point de faiblesse prépondérant, présent dans le matériaux. Les

observations en profondeur montrent clairement que comme dans le cas de la rupture axiale, la bande de cisaillement se matérialise par des mécanismes physiques de traction. Le développement et les interactions des fissures axiales et les hétérogénéités de la distribution des contraintes locales qui en résultent peuvent être considérés comme les principaux facteurs qui contrôlent la rupture macroscopique du grès.

Cependant, malgré les résultats et les objectifs que nous avons pu atteindre, et les corrélations locales et microscopiques substantiels que nous avons pu obtenir, il serait intéressant, voire nécessaire de les parfaire en utilisant d'autres techniques. La tomodensitométrie que nous avons essayé de mettre en oeuvre n'a pas donné de résultats probants à cause de problèmes d'étalonnage. La résistivité a également été tentée dans une collaboration Gréco Géomatériau (Journiaux et al., 1992), mais là encore la difficulté est technique et n'a pas pu être mise en place à cause des conditions spécifiques qu'exige cette méthode, la taille trop importante de nos éprouvettes a également constitué un obstacle. Par ailleurs, l'absorption gazeuse (B.E.T.) a été utilisée sur des éprouvettes déchargées à différents niveaux de contrainte, mais l'observation des surfaces des éprouvettes au M.E.B. a été plus instructive. En revanche, l'absorption gazeuse ou encore des mesures fines de la perméabilité en cours de chargement peuvent donner des indications quantitatives intéressantes. Il serait également intéressant de recouper nos observations par des techniques tel la tomodensitométrie ou le granularité laser dans l'essai uniaxial ou éventuellement dans l'essai biaxial. Le plus intéressant serait en fait l'usage simultané de notre méthode est d'une autre méthode quantitative, nous pensons en particulier à l'émission acoustique.

Au point de vu modélisation, les résultats obtenus par Diouta (1995) ouvrent une voie de rapprochement entre la nécessité d'une description fine du comportement du grès (endommagement) en adéquation avec les données sur la localisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Absi A. (1990), " Vibration et dynamique des structures : propagation des ondes". 2ème partie, Annales de l' I.T.B.T.P., N° 489, pp. 1-22.

Arthur J. R. F., Dunstan T., Al Ani Q. A. J. L. & Assadi A. (1977), "Plastic deformation and failure in granular media". Geotechnique 27, N° 1, pp. 53-74.

Ashby M. F. & Hallam S.D. (1986), "The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states". Acta Metall., Vol. 34, pp. 497-510.

Bascoul A., Zizi Z.; Torrenti J. M.; Benaija E. H. & Berthaud Y. (1992), "Microfissuration et localisation en compression simple dans le béton". Gréco Géomatériau, Rapport scientifique, pp. 171-176.

Bascoul A., Benaija E. H., Berthaud Y., Fond C., Massat M. & Torrenti J. M. (1993), "Analysis of localization in concrete and rocks through stereophotogrametry, speckle laser and replica". Cement and Concrete Research, Vol. 26, N° 6, pp. 1340-1350.

Bauer S. J. & **Johnson B.** (1979), "Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites". Proc. 20th. US. Symp. Rock Mech. Austin, Texas, pp. 7-18.

Benaija E. H. (1992), "Application de la stéréophotogrammétrie au béton. Cas de la compression simple". Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Benaija E. H., Boulay C., Delahousse, Dubuet, Torrenti J. M., Bertaud Y. & Fond C. (1990), "Etude de la localisation dans un grès des vosges". Rapport scientifique, Gréco Géomatériaux, pp. 181-184.

Bishop A. W. & Henkel D. J. (1962), "The measurement of Soil properties in the triaxial Test". Edward Arnold Publisher, London.

Benouniche S. (1979), "Modélisation de l'endommagement du béton hydraulique par microfissuration en compression". Thèse de Doctorat de 3éme cycle, Paris 6.

Berthaud Y. (1987), "Mesure de l'endommagement mécanique du béton par méthode ultrasonore". 1er Congrés Int. RILEM, Paris.

Berthaud Y. (1991), "Mesures et modélisations de l'endommagement des matériaux". Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 6.

Bieniawski Z. T. (1967), MECHANISM OF BRITTLE FRACTURE OF ROCK : Part I : "Theory of the fracture process"; pp. 395, 406. Part II : "Experimental studies"; pp. 407-423. Part III : "Fracture in tension and under long-term loading"; pp. 425-430. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 4, pp. 395-430.

Bombolakis E. G. (1973), "Study of the brittle fracture process under uniaxial compression". Techtonophysics, Vol. 18, pp. 231-248.

Bourbie T., Coussy O. & Zinszner B. (1987), "Acoustique des milieux poreux". Publication de l'IFP, Collection : Science et Technique du Pétrole, N° 27.

Brace W. F., Paulding B. & Scholz C. H. (1966), "Dilatancy in the fracture of crystalline rocks". J. Geophys. Res., Vol 71, pp. 3939-3954.

Brady B. T. (1969), "A statistical theory of brittle fracture for rock materials". Part I: Brittle failure under homogeneous axisymmetric states of stress". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6, pp. 21-42.

Brady B. T. (1974), "Theory of earthquakes I". A scale independent theory of rock failure. Pure and Appl. Geophys., Vol. 112, pp. 701-725.

Brodsky N. S. & Spetzler H. (1984), "Strain localization during deformation of Westerly granite". Rock Mec. in Productivity & Protection, Proc. 25th Symp. on Rock Mech., ed. Dowding C. H. & al., Soc. Min. Engrs. AIME, pp. 87-94, New York.

Byerlee D. J. & Lockner D. A. (1977), "Acoustic emission during fluid injection into rock". In: Proc. First Conf. Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials. Penn. State univ. june 1975. ed. Hardy & al., pp. 87-98.

Chambon R. (1981), "Contribution à la modélisation numérique non-linéaire des sols". Thèse de doctorat es sciences, Grenoble.

Cordebois J.P.& Sidoroff F. (1979), "Endommagement anisotrope en élasticité et en plasticité". J. de Mécanique Théorique et Appliquée, Vol. 1, pp. 69-84.

Critescu N. D. (1989), "Rock Rheology". KLUNER Academic Publisher.

Darve F. & Lefevre (1981), "Etude de la rupture des argiles structurées comme un problème de bifurcation". Journée de Rhéologie. ENTPE. Lyon.

Darve F. (1985), "Rupture d'argiles naturelles par surface de cisaillement à l'essai triaxial". Revue Française de Géotchnique N° 23.

Darve F., Hicher P. Y. & Reynouard J. M. (1995), "Etudes en mécanique des matériaux et des structures". Hermès, Paris.

Desrues J. (1984), "Localisation de la déformation dans les matériaux granulaires". Thèse d'Etat, INP Grenoble.

Desrues J. (1987), "Naissances des bandes de cisaillement dans les matériaux granulaires". Manuel de Rhéologie des géomatériaux, Presse de l'ENPC, Paris.

Desrues J. (1989), "Maillage et fissures, adaptation d'une méthode stéréophotogrammétrique développée à l'IMG". Rapport de contrat LCPC/IMG, 05/06/89.

Desrues J. (1992), "Strain localisation in geomaterials, experimental basis". Continuing education course "Strain localisation and failure in geomaterials". Politecnico di Milano.

Dey T.N. & Wang C. Y. (1981), "Some mechanims of microcrack growth and interaction in compressive rock failure". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 18, pp. 199-209.

Diouta N. G., Haïed A., Kondo D. & Shao J. F. (1994), "Experimental and numerical analysis of strain localization in two rock materials". Proc. US. Symp., ed. Balkema, pp. 93-98.

Diouta N. G. (1995), "Analyse numérique de la localisation dans les matériaux rocheux". Thèse de Doctorat, Université de Lille.

Dunn D. E., La Fountain L. T. & Jackson R. E. (1973), "Porosity dependance and mechanism of brittle fracture in sandstones". J. Geophys. Res. Vol. 78, pp. 2403-2417.

Dunning J. D., Lewis W. L. & Dunn D. E. (1980), "Chemomechanical weahennig in the presence of surfactants".J.Geophys. Res. Vol. 85, pp. 5344-5354.

Edmond J. M. & Paterson M. S. (1972), "Volume changes during the deformation of rocks at high pressures". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, pp. 161-182.

Fairhurst C. & Cook N.G.W. (1966), "The phenomenom of rock splitting parralel to a free surface under compressive stress". Proc. First Cong. Int. Soc. Rock mech., Vol. 1, pp. 687-692, Lisbon.

Farmer I. (1983), "Engeneering behaviour of rocks", 2nd édition, Chapman and Hall.

Friedman M., Perkins R. D. & Green S. J. (1970), "Observation of brittle deformation fractures at the maximum stress of Westerly granite and Solenhofen limestone". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, pp. 297-306.

Gallagher J. J., Friedman M., Handing J. & Sowers G. M. (1974), "Experiment studies relating to microfracture in sandstone". Tectonophysics, Vol. 21, pp. 203-247.

Gotuwka V. (1994), "Etude expérimentale de l'endommagement anisotrope du grès de Fontainebleau". Mémoire de DEA, Université de Lille.

Habib P. (1985), "Les surfaces de glissement en mécanique des sols". Revue Française de Géotchnique N° 23.

Hadley K. (1975a), "Vp / Vs anomalies in dilatant rock samples". Pure Appl. Geophys. Vol. 113, pp. 1-23.

Hadley K. (1975b), "Azimutal variation of dilatancy". J. Geophys. Res., Vol. 80, pp 4845-4850.

Hadley K. (1976), " Comparaison of calculated and observed crack densities and seismic velocities in Westerly granite". J. Geophys. Res., Vol. 81, pp. 3484-3494.

Haïed A., Kondo D. & Henry J.P. (1993a), "Analyse expérimentale de la localisation des déformations dans un grès". Congrès Français de Mécanique, Lille, Vol. 4, pp. 477-480.

Haïed A., Kondo D. & Henry J.P. (1993b), "Experimental detection of shear bands in a sandstone". Assessment and prevention of failure phenomena in rock engineering, pp. 149-154, Turkey.

Hadamard J. (1903), "Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l'hydrodynamique", chapitre 6, Hermann Paris.

Hallbauer D.K., Wagner H. & Cook N.G.W. (1973), "Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests". Int. J. Rock mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 10, pp.713-726.

Hammad W. I. (1991), "Modélisation non linéaire et étude expérimentale des bandes de cisaillement dans les sables". Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble..

Henry J P. & Homand F. (1990), "Apport des capteurs acoustiques dans l'étude du comportement rhéologique des géomatériaux". ENTROPIE, N° 155, pp. 92-95.

Henry J P., Paquet J. & Tancrez J. P. (1977), "Experimental study of crack propagation in calcite rocks". Int. J. Rock mech. Min. Sci. Geomech., Vol. 14, pp. 85-91.

Henry J Y. (1980), "Plaque percée d'un trou et soumise en compression. Etude des conditions de propagation de la fissure de traction". Thèse de Doctorat, Université de Lille.

Hicher P. Y., Wahyudi H. & Tessier D. (1994), "Microstructural analysis of strain localization in clay". Computer & Geotechnics, Vol. 16, pp. 205-222.

Hill R. (1962), "Accelation waves in solids". J. Mech. Phys. Solids, Vol. 10, pp. 1-16.

Hoek E. & Bieniawski Z. T. (1965), "Brittle fracture propagation in rock under compression". Int. J. Fracture Mechanics, Vol. 1, N° 3, pp. 137-155.

Hoek E. & Brown E. T. (1980), "Underground excavations in rock". The Institution of Mining and Metallurgy, London.

Holcomb D.J. (1992), "Localization studies under triaxial conditions". Proc. US. Symp., pp. 661-670, Rotterdam: Balkema.

Homand F., Houpert R., & Troalen J. P. (1987),"La fissuration thermique dans le grès de Fontainebleau". Rapport Gréco Géomatériaux, pp. 46-62.

Horii H. & Nemat-Nasser S. (1985), "Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure". J. Geophys. Res., Vol. 90, pp. 3105-3125.

Ikogou S. (1990), "Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un grès". Thèse de Doctorat, Université de Lille I.

I.S.R.M. (1979), Commision on Standardization of Laboratory and Field Tests : "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock". pp. 137-140. "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties". pp. 141-156. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 16, N° 2, pp. 137-156.

I.S.R.M. (1983), "Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression : revised version". Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 20, N° 6, pp. 285-289.

Jaeger J. C. & Cook N. G. W. (1976), "Fondamentals of rock mechanics". 2nd ed. London; Chapman & Hall.

Journiaux L., Pozzi J.P., Haïed A. & Kondo D. (1992), "Détection de l'apparition de bandes de cisaillement dans les roches : mesures électriques". Gréco géomatériaux, discontinuités, Rapport scientifique, pp. 177-182.

Kachanov L.M. (1958), "Time of the rupture process creep conditions". Izv. Akad. Nauk SSR Otd Tekh. Nauk , Vol. 8, pp. 26-31.

Kemeny J. M. & Cook N. G. W. (1987), "Crack models for the failure of rocks in compression". 2nd Int. Conf. & Short Course on constitutive Laws for Engng. Mat., ed. Desai et al., USA.

Kranz R.L. (1979a), "Crack growth and development during creep of Barre granite". Int. J. Rock.Mech. Min. Sci. , Vol. 16, pp. 23-35

Kranz R.L. (1979b), "Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite". Int. J. Rock.Mech. Min. Sci., Vol. 16, pp. 37-47.

Kranz R.L. (1980), "The effects of confining pressure and stress difference on static fatigue of granite". J. Geophys. Res., Vol. 85, pp. 1854-1866.

Kranz R.L. (1983), "Microcrack in rocks: a review". Tectonophysics, 100, pp. 449-480.

Labuz J. F., Shah S. P. & Dowding C. H. (1985), "Experimental analysis of crack propagation in granite". Int. J. Rock.Mech. Min. Sci.& Geomech., Vol. 22, N° 2, pp. 85-98.

Labuz J. F. & Biolzi L. (1991), "Class I vs Class II Stability : A Demonstration of size effect". Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.28, pp. 199-205.

Lajtai E. Z. & Lajtai V. N. (1975), "The collapse of cavities". Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.12, pp. 81-86.

Lajtai E. Z., Carter B. J. & Duncan E. J. S. (1994), "En echelon crack-arrays in potash salt rock". Rock.Mech. Rock. Engng. Vol. 27, N° 2, pp. 89-111.

Lemaitre J. & Chaboche J.L. (1978), "Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement". J. de Mécanique théorique et Appliquée, Vol. 2, N° 3, pp. 316-365.

Lemaitre J. & Dufailly (1987), "Damage measurements". Eng. Fracture Mechanics, Vol. 28, N° 5 & 6, pp. 643-661.

Lemaitre J. (1990), "A course on damage mechanics". Springer Verlag, Berlin.

Liu H. P. & Livanos A. C. R . (1976), "Dilatancy and precursary bulging along incipient fracture zones in uniaxially compressed Westerly granite". J. Geophys. Res., Vol. 81, pp. 3495-3510.

Lockner D. A. & Byerlee J. D. (1977), "Acoustic emission and fault formation in rocks". In Proceedings of 1st Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials", ed. by H. R. Hardy & al., pp. 99-107, Germany.

Lockner D. A., Walsh J. B. & Byerlee J. D. (1977), " Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite". J. Geophys. Res, Vol. 82, pp. 5374-5378.

Lockner D. A. & Byerlee J. D. (1992), "Fault growth and acoustic emissions in confined granite". Appl. Mech. Rev., Vol. 45, N° 3, part 2, pp. 165-173.

Loret B. & Prevost J.H. (1990), "Dynamic strain localisation in elasto-(visco-) plastic solids-Part 1: General formulation and one dimensional example". Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 83, pp. 247-273.

Mandel J. (1964), "Condition de stabilité et postulat de Drucker". Rhéologie et Mécanique des Sols, ed. Kravtchenko et Syries, IUTAM Symposium, Grenoble.

Martin C. D. & Chandler N. A. (1994), "Progressive fracture of lac du Bonnet granite". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, N° 6, pp.643-659.

Millien A. & Boehler J. P. (1990), "Apparition de bandes de cisaillement dans les roches anisotropes". Groupement Géomécanique des Roches Profondes, Rapport d'études 89-90.

Mosher S., Berger R. L. & Anderson D. E. (1975), "Fracturing characteristics of two granites." Rock Mech., Vol. 7, pp.167-176

Mühlhaus H. B. & Vardoulakis I. (1987), "The thickness of shear bands in granular materials". Geotechnique, Vol. 37, N°3, pp. 271-283.

Myer L. R., Kemeny J. M., Zheng Z., Suarez R., Ewy R. T. & Cook N. G. W. (1992), "Extensile cracking in porous rock under differential compressive stress". Applied Mech. Review, Vol. 45, N° 8, pp. 263-280.

Nadai A. (1950), "Theory of flow and fracture of solids". Mc Graw-Hill, Chap. 18, pp. 275-296.

Needelman A. (1988), "Material rate dependence and mesh sensitivity in localization problems". Com. Meth. Appl. Mech. Engnrng., Vol. 67, pp. 69-85.

Nemat-Nasser S. & Horii H. (1993), "Micromechanics: Overall properties of heterogeneous materials". Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.

Nolen Hoeksema R. C. & Gordon R. B. (1987), "Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, N° 2, pp.135-144.

Nur A. & Simmons G. (1970), "The origin of small cracks in igneous rocks". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol 7, pp. 307-314.

Olsson W. A. (1974), "Microfracturing and faulting in a limestone". Techtonophysics, Vol. 24, pp. 277-285.

Olsson W. A. & Peng S.S. (1976), "Microcrack nucleation in marble". Int. J. Rock Mech. Sci. , Vol.13, pp. 53-59.

Ord A., Vardoulakis I. & Kajewski R. (1991), "Shear band formation in Godsford sandstone". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 28, N° 5, pp. 397-409.

Paterson M. S. (1958), "Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble". Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 69, pp.465-476.

Paterson M. S. (1978), "Experimental rock deformation- The brittle field". Springer-Verlag

Peng S. S. & Johnson A. M. (1972), "Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chemsford granite". Int. J. Rock Mech. Min. Sci.,Vol. 9,pp. 37-86.

Petit J. P. & Barquins M. (1990), " Localisation des bandes de cisaillement par des défauts préexistants : données expérimentales". Groupement Géomécanique des Roches Profondes, Rapport d'études 89-90.

Pijaudier-Cabot G. S. & Bazant Z. P. (1987), "Nonlocal damage theory". J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 113, N° 10, pp. 1512-1533.

Pollard D. D., Segall P. & Delaney P. T. (1982), "Formation and interpretation of dilatant echelon cracks", Bull. Geol. Soc. Ann., Vol. 93, pp. 1291-1303.

Prevost J. H. & Loret B. (1990), "Dynamic strain localisation in elasto (visco-) plastic solids- Part 2 : Plane strain examples". Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 83, pp. 275-294.

Ramsay J. G. (1967), "Folding and Fracturing of Rocks". Mc Graw-Hill, New-York.

Ramsay J. G. (1980), "Shear zone geometry : a review". Journal of Structural Geology, Vol. 2, N° 1 , pp. 83-99, Great Britain.

Rao M. V. M. S. & Ramana Y.V. (1974), "Dilatant behaviour of ultramafic rocks during fracture". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 11, pp. 193-203

Raynaud S. (1992), "Analyse microstructurale de la marne de Beaucaire déformée expérimentalement dans la cellule scan triaxial". Groupement Géomécanique des Roches Profondes. Rapport 1 (06/92) & Rapport 2 (10/92).

Reynolds O. (1901), "Experiments showing dilatancy, a property of granular material, possibly connected with gravitation". Sci. Pap. 2, pp. 217-227, Cambridge University Press, New-York.

Rice J. R. (1976), "Theoretical and applied mechanics", Chapter : "The localisation of plastic deformation". ed. W. T. Koiter, North Holland, Amsterdam.

Rice J.R. (1980), "The mechanics of earthquake rupture".In Physics of the Earth'Interior, edited by A.M. Dziewonski and E. Boschi, Italian Physical Society, Bologna, Italy

Rice J.R. & Rudnicki J.W. (1980), "A note on some features of the theory of localisation of deformation". Int. J. Solids Structures., Vol. 16, pp. 597-605.

Ringot E. , Ollivier J. P. & Maso J. C. (1987), "Characterization of initial state concrete by scanning electron microscopy". Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp. 411-419.

Roscoe K. H. (1970), "The influence of strains in soil mechanics". Geotechnique 20, N° 2, pp. 129-170.

Rossi P., Robert J. L., Gervais J. P. & Bruhat D. (1989), "Identification of the physical mechanisms underlying acoustic emissions during the cracking of the concrete". Materials & Structures, Vol. 22, pp. 194-198.

Rossi P., Godart N., Robert J. L., Gervais J. P. & Bruhat D. (1993), "Utilisation de la technique d'auscultation par émission acoustique pour étudier le fluage propre du béton". Bull. Liaison Labo. P. et Ch., N° 186, pp. 88-92.

Rudnicki J.W. & J.R. Rice (1975), "Conditions for the localization of deformation in pressure sensitive dilatant materials". J. Mech. Phys. Solids, Vol. 23, pp 371-394.

Rummel F. (1971), "Uniaxial compression tests on right angular rock specimens with central holes". In Fissuration des Roches, C. R. Symp. Internat. Mec. Roches, Nancy, Vol. 2, pp. 90-101.

Rummel F. (1975), "Experimentelle Untersuchungen zum Bruchvorgang in Gesteinen". Berichte Inst. Geophysik Ruhr-Univ. Bochum, N° 4.

Sammis C. G. & Ashby M. F. (1986), "The failure of brittle porous solids under compressive stress states". Acta metall., Vol. 34, pp. 511-526. Pergamon Press.

Sangha C. M., Talbot C. J. & Dhir R. K. (1974), "Microfracturing of a sandstone in uniaxial compression". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 11, pp. 107-113.

Santarelli F.J. (1987), "Theoretical and experimental investigation of the stability of axisymmetric wellbore". Ph. D. Thesis University of London.

Santarelli F.J. & Brown E.T. (1989), "Failure of three british rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 26, N° 5, pp. 401-413.

Santarelli F.J. (1990), "Etude expérimentale de la bifurcation dans les roches". Revue Française Géotechnique, N°: 50, pp. 61-70.

Sayehi M. (1992), "Etude expérimentale de l'endommagement du grés de Fontainebleau". Thèse de Doctorat, Université de Lille I.

Scholz C. H. (1968), "Experimental Study of the fracturing process in brittle rock". J. Geophys. Res., Vol. 73, N° 4, pp. 1447-1454

Simmons G. & Richter D. (1976), "Microcracks in rocks". In : The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks. Strens, RGJ (et) NATO Institute, Newcastle-upon-Tyne, April 74 London, Wiley 76.

Sobolev G., Spetzler H. & Salov B. (1978), "Precursors to failure in rocks while undergoing anelastic deformations ", J. Geophys. Res., Vol. 83, pp 269-274.

Soga N., Martin R. J. & Spetzler H. (1976), "Inhomogeneous strain accumulation on laboratory rock samples prior to failure ", Eos Trans. AGV, Vol. 57, (abstract) pp.328.

Soga N., H. Mizutani, H. Spetzler & Martin R. J. (1978), "The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite", J. Grophys Res., Vol. 83, pp. 4451-4458.

Sondergeld C. M. & Estey L. H. (1981), "Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of Westerly Granite". J. Geophys. Res., Vol. 86, N° B4, pp. 2915-2924.

Spetzler H. & Martin R. J. (1974), "Correlation of strain and velocities during dilatancy". Nature (London), 252, pp. 30.31

Sprunt E. S. & Brace W.F. (1974), "Direct observation of microcavities in crystalline rocks". Int. J. Rock.Mech. Min. Sci.Géomech.Abstr., Vol. 11, pp.139-150

Stacey T.R. (1981), "A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 469-474.

Sulem J., Vardoulakis I. & Papamichos E. (1993), "Prediction of shear failure in sandstone". Geotech. Eng. of Hard Soils - Soft Rocks, Vol. 2, pp. 1663-1669.

Tapponnier P. & Brace W.F. (1976), "Developpement of stress induced microcracks in Westerly granite". Int. J. Rock mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 13, pp. 103-112.

Terrien M., Bergues J. & Chastanier P. (1992), "Localisation des déformations et émission acoustique". Rapport scientifique, Gréco Géomatériaux 1992, pp. 187-189.

Thill R. E. (1972), "Acoustic methods for monitoring failure in rock". Dans : New Horizons in Rock Mechanics. 14th Symp. Rock Mechanics, University Park, Penn., ed. Hardy H. R. & al., pp. 649-687.

Thomas T.Y. (1961), "Plastic flow and fracture in solids". Academic Press, New-york.

Tillard D. (1992), "Etude de la rupture dans les géomatériaux cohésifs. Application à la marne de Beaucaire". Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Torrenti J.M., Desrues J., Benaija E.H. & Boulay C. (1989), "Visualisation of strain localization in concrete compression by means of stereophotogrametry". Proc. Int. Congr. Applied Mech., Beijing.

Torrenti J.M. & Benaija E.L. (1990), "Stereophotogrammetry : a new way to study strain localisation in concrete under compression", 9th Int. Conf. on Exp. Mech. ed. PCfS Analysis Copenhague, (4), pp. 1346-1354.

Tourenq (1967), "Mise en évidence de la microfissuration". CR. Soc. Géol. France, fasc. 5.

Tourenq C., Fourmaintraux D. & Denis A. (1971), "Propagation des ondes et discontinuités des roches". Paper I 1. In : Rock Fractures Symp. Int. Soc. Rock. Mech., Nancy.

Vardoulakis I. (1979), "Bifurcation analysis of the triaxial test on sand samples". Acta Mechanica, Vol. 32, pp. 35-54.

Vardoulakis I. & Graf B. (1982), "Imperfection sensitivity of the biaxial test on dry sand". Proc. IUTAM Conf. Deformation and failure of granular materials, Delft, pp.485-491, Rotterdam: Balkema.

Vardoulakis I. & Graf B. (1985), "Calibration of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments". Geotechnique, Vol. 35, N° 3, pp. 299-317.

Vardoulakis I. & Sulem J. (1993), "Application of bifurcation theory to rock mechanics problems". Comprehensive rock mechanics, Vol. 1, Chap. 24, ed. J. Hudson, Pergamon Press.

Vardoulakis I., Sulem J. & Guenot A. (1988), "Borehole instabilities as bifurcation phenomena". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 25, N° 3, pp. 159-170.

Vardoulakis I. & Papanastasiou P. (1988), "Bifurcation analysis of deep boreholes. I: Surface instabilities". Int. Journ. Num. Anal. Methods in Geomechanics, Vol. 12, pp. 379-399.

Vermeer P. A. & de Borst R. (1984), "Non-associated plasticity for soils, concrete and rock". Heron, Vol. 29, pp. 1-62.

Viggiani G., Rampello S. & Georgiannou V.N. (1993), "Experimental analysis of localisation phenomena in triaxial tests on stiff clays". Geotechnical Engineering of hard soils - soft rocks, Vol. 1, pp. 849-856.

Wawersik W. R. & Fairhurst C. (1970), "A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, pp. 561-575.

Wawersik W. R. & Brace W. F. (1971), "Post-failure behavior of a granite and a diabase". Rock Mech., Vol. 3, pp. 61-85.

Wong T.F. (1982a), "Micromechanics of faulting in westerly granite". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 19, pp 49-64.

Wong T. F. (1982b), "Development of Stress - Induced Anisotropy and Localized Deformation in Brittle Rock". Coll. Int. du CNRS, N° 319, pp. 321-339.

Yanagidani T., Ehara S., Nishisawa O. & Kusunase K. (1985), "Localisation of dilatancy in Ohshima Granite under constant uniaxial stress". J. Geophys. Res., Vol. 90, pp. 6840-6858.

Yijun D. & A. Aydin (1991), "Interaction of multiple cracks and formation of echelon crak aways". Int. J. Num. & Analytical Methods in Geomech., Vol. 15, pp. 205-218.

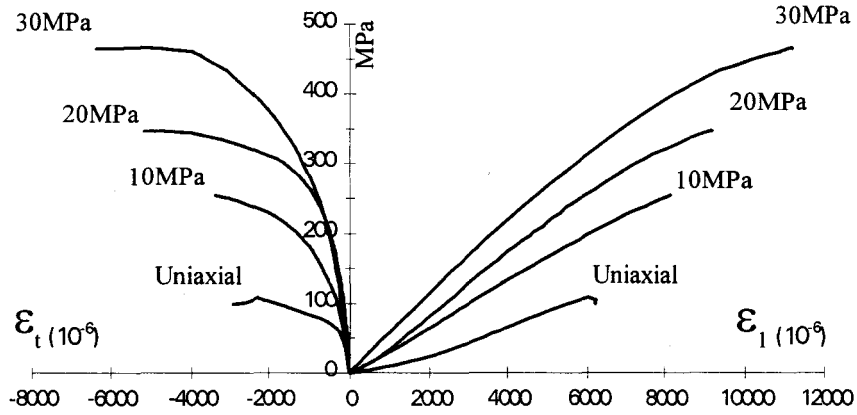
ANNEXES

ANNEXE 1

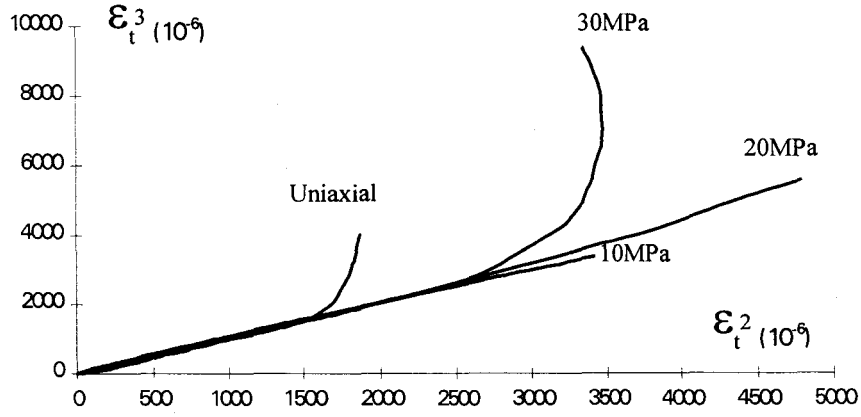
Courbes illustrant l'influence de la pression de confinement sur le comportement mécanique du grès de Fontainebleau dans les essais de compression. Mise en évidence de l'effet de ce paramètre sur les niveaux de contrainte, de déformabilité et du seuil de localisation.

A1-1: EPROUVETTES CYLINDRIQUES (H = 75 mm; D = 37,5 mm)

Courbes contraintes - déformations



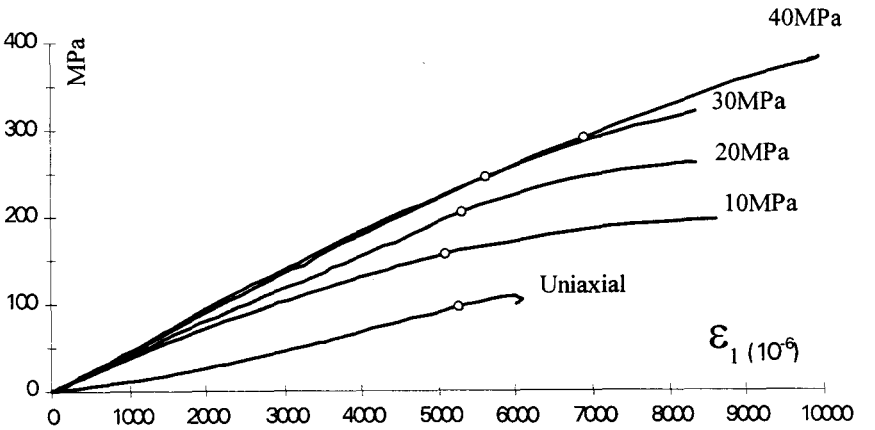
Courbes déformations transversales



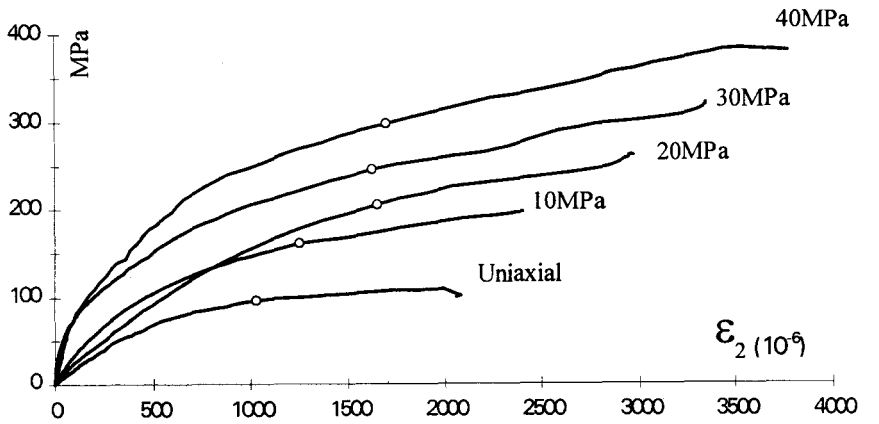
A1-2: PLAQUES RECTANGULAIRES (H = 90 mm; L = 57 mm ; e = 12 mm)

Courbes contraintes - déformations

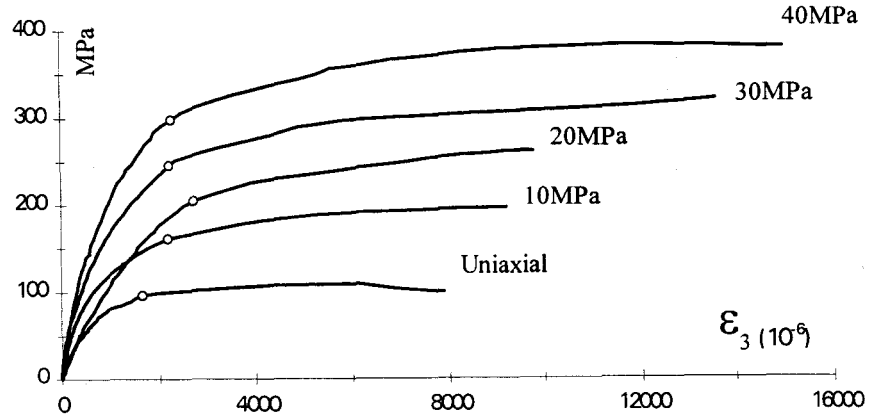
LONGITUDINALES



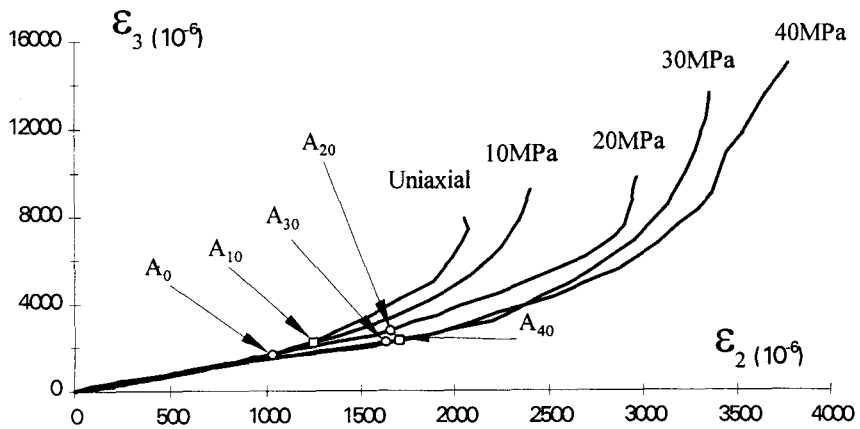
TRANSVERSALES



LATERALES



Courbes déformations transversales en fonction des déformations latérales



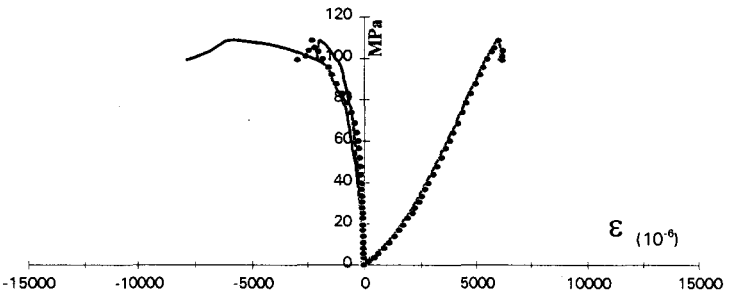
A_0, A_{10}, A_{20}, A_{30} et A_{40} représentent les seuils de localisation pour respectivement l'essai de compression uniaxial, et dans les essais triaxiaux pour une pression de confinement de 10, 20, 30 et 40MPa. Reportés sur les courbes contraintes - déformations (ci-dessus), ces points sont repérables sur chacune de ces courbes par des plots circulaires (fond blanc).

ANNEXE 2

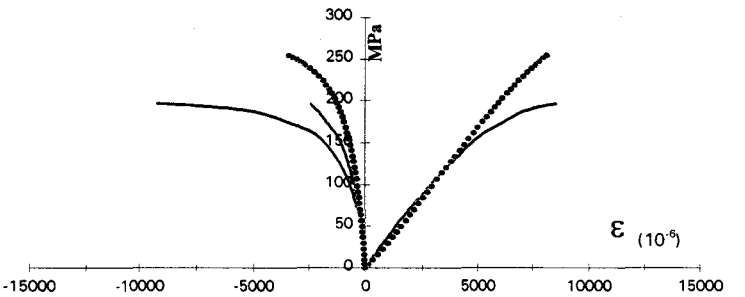
Courbes se rapportant à l'étude comparative entre les reponses mécaniques obtenus à partir des éprouvettes cylindriques (H = 75 mm et D = 37,5 mm) à base circulaire et des plaques rectangulaires 90 × 57 × 12 mm^3 (ligne continue).

A2-1 : COURBES CONTRAINTES - DEFORMATIONS

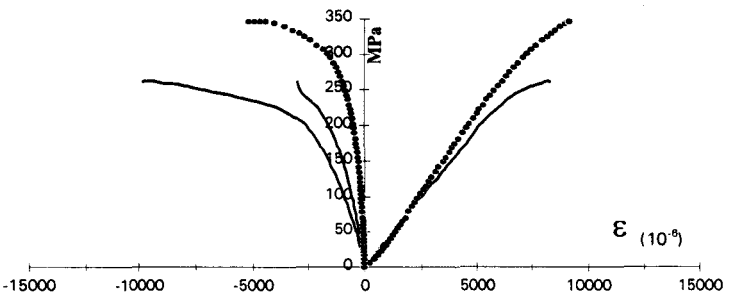
Uniaxial



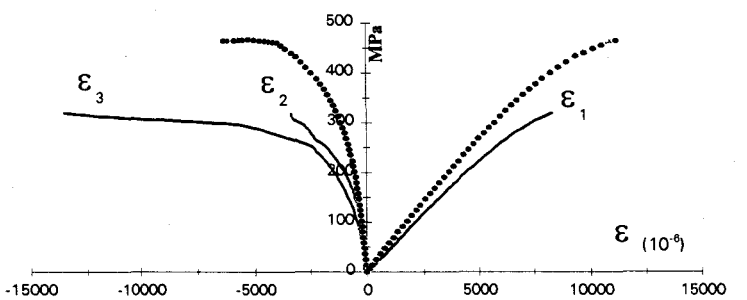
Pc = 10 MPa



Pc = 20 MPa

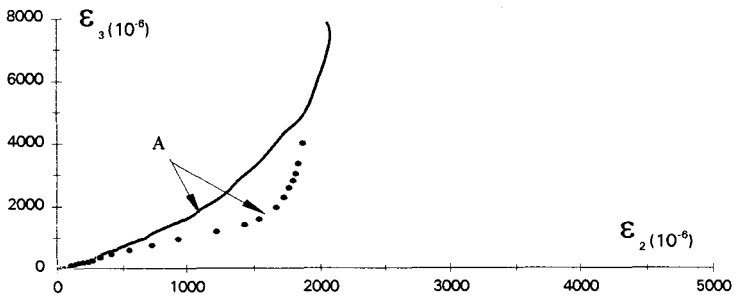


Pc = 30 MPa

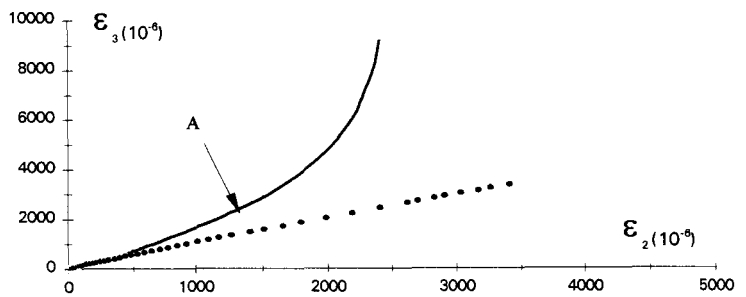


A2-2 : COURBES DEFORMATIONS TRANSVERSALES - DEFORMATIONS LATERALES

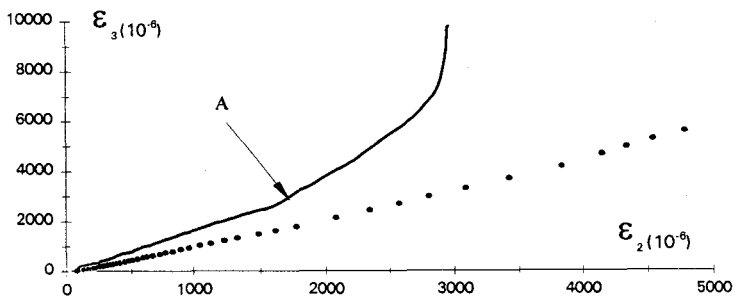
Uniaxial



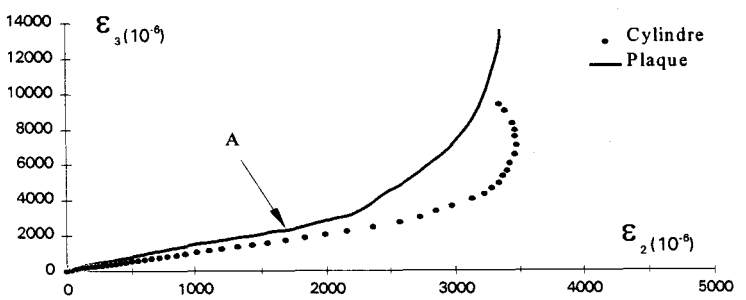
Pc = 10 MPa



Pc = 20 MPa



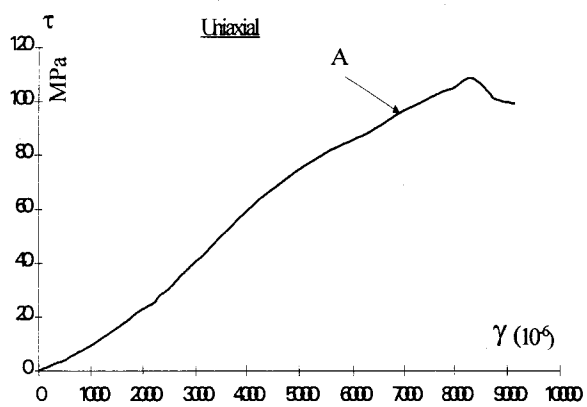
Pc = 30 MPa

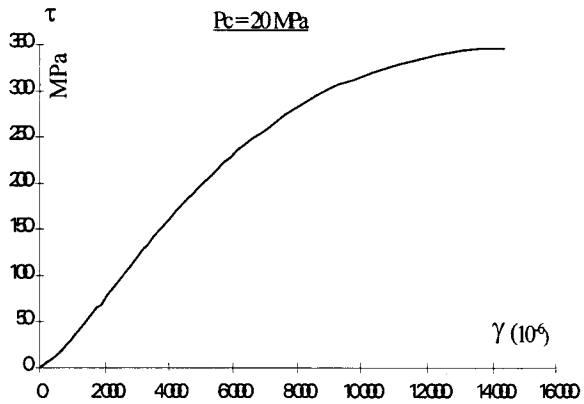


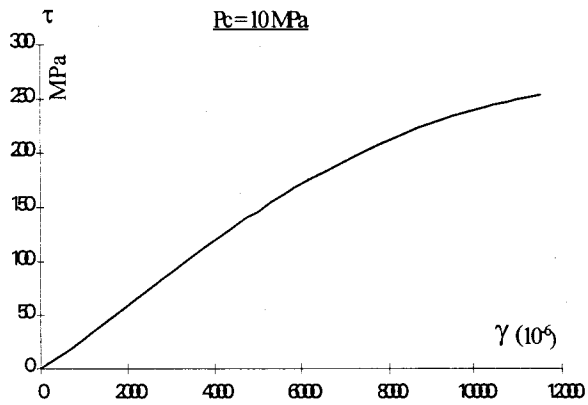
ANNEXE 3

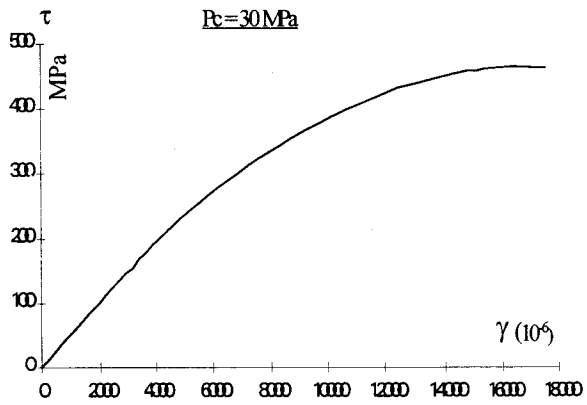
Courbes représentant les variations de la déformation de cisaillement γ en fonction de la contrainte tangentielle τ. L'étude concerne les essais uniaxiaux et triaxiaux monotones et sont présentés sous forme de trois sous-annexes: les essais concernant les cylindres droits étudiés dans les chapitres 2 et 3 (A3-1), les plaques rectangulaires de dimensions 12 x 57 x 90 mm^3 (percées ou non) des chapitres 3 et 4 (A3-2) et enfin les plaques rectangulaires qui ont fait l'objet de l'étude "effets de l'imperfection" du chapitre 4 et "effet de Forme" du chapitre 5 (A3-3).

A3-1 : EPROUVETTES CYLINDRIQUES:

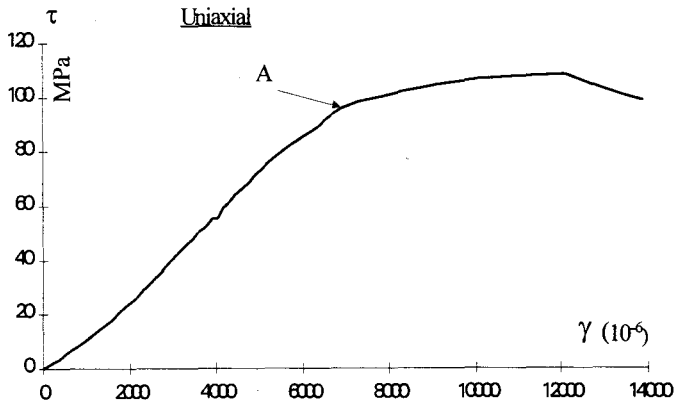




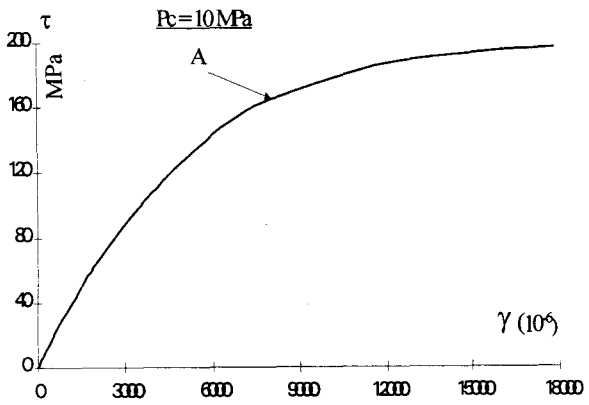


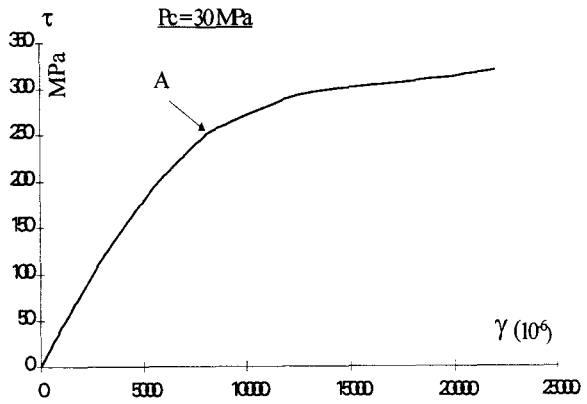


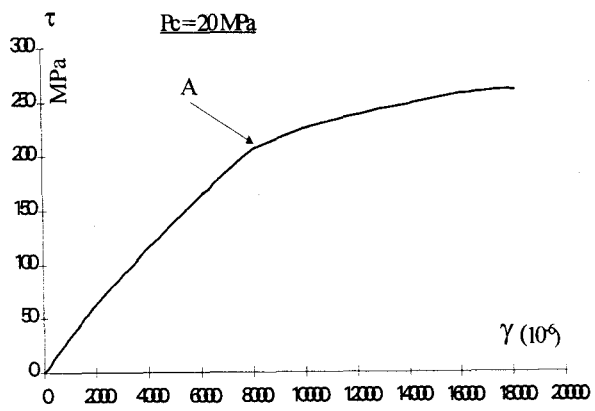
A3- 2 : PLAQUES RECTANGULAIRES :

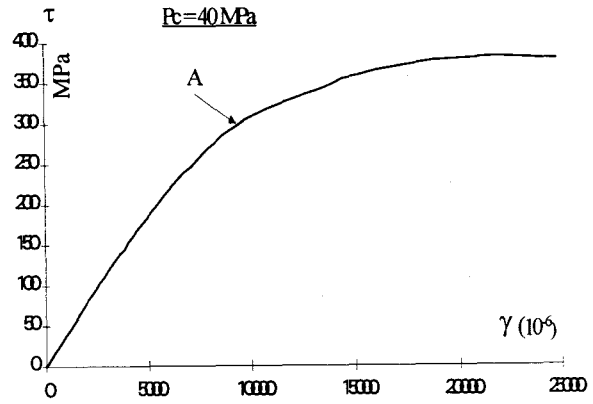


Essais triaxiaux

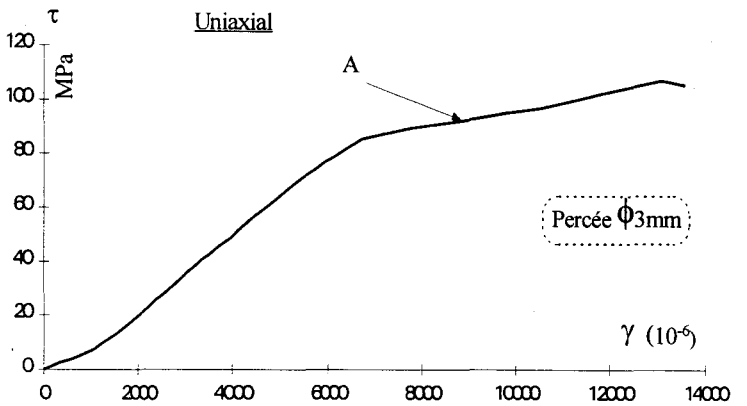




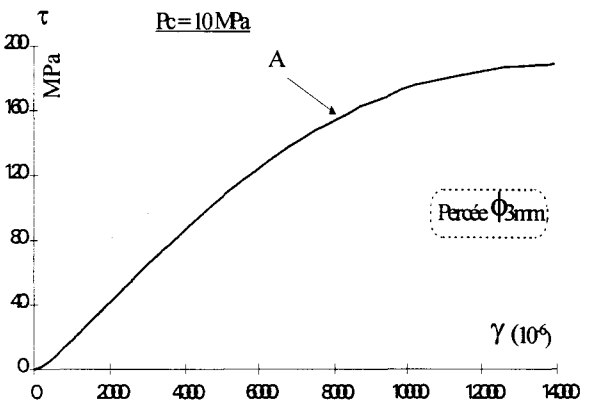


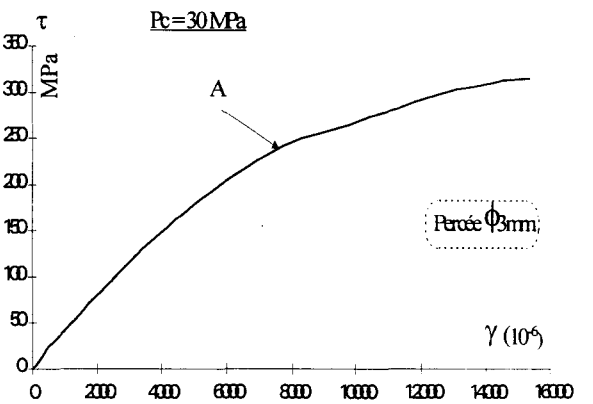


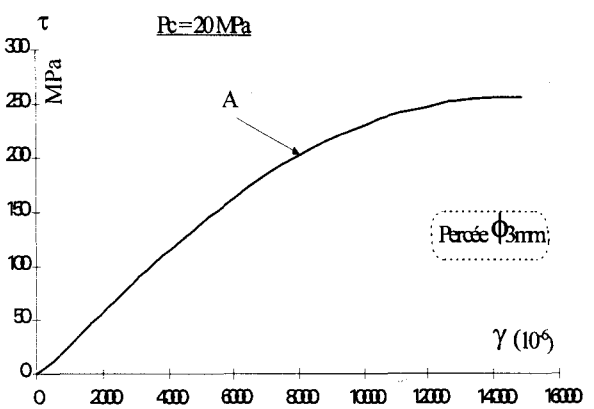
PERCEES D=3mm

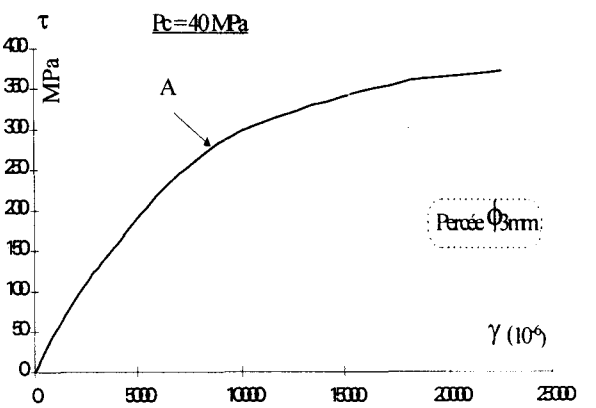


Essais triaxiaux



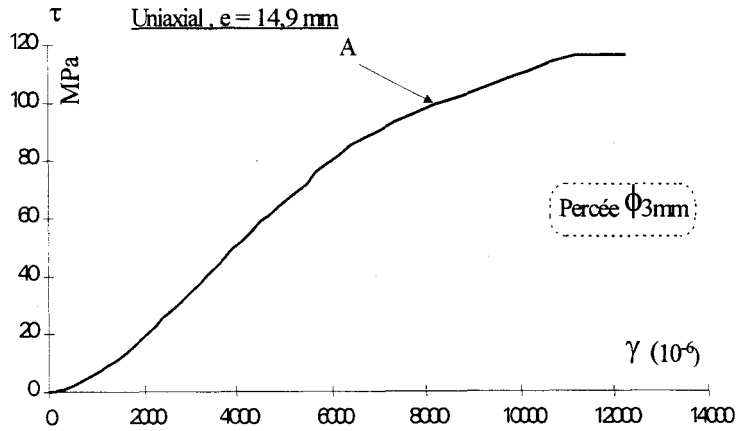


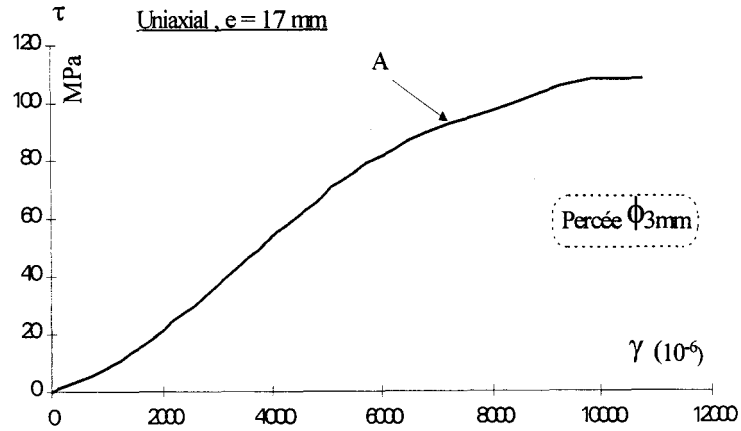


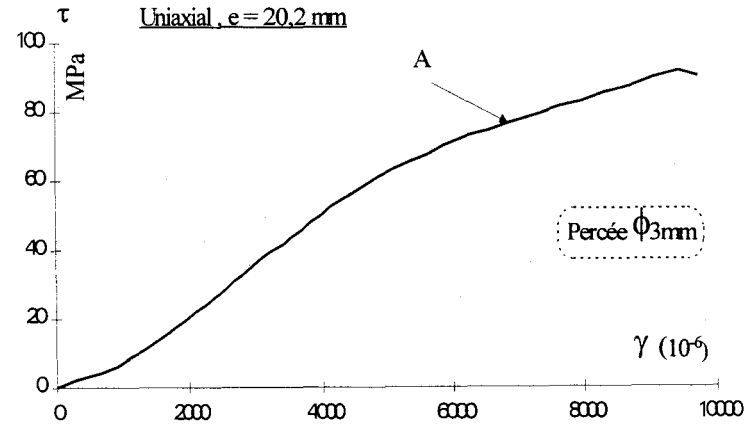


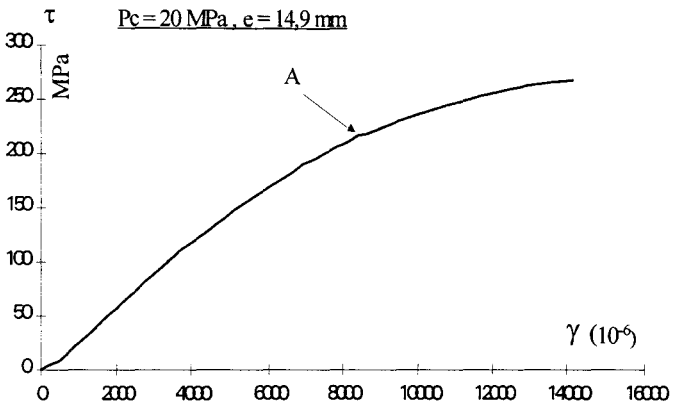
A3- 3 : EPAISSEUR ET DIAMETRE DE L'OUVERTURE CYLINDRIQUE VARIABLES :

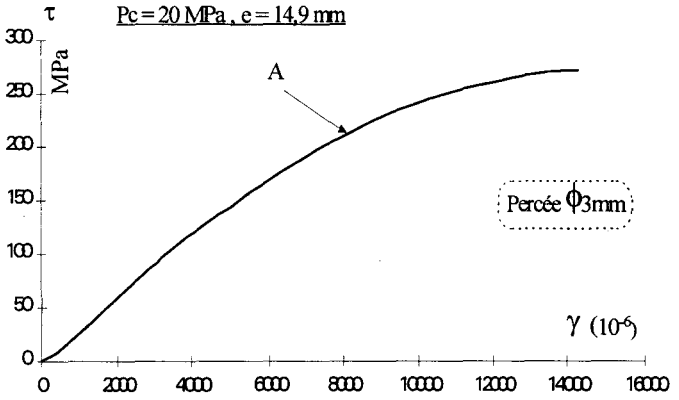
A3-3a : PLAQUES EPAISSES :



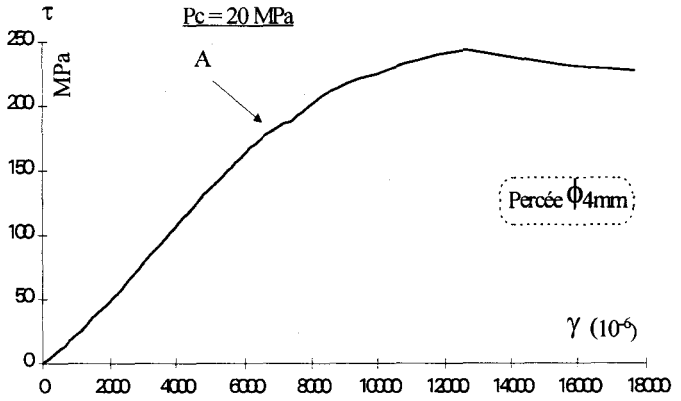


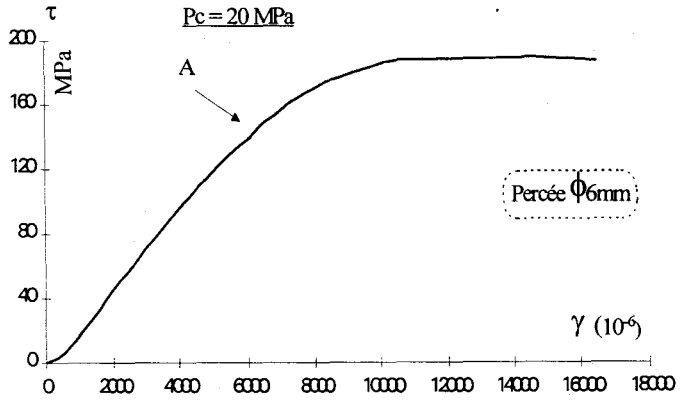






A1-3b : EFFET DU DIAMETRE DU TROU :



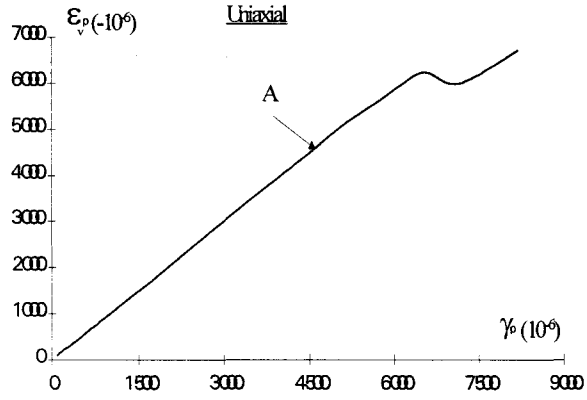


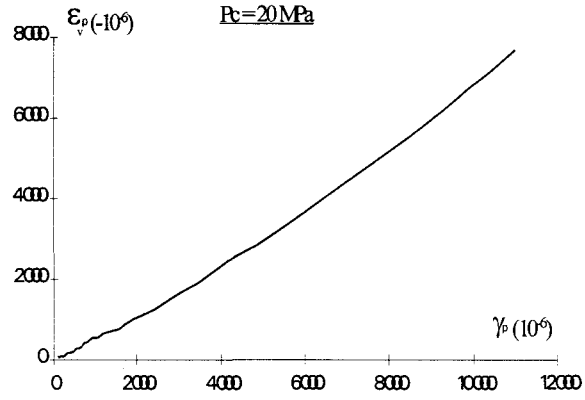
ANNEXE 4

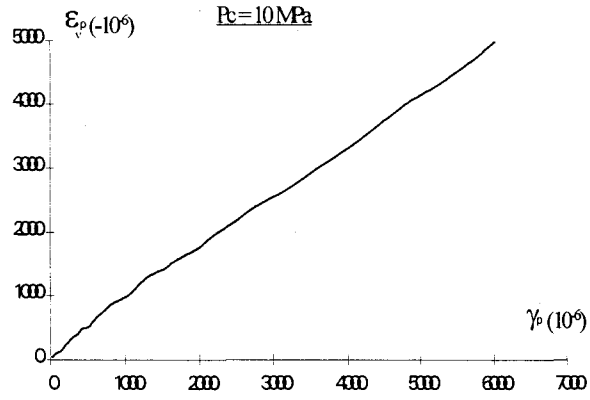
Courbes représentant les variations de la déformation de cisaillement plastique γ^p en fonction de la déformation volumique plastique ε_v^p. L'étude concerne les essais uniaxiaux et triaxiaux monotones et sont présentés sous forme de trois sous-annexes: les essais concernant les cylindres droits étudiés dans les chapitres 2 et 3 (A1-1), les plaques rectangulaires de dimensions 12 x 57 x 90 mm^3 (percées ou non) des chapitres 3 et 4 (A1-2) et enfin les plaques rectangulaires qui ont fait l'objet de l'étude "effets de l'imperfection" du chapitre 4 et "effet de Forme" du chapitre 5 (A1-3).

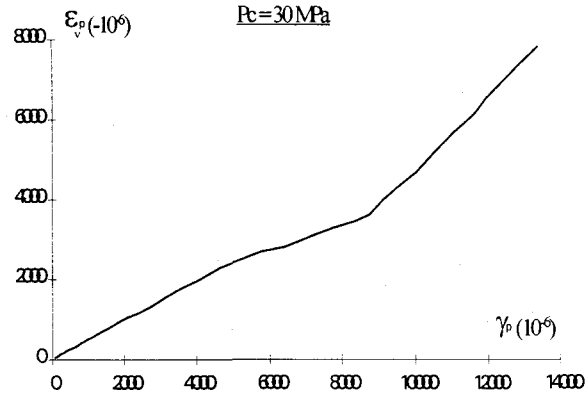
NB: Les déformations volumiques plastiques ε_v^p sont bien entendu négatives au vue des conventions de signe en vigueur. Pour des raisons de commodités pratiques (axe vertical dirigé vers le haut), elles sont affectées d'un signe moins (-).

A4-1 : EPROUVETTES CYLINDRIQUES

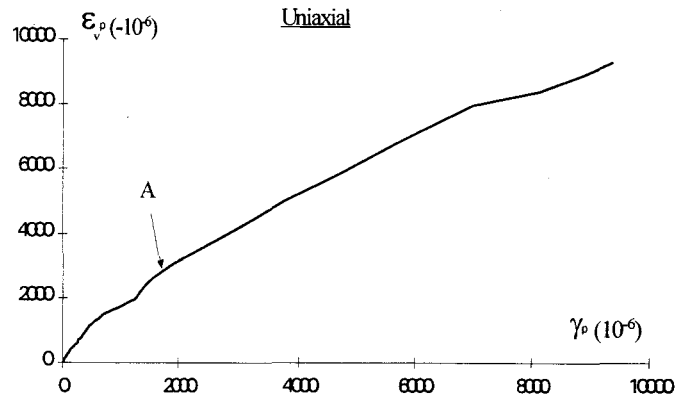




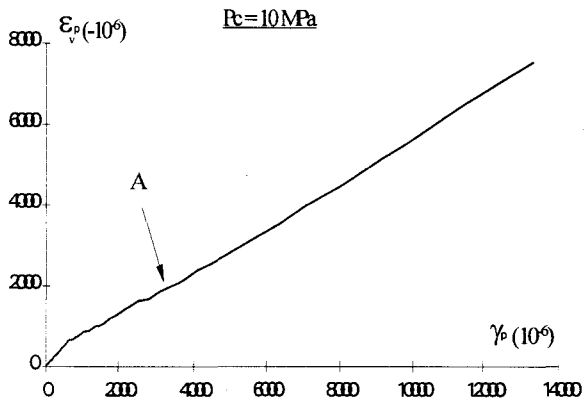


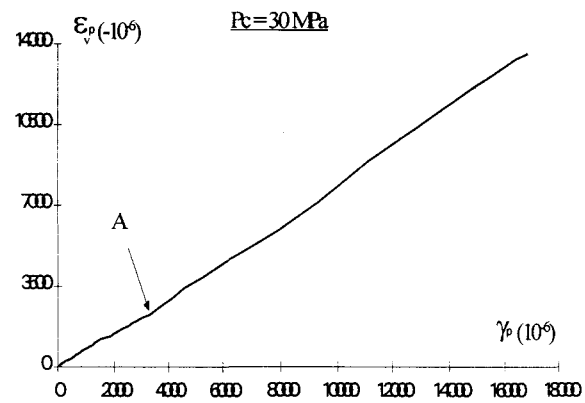


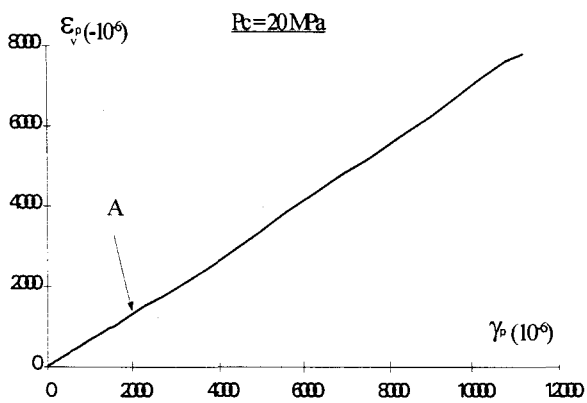
A4-2 : PLAQUES RECTANGULAIRES :

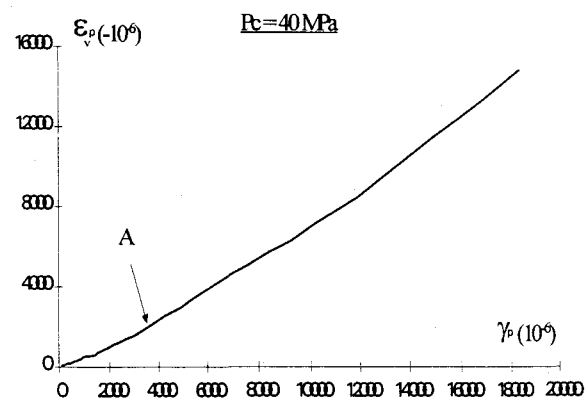


Essais triaxiaux

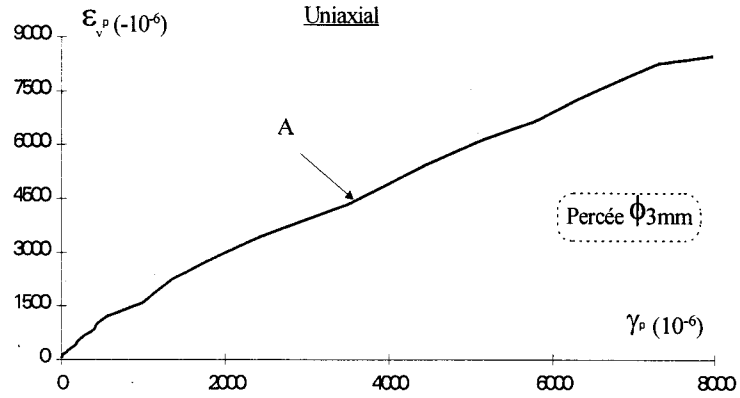




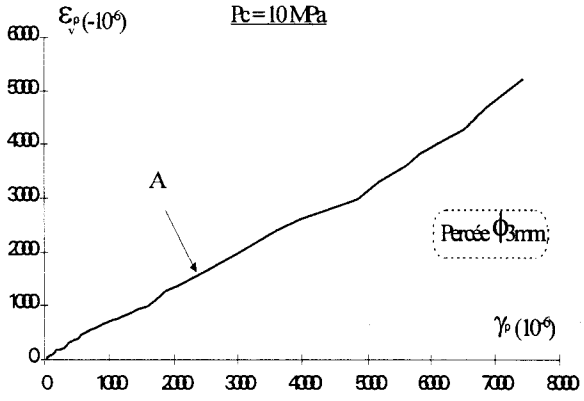


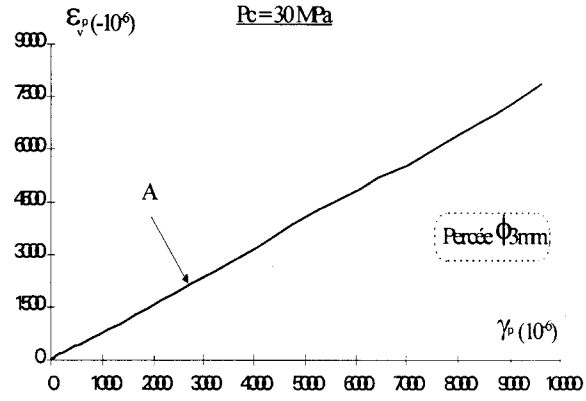


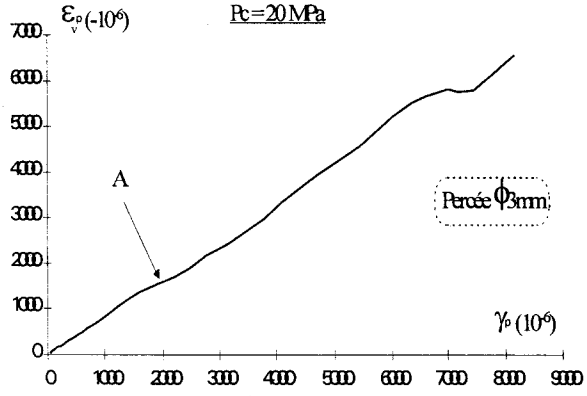
PERCEES D=3mm

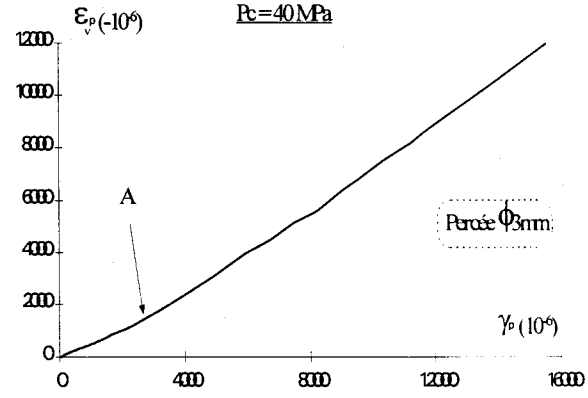


Essais triaxiaux



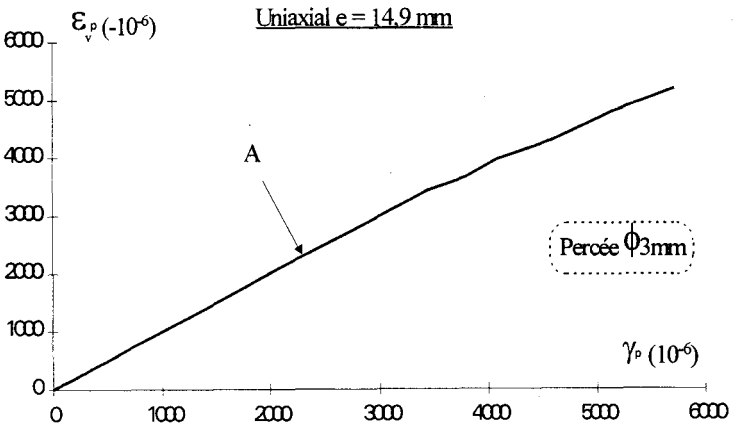


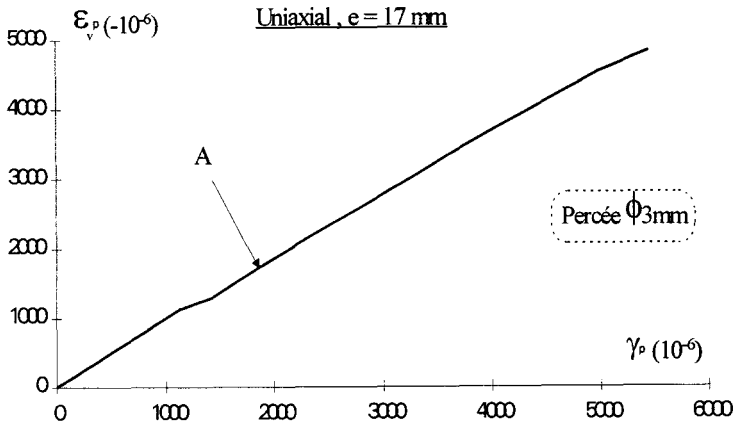


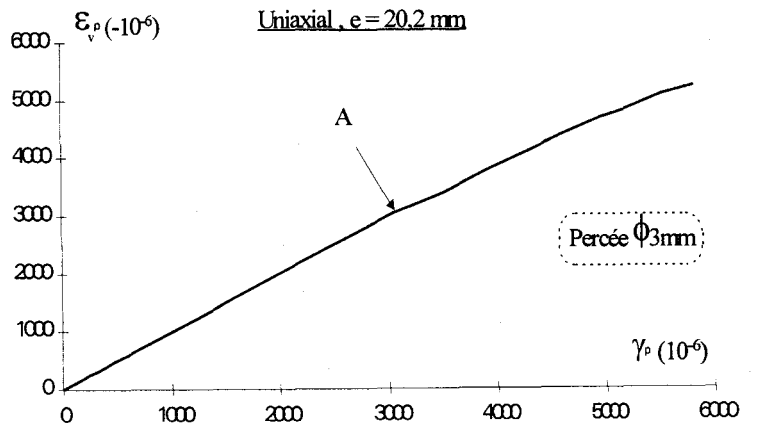


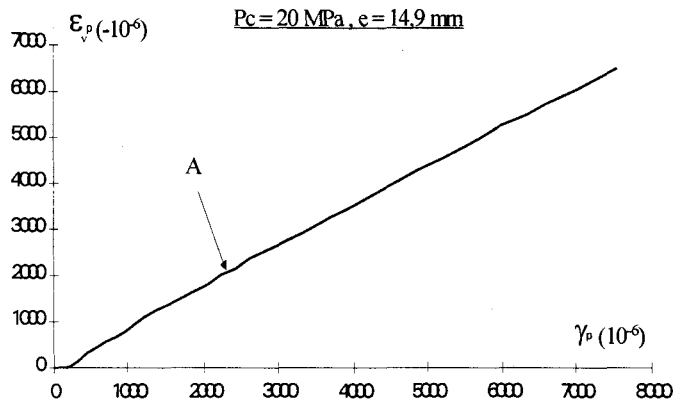
A4-3 : EPAISSEUR ET DIAMETRE DE L'OUVERTURE CYLINDRIQUE VARIABLES :

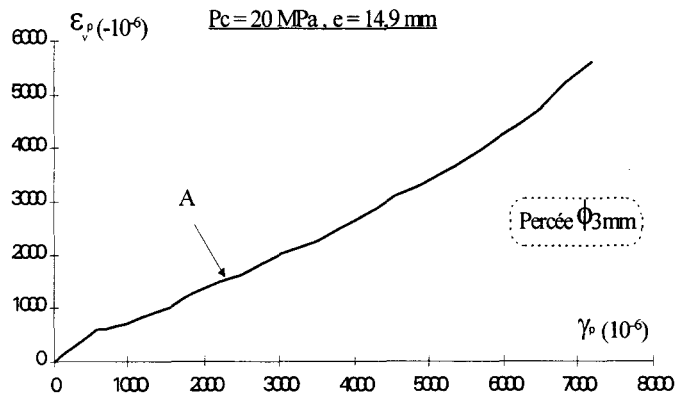
A4-3a : PLAQUES EPAISSES :



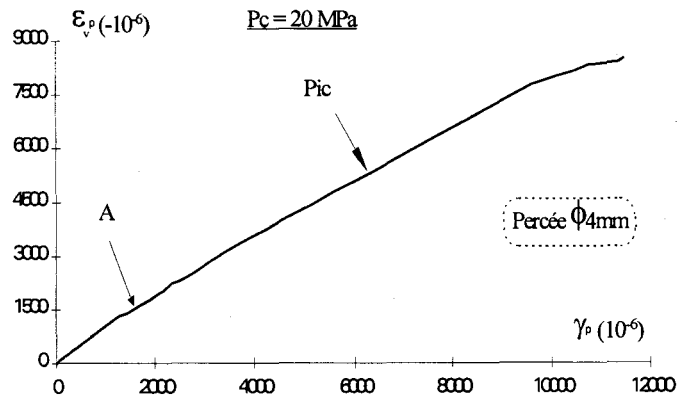


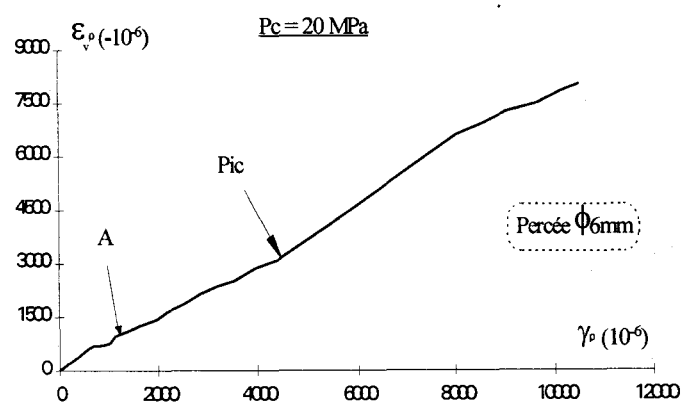






A4-3b : EFFET DU DIAMETRE DU TROU :





ANNEXE 5

On donne ici les résultats détaillés obtenus sur les plaques rectangulaires percée, dans le cadre de l'étude qui a concerné l'augmentation :

(i) du diamètre de l'ouverture cylindrique développée dans le paragraphe IV-6 du chapitre 4.

(ii) de l'épaisseur de ces plaques, percées de 3 mm, traité dans le paragraphe V-1 du chapitre 5.

Cette annexe est composée de 3 tableaux :

Tableau A5-1 :

Ce tableau donne les valeurs précises concernant les paramètres (modules élastiques, coefficients de Poisson et pente initiale OA des courbes ε_3 - ε_2), les déformations (maximales et au seuil de localisation A) et les contraintes (résistance, seuil de localisation A et début de la propagation instable de la fissuration B).

Tableau A5-2 :

De structure identique au tableau 4.2, ce tableau donne les orientations des bandes de localisation mesurées θ_{exp} et permet de les comparer avec l'angle de Coulomb θ_C, l'angle de Roscoe (1970) θ_R et l'angle d'Arthur et al. (1977) θ_A. Les angles les plus proches de θ_{exp} sont indiqués en caractère gras. Les angles de frottement interne et de dilatance sont obtenues de la même manière décrite dans le paragraphe IV-5-3 du chapitre 4 (pp. 116-119).

Tableau A5-3 :

Ce tableau donne les modules d'écrouissages au seuil de localisation A. Il permet d'effectuer la comparaison entre le module d'écrouissage expérimental h_{exp}, et le module d'écrouissage critique h_c calculés à partir de l'équation 8.7 de Vermeer et de Borst (1984) et le module d'écrouissage maximal h_{max} obtenu à partir de la relation (21) de Rudncki et Rice (1975). Les paramètres utilisés pour alimenté les données de ce tableau ont été obtenu de la manière décrite dans le paragraphe IV-5-4 du chapitre 4 (pp. 120-122).

Tableau A5 - 1

Epaisseur (e) et diamètre (D) de la cavité cylindrique	Pc (MPa)	Déviateur de contrainte au pic (MPa)	E (GPa)	ν	Déformations maximales* (10^{-6})			Déviateur de contrainte au point B (MPa)	Déviateur de contrainte au seuil de localisation A	Niveau de déformations* au seuil de localisation A (10^{-6})			Pente OA
					ε_1	ε_2	ε_3			ε_1	ε_2	ε_3	
e = **12,0**mm; D = 3mm	Uniaxial	107	22,9	0,21	6450	1800	7100	77	93	5600	1350	2250	1,8
e = **14,9**mm; D = 3mm	Uniaxial	117	23,3	0,28	6400	2250	5850	76	99	5500	1800	2600	1,4
e = **17,0**mm : D = 3mm	Uniaxial	108	21,4	0,24	6250	2600	4500	73	92	5350	1550	1850	1,2
e = **20,2**mm; D = 3mm	Uniaxial	92	21,7	0,22	5300	2950	4400	55	77	4550	2300	2300	1
e = 14,9mm; D = 0mm	20	269	39,5	0,16	7600	3000	6550	162	212	5700	1750	2400	1,4
e = 14,9mm; D = 3mm	20	272	38	0,22	8100	2300	6250	197	212	6100	1500	2000	1,4
e = 12,0mm; D = **0**mm	20	262	39,5	0,27	8350	2950	9800	170	206	5300	1650	2750	1,7
e = 12,0mm; D = **3**mm	20	256	37,0	0,18	7600	2350	7300	159	194	5400	1350	2150	1,6
e = 12,0mm; D = **4**mm	20	244	37,9	0,17	8200	3100	9450	182	182	5550	1650	1350	0,7
e = 12,0mm; D = **6**mm	20	190	28,6	0,16	8150	2100	8350	140	140	5400	1100	700	0,6

(*) Arrondies aux 50 microdéformations les plus proches.

Tableau A5 - 2

Epaisseur (e) et diamètre (D) de l'ouverture cylindrique	Pression de confinement (MPa)	θ_{exp}	Angle de frottement		Angle de dilatance		$\theta_C = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$		$\theta_R = \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}$		$\theta_A = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{4}(\phi + \psi)$	
			ϕ_{max}	ϕ_s	ψ_{moy}	ψ_s	Max.	au seuil	Moy.	au seuil	Max./Moy.	au seuil
e = 12,0mm; D = 3mm	Uniaxial	Inf. à 10°	49°	46°	_	90°	21°	22°	_	0°	_	11°
e = 14,9mm; D = 3mm	Uniaxial	Inf. à 10°	51°	46°	70°	70°	20°	22°	10°	10°	15°	16°
e = 17,0mm : D = 3mm	Uniaxial	Inf. à 10°	50°	45°	66°	66°	20°	23°	12°	12°	16°	17°
e = 20,2mm; D = 3mm	Uniaxial	Inf. à 10°	46°	41°	70°	70°	22°	25°	10°	10°	16°	17°
e = 14,9mm; D = 0mm	20	30°	50°	43°	58°	58°	20°	24°	16°	16°	18°	20°
e = 14,9mm; D = 3mm	20	30°	51°	44°	48°	36°	20°	23°	21°	27°	20°	25°
e = 12,0mm; D = 0mm	20	30°	50°	43°	43°	36°	20°	24°	24°	27°	22°	25°
e = 12,0mm; D = 3mm	20	26°	49°	41°	44°	40°	21°	25°	23°	25°	22°	25°
e = 12,0mm; D = 4mm	20	29°	48°	40°	45°	26°	21°	25°	23°	32°	22°	29°
e = 12,0mm; D = 6mm	20	34°	41°	33°	45°	32°	25°	29°	23°	29°	24°	29°

Tableau A5 - 3

Epaisseur (e) et diamètre (D) de l'ouverture cylindrique	Pression de confinement (MPa)	Module de cisaillement G (GPa)	μ *	β	Module tangent T (GPa)	h_{exp} (GPa)	h_c (GPa)	h_{max} (GPa)
e = **12,0** mm; D = 3 mm	Uniaxial	9,5	0,72	1,0	1,9	2,3	0,78	0,84
e = **14,9**mm; D = 3 mm	Uniaxial	9,1	0,72	0,94	3,2	5,0	0,82	0,93
e = **17,0**mm : D = 3 mm	Uniaxial	8,7	0,71	0,91	4,0	7,3	0,72	0,79
e = **20,2**mm; D = 3 mm	Uniaxial	8,9	0,66	0,94	3,1	4,8	0,62	0,67
e = 14,9mm; D = 0 mm	20	17,0	0,68	0,85	7,7	14,1	1,17	1,21
e = 14,9mm; D = 3 mm	20	15,6	0,69	0,59	8,5	18,7	1,19	1,29
e = 12,0mm; D = **0** mm	20	15,6	0,68	0,59	5,0	7,4	1,23	1,39
e = 12,0mm; D = **3** mm	20	15,7	0,66	0,64	7,7	15,1	1,19	1,24
e = 12,0mm; D = **4** mm	20	16,2	0,64	0,44	8,4	17,3	1	1,04
e = 12,0mm; D = **6** mm	20	12,4	0,55	0,5	8,4	26,0	0,56	0,58