

50376
1992
359

62 814

50376
1992
N° d'ordre: 912
359

THESE DE DOCTORAT

présentée à:

L'UNIVERSITE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Spécialité:

Génie civil

TITRE:

**ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ENDOMMAGEMENT
DU GRES DE FONTAINEBLEAU**

par:

Mohamed SAYEHI



Soutenu Le 13 juillet 1992

Jury :

M. J.P. Henry	: USTLFA	Président
M. Y. Berthaud	: ENSET Cachan	Rapporteur
M. I. Shahrour	: ECL	Rapporteur
M. P. Cuxac	: ENSG Nancy	Examineur
M. D. Kondo	: USTLFA	Examineur
M. D. weichert	: USTLFA	Examineur

A ma Mère, à mon Père,

A ma Femme,

A mes soeurs, à mes frères,

A tous ceux qui me sont chers...

RESUME:

L'étude menée dans ce rapport concerne la caractérisation du comportement d'un grès. Le comportement est essentiellement lié au développement progressif de la microfissuration.

Un montage de traction directe est présenté. Des essais de traction monotones ont permis de mettre en évidence la non linéarité du comportement. La caractérisation de l'endommagement en traction du matériaux est faite à l'aide d'essais cycliques.

Une étude complète du comportement sous sollicitations de compression triaxiale permet de conclure à une forte anisotropie induite dans le comportement. Cette anisotropie est en relation directe avec l'évolution de la microfissuration.

Pour caractériser l'endommagement anisotrope en compression un essai spécifique a été proposé. Des essais de tractions sont menés sur des échantillons carottés dans le sens transversale de grands échantillons déjà testés en compression. Différents déviateurs sont étudiés. Les résultats montrent un affaiblissement très prononcé de la raideur dans la direction transversale.

Mots clés: Endommagement - Fissuration - Anisotropie - Comportement rhéologique - Caractérisation expérimentale.

ABSTRACT:

The study in this report concerns the behavior of a sandstone. This behavior is mainly due to progressive microcracking development.

A direct tensile setting is presented. Monotonous tensile tests allowed to show the nonlinearity of behavior, while the tensile damage of the material is characterized with cyclic tests.

A complete study of behavior under triaxial compressive loading allowed to conclude of high induced anisotropy of the damage. This anisotropy is directly related to microcracking evolution.

In order to characterize compressive anisotropy damage, a specific test is proposed. Tensile tests have been done on transverse cored samples from big samples yet tested in compression.

Various deviatoric stresses are studied. Results show a very pronounced attenuation of stiffness on the transverse direction.

Keywords: Damage - Cracking - Anisotropy - Brittle behavior - Experimental characterization.

AVANT- PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de mécanique des matériaux fragiles de l'Ecole Universitaire des Ingenieurs de Lille.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur le Professeur HENRY qui a assuré la direction de ce travail. Les conseils qu'il m'a formulés et ces encouragements m'ont été d'un grand soutien. Il m'a fait l'honneur de présider le Jury. Qu'il veuille bien accepter mes plus vifs remerciements.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur KONDO dont les conseils et directives m'ont été très précieux durant ces années de travail.

Messieurs BERTHAUD et SHAHROUR ont accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. Je leur en suis très reconnaissant.

Je tiens également à remercier vivement Messieurs CUXAC et le professeur WEICHERT qui m'ont fait l'honneur de participer au Jury.

J'adresse mes plus chaleureux et sincères remerciements à tous les membres du laboratoire qui m'ont aidé dans ce travail.

SOMMAIRE

Introduction	p.1
Chapitre 1 - Etude bibliographique sur les aspects physiques de l'endommagement des roches	p.3
1.1 Microstructures et propriétés mécaniques des roches	p.4
1.1.1 Microfissuration des roches	p.4
1.1.1.1 Mesures par microscope optique	p.5
1.1.1.2 Mesures par microscope à balayage (M.E.B.)	p.6
1.1.2 Microfissuration et comportement macroscopique des roches	p.8
1.2 Modèles rhéologiques de comportement des roches	p.10
1.2.1 Modèles élastoplastiques	p.10
1.2.2 Modèles d'endommagement	p.12
1.2.2.1 Notion de contrainte effective. Equivalence en déformation	p.13
1.2.2.2 Couplage élasticité - endommagement	
1.2.4 Conclusions et choix	p.15
1.3 Caractérisation physique de l'endommagement des roches	p.15
1.3.1 Mesures par jauges d'extensométrie	p.15
1.3.2 Mesures de l'endommagement par ultra-sons	p.16
1.3.2.1 Rappels de propagation d'ondes dans les milieux élastiques	p.16
1.3.2.2 Notion d'atténuation	p.17
1.4 Conclusion	p.19
Chapitre 2 - Etude expérimentale de l'endommagement du grès de Fontainebleau	p.20
2.1 Etude de la traction monotone du grès	p.21
2.1.1 Différents types d'essai de traction	p.21
2.1.2 Présentation du grès testé	p.25

2.2	Etude de la traction directe	p.27
2.2.1	Dispositif expérimental	p.27
2.2.2	Description de l'essai	p.28
2.2.3	Résultats et interprétation	p.28
2.3	Essai de traction directe avec des jauges	p.29
2.3.1	Résultats et interprétation	p.30
2.4	Mesure de l'endommagement par cycles de chargement-déchargement	p.31
2.4.1	Cycles de chargement-déchargement avant le pic	p.32
2.4.2	Cycles de chargement-déchargement-rechargement avant et après le pic	p.34
2.5	Mesures de l'endommagement en traction par ultra-sons	p.37
2.5.1	Présentation de la chaîne de mesures	p.37
2.5.2	Résultats des mesures	p.38
2.6	Conclusion	p.43
 Chapitre 3 - Etude expérimentale du grès de Fontainebleau en compression		p.44
Introduction		p.45
3.1	Présentation des essais	p.45
3.2	Dispositif et montage expérimentaux	p.46
3.2.1	Dispositif	p.46
3.2.2	Montage expérimental	p.46
3.3	Essai de compression hydrostatique	p.48
3.3.1	Procédure	p.48
3.3.2	Résultats	p.48
3.4	Essai de compression	p.49
3.4.1	Manipulation	p.49
3.4.2	Essai monotone : Résultats	p.49
3.4.3	Essai de compression simple avec chargement-déchargement	p.50

3.5	Essais triaxiaux	p.53
3.5.1	Procédure d'essai	p.53
3.5.2	Résultats et interprétation	p.53
3.6	Essais triaxiaux avec cycles chargement-déchargement	p.57
3.6.1	Manipulation	p.57
3.6.2	Résultats et interprétation	p.57
3.7	Conclusion	p.61
 Chapitre 4 - Anisotropie de l'endommagement Méthodologie de quantification et résultats		p.62
4.1	Essais triaxiaux arrêtés à des déviateurs choisis	p.63
4.2	Caractérisation de l'endommagement en compression	p.64
4.2.1	Méthodologie expérimentale	p.65
4.2.2	Effet d'échelle	p.65
4.3	Etude au B.E.T. : (Brunaueur - Emmet et Teller)	p.66
4.3.1	Procédure expérimentale	p.67
4.3.2	Résultats et interprétation (B.E.T.)	p.68
4.4	Essais de traction sur échantillons microfissurés : Résultats et interprétation	p.70
4.4.1	Cas de l'endommagement sous compression simple	p.70
4.4.2	Cas de l'endommagement sous compression triaxiale	p.73
4.5	Essais de compression sur échantillons microfissurés en compression triaxiale	p.90
4.5.1	Résultats et interprétation	p.90
4.6	Conclusion	p.92
 Conclusion		p.93
 Bibliographie		p.96
 Annexe		p.101

INTRODUCTION



On sait l'importance de l'expérimentation dans la compréhension des phénomènes de rupture, et dans le développement de modèles de comportement. Dans le cas de la plupart des roches, c'est dans la microfissuration que doivent être recherchés les mécanismes fondamentaux de déformations (non linéarité, anisotropie induite, forte dilatance). Les lois élastoplastiques [11] rendent compte difficilement de tels aspects du comportement.

Depuis quelques années maintenant, l'étude rhéologique des milieux microfissurés peut être abordée à l'aide de la mécanique de l'endommagement [36], [46]. Cette approche macroscopique permet la prise en compte de la dégradation du matériau au cours du chargement. Le travail présenté ici concerne donc la caractérisation expérimentale de l'endommagement du grès de Fontainebleau. L'objectif est la quantification de l'endommagement sous diverses sollicitations à l'aide de plusieurs techniques.

Le mémoire comporte quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous effectuons une étude bibliographique concernant les mécanismes physiques qui peuvent générer l'endommagement. Cette analyse permettra de mettre en évidence l'importance d'une modélisation qui tienne compte de l'anisotropie de l'endommagement. Ce chapitre s'achèvera sur une présentation des techniques expérimentales de mesures envisagées pour la suite du travail. Nous soulignerons particulièrement l'intérêt des mesures par ultrasons.

Le second chapitre est consacré à l'étude de l'endommagement en traction du grès. Le montage conçu pour les essais de traction sera présenté. Les courbes d'essais de traction avec cycles de chargement-déchargement permettront d'évaluer l'évolution de l'endommagement. Les résultats du suivi continu de l'endommagement à l'aide des mesures par ultra-sons seront également présentés et discutés.

Nous effectuons au troisième chapitre l'étude du comportement sous sollicitations triaxiales du grès. Différentes pressions de confinement seront étudiées. Ces essais permettront de mettre en évidence la forte anisotropie induite du comportement du grès. Les cycles de chargement déchargement que nous présenterons en fin de chapitre permettent de déterminer la variation des modules élastiques longitudinaux. Ils seront cependant insuffisants pour évaluer l'endommagement latéral.

Le dernier chapitre porte ainsi sur l'étude de l'anisotropie de l'endommagement sous compression triaxiale. Nous présenterons la procédure de quantification de l'endommagement anisotrope, utilisée dans le cadre de cette étude : essais de traction simple sur échantillons préalablement microfissurés en compression. Les précautions nécessaires à la mise en oeuvre de cette procédure seront soulignées et les résultats obtenus discutés.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ASPECTS PHYSIQUES DE L'ENDOMMAGEMENT DES ROCHES

L'élaboration de lois de comportement pour les géomatériaux tels que les roches se fait à partir d'informations que nous situerons à deux niveaux différents :

- L'échelle microscopique qui concerne la microstructure et les hétérogénéités locales du matériau. A cette échelle, on s'intéresse aux micromécanismes qui génèrent les propriétés mécaniques globales du matériau. Il peut s'agir par exemple de la présence de dislocations ou dans le cas qui nous intéresse de la microfissuration,
- L'échelle macroscopique où les données recueillies correspondent à un élément de volume. Ces données, qui sont par exemple les contraintes et déformations, sont celles qui intéressent l'ingénieur. Ce dernier niveau d'observation est le plus abordé à cause de son aspect pratique, mais aussi de son adéquation avec les concepts courants de la mécanique des milieux continus.

Le présent travail s'inscrit d'ailleurs dans ce cadre ; cependant, l'observation macroscopique peut masquer des phénomènes locaux importants mis en jeu dans le processus de déformation. Une modélisation macroscopique correcte du comportement doit être éclairée par les mécanismes physiques qui, dans le cas des roches, est essentiellement le développement de discontinuités présentes ou apparues.

Le premier paragraphe de ce chapitre est essentiellement consacré aux relations entre la microstructure et le comportement des roches. Nous parlerons de la microfissuration proprement dite et les moyens dont on dispose actuellement pour l'étudier. Nous insisterons ensuite sur l'incidence de la microfissuration sur les propriétés mécaniques des roches. Bien que le chapitre traite des aspects physiques du comportement des roches, nous passerons rapidement en revue les différentes modélisations possibles de ce comportement. Cela nous permettra de justifier le bien fondé d'une modélisation par la mécanique de l'endommagement.

Dans le dernier paragraphe, nous décrirons les moyens de caractérisation de l'endommagement (mesures extensométriques, mesures par ultra-sons, etc. ...).

1.1 MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES MECANIQUES DES ROCHES

1.1.1 Microfissuration des roches

Du point de vue microstructural, les roches sont des matériaux hétérogènes. Cela provient essentiellement du fait que leur texture est formée de grains homogènes, mais à minéralogie et orientation cristalline diverses. De manière générale, on distingue selon leur structure plusieurs groupes de roches [32] :

- les roches cristallines formées d'un assemblage de cristaux (granite, marbre, etc. ...),
- les roches sédimentaires détritiques, constituées par un agrégat de particules reliées ou non par un ciment (calcaire, grès, ...),
- les roches volcaniques caractérisées par une phase microlitique. Les points de faiblesse des roches sont les interfaces entre les grains ou encore les microfissures qui peuvent être intergranulaires ou transgranulaires.

Les études menées par Houpert [32] sur un granite montre que les propriétés mécaniques (notamment la résistance au pic) varient sensiblement avec la taille des grains (figure 1.1). Il semble que l'on puisse relier l'évolution de la microfissuration à son état initial, les fissures se développant plus aisément autour des gros grains.

La microfissuration dans les roches est essentiellement d'origine naturelle (mouvements tectoniques ...). Son développement sous charge est d'une grande complexité,

car résultant des mécanismes de propagation, d'interaction et de coalescence des pores et des microfissures existantes. Si dans le cadre de la mécanique de la rupture, on dispose actuellement d'outils théoriques pour aborder ce problème, il n'en reste pas moins que la compréhension de tels mécanismes demeure encore un sujet ouvert.

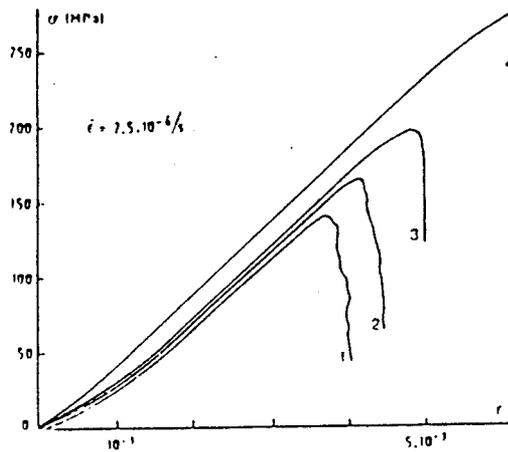


Figure 1.1 : Variation de caractéristiques mécaniques des roches avec la taille des grains (d'après Houpert [32])

Au cours des dernières années, des investigations expérimentales ont été menées par différents auteurs afin de quantifier finement le développement des microfissures. Les moyens expérimentaux utilisés sont divers : méthodes optiques, mesures par microscope électronique à balayage (M.E.B.), méthodes acoustiques ... Nous avons choisi de présenter succinctement les deux premiers types de mesures.

1.1.1.1 Mesures par microscope optique

Ce sont les premières mesures courantes sur la microstructure des roches [26], [23]. Les aspects abordés concernent la forme des grains, les mécanismes d'évolution des microfissures ou la densité de microfissuration. Halbauer et al [26] ont réalisé des mesures de ce type sur une argile quartzitique sollicitée en compression triaxiale. Les échantillons utilisés sont cylindriques (25 mm de diamètre, 75 mm de hauteur). Le chargement est arrêté à des niveaux de déviateurs préalablement choisis. Des tranches longitudinales, obtenues par sciage soigné, ont été ensuite réalisées. L'observation de ces tranches est faite au microscope optique.

Les auteurs ont constaté que les microfissures sont principalement intergranulaires (au cours de leur développement) et quasiment perpendiculaires à la contraintes principale mineure.

Les mesures précises des orientations donnent des valeurs comprises entre -10° , et $+10^\circ$ par rapport à l'axe de chargement. Par ailleurs, quelques microfissures semblent suivre les joints de grains. Dans leurs études, Halbauer et al [26] ont également effectué des mesures de densité de microfissures sur des surfaces de 2 mm x 2 mm. Ils ont remarqué que cette densité augmente considérablement au cours du chargement. Elle passe de 300/4 mm² aux faibles déviateurs de contrainte à environ 3 000/4 mm² aux déviateurs de contrainte élevés. Si la distribution de microfissures est homogène dans les premières étapes du chargement, elle semble se concentrer plus au centre lorsque celui-ci augmente. De manière schématique, les auteurs ont

proposé un mécanisme de rupture résumé sur la figure 1.2.

Elle fournit aussi des conclusions qui sont assez différentes de celles obtenues dans les mesures optiques de Friedman et al [23]. La raison essentielle de ces observations contradictoires semble être la faible résolution des mesures optiques. D'autres types de mesures avaient été développées pour des investigations plus fines. Les plus performantes sont sans doute les études par microscope électronique à balayage.

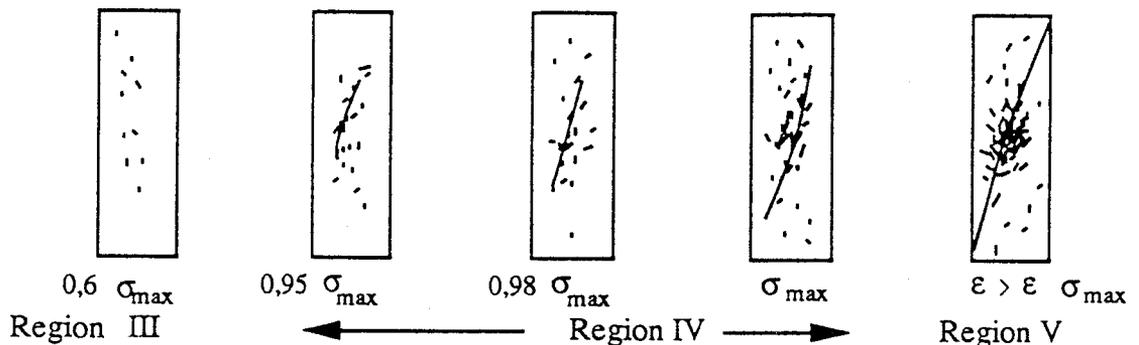


Figure 1.2 : Mécanisme de rupture par microfissuration selon Halbauer et al [26]

1.1.1.2 Mesures par microscope électronique à balayage (M.E.B.)

Tapponier et Brace [68] furent parmi les premiers dont les travaux ont porté sur l'utilisation du M.E.B. pour le suivi de l'évolution de la microfissuration induite dans les roches. Les échantillons utilisés sont cylindriques. A des niveaux de chargement préalablement fixés, les échantillons sont déchargés. Des carottes cylindriques de diamètre plus petit sont ensuite extraites de ces éprouvettes préchargées. C'est sur ces carottes que sont réalisées les observations microscopiques. Les éprouvettes sont métallisées au minimum (200 A°) et les agrandissements choisis vont de 300 à 400 fois. Les dimensions observées sont de l'ordre de 10 à 30 fois la taille des grains. Nous montrons sur la figure 1.3 les niveaux de chargement testés. Sur la figure 1.4, des exemples d'observations faites par Tapponier et Brace [68] sont présentés.

Une étude plus détaillée et plus complète a été effectuée par Wong [72] en 1982 sur un granite (Westerly Granite). Il s'agit pour ces auteurs de faire des investigations aussi bien avant qu'après le pic de contraintes. La métallisation a été réalisée avec un recouvrement en or. Le matériel utilisé est un microscope à rayon X, et à énergie dispersive. Sa résolution est de 0,02 μm , le voltage était fixé à 20 KV. Les éprouvettes pré-pic examinées montrent de nombreuses microfissures transgranulaires orientées à des angles faibles ($< 15^\circ$) par rapport à l'axe de compression. Les auteurs ont cependant observé plusieurs microfissures à des orientations supérieures à 15° . Le développement de ces microfissures se ferait suivant les lois de la mécanique de la rupture. Le frottement sur les microfissures inclinées jouent un rôle important. De manière simplifiée, les observations faites peuvent être résumées sur le schéma de la figure 1.5.

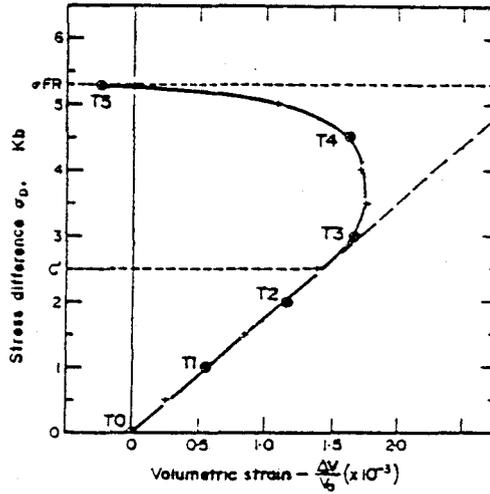


Figure 1.3 : Niveaux de chargement utilisés pour l'observation microscopique de Tapponier et Brace [68]



Figure 1.4 : Exemple d'observation faite par Tapponier et Brace [68]

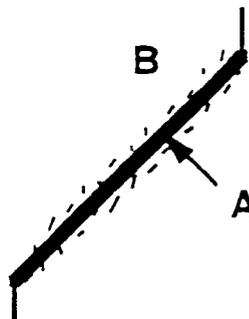


Figure 1.5 : Mécanisme de rupture par microfissuration selon WONG [72]

La microfissuration se développe de manière quasi diffuse. Du fait du glissement sur les lèvres de la microfissure inclinée (A) se développent de nombreuses microfissures axiales (B). Ces dernières sont en extension et sont la source principale de la dilatance des matériaux étudiés. Par ailleurs, elles ont un rôle stabilisateur de la propagation pré-pic, et peuvent servir de barrière vis-à-vis de la fissure inclinée. Ce modèle d'interprétation correspond à peu près à ce que Bieniawski [7] a suggéré quelques années auparavant. Par ailleurs, Wong [73] a analysé l'interaction qui peut exister entre les fissures et les pores. La présence de pores peut fortement influencer le mécanisme de microfissuration, l'altération du matériau étant lié à la conjonction de deux phénomènes : effondrement des pores, propagation de microfissures en présence de trous. Les travaux de Kranz [42] apportent également des renseignements sur ce sujet. Dans le cas du matériau que nous envisageons d'étudier (grès de Fontainebleau), nous verrons que la porosité peut être négligée.

Un aspect intéressant dans les études par microscopie est celui qui concerne la localisation des déformations au cours des essais triaxiaux. Les différents auteurs [72], semblent conclure à une localisation ayant lieu juste après le pic de la courbe contraintes-déformations. Nous ne rentrerons pas ici dans le détail de ces analyses, mais des travaux plus récents basés sur d'autres techniques de mesures montrent au contraire une localisation pré-pic [4]. Pour le suivi de la microfissuration, signalons qu'il existe d'autres types de mesures que le M.E.B. : mesures par ultra-sons, émissions acoustiques, etc. ... Enfin, signalons aussi l'intéressante étude bibliographique faite par Kranz [42] sur la microfissuration dans les roches.

1.1.2 Microfissuration et comportement macroscopique des roches

La forte influence de la microstructure sur les propriétés des roches vient d'être soulignée. C'est cette microstructure qui détermine les caractéristiques initiales de la roche : module d'élasticité, résistance à la rupture, seuil de fissuration. Ce paragraphe est consacré à l'interprétation des courbes de comportement à partir de la microfissuration. Les roches sont généralement classées en deux catégories, à partir des résultats de compression triaxiale [71] (figure 1.6) :

- les roches de classe I sont celles pour lesquelles l'obtention de la rupture est assez progressive,
- la classe II regroupe les roches dont la rupture est assez difficile à contrôler. La poursuite de l'essai après le pic de contrainte nécessite une libération de l'énergie emmagasinée dans l'échantillon.

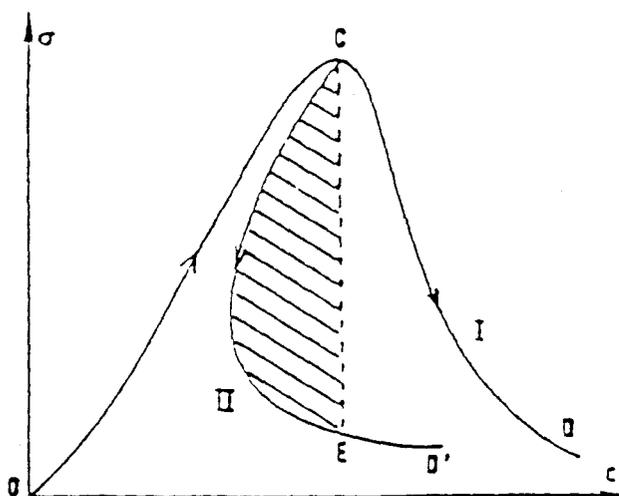


Figure 1.6 : Classes des roches à partir d'essais de compression

Du fait, des problèmes d'asservissement et de la représentativité des courbes $\sigma - \varepsilon$ après le pic, cette classification, basée sur le comportement post-pic, ne paraît pas très convaincante en soi. En revanche les deux types de comportement sont en relation avec le réseau de fissures naturelles et leur évolution [32], [29]. Plus le réseau est important, plus la distribution des surfaces spécifiques de rupture est serrée et la roche évoluera vers la classe II. L'énergie dépensée sert essentiellement à propager une discontinuité, l'altération du matériau passe rapidement du mode diffus au mode localisé.

Par contre, une forte microfissuration initiale dissipera l'énergie dans tout le volume d'échantillon testé. Dans ce cas, le comportement tend vers la classe I, les lignes de rupture se présentent sous forme d'une zone d'intense cisaillement. Précisons, dès à présent, que nous ne nous intéresserons qu'à la partie pré-pic de la courbe de compression triaxiale. Pour la traction, signalons seulement que la rupture se fait de manière élastique fragile par propagation de discontinuités perpendiculaires à la charge. En revanche, nous détaillerons le comportement en compression en liaison avec la microfissuration. Généralement, le comportement avant pic est décrit en quatre phases distinctes (figure 1.7) :

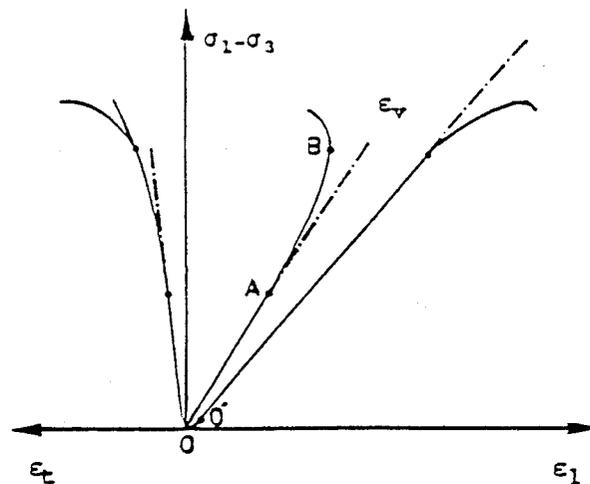


Figure 1.7 : Différentes phases dans le comportement sous compression des roches

- **La phase I** : (O O')

Elle est appelée phase de serrage de microfissures. C'est la représentation immédiate de l'état de microfissuration naturelle du matériau. Lorsque la compression est appliquée, les microfissures existantes se ferment. On a en quelque sorte une restauration du matériau. Souvent faible pour les roches, cette phase est pratiquement inexistante dans les bétons.

- **La phase II** : (ou phase linéaire O'A)

Les déformations sont linéaires. Elles peuvent ne pas être totalement élastiques. En effet, si l'on fait un cycle de chargement-déchargement-rechargement dans cette partie de la courbe, on peut obtenir une boucle d'hystérésis due sans doute au frottement sur les lèvres des microfissures. Il faut noter qu'à ce niveau, il n'y a pas encore d'altération du matériau.

- *La phase III* : (AB)

Dans cette partie de la courbe, les déformations longitudinales restent linéaires, alors que les déformations transversales perdent leur linéarité. Les microfissures commencent à se propager et suivant des directions privilégiées qui sont manifestement assez proches de la direction perpendiculaire à celle de la contrainte principale mineure. Les mécanismes en jeu sont ceux décrits au paragraphe précédent : micro-glissement, extension de microfissures axiales. Ils induisent une anisotropie dans le comportement du matériau. Rappelons que dans cette phase la propagation des microfissures est bien stable.

- *La phase IV* : (ou phase de propagation instable BC)

C'est la phase qui précède la rupture du matériau. Les déformations longitudinales perdent leur linéarité. Sur la courbe de déformation volumique, on observe une forte dilatance. Les microfissures interagissent et se relient entre elles. Les mécanismes mis en jeu sont assez complexes (interaction - coalescence), et conduisent à la formation d'une fissure. La localisation éventuelle des déformations a très probablement lieu dans cette phase.

1.2 MODELES RHEOLOGIQUES DE COMPORTEMENT DES ROCHES

Le récent développement des moyens de calcul a permis en Mécanique, d'une part, l'essor de méthodes numériques de calcul de structures (éléments finis, équations intégrales, différences finies), et d'autre part, la mise en oeuvre de modèles de comportement de plus en plus sophistiqués. Les modèles rhéologiques s'appuient naturellement sur l'observation physique et doivent permettre la description d'un certain nombre de traits fondamentaux du comportement étudié. Dans le cas des roches, diverses approches ont été développées. Elles vont des modèles simples d'élasticité à des modèles plus complexes intégrant la fissuration des roches (mécanique de la rupture). Ces théories s'inscrivent dans le cadre de la Mécanique des Milieux Continus.

La mécanique de la rupture, que nous ne présenterons pas ici, procède par la prise en compte de défauts préexistants ou induits dans le matériau. Il s'agit précisément de caractériser les conditions de propagation des défauts jusqu'à la rupture des structures étudiées. Un travail de thèse a été déjà réalisé sur ce sujet dans le Laboratoire [39].

1.2.1 Modèles élastoplastiques

La loi la plus élémentaire utilisée dans la modélisation des roches est celle de l'élasticité linéaire. Mais, du fait de l'existence dans beaucoup de cas de déformations anélastiques ou non linéaires, le comportement des roches ne peut être décrit de manière réaliste par cette loi. La théorie de la plasticité a permis de rendre compte de plusieurs aspects des non linéarités observées dans les matériaux rocheux.

La théorie classique de l'élastoplasticité a été développée à partir d'expériences faites sur les métaux [12] dans lesquels la répartition des incréments de déformations totales $d\epsilon_{ij}$ en déformations réversibles (élastiques) $d\epsilon_{ij}^e$ et irréversibles (plastiques) $d\epsilon_{ij}^p$ est justifiée par la nature des phénomènes physiques et l'hypothèse des déformations infinitésimales :

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p$$

Les incréments de déformations élastiques $d\varepsilon_{ij}^e$ et de contrainte $d\sigma_{ij}$ sont liés par le tenseur d'élasticité D_{ijkl}^e

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{ij}^e$$

La notion de surface de charge permet de déterminer quand les déformations plastiques $d\varepsilon_{ij}^p$ se produisent. Cette éventualité dépend de la position de la contrainte σ_{ij} dans l'espace des contraintes ainsi que de la direction de l'incrément de contrainte $d\sigma_{ij}$.

Pour traduire l'évolution de la surface de charge f au cours de la sollicitation, cette surface est dépendante de l'histoire antérieure par l'intermédiaire d'un certain nombre de paramètres d'écrouissage K qui sont associés, d'une façon ou d'une autre, aux déformations plastiques antérieures. Ainsi, l'équation de cette surface s'écrit :

$$f(\sigma, K) = 0$$

Lorsque la contrainte actuelle est située sur la surface de charge et a tendance à sortir de cette surface, le matériau est en état plastique. Les déformations plastiques seront calculées à partir de la relation d'écoulement :

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \psi_{ij}$$

où ψ_{ij} montre la direction de déformation plastique et λ est le multiplicateur plastique qui fixe la norme de déformation plastique. ψ_{ij} est quelque fois le gradient d'une fonction dérivable g (appelée souvent potentiel plastique).

$$\psi_{ij} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$$

Un matériau élastoplastique est dit non-associé lorsque $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \neq \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$. Dans le cas contraire, on dit que la loi d'écoulement est associée.

La coïncidence entre $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$ est liée au postulat de Drucker qui implique :

- 1 - que la surface de charge f soit convexe.
- 2 - que l'incrément de déformation plastique soit normal à la surface de charge en un point régulier ou se situe dans le cône des normales extérieures en un point singulier.

Pour définir complètement la relation constitutive, il faut calculer le multiplicateur plastique λ , en fonction de $d\varepsilon_{ij}$ pour le processus de déformation imposée, soit en fonction de $d\sigma_{ij}$ pour le processus de contrainte imposée. Ceci se fait par application de la condition de consistance $df = 0$ qui indique que l'état de contrainte doit rester sur la surface de charge ($f = 0$) au cours du chargement. En fonction de l'incrément de contrainte $d\sigma_{ij}$, on a :

$$df = 0 = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \bar{K}} \frac{\partial \bar{K}}{\varepsilon_{1s}^p} \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{1s}}$$

$$\lambda = \frac{1}{h_p} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \quad h_p : \text{le module plastique}$$

$$h_p = - \frac{\partial f}{\partial \bar{K}} \frac{\partial \bar{K}}{\partial \varepsilon_{1s}^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{1s}}$$

Cette relation ne s'applique qu'à un matériau à écrouissage positif ($h_p \geq 0$).

En fonction de l'incrément de déformation totale $d\varepsilon_{ij}$, on écrit :

$$df = 0 = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \Delta_{ijkl}^e \left\{ d\varepsilon_{kl} - \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}} \right\} + \frac{\partial f}{\partial \bar{K}} \frac{\partial \bar{K}}{\partial \varepsilon_{1s}^p} \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{1s}}$$

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \Delta_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} \right\}}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \Delta_{ijkl}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}} + h_p \right\}}$$

Cette relation s'appliquera à un matériau à écrouissage positif ($h_p \geq 0$) ou négatif ($h_p < 0$).

1.2.2 Modèles d'endommagement

Nous avons déjà souligné le rôle essentiel de la microfissuration dans le comportement fragile des roches. L'évolution de la microfissuration doit être traduite dans la loi de comportement.

La mécanique de l'endommagement permet justement de tenir compte de la microstructure du matériau. Historiquement, c'est Rabotnov, puis Kachanov [36] qui furent les premiers à définir une variable interne d'endommagement D à travers le concept de la contrainte effective. Les premiers travaux ont notamment porté sur le comportement des matériaux métalliques.

Dans les années 1970, la mécanique de l'endommagement a connu des développements importants, en particulier sa formulation thermodynamique [12] [46]. Ce n'est que récemment qu'un certain nombre d'applications ont été réalisées sur le comportement non linéaire des matériaux fragiles tels que les bétons [53], ou les roches [59]. La plupart des modèles développés s'appuient généralement sur le concept de contrainte effective.

1.2.2.1 Notion de contrainte effective. Equivalence en déformation

Prenons un échantillon de matériau de section S soumise à une sollicitation σ . Du fait de la microfissuration, la section résistante effective \tilde{S} est inférieure à S . On appelle contrainte effective la contrainte rapportée à la section \tilde{S} (figure 1.8).

Dans le cas unidimensionnel, Kachanov a posé :

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

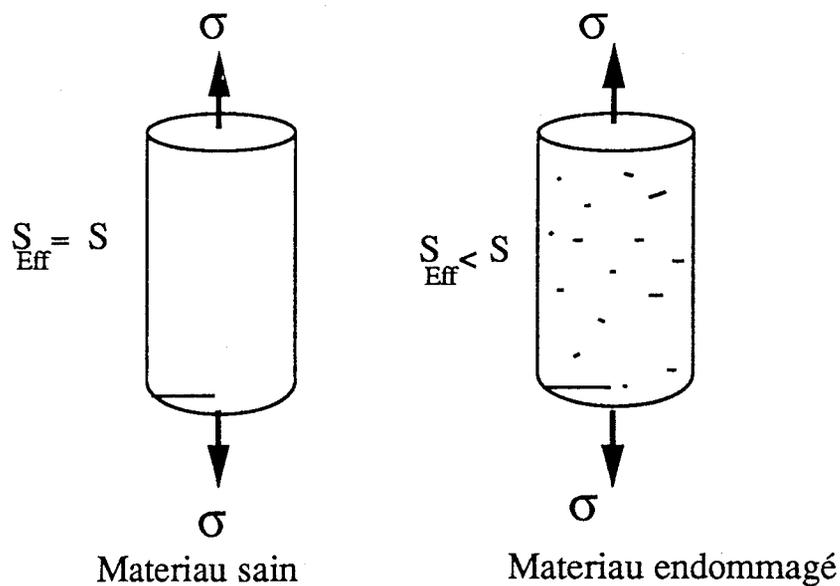


Figure 1.8 : Définition de la section effective \tilde{S}

D est la variable d'endommagement, on a : $0 \leq D \leq 1$

$D = 0$	matériau sain
$0 < D < 1$	matériau endommagé
$D = 1$	matériau rompu

Lemaitre [46] a montré que la relation contrainte-déformation, dans le cas de l'élasticité endommageable, peut s'écrire de la même façon qu'en élasticité en remplaçant la contrainte

usuelle σ par la contrainte effective $\tilde{\sigma}$. Ceci est fait en faisant l'hypothèse d'une équivalence en déformation entre le matériau sain et le matériau endommagé (figure 1.9) [46][15] :

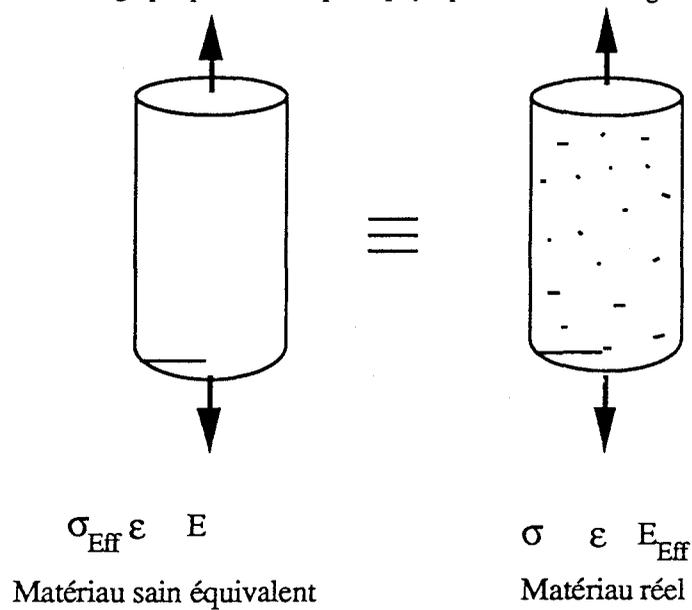


Figure 1.9 : Equivalence en déformation

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{pour le matériau endommagé}$$

$$\approx$$

$$\sigma = \epsilon E_0 \quad \text{pour le matériau sain équivalent}$$

$$\sigma = \frac{\sigma}{1-D}, \quad \text{on déduit } D = 1 - \frac{E}{E_0}$$

Cette expression donne, comme on le verra, un moyen relativement simple de mesure de l'endommagement.

1.2.2.2 Couplage élasticité-endommagement

L'endommagement affecte ainsi les caractéristiques mécaniques du matériau. Dans le cas du couplage avec l'élasticité, la loi du comportement en milieu isotrope s'écrit :

$$\epsilon_{ij} = C_{ijkl} (1-D) \sigma_{kl}$$

C : est le tenseur d'élasticité .

Cela revient à dire que, seul, le module d'élasticité est affecté par D. Par contre, lorsque l'endommagement est/ou devient anisotrope, D est décrit par un tenseur d'ordre 2. En repère principal, on a :

$$D = \begin{pmatrix} D_1 & & \\ & D_2 & \\ & & D_3 \end{pmatrix}$$

L'identification des différentes variables d'endommagement en compression des roches reste encore, comme nous le verrons au troisième chapitre, un domaine de recherche en plein développement. Il existe des possibilités de couplage entre l'endommagement et la plasticité des roches [3]. La difficulté, dans un tel cas, concerne la différenciation, tout au moins au niveau expérimental, des déformations anélastiques et plastiques.

De manière plus générale, la formulation thermodynamique des modèles d'endommagement est maintenant bien établie (voir Lemaitre et Chaboche [46]). Dans ce cadre, les variables observables sont les déformations et la température. Les variables associées sont respectivement la contrainte σ et l'entropie S du système. L'endommagement est décrit par la variable interne D à laquelle on associe une variable thermodynamique Y .

La donnée de l'énergie spécifique libre $\psi(\epsilon, D, T)$ et du pseudo-potentiel de dissipation ϕ^* permettent de décrire complètement le comportement du matériau endommagé [12].

1.2.3 Conclusions et choix

La présentation succincte, que nous venons de faire, montre que les mécanismes physiques décrits par la plasticité et l'endommagement ne sont pas les mêmes. Il existe d'autres approches de modélisation comme les lois hypoélastiques [56], ou les lois incrémentales [16].

Chaque loi de comportement s'adapte plus ou moins bien à tel ou tel matériau, ou telle application. Les lois élastoplastiques permettent par exemple une bonne modélisation du comportement de roches très poreuses comme la craie. C'est un aspect abordé dans le laboratoire de mécanique [58]. Dans le cas du matériau que nous envisageons d'étudier (le grès), la forte susceptibilité à la fissuration fait que le mécanisme dominant semble être la microfissuration. Dans ce cas, la théorie de l'endommagement apparaît bien adapté. Un premier travail de modélisation basé sur la fissuration a été déjà fait en ce sens par Ikogou [34]. La démarche adoptée ici s'inscrit plus explicitement dans le cadre de la mécanique de l'endommagement avec comme objectif la caractérisation expérimentale de ce phénomène.

1.3 CARACTERISATION PHYSIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT DES ROCHES

L'endommagement caractérise la détérioration progressive du matériau sous chargement monotone ou répété jusqu'à la rupture de l'élément de volume. Il peut être mesuré à travers des variables physiques bien définies.

Le choix fait ici est celui couramment utilisé qui consiste à la quantification de l'endommagement au travers de la variation des constantes mécaniques du matériau. Nous présentons ici les deux méthodes de mesures utilisées dans cette étude à savoir les mesures extensométriques et les mesures par ultra son [61].

1.3.1 Mesures par jauges d'extensométrie

Nous avons vu que, sous l'hypothèse de l'équivalence en déformation, et lorsqu'on a qu'une variable d'endommagement D , celle-ci peut s'écrire :

$$D = 1 - \frac{E}{E_0}$$

Lorsque le matériau est sain $E = E_0$, et donc $D = 0$. En revanche si E devient petit vis-à-vis de E_0 , D se rapproche de 1. La mesure de l'endommagement exige celle de la variation de E . Cela peut se faire à l'aide de cycles de chargement-déchargement (voir figure 1.10). Si elle est simple dans son principe, cette façon expérimentale de mesurer l'endommagement est assez délicat du fait même des imprécisions qu'il peut avoir sur la détermination des modules d'élasticité.

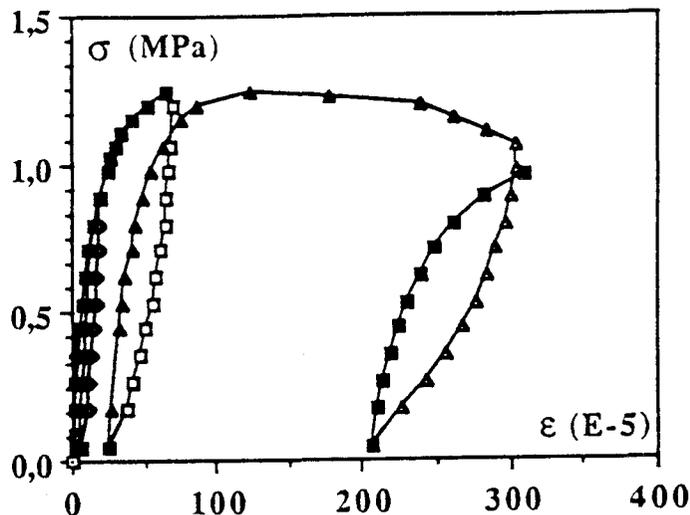


Figure 1.10 : Cycles de chargement déchargement

1.3.2 Mesures de l'endommagement par ultra-sons

Une autre technique qui peut être envisagée pour la quantification de l'endommagement est celle des ultra-sons. Elle présente un certain nombre d'avantages qui sont :

- sa simplicité de mise en oeuvre. L'appareillage nécessaire est relativement simple,
- un suivi continu de l'évolution de la micro-fissuration,
- son aspect non destructif.

1.3.2.1 Rappels de la théorie de propagation d'ondes dans les milieux élastiques

Dans un milieu élastique linéaire, le champ de déplacement est donné par l'équation de Lamé-Navier :

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } \vec{u} - \mu \text{rot rot } \vec{u} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \rho \ddot{\vec{u}}$$

λ et μ sont les coefficients de Lamé ; ρ la densité volumique du matériau.

La résolution de cette équation donne deux types d'ondes (longitudinales et transversales), selon que le champ \vec{u} considéré est irrotationnel ou rotationnel.

- pour l'onde longitudinale ou de compression (ondes primaires)

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

- pour l'onde transversale ou de cisaillement (ondes secondaires)

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Le mouvement vibratoire d'onde se fait suivant la direction de propagation pour les ondes P et perpendiculaire pour les ondes S. Toute variation de caractéristique mécanique peut être détectée à partir des vitesses de propagation. Celles-ci doivent diminuer lorsque la microfissuration augmente.

Si la mesure des vitesses est simple (mesure du temps de parcours de l'onde émise), son exploitation peut être délicate du fait des problèmes de diffraction de l'onde ou de l'interaction avec les interfaces. En effet, le chemin de propagation de l'onde n'est pas, en général, le chemin rectiligne idéalisé entre l'émetteur et le récepteur. Certaines précautions expérimentales peuvent être prises pour améliorer la qualité des mesures (surfaces planes, saturation moins élevée, ...) [17].

I.3.2.2 Notion d'atténuation

L'atténuation est liée à l'interaction entre l'onde et le milieu étudié. Elle caractérise essentiellement la dissipation dans ce milieu. On distingue couramment deux types d'atténuation :

- l'atténuation intrinsèque qui dépend des déformations non linéaires du matériau. C'est elle qui est à relier à l'endommagement,
- l'atténuation extrinsèque qui, elle, résulte des réflexions de l'onde. Elle peut être importante pour des longueurs d'onde de dimension sensiblement égale à la taille des grains ou des hétérogénéités [48], [55].

Pour l'établissement de l'expression donnant l'atténuation, on utilise généralement un modèle visco-élastique :

$$\sigma(t) = m(t) \varepsilon(t)$$

t représente le temps, et m la matrice de souplesse. Par la transformée de Fourier, et en utilisant l'équation du mouvement, on obtient [8] :

$$M \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

$M(\omega)$ est le module complexe
 U la transformée de Fourier du champ de déplacement u

Dans le cas d'une onde plane, la solution à cette équation s'écrit :

$$u = u_0 e^{-\alpha x [i\omega t - kx]}$$

k est un complexe

L'amplitude spectrale d'une telle onde s'écrit :

$$U(f) = G(f, x) e^{-\alpha(f) x} \exp [i (\omega t - kx)]$$

G permet de prendre en compte les effets de la géométrie de l'échantillon et de la source
 $\alpha(f)$ est le coefficient dit d'atténuation
 x est la longueur de l'échantillon
 f est la fréquence

Pour la détermination pratique de l'atténuation, on choisit d'abord un échantillon de référence dont le facteur de qualité Q_r est assez élevé. Le facteur de qualité Q est tel que :

$$\alpha = \frac{\pi f}{QV} \quad \text{soit} \quad Q = \frac{\pi f}{\alpha V}$$

De l'expression de $U(f)$, on déduit :

$$\text{Ln} \frac{U}{U_r}(f) = - [\alpha - \alpha_r] x + \text{cte}$$

soit
$$\text{Ln} \frac{u}{U_r}(f) = -\pi \left(\frac{1}{QV} - \frac{1}{Q_r V_r} \right) x f + \text{cte}$$

p

Comme $Q_r V_r$ est élevé, alors $\frac{1}{Q_r V_r}$ peut être négligé.

On a donc :

$$\text{Ln} \frac{U}{U_r}(f) = - \frac{\pi x}{QV} f + \text{cte}$$

La méthode du rapport des spectres, couramment utilisée pour déterminer le facteur de qualité consiste à tracer la pente de la droite $\text{Ln} \frac{U}{U_r}(f)$. Si besoin est, on peut restreindre l'intervalle de fréquence pour avoir une droite.

La pente de la droite obtenue est $-\frac{\pi x}{QV}$, ce qui permet de calculer Q et donc l'atté-

nuation $\alpha = \frac{\pi f}{QV}$.

Un exemple de mise en oeuvre de la méthode est présentée sur la figure 1.11 [40]. On peut observer que le logarithme du rapport des spectres est effectivement une droite.

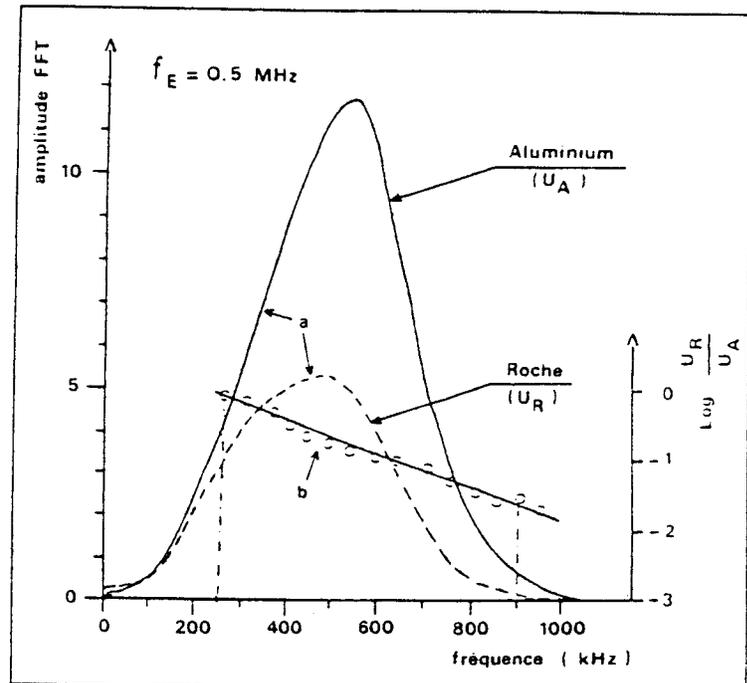


Figure 1.11 : Exemple de détermination du facteur de qualité par la méthode du rapport du spectre (d'après Klimis [40])

1.4 CONCLUSIONS

A travers ce chapitre bibliographique, nous avons voulu mettre en évidence un certain nombre d'aspects essentiels dans le comportement des roches microfissurées.

- L'importance de la microfissuration et son évolution dans le comportement en compression des roches semble bien établi : la microfissuration initiale détermine par exemple les caractéristiques mécaniques des roches. Elle peut également influencer le mode de rupture. Le développement de la microfissuration est un phénomène assez complexe à décrire. Au travers des observations microscopiques disponibles dans la littérature, il semble que le mécanisme dominant soit l'extension de fissures axiales en partie provoquée par l'existence de fissures frottantes inclinées par rapport à l'axe de chargement.

Par ailleurs, la présence de pores et les interactions entre microfissures peuvent, dans certains cas, être importantes et mériteraient alors d'être prises en compte.

- Il y a ainsi donc pour les roches microfissurées la nécessité d'une modélisation fine susceptible de tenir compte de l'altération observée au cours des chargements. L'anisotropie induite dans le comportement et la forte dilatance due à l'évolution de la microfissuration sont aussi des aspects majeurs à considérer. Le cadre fourni par la mécanique de l'endommagement paraît bien adapté pour cela.

- Pour la modélisation de l'endommagement, l'un des aspects à traiter est la caractérisation expérimentale de la dégradation. On dispose à l'heure actuelle de peu de renseignements expérimentaux sur l'endommagement des matériaux fragiles. La suite de cette étude est consacrée à cela.

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ENDOMMAGEMENT DU GRES DE FONTAINEBLEAU SOUS SOLLICITATIONS DE TRACTION

La caractérisation du comportement d'un matériau doit se faire pour divers types de sollicitation et de chemins de contraintes. En Mécanique des Roches, les ouvrages souterrains sont souvent sollicités en compression. Cependant, les phénomènes de décompression (qui font suite au creusement des ouvrages) induisent de fortes extensions.

De ce fait, il est important que les sollicitations de traction soient étudiées expérimentalement et dans les modèles de comportement des roches. Si les modèles existants ne prennent pas en compte correctement ce type de sollicitation, c'est en partie par manque d'essais, mais aussi à cause des difficultés que posent ces essais.

Après une présentation des essais de traction monotone ainsi que les résultats obtenus, on s'attachera particulièrement à la quantification de l'endommagement du grès sous ce type de sollicitation. Enfin, les résultats obtenus à l'aide d'une autre technique expérimentale (mesures ultrasonores) seront présentés et discutés à la fin du chapitre.

2.1 ETUDE DE LA TRACTION MONOTONE DU GRES

Il existe trois types d'essais qui permettent d'évaluer la résistance à la traction :

- L'essai de flexion trois points,
- L'essai Brésilien,
- L'essai de traction directe.

2.1.1 Différents types d'essai de traction

L'essai de traction par flexion :

C'est le plus connu et le plus utilisé des trois essais. Il permet de reproduire un type de sollicitation de traction locale très fréquente dans les ouvrages de Génie Civil. Cette procédure de caractérisation de la résistance à la traction offre l'avantage d'une mise en place facile qui conduit à une zone d'endommagement confinée et moins sensible à la présence des défauts locaux. Malheureusement, il donne des résultats dépendant fortement de la dimension des éprouvettes [2].

L'essai Brésilien :

L'intérêt de cet essai est qu'il peut être réalisé sur des éprouvettes en compression. C'est l'essai indirect le plus souvent pratiqué sur les roches (simplicité de la manipulation, avantage économique).

Cet essai consiste en une compression diamétrale d'un disque du matériau. L'effort de compression appliqué développe des contraintes de traction à l'intérieur de l'éprouvette suivant un plan médian [28].

On constate pour les matériaux fragiles une rupture le long du diamètre AB (figure 2.1). Du point de vue de la rupture, on considère que l'effort P est appliqué le long d'une génératrice du cylindre. Alors la répartition des contraintes le long du diamètre de charge AB est donnée par [25]:

$$\sigma_{yy} = \frac{-P}{\pi b R}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{P}{\pi b R} \frac{3(R^2 + y^2)}{R^2 - y^2}$$

et sur le diamètre CD :

$$\sigma_{yy} = \frac{-P}{\pi b R} \frac{(R^2 - x^2)^2}{(R^2 + x^2)^2}$$

b : largeur du disque
R : Rayon du disque

Avec l'application du critère de Griffith [25], le long de AB, on montre que vis-à-vis de ce critère le point défavorable se situe au centre du disque (figure 2.1).

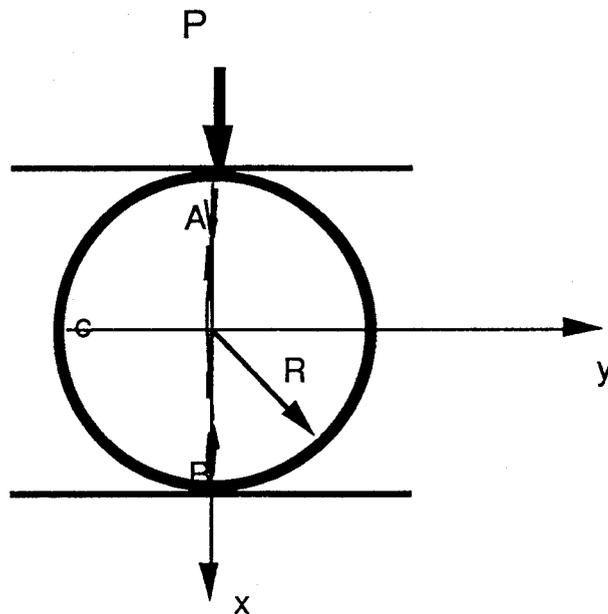


Figure 2.1 : Essai Brésilien

Au centre du disque :

$$\sigma_{yy} = \frac{-P}{b R}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{3P}{\pi b R}$$

$$|\sigma'_{0B}| = \frac{P}{\pi b R}$$

L'essai de traction directe

Cet essai peut être asservi en déplacement ou en déformation.

Dans tout matériau fragile, à l'approche de la résistance au pic, il se produit un désordre important qui ne correspond plus à la description simple de type élastique fragile ; l'asservissement en déplacement ou déformation est utilisé pour bien suivre la partie radoucissante de la courbe contraintes-déformations. Nous donnons sur la figure 2.2 un exemple de comportement obtenu par Terrien [70] sur une éprouvette en micro-béton. On remarque sur cette figure une perte de linéarité bien avant le pic dû au développement des microfissures.

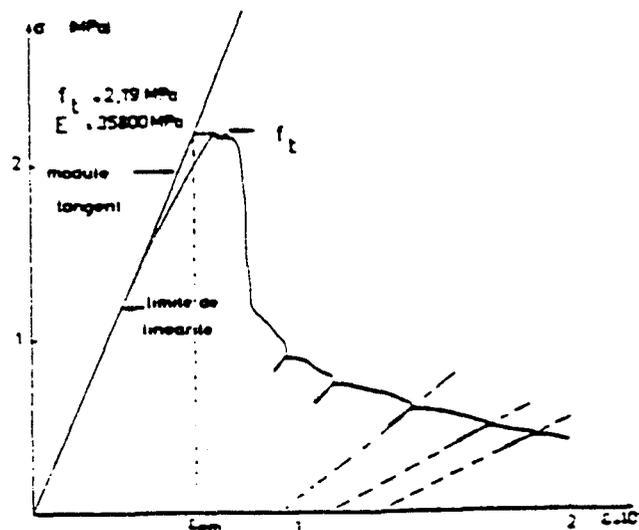


Figure 2.2 : Essai de traction à vitesse imposée, d'après (TER 80)

L'essai "P.I.E.D."

Lors d'un essai de traction des matériaux fragiles, on constate souvent que l'éprouvette se rompt par cassure au milieu ; cette cassure fait suite à une phase de localisation de la déformation au milieu de l'échantillon (figure 2.3). Dans le but d'empêcher ce phénomène de localisation de déformations, des tentatives d'amélioration d'essai ont été faites par certains auteurs [54], [58]. Nous présentons ici une procédure expérimentale qui nous paraît intéressante.

Pour l'essai "P.I.E.D.", l'idée de base est due à Hermite(30) qui a utilisé des éprouvettes en béton moulées dans des tubes métalliques munis d'un filetage interne pour favoriser l'adhérence. Un effort de traction est appliqué sur le tube, les déformations dans le béton sont alors imposées par les déformations élastiques du tube. Mais la différence du coefficient de Poisson des deux matériaux introduit un effet de confinement mettant le béton dans un état triaxial, effet qui a été amélioré [58], [13], en utilisant une série de barettes métalliques espacées et collées sur les faces latérales d'une éprouvette prismatique (figure 2.4). L'objectif est d'aboutir à une caractérisation correcte du comportement du matériau soumis à un chargement de traction uniaxial, notamment jusqu'aux environs de la rupture. Il s'agit d'avoir un champ de déformation quasi uniforme dans l'échantillon testé (figure 2.5).

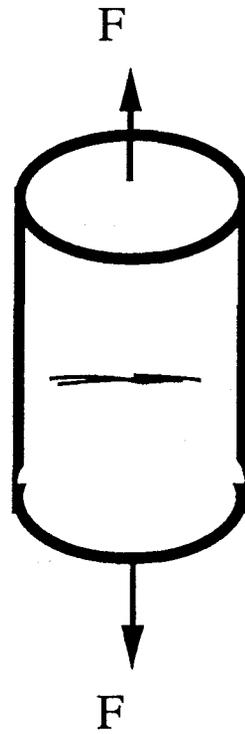


Figure 2.3 : Mode de rupture en traction directe

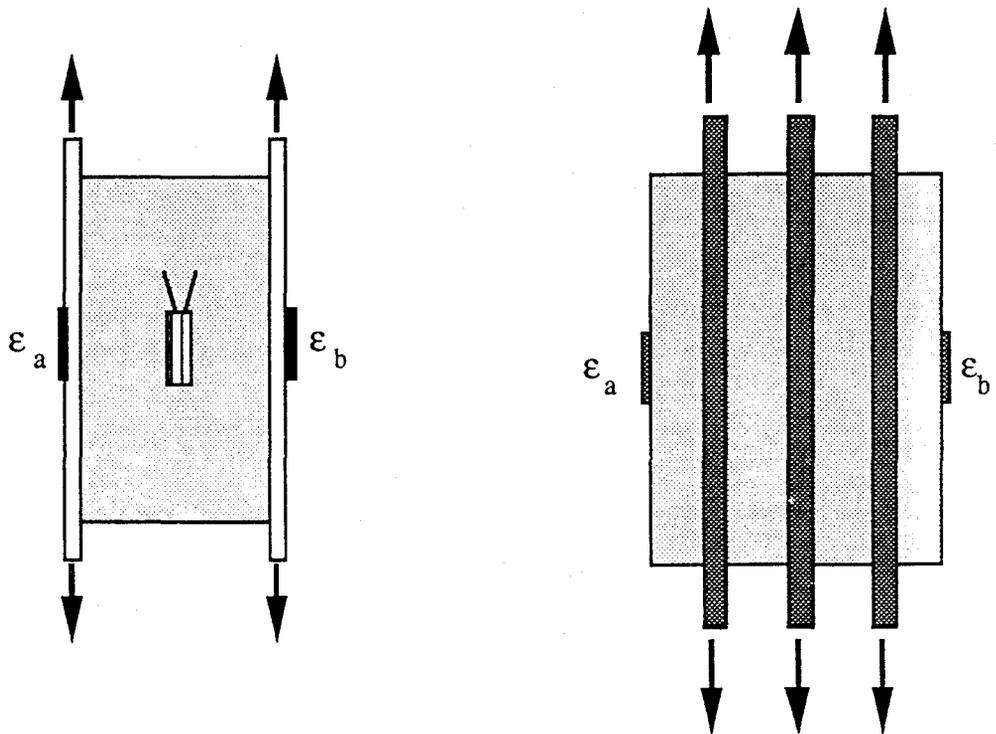


Figure 2.4 : Principe de l'essai P.I.E.D.

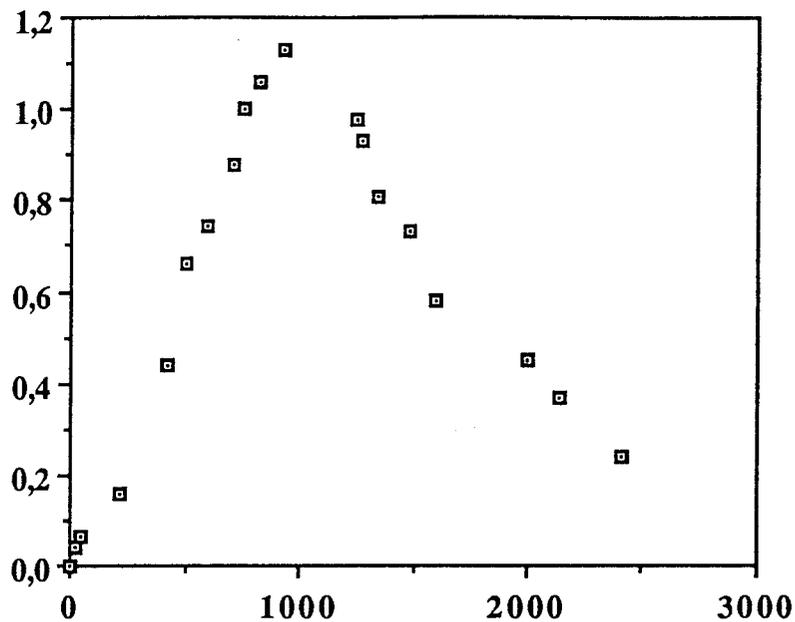


Figure 2.5 : Exemple de résultat obtenu à l'aide de l'essai P.I.E.D. [54]

Après cette brève présentation des diverses possibilités d'étude expérimentale, nous allons décrire le matériau étudié ainsi que le dispositif expérimental choisi et les résultats obtenus ; l'essai retenu est celui de la traction directe.

2.1.2 Présentation du grès testé

Le grès de Fontainebleau est un matériau granulaire qui sert de support à de nombreuses expériences de physique des roches, grâce à son exceptionnelle simplicité de ses deux phases solide et poreuse et qui fait de lui un bon exemple d'espace poreux intergranulaire [31].

Le grès de Fontainebleau est essentiellement formé de grains de quartz ayant subi une longue érosion et un bon classement granulométrique avant de se déposer.

Le dépôt original est formé de grains de quartz monocristallins sub-sphériques, de diamètre avoisinant $250 \mu\text{m}$, c'est du quartz à plus de 99,8 % de porosité comprise entre 3 et 30 %. Le grès de Fontainebleau utilisé pour les essais en laboratoire a une porosité comprise entre 9 et 11 %.

La figure 2.6 montre le moulage du réseau poreux du grès de Fontainebleau de diverses porosités [8].

MOULAGE DU RESEAU POREUX DE GRES DE FONTAINEBLEAU DE DIVERSES POROSITES

Photographies de répliques époxy au Microscope Electronique à Balayage.
Montages stéréographiques

500 μm

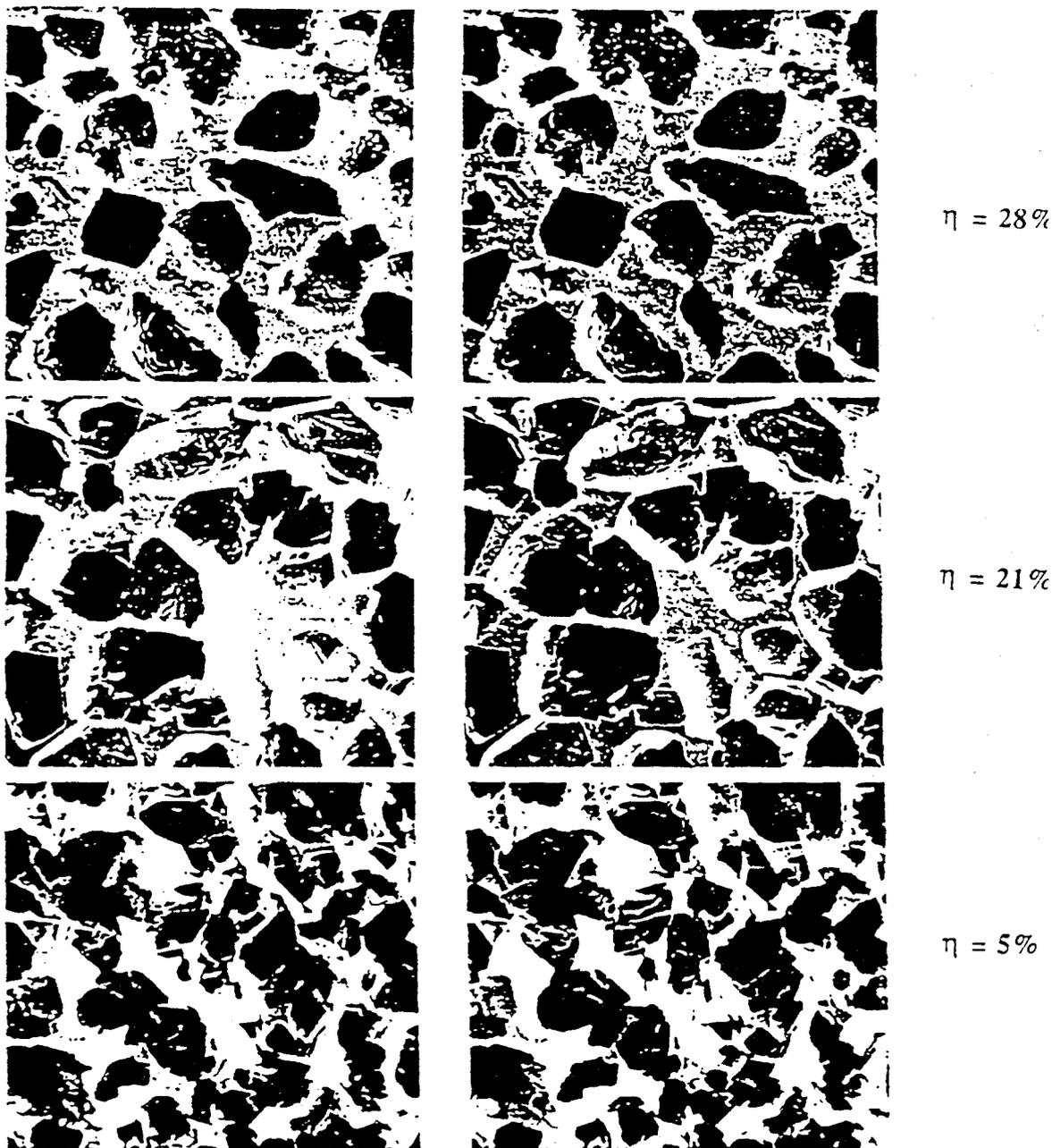


Figure 2.6 : Moulage du réseau poreux du grès de Fontainebleau de diverses porosités (d'après Bourbie [8])

2.2 ETUDE DE TRACTION DIRECTE

Les roches ayant un comportement fragile, le serrage d'une éprouvette cylindrique dans les mors d'acier crée des fissures ou des ruptures au niveau du contact. Il importe donc d'avoir des montages particuliers permettant une prise indirecte de l'échantillon. La figure 2.7 donne deux exemples d'accrochage métallique à l'aide de colle époxy. L'échantillon peut être collé sur ses faces (figure 2.7.a), sur un collier en aluminium (figure 2.7.b). Dans ce cas, la rupture apparaît généralement au niveau du collage car il y a, à ce niveau, des concentrations de contraintes (effet d'accrochage, etc. ...). Dans notre travail le système d'accrochage retenu est (a).

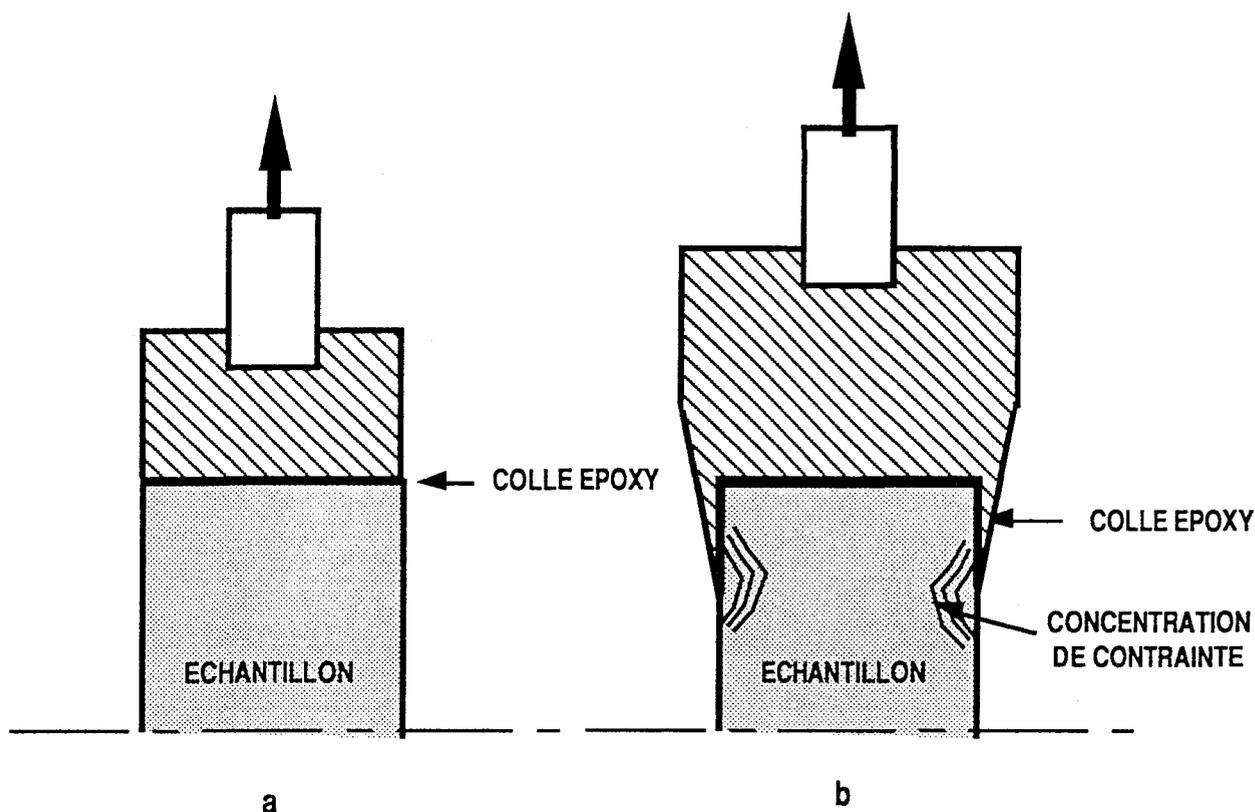


Figure 2.7 : Exemples d'accrochage métallique utilisés en traction directe

2.2.1 Dispositif expérimental

Il est schématisé sur la figure 2.8. Le montage de traction est constitué de deux ensembles symétriques. Chaque ensemble est constitué principalement de deux pièces filetées; la première de ces pièces est montée sur la machine, et la deuxième est collé sur l'échantillon. Les deux pièces sont liées entr'elles par une tige de 9 mm de diamètre pour assurer l'alignement de l'échantillon au cours de l'essai. Aux extrémités de cette tige, des billes de diamètre 20 mm sont fixées pour éviter toute excentricité et tout moment lesquels perturberaient la réussite de l'essai.

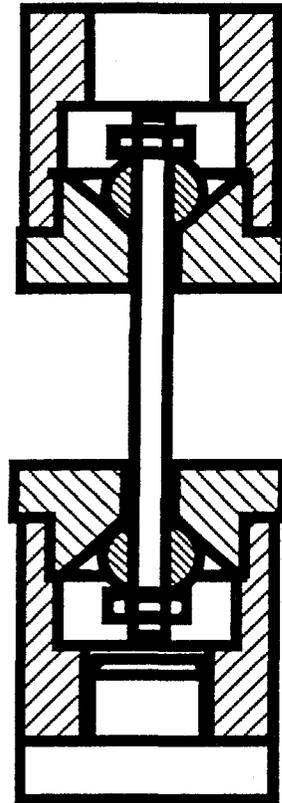


Figure 2.8 : Dispositif expérimental de traction mis au point

2.2.2 Description de l'essai

L'essai de traction directe consiste à soumettre l'échantillon à un champ de contraintes uniaxial. L'éprouvette est collée avec une colle de type Araldite AW 106 et un durcisseur 953 U sur ses deux faces. Deux couronnes réalisées en Aluminium serrent l'échantillon. Sur ces deux couronnes est monté un capteur LVDT $\pm 2,5$ mm, relié à un transducteur qui donne son signal sur un enregistreur et une table traçante x-y. Ce capteur fournit donc l'état de déformation sur une distance centrale de 45 mm de l'échantillon sollicité. Tout le système est monté sur une machine INSTRON de 10 t de capacité. La vitesse de chargement est de l'ordre de 10^{-4} mm/s.

2.2.3 Résultats et interprétation

Nous remarquons, pour l'essai de traction directe, que la rupture finale se produit au milieu de l'échantillon perpendiculairement à la contrainte appliquée comme précédemment souligné. On observe sur la courbe contrainte-déformation axiale une perte de linéarité bien avant le pic due sans doute au développement des microfissures au sein du matériau. Cette non linéarité est d'une importance qui ne peut pas être négligée. Le pic de contrainte est de l'ordre de 1,5 MPa, avec un état de déformation de l'ordre de $200 \cdot 10^{-5}$ (figure 2.9).

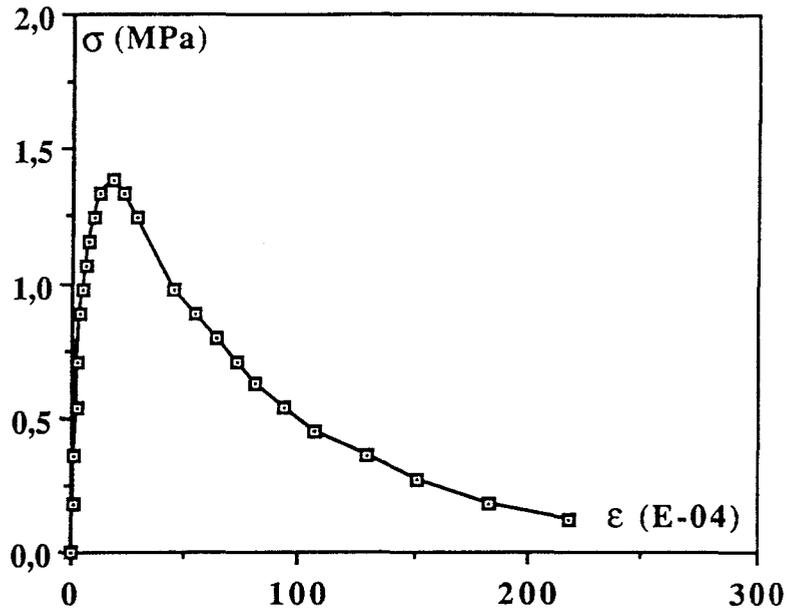


Figure 2.9 : Essai de traction directe

Le module élastique en traction mesurée pour cette roche est de 4 800 MPa. L'essai est poursuivi jusqu'à la rupture avec des déformations de l'ordre de $200 \cdot 10^{-4}$.

2.3 ESSAI DE TRACTION DIRECTE AVEC DES JAUGES

Un des aspects essentiels de la caractérisation du comportement des matériaux fragiles dit radoucissants est la représentation des résultats post-pic. Quelle confiance peut-on accorder aux mesures de déformations réalisées dans la partie descendante de la courbe contrainte-déformation ? Cette question est complexe et nécessite une étude complète et rigoureuse. Pour se faire une idée sur les réponses à ces interrogations, nous avons décidé de réaliser des mesures par jauges d'extensométrie au cours de l'essai de traction.

L'essai effectué est le même que précédemment, excepté que le capteur LVDT est remplacé par des jauges d'extensométrie. Sur l'échantillon, 6 jauges de 10 mm de longueur sont disposées de la façon suivante : deux jauges au milieu et les 4 autres sur les extrémités (voir figure 2.10). Les jauges sont placées d'une façon longitudinale sur tout l'échantillon, pour qu'on puisse mesurer les déformations tout au long de notre échantillon.

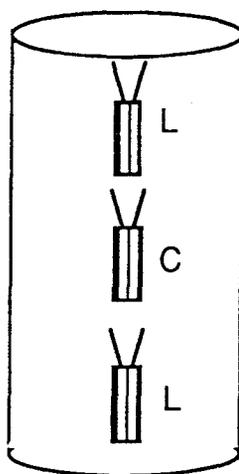
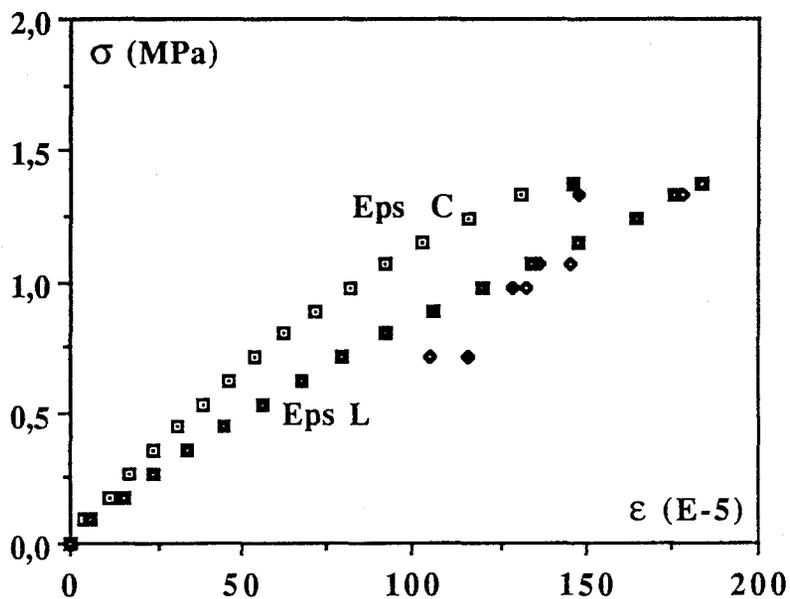


Figure 2.10 : Disposition des jauges d'extensométrie dans l'essai de traction

2.3.1 Résultats et interprétation

On remarque sur la courbe contrainte-déformation (figure 2.11) que le pic reste toujours proche de 1,6 MPa.



Eps C : déformation des jauges centrales
 Eps L : déformation des jauges sur les côtés

Figure 2.11 : Essai de traction direct avec jauges

Le module initial en traction reste à peu près le même que précédemment. Aucune fissure n'est observée au pic alors que la charge commence à diminuer. Après un certain niveau à peu près égal à 40 % du pic, on observe visuellement une fissure qui commence à se développer au milieu de l'échantillon, et ce jusqu'à la rupture finale. Les déformations locales mesurées par les jauges centrales et celles qui sont sur les côtés sont quasiment les mêmes jusqu'à la visualisation de la fissure. Ceci laisse penser que la localisation des déformations n'apparaît qu'après le pic de contrainte. L'éprouvette subit un même état de déformation jusqu'au moment où la microfissure commence à se développer au milieu de l'échantillon. A partir de là, les mesures des jauges centrales commencent à diverger par rapport à celles données par les jauges placées aux extrémités.

2.4 MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR CYCLES DE CHARGEMENT - DECHARGEMENT

Moyennant l'hypothèse d'une équivalence en déformation, nous avons souligné que la quantification de l'endommagement est donnée par D : module élastique courant, E_0 : module élastique initial.

$$D = 1 - \frac{E}{E_0}$$

La première montée nous a permis de déterminer le module initial en traction E_{0t} . La variation du module est obtenue en effectuant des cycles de chargement-déchargement avant et après le pic.

La boucle d'hystéresis due à la viscoélasticité lors d'un cycle charge-décharge rend nécessaire d'une convention pour la mesure du module d'Young élastique. Pour obtenir une mesure moins perturbée par l'effet viscoélastique [5], nous avons choisi de mesurer le module défini par la pente de la droite, joignant le point de plus faible abscisse à contrainte nulle à l'intersection des graphes de décharge et de recharge (figure 2.12).

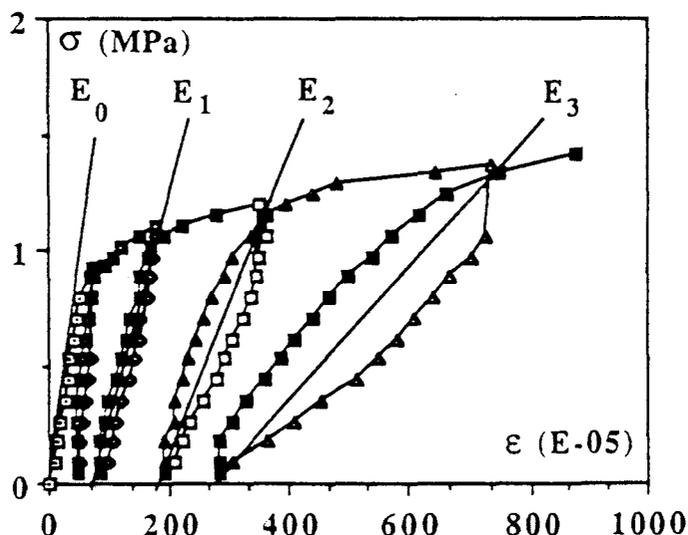


Figure 2.12 : Définition du module sécant utilisé pour la mesure de l'endommagement

2.4.1 Cycles de chargement-déchargement avant le pic

On a effectué un essai de traction chargement-déchargement-rechargement seulement avant le pic, pour caractériser l'endommagement dans cette zone (figure 2.13). Le module élastique en traction diminue au fur et à mesure que la déformation totale augmente. Sa

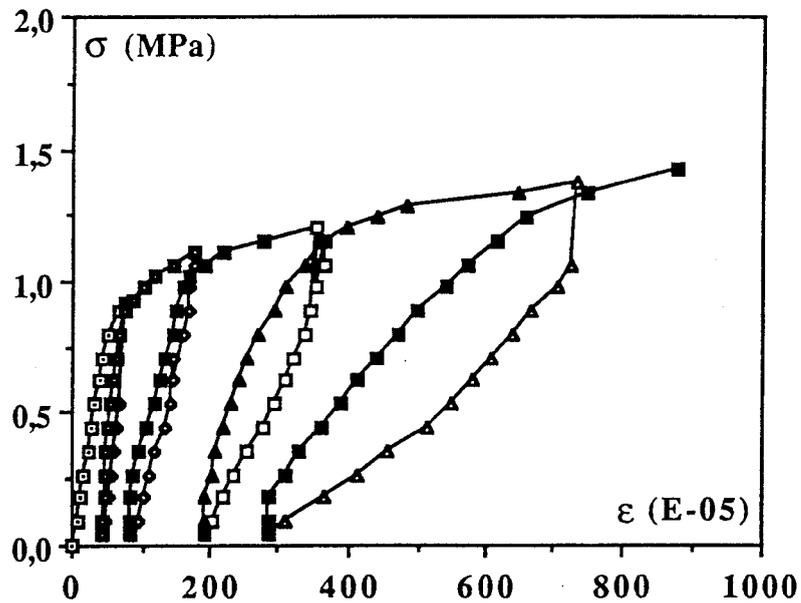


Figure 2.13 : Courbe contrainte-déformation pour cycles chargement-déchargement avant le pic

variation en fonction de la déformation anélastique est donnée sur la figure 2.14. L'évolution de l'endommagement en fonction des déformations anélastiques et totales est donnée par les figures 2.15. L'endommagement atteint au pic une valeur de l'ordre de 0.6, ce qui n'est pas négligeable. On remarque l'existence de déformations anélastiques dues au frottement entre les lèvres des fissures.

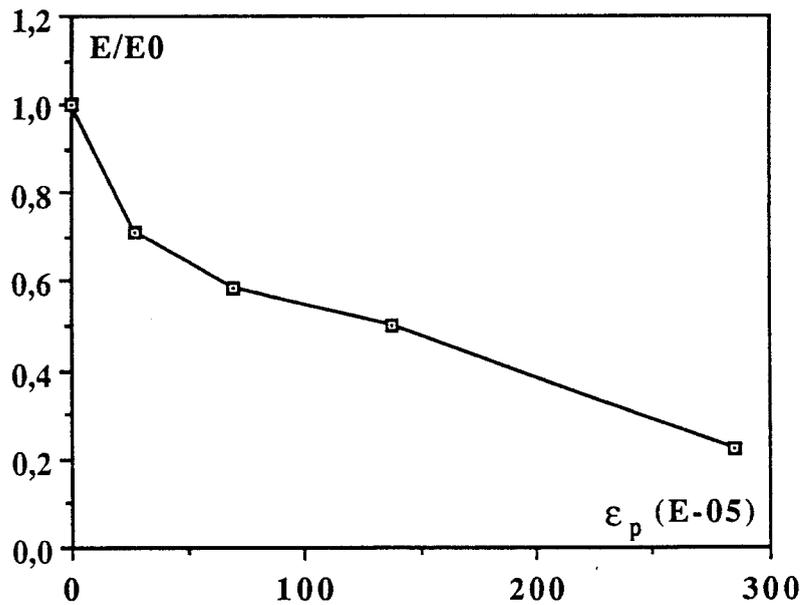
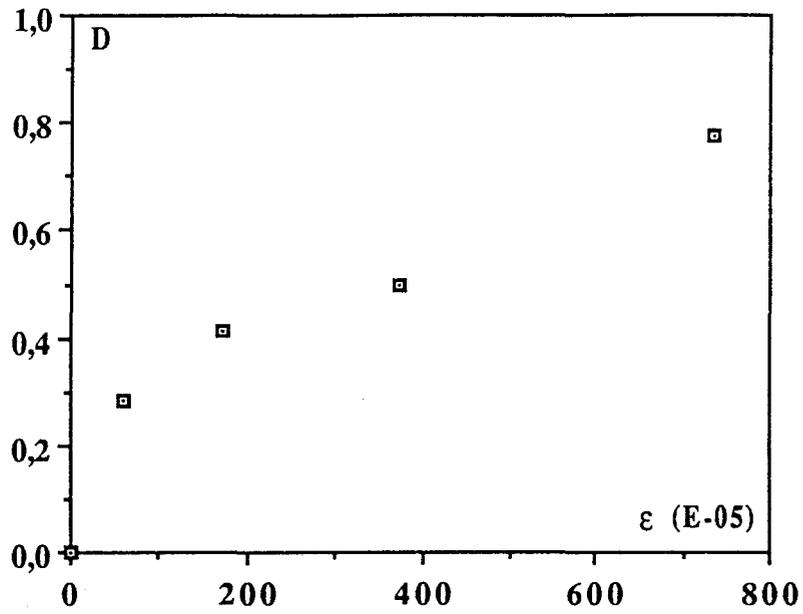
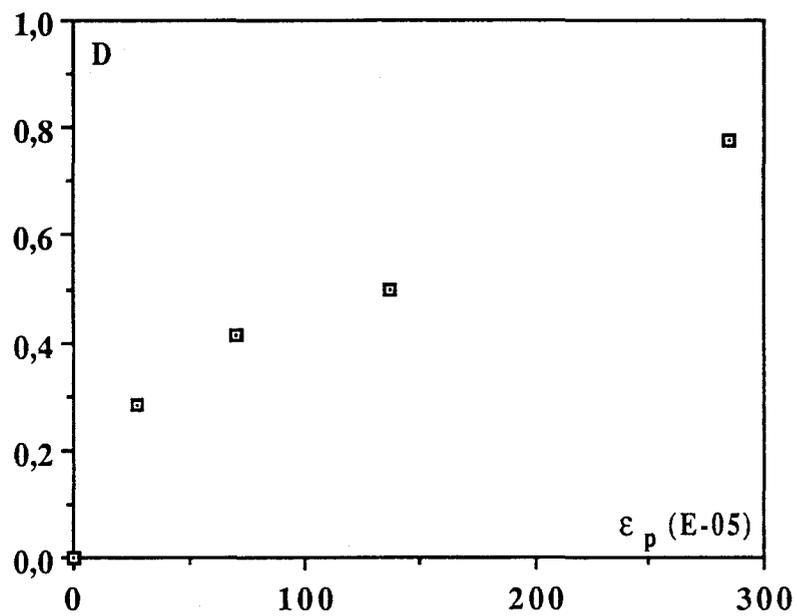


Figure 2.14 : Variation du module élastique en fonction de la déformation anélastique (avant le pic)

La variation de l'endommagement en fonction des déformations totales et anélastiques est représentée sur les figures 2.15.a et 2.15.b . L'allure de cette courbe n'est pas vraiment différente de celle de la déformation totale. Il semble que l'endommagement peut être piloté à l'aide des déformations plastiques liées à l'évolution de la microfissuration. Nous reviendrons au quatrième chapitre sur cette question.



(a)



(b)

Figures 2.15 (a.b) : Evolution de l'endommagement prépic en fonction des déformations totales et anélastiques

2.4.2 Cycles de chargement-déchargement-rechargement avant et après le pic

L'essai précédent a été repris avec des retours élastiques en arrière, avant et après le pic de contrainte, et ceci, jusqu'à la rupture de l'éprouvette (figure 2.16). On remarque que le pic reste toujours du même ordre. De même, le module initial reste inchangé. La variation du module élastique et celle de l'endommagement, obtenues pour l'essai complet, est respectivement présentée sur les figures 2.17 (a.b) et 2.18 (a.b). L'endommagement atteint une valeur légèrement supérieure à 0.8 à la fin de l'essai.

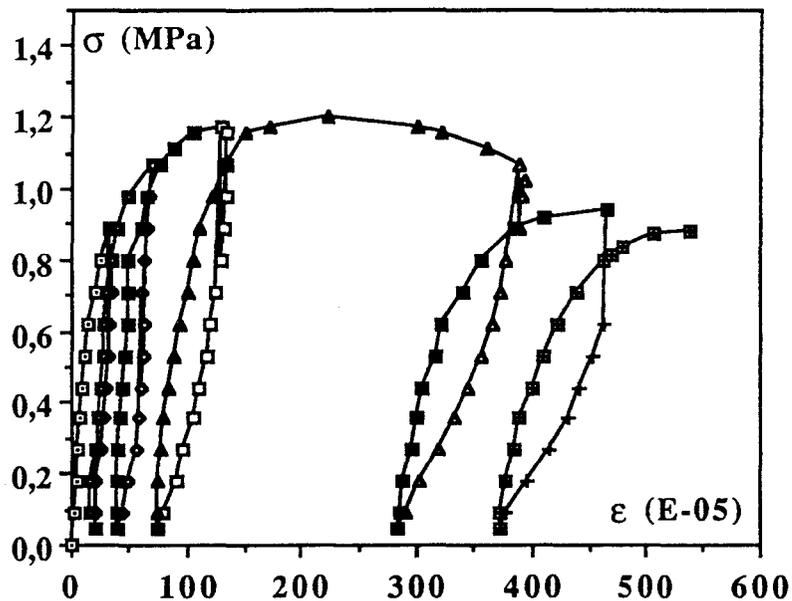
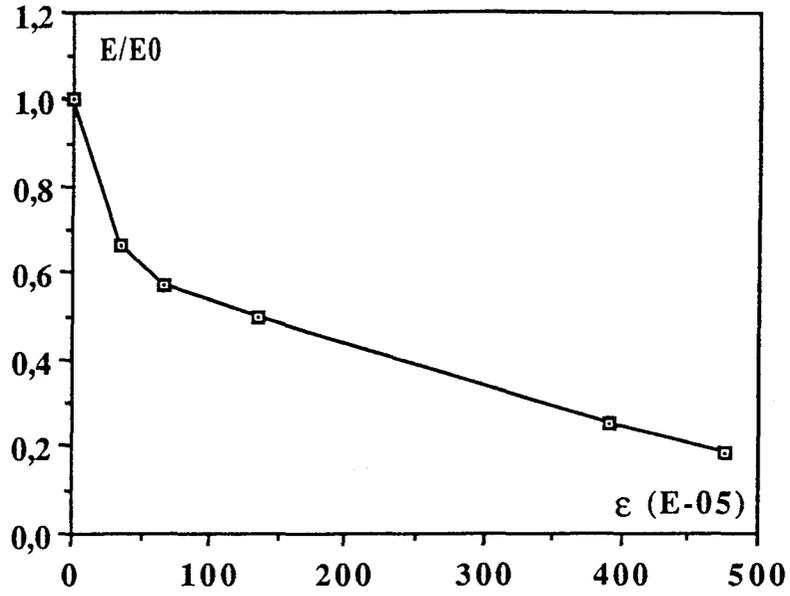
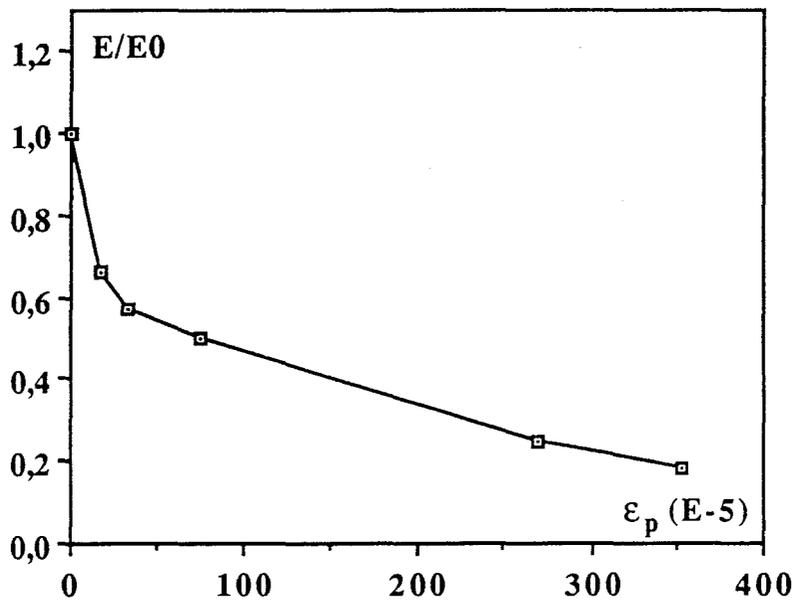


Figure 2.16 : Courbe contrainte déformation pour cycles de chargement déchargement avant et après le pic

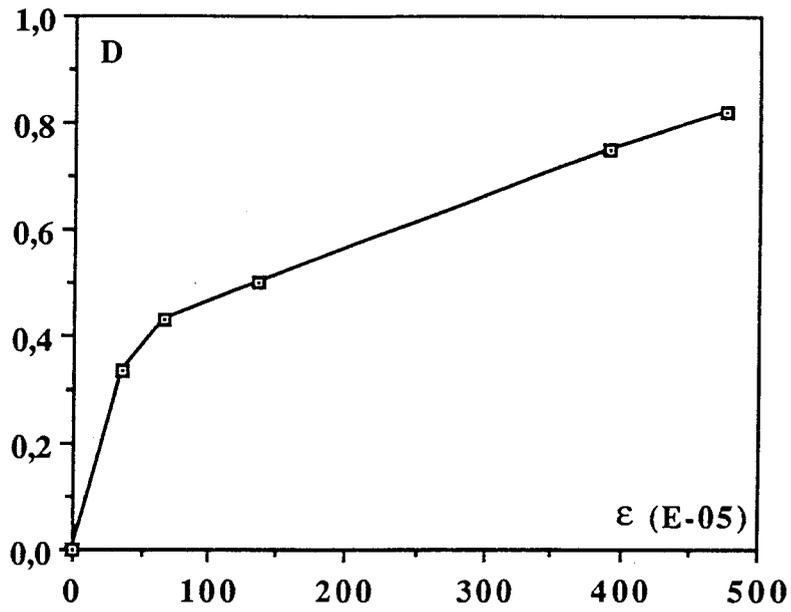


(a)

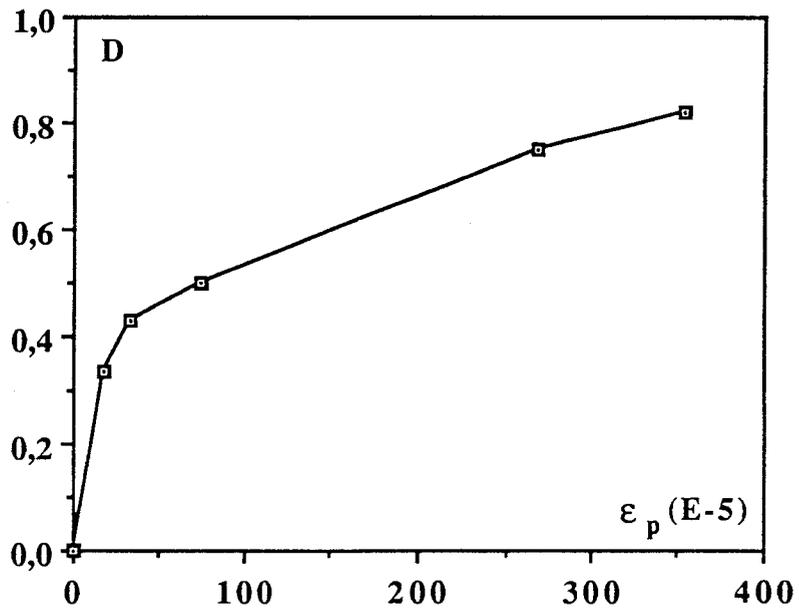


(b)

Figure 2.17 (a,b) : Variation du module élastique pour des cycles effectués avant et après le pic de contraintes en fonction des déformations totales et anélastiques



(a)



(b)

Figure 2.18 (a.b) : Evolution de l'endommagement au cours de l'essai complet en fonction des déformations totales et anélastiques

2.5 MESURES DE L'ENDOMMAGEMENT EN TRACTION PAR ULTRA-SONS

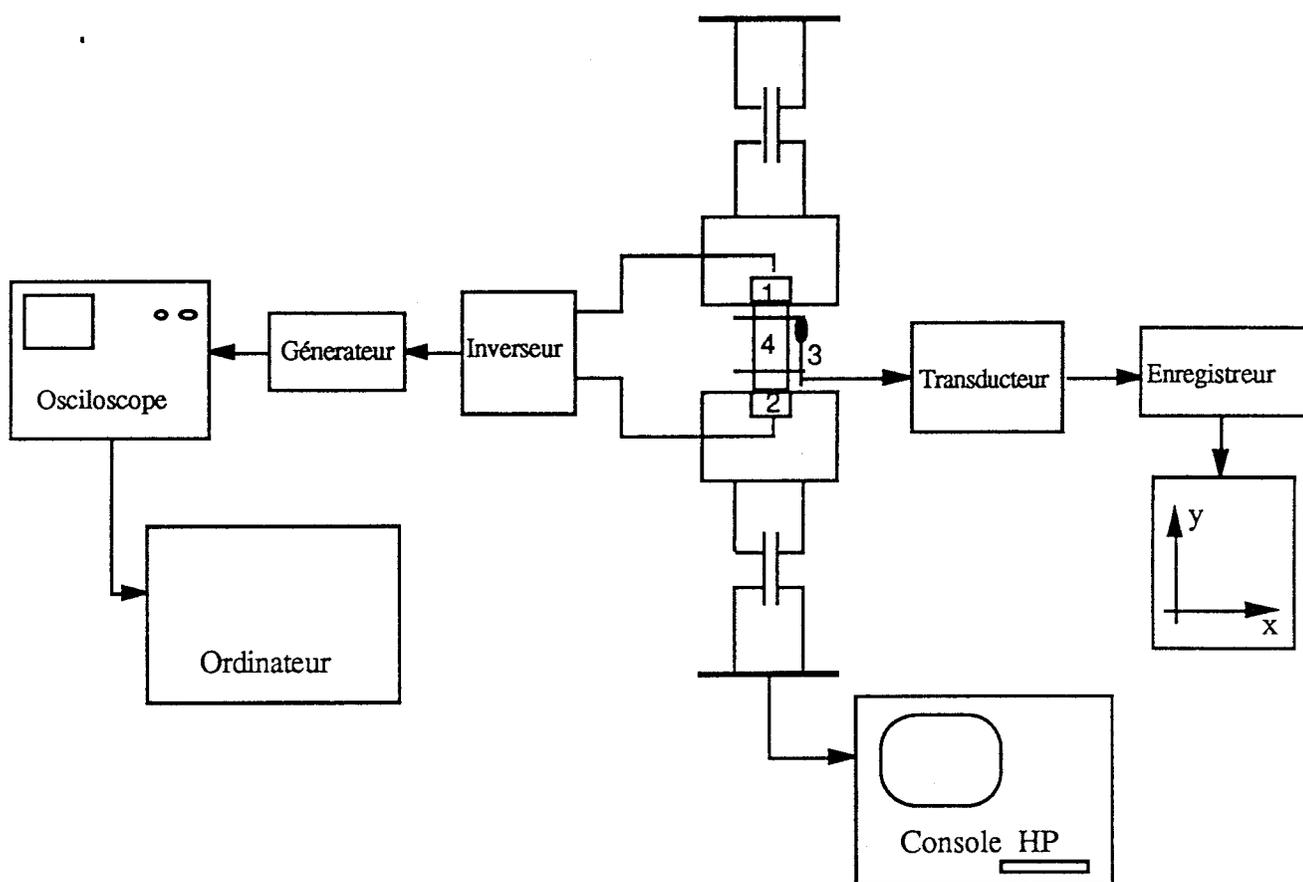
Les mesures extensométriques de déformation ont permis grâce aux cycles de chargement - déchargement effectués de quantifier l'endommagement en traction du grès étudié. Elles ne permettent pas cependant un suivi continu de l'endommagement. Nous avons décidé d'effectuer des mesures par ultra-sons essentiellement dans deux buts :

- la caractérisation continue de l'évolution de la microfissuration,
- le contrôle éventuel des résultats précédemment obtenus, et de fait l'applicabilité des mesures ultrasoniques à la mesure de l'endommagement.

Les essais ont été réalisés avec la collaboration du Laboratoire de Géomécanique de Nancy [17]. Après une brève description du système de mesures, nous présenterons les résultats obtenus ainsi que leur interprétation.

2.5.1 Chaîne de mesures

La chaîne de mesure utilisée comporte outre la partie mécanique classique, une chaîne d'acquisition et de traitement des données obtenues par ultra-sons. Elle est représentée sur la figure 2.19. Elle comprend : un système de génération d'impulsions, un oscilloscope et des transducteurs piézoélectriques.



1 : émetteur 2 : récepteur 3 : capteur 4 : échantillon

Figure 2.19 : Montage utilisé pour l'essai ultrasonique (montage général)

Le générateur d'impulsion

Il est de type Panametrics 5 055 PR, et, est à la fois émetteur et récepteur. Il émet des impulsions électriques (dont il règle l'intensité et le taux de répétition) que le transducteur convertit en impulsion ultrasonore. Le récepteur a pour rôle de régler l'atténuation du signal. Le générateur d'impulsions est relié à un oscilloscope par deux câbles dont l'un assure la transmission du signal, et l'autre la synchronisation des deux appareils.

L'oscilloscope

Il s'agit d'un oscilloscope Tektronix 2 430 A, muni d'une interface GPIB. Il enregistre 1 024 points avec une résolution de 8 bits. Il peut également mémoriser quatre signaux et possède une fonction moyenne qui permet de réduire le bruit aléatoire ambiant. Cet aspect (réduction du bruit extérieur) se révélera important pour les mesures d'endommagement (forte microfissuration) que nous envisageons ici. Enfin, une interface I.E.E.E. assure la connexion à un microordinateur qui permet le stockage et l'analyse des signaux à l'aide d'un logiciel (S.P.D.).

Les transducteurs piézoélectriques

Sur la chaîne de mesure ultrasonique du Laboratoire de Géomécanique, il existe plusieurs types de transducteurs qui sont utilisés [6]. Pour nos essais, les transducteurs sont de type D 7 105 (transducteurs doubles) permettant l'émission et la réception d'ondes P et S. La fréquence centrale de ces transducteurs est de 1 MHz. Le couplage est assuré par un couplant visqueux Sofranel SWC. Les transducteurs sont installés dans des têtes de part et d'autre de l'éprouvette assurant l'application des efforts.

2.5.2 Résultats des mesures

Lors des essais de traction avec cycles de chargement-déchargement, il a été réalisé l'émission et la réception d'ondes P et S. Les signaux ont été enregistrés dès le début de l'essai. Les mesures n'ont pas pu être effectuées jusqu'à la rupture de l'échantillon, les signaux étant vite perturbés par le développement intense de la microfissuration (figure 2.20). On observe sur ces signaux une forte variation d'amplitude. L'exemple présenté sur la figure 2.20 concerne des signaux recueillis au début au pic de la contrainte, et à la fin de l'enregistrement.

Les vitesses V_p et V_s enregistrés au cours de la déformation sont présentées sur les figures 2.22 (a,b). On remarque que la vitesse V_p suit à peu près la courbe contrainte déformation ; les variations de vitesse restent néanmoins faibles au regard de ce que l'on pouvait attendre. L'endommagement déduit est de l'ordre de 0.10 seulement, comparé au 0.4 enregistré en statique pour le même niveau de déformation (mesures extensométriques). Cependant, il s'agit là d'un endommagement dynamique dont la valeur est cependant assez faible vis-à-vis de ce que l'on attendait.

Les mesures de vitesse, seules, ne semblent pas particulièrement bien appropriées à la caractérisation de l'endommagement induit.

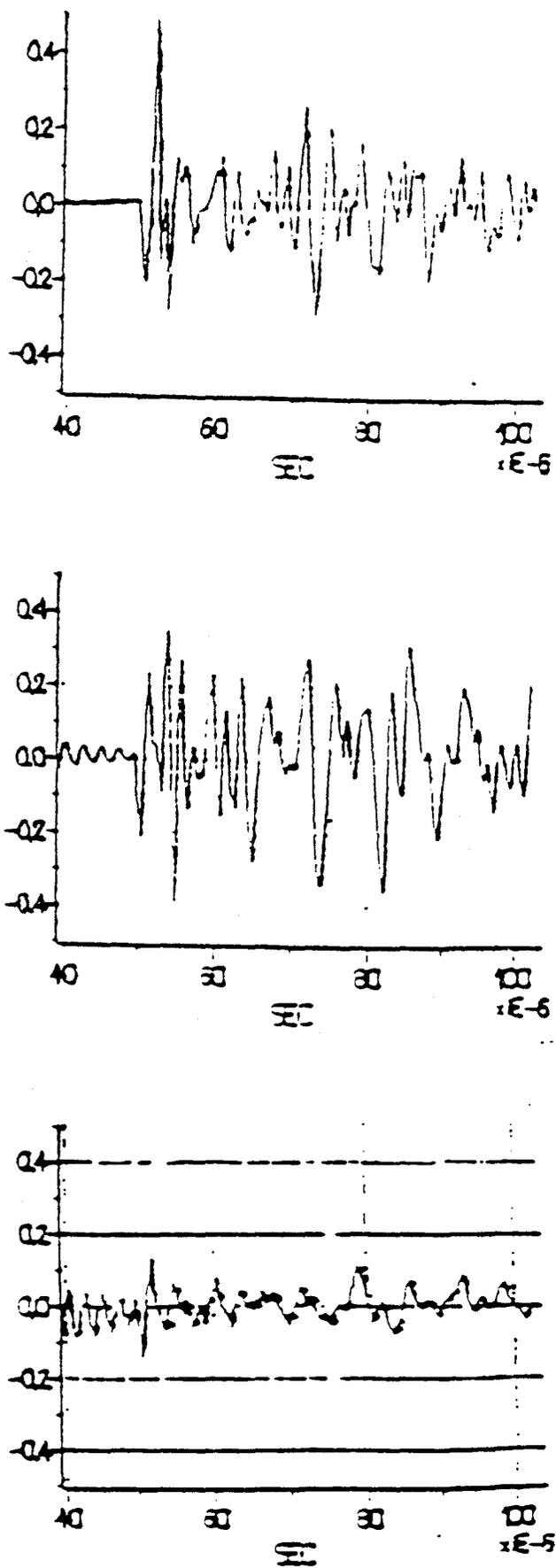


Figure 2.20 : Signaux recueillis au cours de l'essai de traction

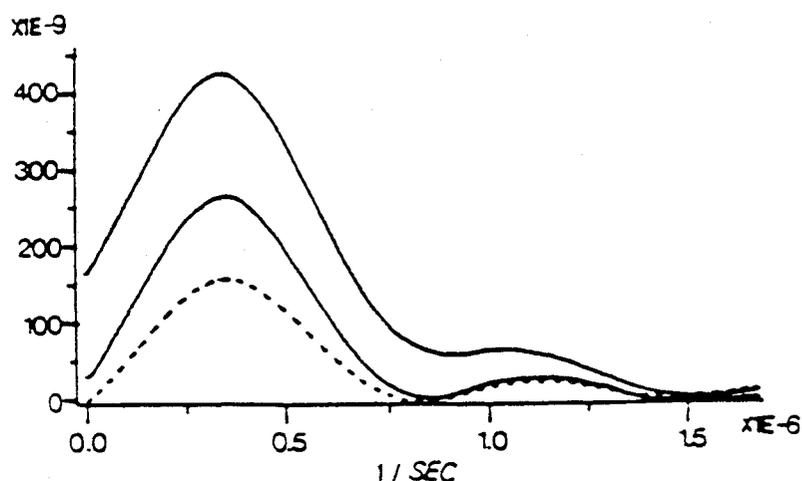
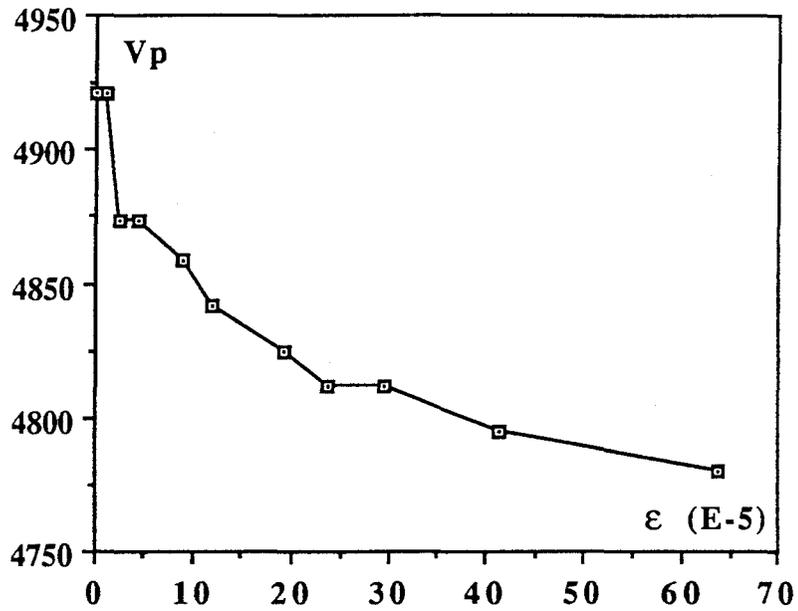


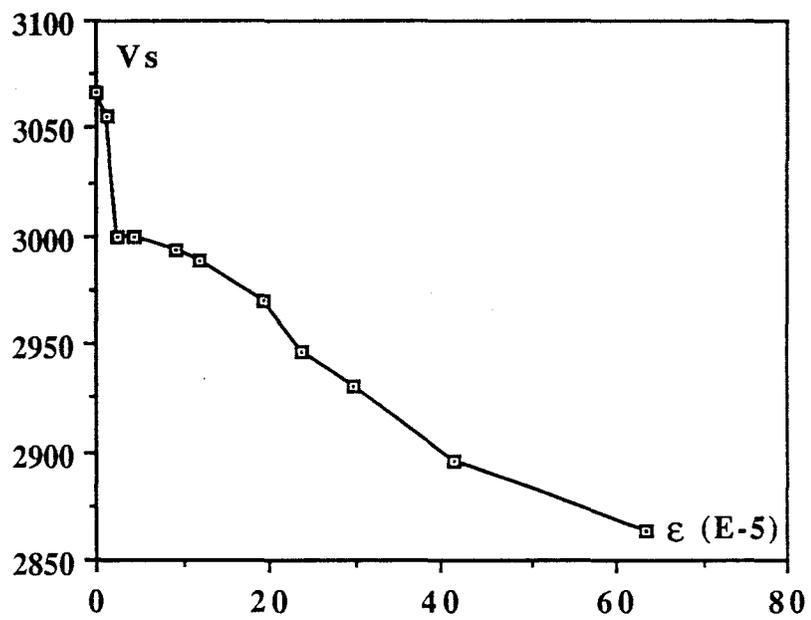
Figure 2.21 : Spectres d'amplitude

L'atténuation du signal (facteur de qualité) permet par contre un suivi plus fin ; le facteur de qualité se révélant bien sensible à l'évolution de la microfissuration. La figure 2.23 représente la variation du facteur de qualité Q en fonction de la contrainte appliquée. Dès l'application de la charge, on observe une diminution de Q . Cette diminution se poursuit de manière rapide jusqu'à l'arrêt de l'essai, à environ une contrainte de 1 MPa, soit avant le pic de contrainte. La déformation atteinte est relativement faible, de l'ordre de 70×10^{-5} . Signalons que pour les essais effectués, l'atténuation varie comme l'inverse de Q [17]. Nous avons, au cours de l'essai par ultra-son, effectué quelques cycles de chargement - déchargement. Un exemple de résultats de ces cycles est représenté sur la figure 2.24.

On constate que le facteur de qualité suit le cycle effectué. Les facteurs de qualité obtenus en décharge sont plus faibles que ceux en charge précédemment réalisés.



(a)



(b)

Figure 2.22 (a,b) : Variation des vitesses de propagation d'ondes V_p et V_s en fonction des déformations totales

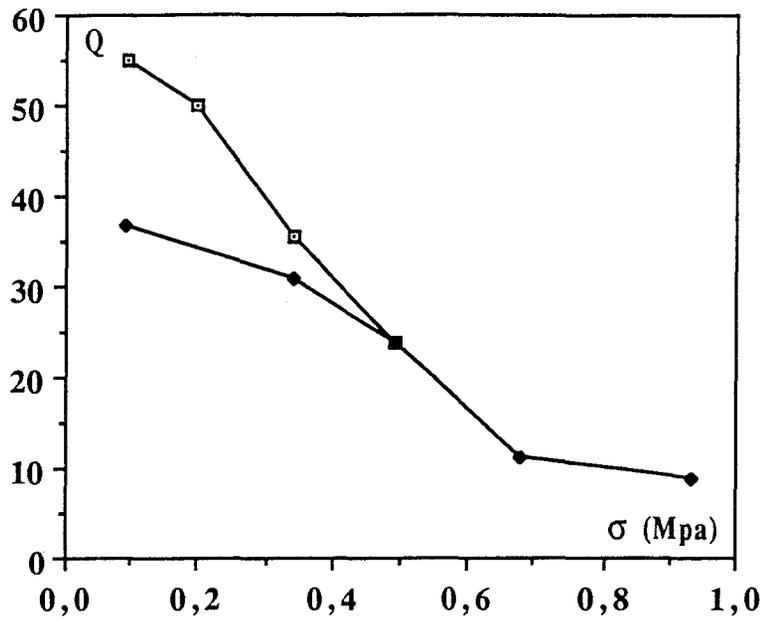


Figure 2.23 : Variation du facteur de qualité en fonction de la contrainte appliquée (chargement - déchargement)

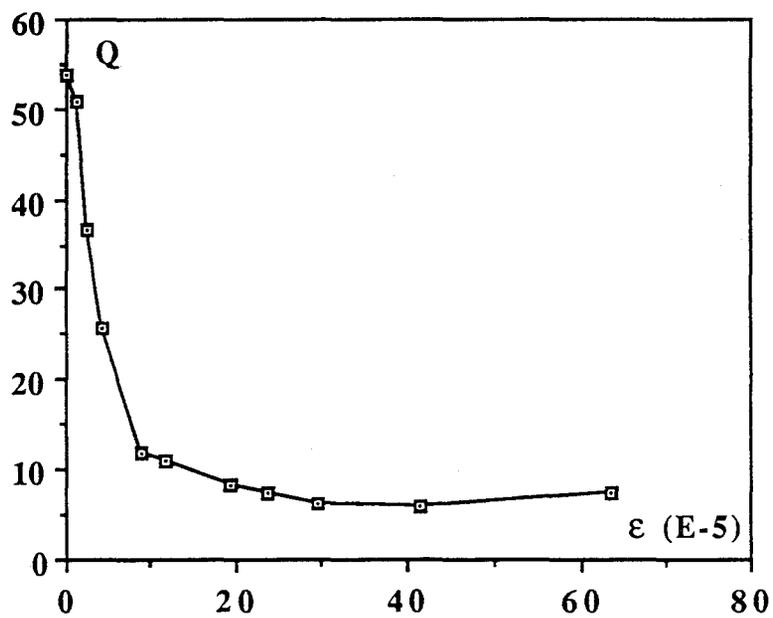


Figure 2.24 : Variation du facteur de qualité en fonction des déformations totales

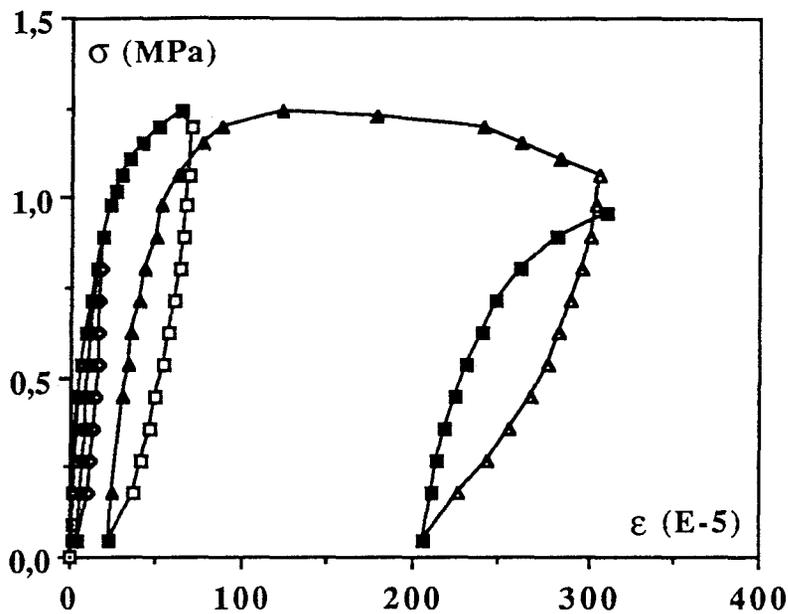


Figure 2.25 : Essai de traction directe chargement-déchargement-rechargement contrôle ultra-sons

2.6 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'endommagement en traction du grès de Fontainebleau. Cette roche est caractérisée par son isotropie initiale et sa forte susceptibilité à la fissuration.

Un montage particulier a été mis au point pour assurer le centrage et la bonne application des charges. Les essais monotones réalisés donnent une résistance relativement faibles de l'ordre de 1,5 MPa. Le module d'élasticité est de 4 800 MPa. On a observé sur la courbe de traction (figure 2.25) une non linéarité avant le pic de contrainte. Nous avons également testé la localisation des déformations mesurées en collant une série de jauges sur l'échantillon. Les mesures montrent une inhomogénéité des déformations un peu après le pic de contrainte.

La caractérisation de l'endommagement est faite à l'aide de cycles de chargement - déchargement. Le point remarquable à signaler est la précocité de l'endommagement bien avant le pic de contraintes. La valeur atteinte au pic est de l'ordre de 0.6.

Des mesures ultrasoniques, que nous avons réalisées avec la collaboration du Laboratoire de Géomécanique de Nancy, confirment cette précocité de l'endommagement. Les vitesses de propagations d'ondes (V_p et V_s) mesurées varient très peu. En revanche, le facteur de qualité s'est révélé bon indicateur de l'endommagement du matériau. Il faut souligner que les essais n'ont pas pu être poursuivis jusqu'aux déformations moyennes ou élevées, les signaux recueillis étant vite perturbés. Cela constitue indubitablement la grande limitation de ce type de manipulation.

CHAPITRE III
ETUDE EXPERIMENTALE
DU GRES DE FONTAINEBLEAU
EN COMPRESSION

INTRODUCTION

Nous avons souligné, au chapitre I, l'importance de la fissuration dans la compréhension du comportement des roches. C'est à cette fissuration que les roches doivent ce qui les distingue du comportement des autres matériaux solides. L'étude de la fissuration de la roche en tant que matière est importante dans la mesure où elle est susceptible d'apporter des informations sur le massif rocheux.

La détermination des propriétés de la fissuration sur des échantillons de roche apporte donc un indice d'identification très utile à la connaissance des roches parce qu'elle est infiniment moins coûteuse que la recherche à l'échelle du massif rocheux. La modélisation du comportement des roches poreuses à forte susceptibilité à la fissuration nécessite des moyens d'investigation de plus en plus précis. Les essais de base qui servent à comprendre mieux les aspects fondamentaux du comportement rhéologique des roches, et permettent le calcul des paramètres à introduire dans les modèles sont l'essai de compression simple, les essais triaxiaux classiques, et dans le cas de l'endommagement, les essais triaxiaux avec cycles de chargement-déchargement-rechargement.

Les résultats des différents essais effectués sur le grès seront présentés et discutés dans ce chapitre.

3.1 PREPARATION DES ESSAIS

- *Préparation des éprouvettes*

Les éprouvettes utilisées pour la réalisation des essais de compression sont découpées à partir de carottes cylindriques, prélevées dans des blocs de grès sains, non fissurés pour avoir une cohérence vis-à-vis des résultats.

Les éprouvettes ont pour côtes moyennes environ 37,5 mm de diamètre et 75 mm de hauteur, soit un élanement de 2, ce qui est assez correct. Un élanement plus élevé aurait conduit à une rupture par flambage.

- *Condition d'essai*

Les éprouvettes sont munies de jauges transversales et longitudinales. L'ensemble est introduit dans une jaquette en silastène qui les isole de l'huile "haute pression", utilisée pour la montée en pression de confinement.

- *Vitesse de chargement*

De façon générale, l'augmentation de la vitesse de chargement augmente la résistance apparente en compression des roches [31], [28]. Afin de respecter les conditions de sollicitation quasi-statique, nous avons utilisé des vitesses de sollicitation très lentes de l'ordre de $1,2 \cdot 10^{-6}$ mm/s en déplacement contrôlé.

- *Température*

L'influence de la température sur le comportement mécanique dépend de la roche. Le comportement mécanique du grès de Fontainebleau est très peu sensible au traitement thermique, jusqu'à une température de l'ordre de 300° (figure 3.1). Les essais qui sont traités dans ce chapitre ont été effectués à la température ambiante.

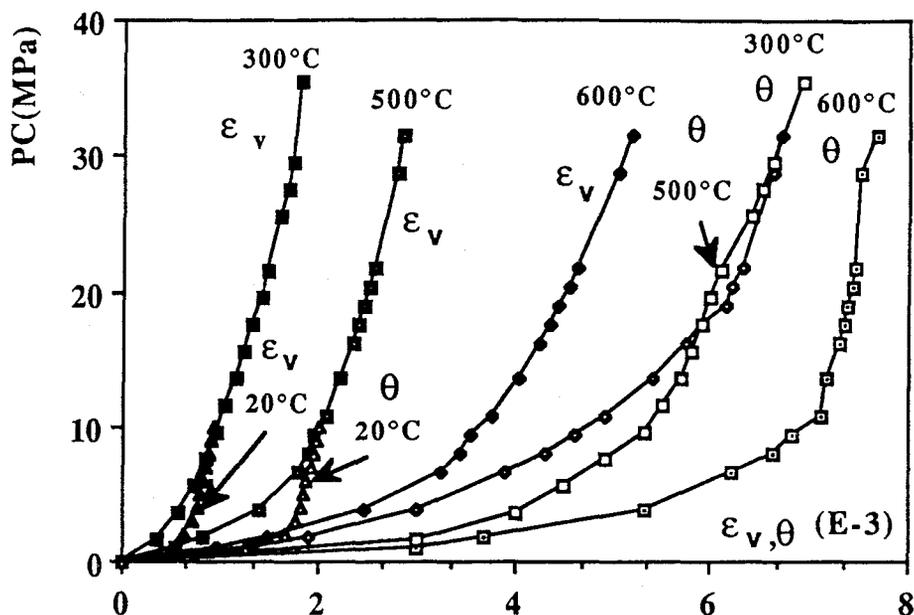


Figure 3.1 : Influence de la température sur le comportement du grès (isotropes)[63]

3.2 DISPOSITIF ET MONTAGE EXPERIMENTAUX

3.2.1 Dispositif

La presse utilisée est une presse "Instron", de même type que celle déjà évoquée au chapitre II, mais celle-ci a une charge maximale de 50 tonnes au lieu de 10 tonnes pour la précédente. Cette machine permet donc d'atteindre des valeurs de contrainte élevées, ce qui sera le cas en compression triaxiale.

La cellule triaxiale utilisée a une capacité de 150 MPa, son diamètre intérieur est de 100 mm, et sa hauteur est de 130 mm. Elle est à axe décentré ce qui lui permet de recevoir un collier pour la mesure des déformations transversales. Ce collier a été mis au point au Laboratoire.

Une pompe "haute pression" de type Gilson, de capacité de 60 MPa, est utilisée pour la montée et le maintien de la pression de confinement dans la cellule au cours de l'essai.

3.2.2 Montage expérimental

Pour effectuer les essais de compression triaxiale de révolution, le montage expérimental, schématiquement représenté par la figure 3.2, a été réalisé.

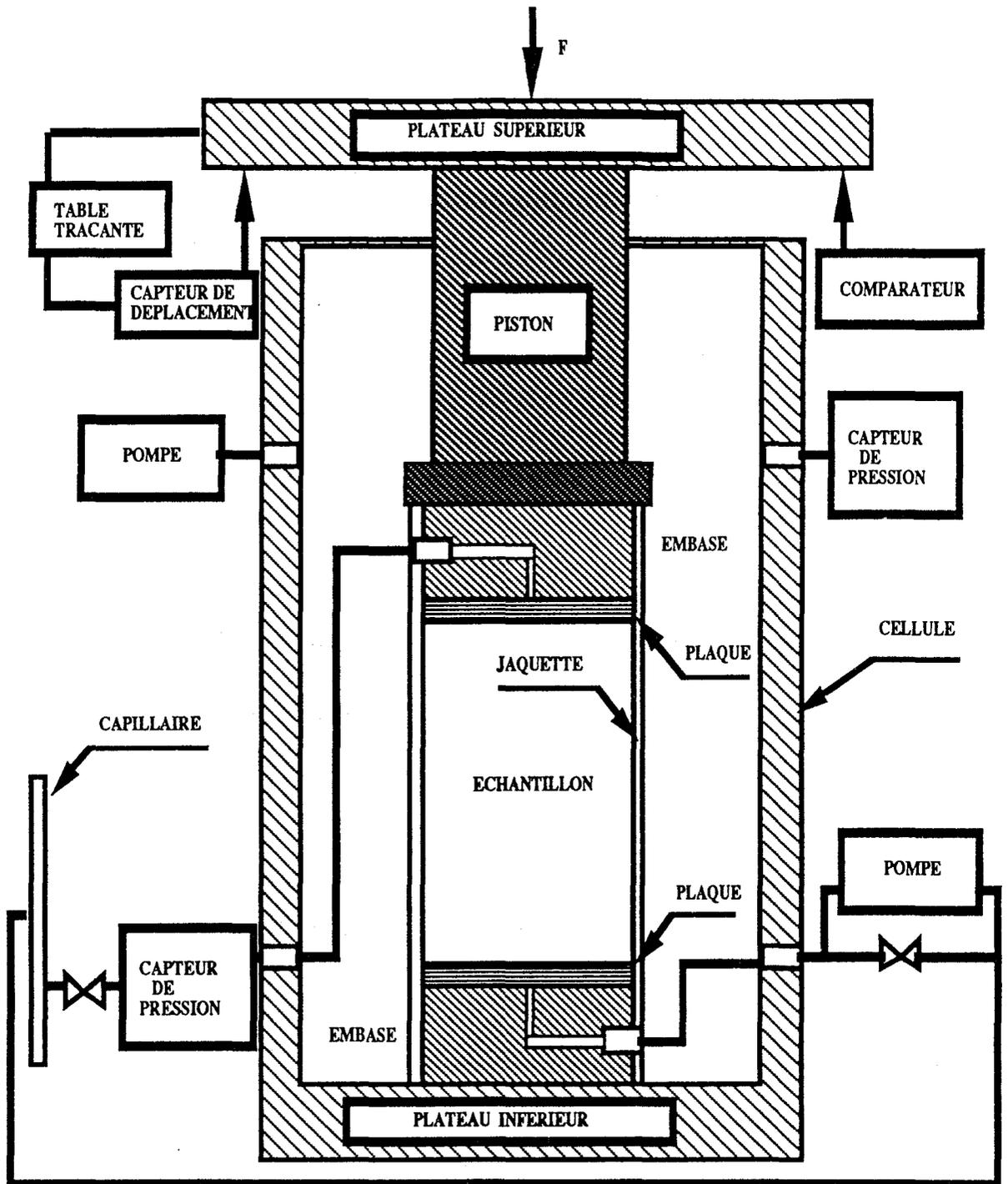


Figure 3.2 : Montage expérimental d'essai triaxial

L'éprouvette munie de jauges transversales et longitudinales de 10 mm de longueur est gainée par une jaquette en silastène. Le collage des jauges est une opération délicate qui conditionne de beaucoup la réussite de l'essai. L'éprouvette est ensuite placée entre deux embases métalliques. L'embase inférieure est solidaire de la cellule. A une sortie de la cellule triaxiale est branchée la pompe Gilson qui sert à monter la pression et à la maintenir constante $\sigma_2 = \sigma_3$.

Nous présentons les trois types d'essai de compression (essais dits de base) qui ont été effectués : la compression hydrostatique pour caractériser l'état d'anisotropie initiale du matériau, les essais uniaxiaux de compression et les essais triaxiaux.

Dans toute la suite de ce rapport, les notations ainsi que les conventions suivantes seront adoptées :

σ_1	:	contrainte axiale (axe de chargement)
$\sigma_2 = \sigma_3 = P_c$:	contrainte radiale, confinement
ε_1	:	déformation longitudinale
$\varepsilon_2 = \varepsilon_3$:	déformation transversale
$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2 \varepsilon_2$:	déformation volumique

3.3 ESSAI DE COMPRESSION HYDROSTATIQUE

3.3.1 Procédure

Cet essai consiste à soumettre l'éprouvette de grès à un champ de contrainte hydrostatique $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$ en condition drainée. La pression de confinement est appliquée jusqu'à une valeur de 60 MPa, la limite de la pompe utilisée.

Afin d'éviter une perturbation éventuelle de l'état de contrainte isotrope, le piston de la presse n'est pas en contact avec l'embase supérieure de l'échantillon.

3.3.2 Résultats

Les courbes contraintes-déformations longitudinales et transversales montrent que le grès a un comportement isotrope sous sollicitation hydrostatique. En effet, les réponses du matériau dans les deux directions (longitudinales et transversales) sont exactement les mêmes ; les deux courbes sont à peu près confondues (figure 3.3). La déformation volumique des

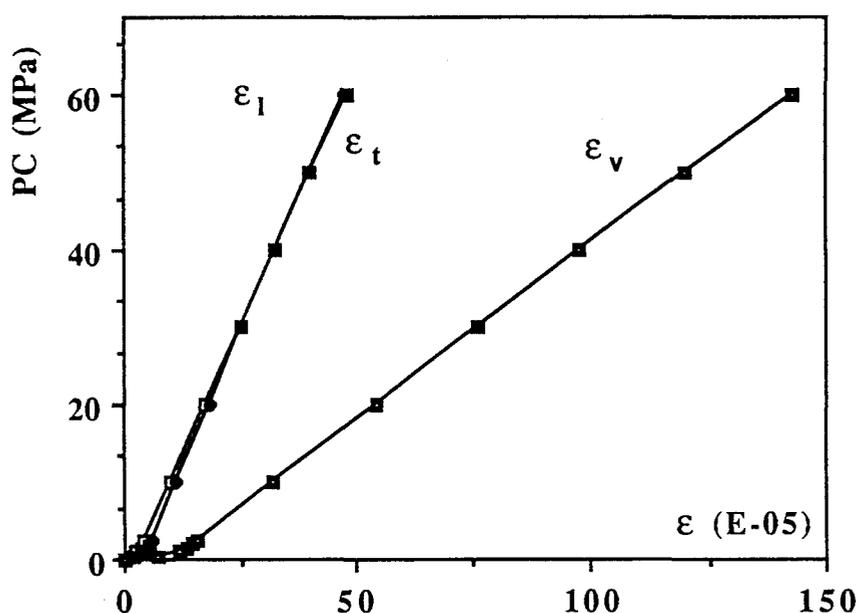


Figure 3.3 : Courbes d'essai de compression isotrope

pores est de l'ordre de 10^{-4} , et la pression de fermeture des microfissures est de l'ordre de 3 MPa, ce qui est relativement faible par rapport à d'autres matériaux de porosité élevée [62]. On remarque que le comportement est pratiquement linéaire jusqu'à la fin de l'essai, et aucune trace visible de rupture de l'échantillon n'est relevée.

3.4 ESSAI DE COMPRESSION

3.4.1 Manipulation

Dans un essai de compression simple monotone, l'éprouvette est soumise à un champ de contrainte unidimensionnel de compression σ_1 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. Par contre dans l'essai de compression simple avec cycles de chargement-déchargement, on fait le même essai mais à différents niveaux de contrainte axiale, on effectue un déchargement jusqu'à un état quasi nul, puis un rechargement jusqu'à un niveau de contrainte axiale supérieur au précédent, et à nouveau on décharge, et ainsi de suite jusqu'à la rupture.

Le premier déchargement a été effectué à peu près aux environs du seuil de fissuration pour bien s'assurer de la création d'un état de microfissuration dans le sens transversal. Il faut souligner que les essais de compression simple ont été répétés plus d'une fois, vu la dispersion des résultats [60] observée dans ce type d'essai.

3.4.2 Essai monotone : Résultats

Les résultats de résistance à la compression simple indiquent toujours une dispersion élevée particulièrement significative dans le cas du grès de Fontainebleau [70]. Cette dispersion peut être liée à la nature discontinue du matériau. La courbe contrainte déformation longitudinale est sensiblement linéaire jusqu'à la rupture avec au début une faible zone de fermeture des microfissures.

Sur la courbe contrainte déformation transversale, on constate une perte de linéarité qui se manifeste tôt avec l'absence de la pression de confinement. Cette perte de linéarité est à peu près à 20 % de la contrainte à la rupture qui est d'environ 60 MPa (figure 3.4). Par ailleurs, le module d'Young en compression est notamment plus élevé que ce qui a été trouvé en traction (chapitre II). Il est d'environ 32 000 MPa contre environ 5 000 MPa pour la traction. Par contre, le calcul du module de Young en compression dans la zone de fermeture de fissure nous a permis d'avoir une idée sur le module au début de l'essai. Celui-ci est à peu près de 12 000 MPa. De même, le calcul de ce module à partir d'un essai de compression isotrope donne une valeur de 9 000 MPa qui se rapproche du module en traction pour ce matériau. Le module en traction peut ainsi être rapproché du module obtenu dans la phase de serrage.

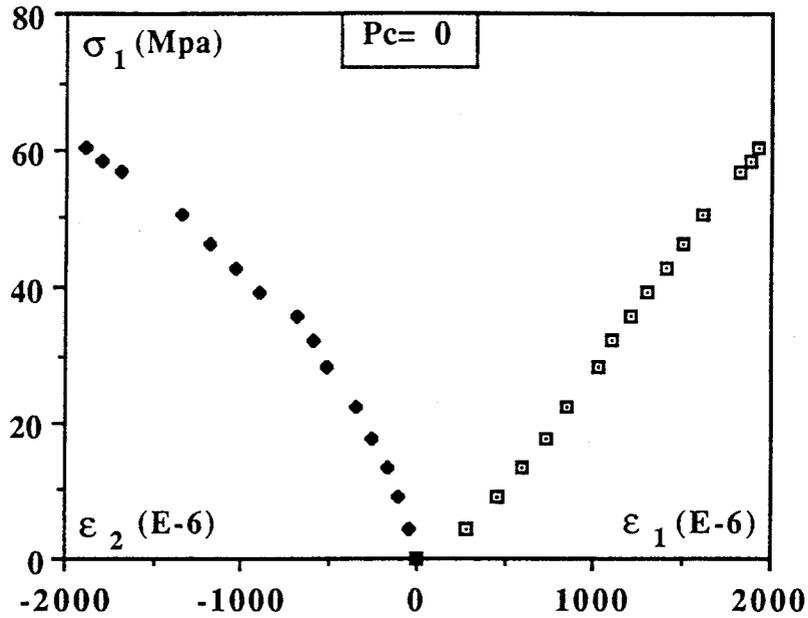


Figure 3.4 : Essai de compression simple

3.4.3 Essai de compression simple avec chargement-déchargement

La sollicitation a été menée par phase de chargement-déchargement de façon à contrôler l'évolution des caractéristiques du matériau. Il a été montré que cette façon d'opérer permet de conserver une enveloppe des courbes à peu près identique aux courbes obtenues lors d'un chargement monotone croissant sur le même matériau [5]. Ceci a été observé sur les allures de nos courbes (figure 3.5). Les cycles de chargement-déchargement permettent de déterminer le module d'élasticité E_1 et le coefficient de Poisson ν_{12} aux différents points de décharge. Les modules choisis sont les modules sécants.

• Variation du coefficient de Poisson

La variation du coefficient de Poisson ν_{12} en fonction de ϵ_2 calculer suivant l'hypothèse de l'isotropie transverse est représentée sur la figure 3.6. On constate que ce coefficient atteint une valeur de $\nu_{12} = 0.67$ à la fin de l'essai. De même, une représentation des déformations transversales en fonction des déformations longitudinales (figure 3.7) pour un essai de compression simple avec cycles nous donne une idée sur la variation du coefficient de Poisson.

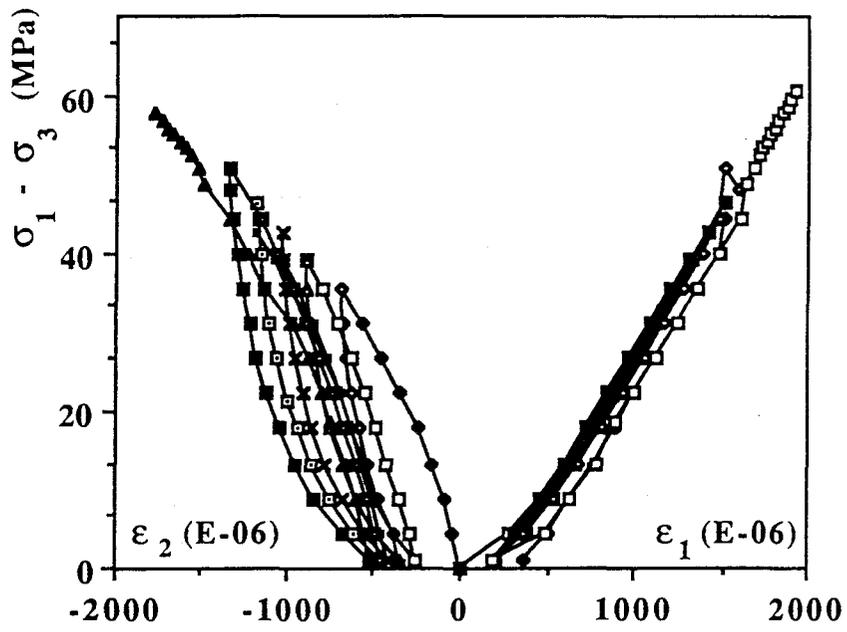


Figure 3.5 : Essai de compression simple avec chargement-déchargement

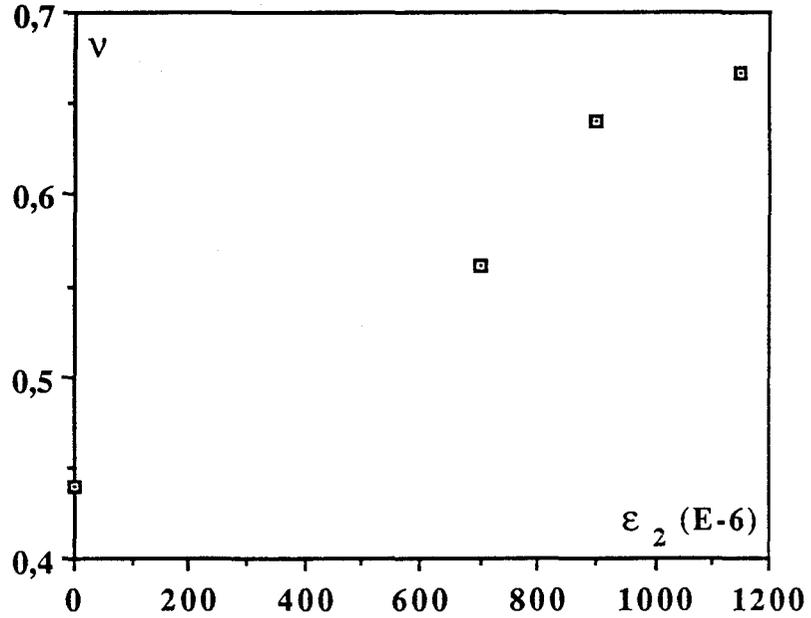


Figure 3.6 : Variation de ν_{12} en fonction de ϵ_2 suivant l'hypothèse de l'isotropie transverse

- *Déformation anélastique*

On remarque sur la (figure 3.7) que les déformations anélastiques longitudinales sont quasi nulles avec un module élastique qui reste pratiquement inchangé. Dans le sens transversal, il y a une apparition de déformations anélastiques nettement plus importantes que celles observées dans le sens longitudinal. Pour la direction transversale, nous avons tracé la courbe des déformations anélastiques en fonction des déformations totales ϵ_2 (figure 3.8). On observe que la partie anélastique n'est pas négligeable, ceci provient du fait que, lorsque l'on décharge l'échantillon endommagé, les microfissures préalablement créées (en extension) ne se referment pas entièrement. En effet, sur cet essai, au début, on observe une concavité tournée vers le haut de la courbe dans le sens longitudinal qui correspond à la fermeture des fissures les plus inclinées sur l'axe de compression (figure 3.5); alors que lors de la décharge, le frottement bloque tout nouveau glissement [51], ce qui explique que la pente de décharge E_d soit plus forte que la pente de charge.

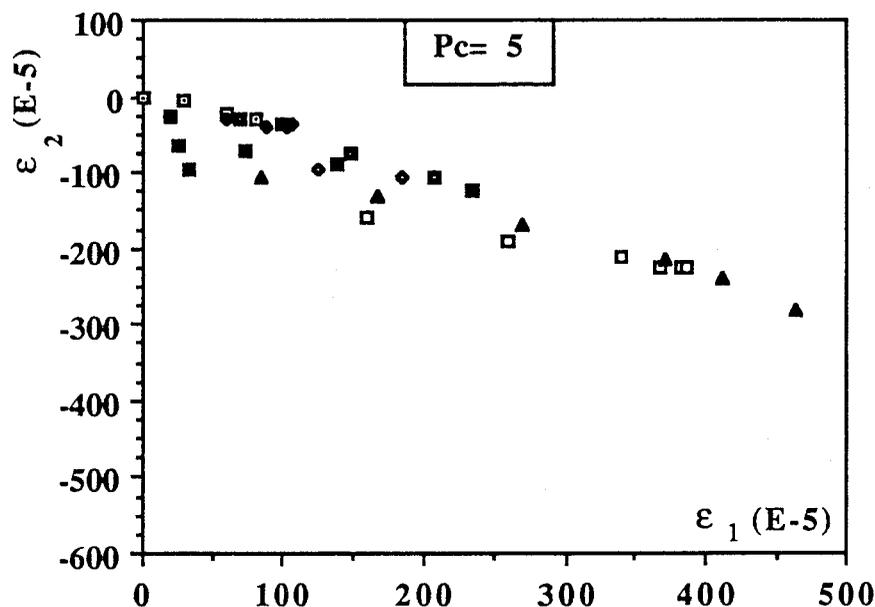


Figure 3.7 : Courbe de déformation transversale en fonction de déformation longitudinale

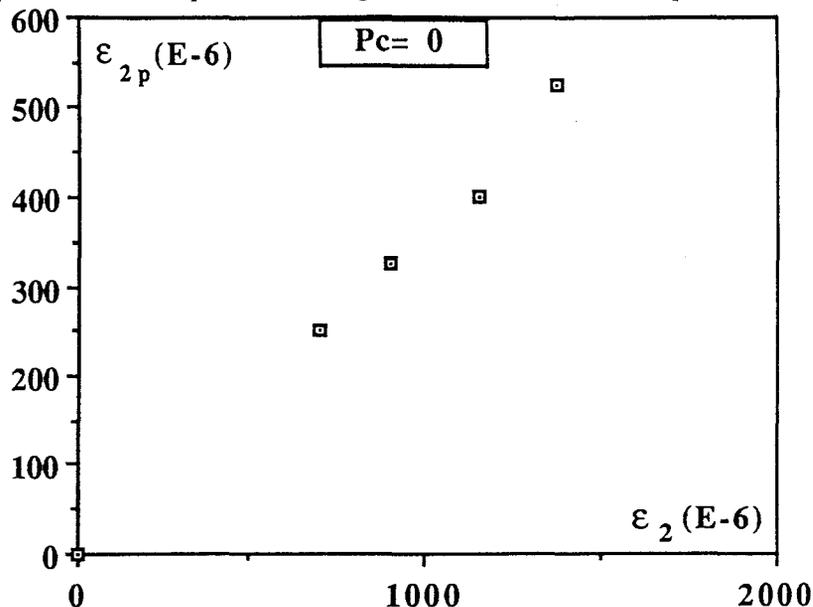


Figure 3.8 : Déformations anélastiques transversales en fonction de ϵ_2

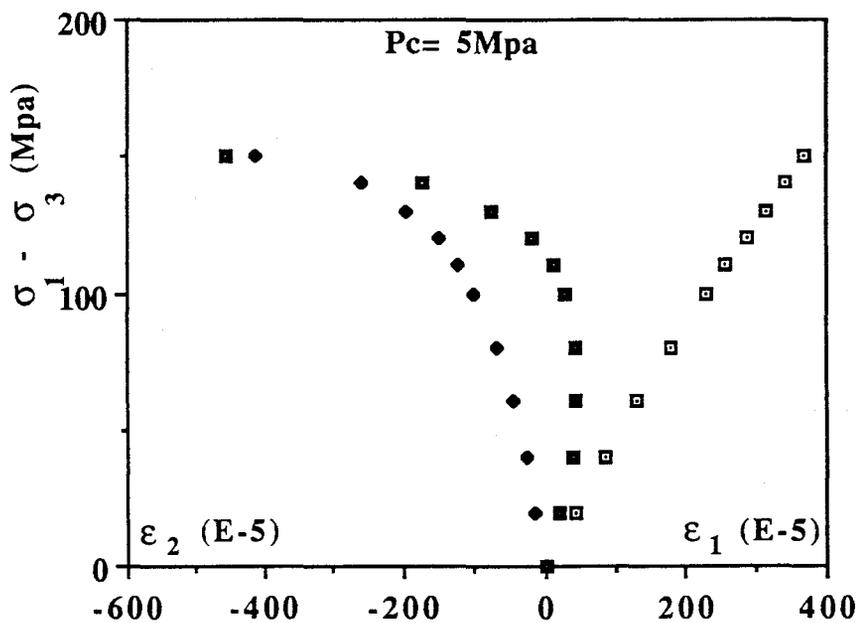
3.5 ESSAIS TRIAXIAUX

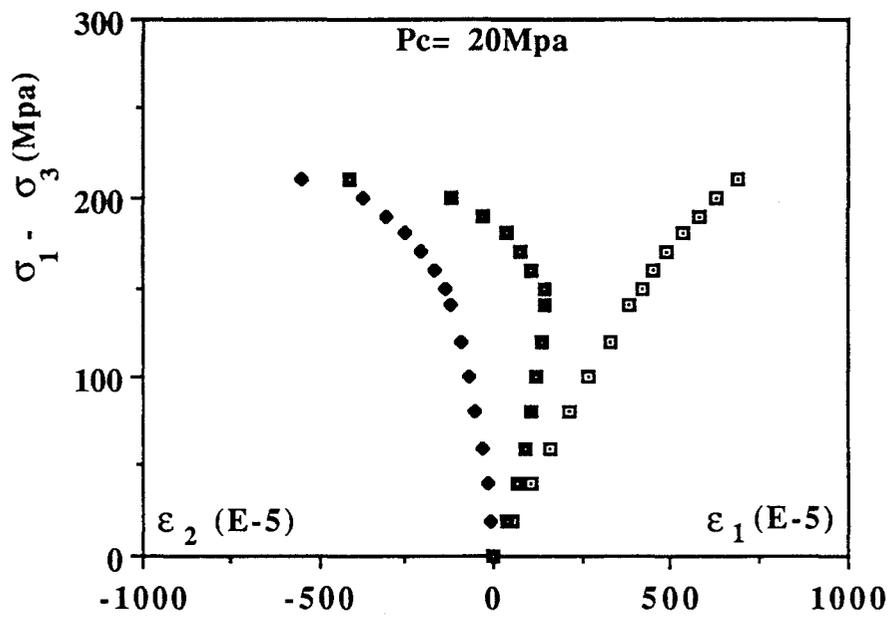
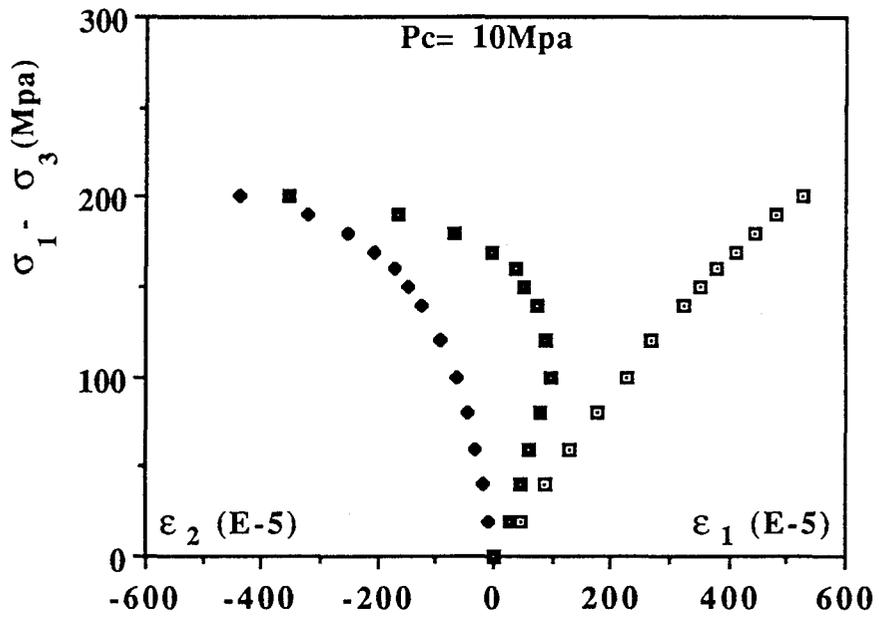
3.5.1 Procédure d'essai

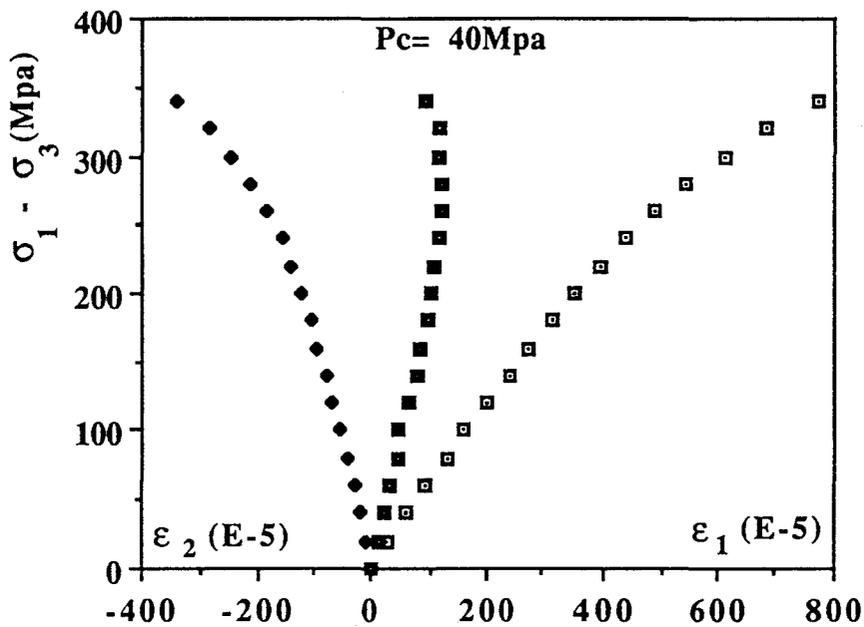
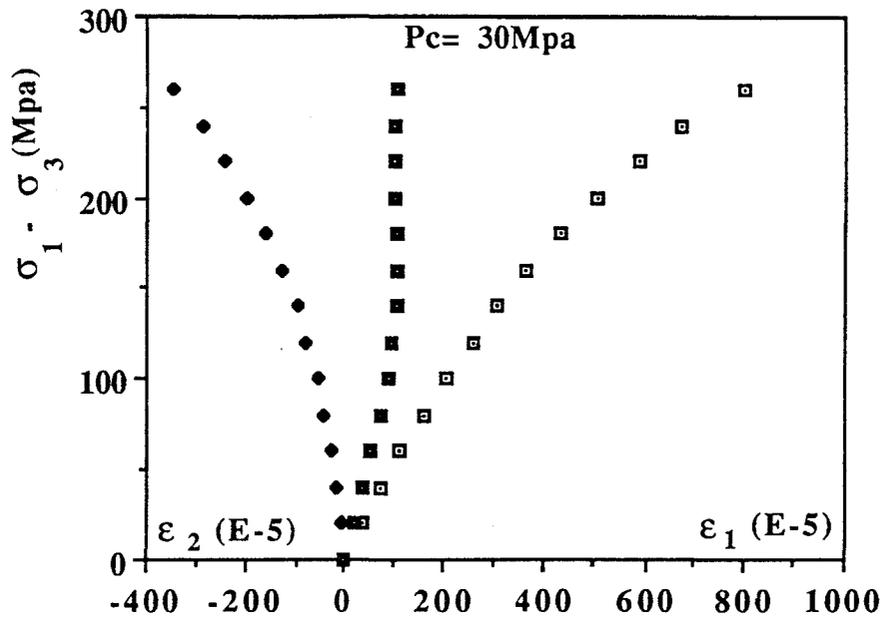
L'éprouvette est soumise à un champ de contrainte isotrope $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ jusqu'à une valeur donnée. On maintient ensuite la pression de confinement constante et on augmente la contrainte axiale jusqu'à la rupture. Les essais de compression triaxiale monotone ont été effectués à différentes pressions de confinement : $P_c = 5, 10, 20, 30$ et 40 MPa.

3.5.2 Résultats et interprétation

Les courbes contraintes-déformations longitudinales (figure 3.9) sont sensiblement







Figures 3.9 : Courbes d'essais triaxiaux monotones pour $P_c = 5, 10, 20, 30, 40 \text{ MPa}$

linéaires jusqu'à environ 70 % du pic. La non linéarité qui suit reste cependant faible. Par contre, les courbes contraintes déformations transversales mettent en évidence une perte rapide de linéarité, ce qui induit un comportement fortement anisotrope du grès sous sollicitation triaxiale monotone [34]. Cette anisotropie induite correspond à une orientation privilégiée de la microfissuration perpendiculaire à la contrainte principale mineure. La perte de linéarité observée sur la courbe contrainte déformation transversale doit être ainsi attribuée au développement progressif des microfissures. La perte de linéarité dans le sens transversal commence tôt avec la diminution de la pression de confinement (figure 3.11). On peut également remarquer que les modules d'élasticité et la résistance au pic augmentent avec l'augmentation de la pression de confinement (figure 3.10).

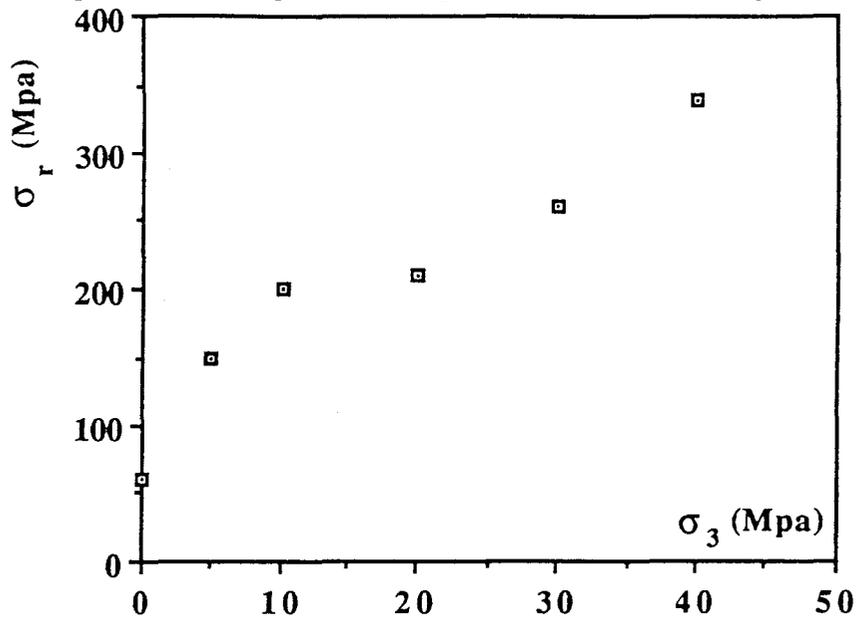


Figure 3.10 : Résistance au pic en fonction de la pression de confinement

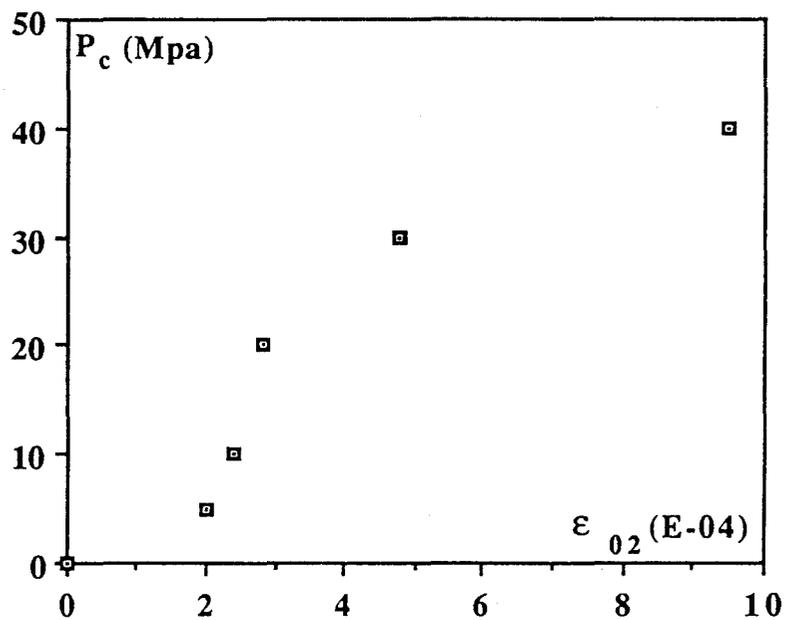


Figure 3.11 : Perte de linéarité dans le sens transversal en fonction de la pression de confinement

La courbe contrainte-déformation volumique comporte les différentes phases que nous avons signalées au premier chapitre. Le matériau passe d'une phase de contractance à une phase très dilatante jusqu'à la fin de l'essai. L'intensité de cette phase de dilatance semble diminuer avec la pression de confinement.

Alors que sur la figure 3.9, la courbe contrainte axiale déformation volumique peut être distinguée par quatre phases (voir chapitre 1), une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance qui diminue avec l'augmentation de la pression de confinement (figure 3.13), qui peut être expliquée par le rôle de la pression de confinement qui a tendance à refermer les microfissures.

L'endommagement d'un matériau élastique est défini comme étant une modification du comportement élastique macroscopique du fait d'irréversibilité microstructurelles [46] (microfissurations, microvides, décohésion intergranulaire) subies par le matériau au cours d'un chargement. L'état de dégradation sera alors caractérisé par la donnée de paramètres internes qui définissent les modifications précédentes à l'échelle de la microstructure ; par exemple, densité de microfissures, la porosité, etc. ...

Ce confinement ayant tendance à refermer les microfissures.

3.6 ESSAIS TRIAXIAUX AVEC CYCLES CHARGEMENT-DECHARGEMENT

3.6.1 Manipulation

L'éprouvette est soumise à une sollicitation du type décrit au paragraphe 3.5.1. A différents niveaux de contrainte axiale, on effectue un déchargement jusqu'à l'état hydrostatique, puis un rechargement jusqu'à un niveau de contrainte axiale supérieur au précédent niveau de contrainte axiale de déchargement, et de nouveau on décharge, et ainsi de suite jusqu'à la rupture.

Les essais ont été effectués à différentes pressions de confinement de 5, 10, 20, 30 et 40 MPa.

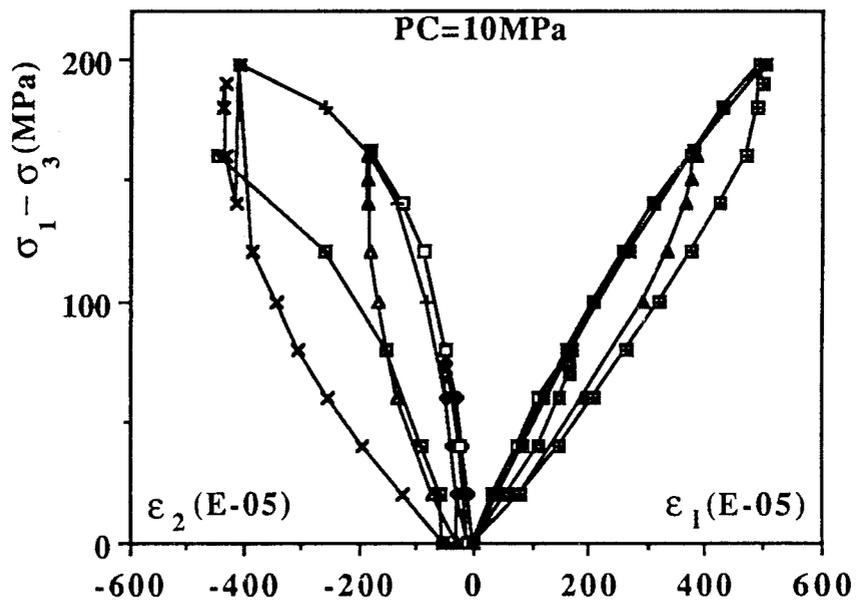
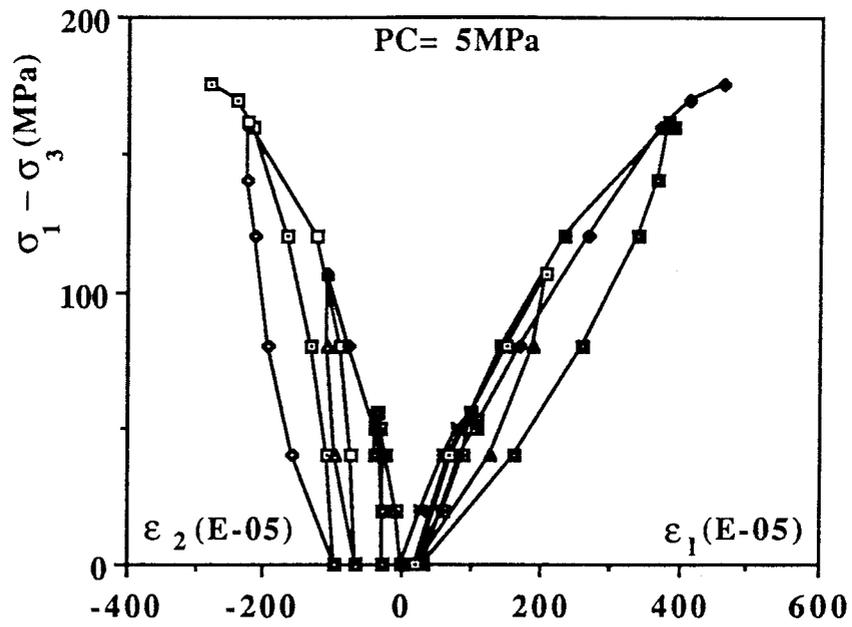
3.6.2 Résultats et interprétation

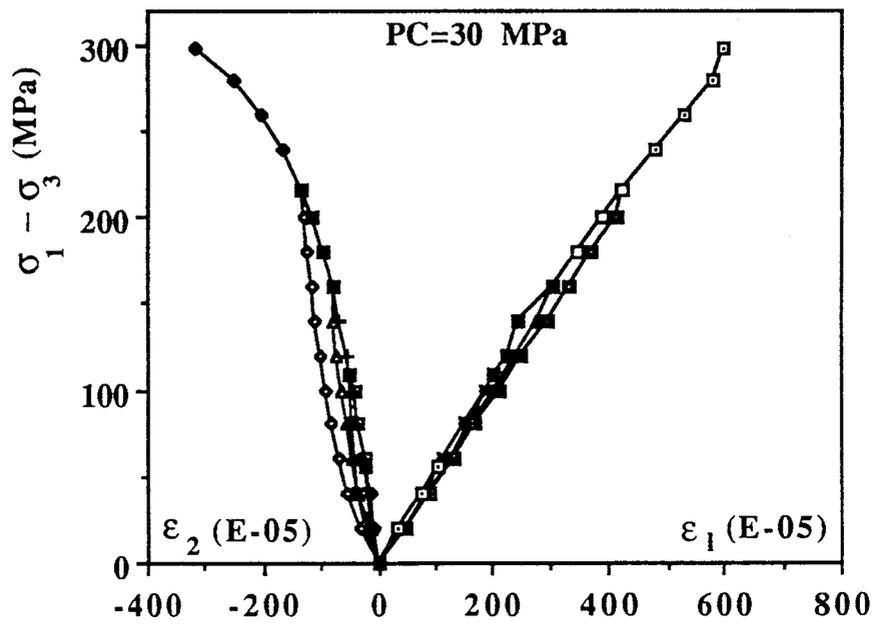
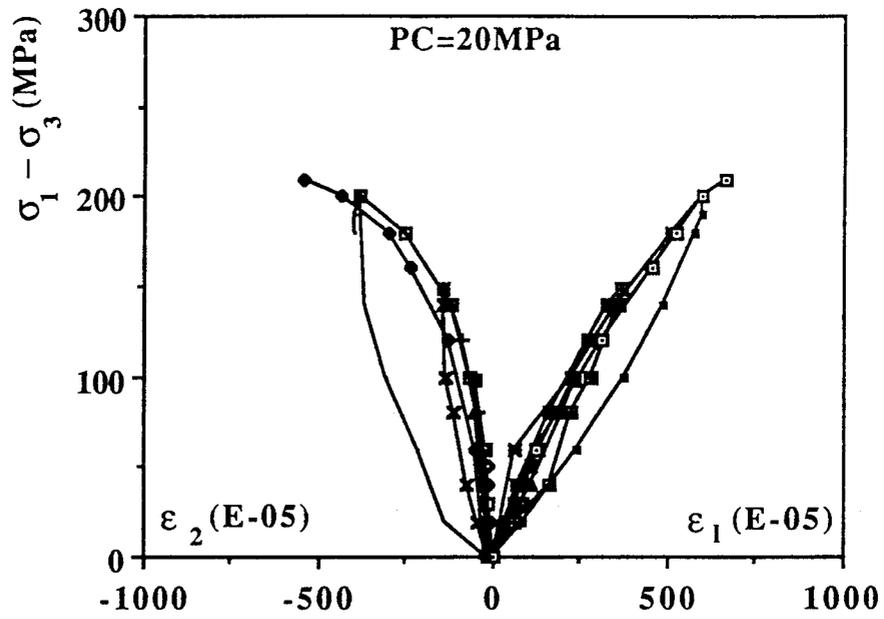
Les résultats sont présentés sur la figure 3.12 pour les différentes pressions de confinement.

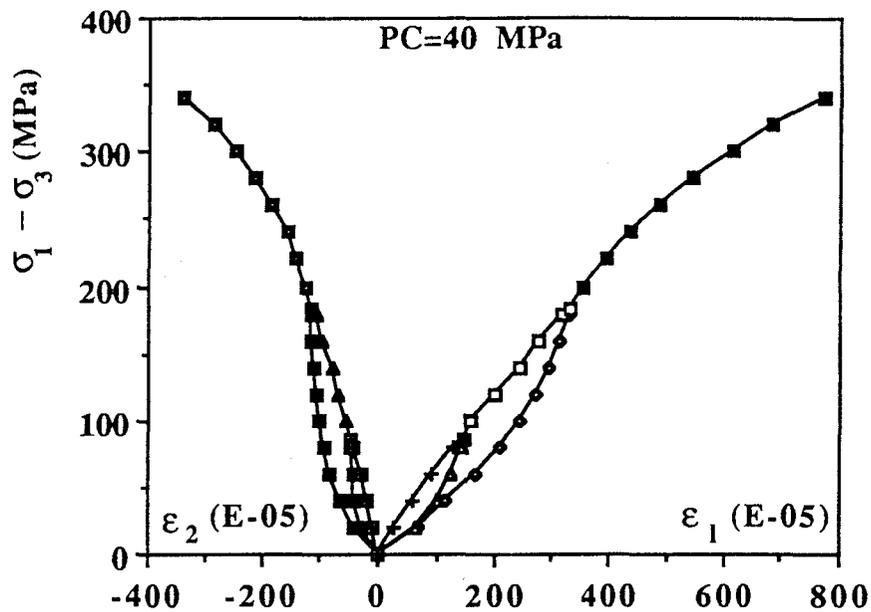
On remarque l'apparition des déformations transversales permanentes, d'autant plus importantes que la pression de confinement est faible. Au-delà de 10 MPa, les déformations permanentes sont quasi nulles, mais les boucles d'hystérésis croissent avec la pression de confinement jusqu'à atteindre des modules infinis. Ces boucles d'hystérésis peuvent être interprétées par le frottement entre lèvres de microfissures pendant la refermeture ou réouverture de celles-ci [13], [58], [52].

Au-dessus de 20 MPa, les boucles d'hystérésis diminuent sur les courbes contraintes déformations longitudinales (figure 3.16). On les observe pour deux pressions de confinement $P_c = 10$ et 20 MPa. Nous avons tracé la variation du module élastique E_1 en fonction des déformations totales ϵ_1 . Nous remarquons que ce module diminue à peu près de 20 % de sa valeur à la fin de l'essai (figure 3.13), alors que sur ces courbes les déformations anélastiques sont presque nulles pour toutes les pressions de confinement, une augmentation des valeurs de coefficient de Poisson a été observée (figure 3.18).

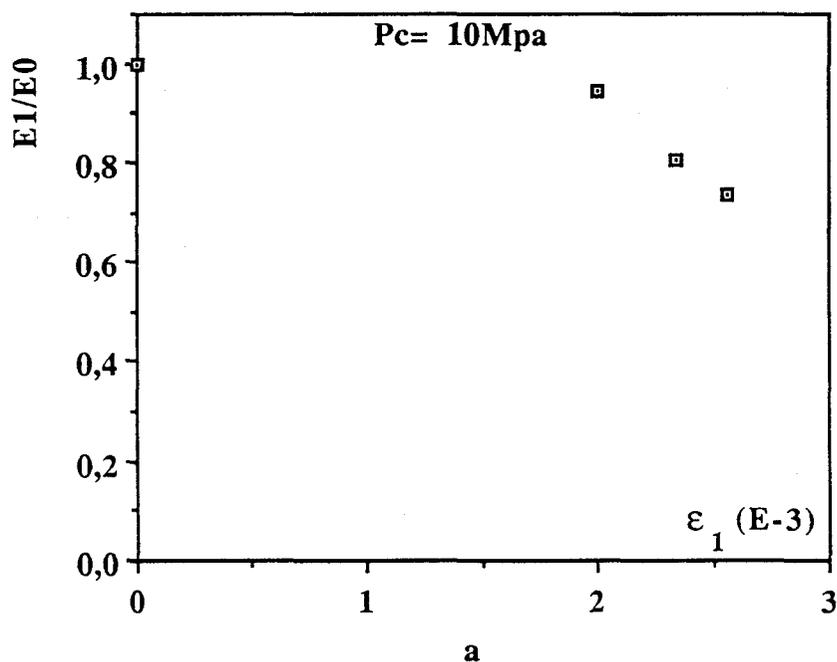
De plus, nous constatons que les boucles d'hystérésis dans le sens longitudinal ne sont pas de grande importance par rapport à celles observées dans le sens transversal.

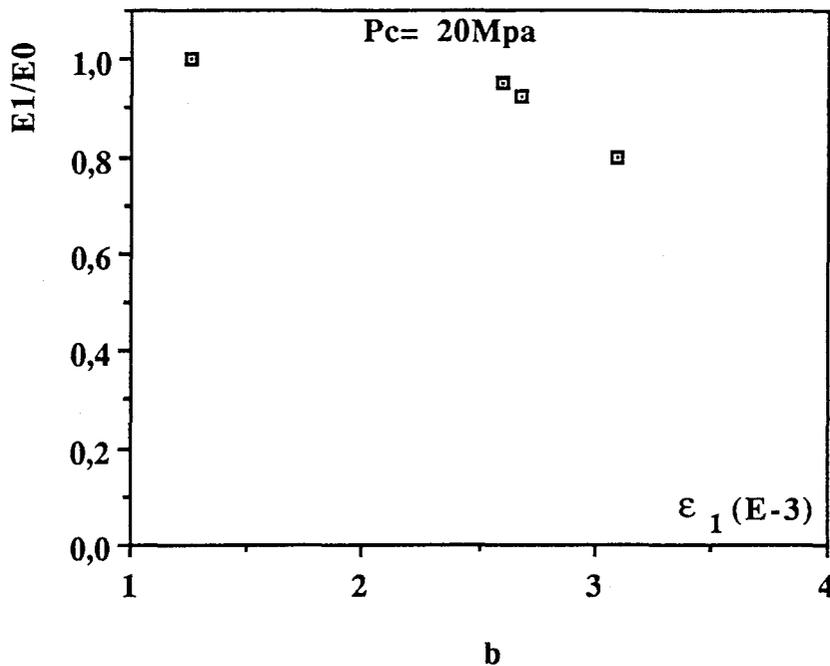






Figures 3.12 : Essais triaxiaux avec chargement-déchargement (5, 10, 20, 30, 40 MPa)





Figures 3.13 : Variation de E_1/E_0 en fonction de déformation totale ϵ_1

3.7 CONCLUSION

L'étude présentée ici porte sur le comportement mécanique sous sollicitation triaxiale du grès. Les essais préliminaires de compressibilité nous ont permis de constater que le grès est un matériau initialement isotrope.

Sous sollicitations déviatoriques, le comportement est d'abord isotrope, puis anisotrope par la suite, les déformations latérales sont nettement plus élevées que les déformations longitudinales. L'anisotropie induite peut être reliée à l'évolution de la microfissuration suivant une direction privilégiée (direction perpendiculaire à la contrainte principale mineure). Nous avons effectué des cycles de chargement-déchargement au cours des essais de compression, pour caractériser l'endommagement longitudinal du matériau. Les résultats obtenus montrent que cet endommagement est très faible, le module longitudinal restant quasiment inchangé. Les déformations anélastiques (en particulier les latérales) sont relativement importantes avec la diminution de la pression de confinement dans les essais triaxiaux. Les essais effectués ne permettent pas d'accéder à la variation du module suivant la direction transversale. La caractérisation de l'endommagement latéral ne peut donc être effectuée à l'aide de ces essais de compression avec cycles de chargement-déchargement.

CHAPITRE IV

ANISOTROPIE DE L'ENDOMMAGEMENT

METHODOLOGIE DE QUANTIFICATION ET RESULTATS

Le manque de résultats expérimentaux, pour caractériser l'endommagement en compression des matériaux fragiles, a récemment incité quelques chercheurs à la quantification dans ce domaine des mesures d'endommagement anisotrope en s'appuyant sur la notion d'équivalence en énergie [57]. Comme on l'a vu au chapitre 3, dans les essais triaxiaux sur la roche étudiée, la perte de linéarité dans la direction transversale apparaît très tôt, alors que, dans le sens longitudinal, le module d'élasticité reste à peu près inchangé. Alors, nous nous sommes attachés à mesurer l'effet de l'endommagement transversal qui nous apparaît comme le mécanisme essentiel dans le comportement du grès. Comme la courbe reste à peu près linéaire dans le sens longitudinal, on considère que l'endommagement D_1 dans le sens longitudinal pour cette roche reste nul.

Les essais ont été effectués sur des échantillons qui ont environ 95 mm de diamètre et 110 mm de hauteur. Le choix de ces dimensions a été fait par rapport à la cellule utilisée, de la machine d'essai "Los system" (de capacité 250 tonnes), et pour qu'on puisse carotter deux échantillons dans le sens transversal de 75 mm de hauteur et 37,5 mm de diamètre après essai sur le grand échantillon.

4.1 ESSAIS TRIAXIAUX ARRETES A DES DEVIATEURS CHOISIS

Des essais arrêtés à des niveaux de déviateurs de contrainte fixés ont été effectués, sur des grands échantillons, pour différentes pressions de confinement $P_c = 0, 10, 20$ et 30 MPa (tableau 4.1). Le but de ces chargements est de créer un état de microfissuration (donc d'endommagement), en compression triaxiale pour des déviateurs de contrainte précis. Ceux-ci se situent après la perte de linéarité dans le sens transversal. Le choix de ces déviateurs de contrainte est fait à partir des essais de compression triaxiale du chapitre 3, et des essais de compression sur grands échantillons. Les échantillons microfissurés seront ensuite carottés et testés sous sollicitation de traction uniaxiale. Le dispositif utilisé pour tester les grands échantillons en compression triaxiale est une presse hydraulique "Los system", de 250 tonnes de capacité, avec une cellule triaxiale pouvant supporter 60 MPa de confinement. La hauteur de cette cellule triaxiale est de 16 cm. Le choix de cette machine a été fait pour pouvoir monter à des déviateurs de contrainte élevés pour ce type d'échantillons de gros diamètre. Le montage expérimental est à peu près le même que celui qui est utilisé au chapitre 3 (figure 3.2).

P_c (MPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ MPa			
0	15	24	33	/
10	65	170	196	220
20	140	159	196	232
30	170	200	240	250

Tableau 4.1 : Déviateurs utilisés pour les différentes pressions de confinement

4.2 CARACTERISATION DE L'ENDOMMAGEMENT EN COMPRESSION

La caractérisation de l'endommagement transversal dans les matériaux fragiles sous sollicitation de compression reste encore un sujet peu traité dans la littérature. Quelques tentatives ont été faites pour mesurer cet endommagement D_2 sur les bétons [5], [58], en adoptant la notion d'équivalence en énergie. L'endommagement pour des états de compression est encore très mal compris. On dispose de peu de données et de modélisation, contrairement à l'endommagement en traction avec les divers travaux [59], [41], [21] menés dans le cas des matériaux fragiles. Nous avons choisi de mesurer l'endommagement à travers la variation du module élastique transversal en traction par rapport au module élastique initial de traction E_{ot} pour un matériau vierge. Des travaux effectués sur des bétons préalablement endommagés en traction uniaxiale montrent que l'application d'une compression uniaxiale dans la même direction sur ces éprouvettes n'affecte pas la raideur en compression [13]. Il y a de ce fait restauration totale de la raideur initiale du matériau et un aspect unilatéral du comportement (Essai Pied).

Alors l'idée de caractériser l'endommagement de cette roche en compression par traction a été retenue. Le fait que la rupture en compression procède d'un mécanisme d'extension perpendiculaire à la contrainte principale mineure nous a incité à réaliser un essai de traction uniaxiale dans la direction de cette contrainte principale mineure (figure 4.1).

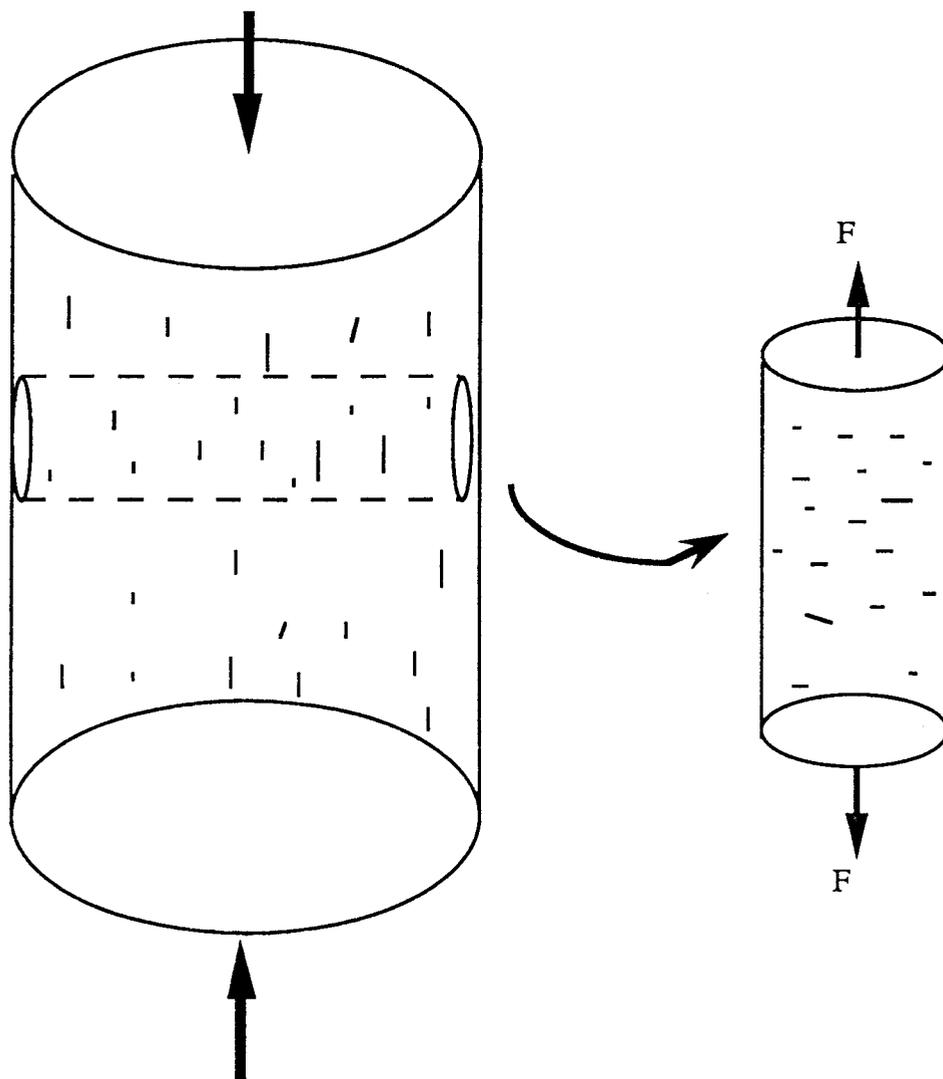


Figure 4.1 : Méthodologie de l'essai de traction sur échantillon microfissuré en compression

4.2.1 Méthodologie expérimentale

La méthodologie expérimentale suivie consiste à effectuer des essais de compression triaxiale, sur des grands échantillons (tableau 4.1). Les essais sont arrêtés à des déviateurs bien fixés ; un état de microfissuration sera ainsi créé qui correspond à ces déviateurs, puis on décharge rapidement. Le déchargement sera effectué en quelques minutes jusqu'à une contrainte nulle, et on arrête l'essai de compression. A partir de l'échantillon déjà testé, nous avons carotté dans le sens transversal deux échantillons de 37,5 mm de diamètre et 75 mm de hauteur (figure 4.1). Il faut bien faire attention au moment du carottage à ne pas créer de microfissuration supplémentaire due à cette opération, pour les petits échantillons. Le carottage doit ainsi se faire lentement. Les échantillons préalablement microfissurés en compression seront ensuite testés en traction monotone ou avec chargement-déchargement, dans le but de quantifier l'endommagement anisotrope en compression. Celui-ci est donné par la variation de raideur élastique en traction par rapport au module initial de traction pour un matériau vierge. Cette façon de déterminer l'endommagement en compression pose beaucoup de difficultés expérimentales, surtout pour des échantillons microfissurés en compression, arrêtés à des déviateurs très élevés qui sont proches de la contrainte à la rupture. La difficulté essentielle provient du fait que le réseau de microfissuration créé est élevé, et que le matériau fortement endommagé est très fragile. Le carottage sur ces échantillons reste ainsi une étape très délicate pour la réussite ou l'échec de tels essais.

4.2.2 Effet d'échelle

Un aspect important dans la méthodologie expérimentale adoptée est l'effet d'échelle. Quel est l'ordre de grandeur des erreurs commises, lorsque nous travaillons sur des éprouvettes de différentes tailles. Pour s'assurer que l'état de microfissuration en compression créé aux différents déviateurs, bien définis sur les grands échantillons testés, est du même ordre que celui obtenu pour les petits échantillons au chapitre 3, une comparaison a été faite sur les courbes contraintes déformations (figures 4.2 et 4.3) obtenues pour les différentes tailles d'éprouvettes, et à des

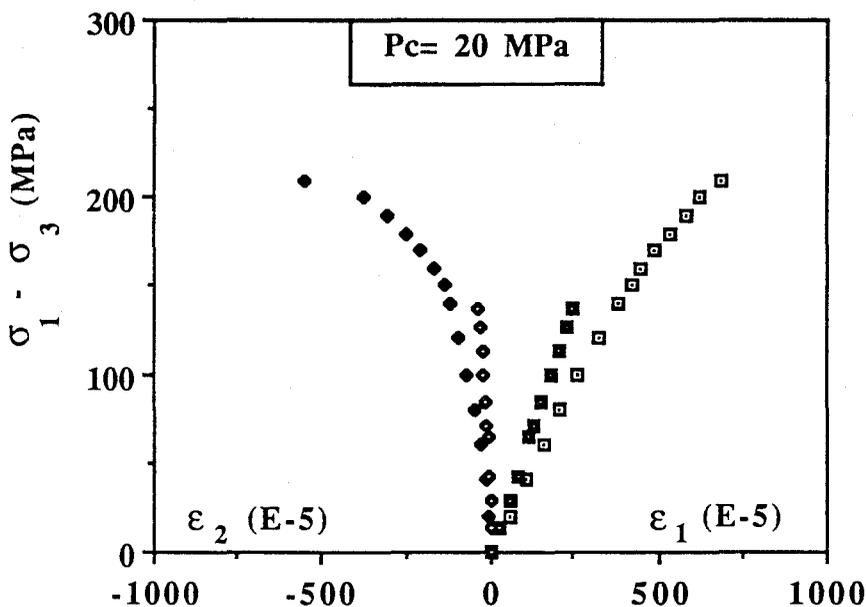


Figure 4.2 : Essais de compression triaxiale pour des diamètres $\phi = 94$ mm et $\phi = 37$ mm, et à $P_c = 20$ MPa

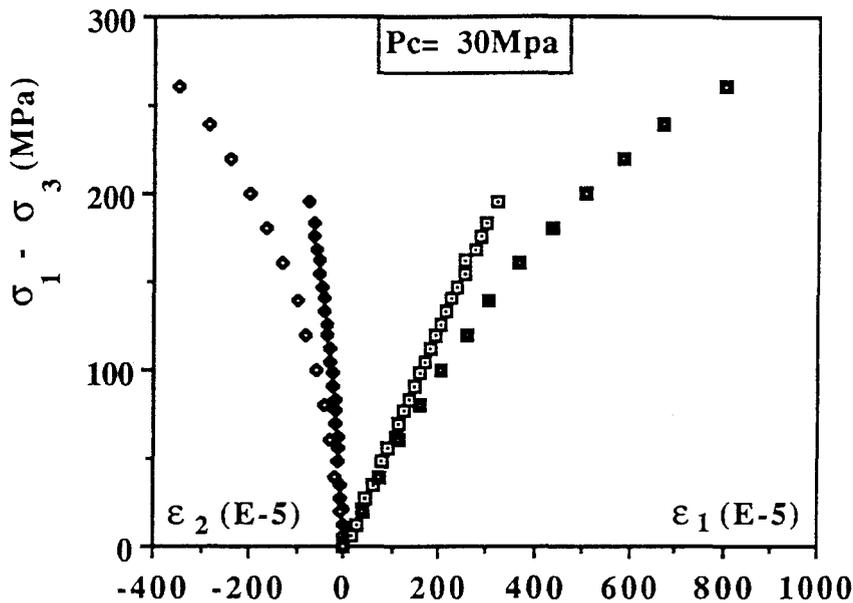


Figure 4.3 : Essais de compression triaxiale pour des diamètres $\phi = 94$ mm et $\phi = 375$ mm, et à $P_c = 30$ MPa

pressions de confinement de $P_c = 20$ et 30 MPa. Cette comparaison permet de montrer que l'effet de taille n'est pas très important dans le comportement du grès de Fontainebleau. Les déformations pour un déviateur de contrainte précis sont comparables pour les petits et les grands échantillons. De même, le module d'élasticité longitudinal initial est quasiment le même. On constate néanmoins qu'aux déviateurs élevés, il y a de petites différences. L'effet d'échelle paraît moins marqué ici que sur les bétons [2], ou trois phénomènes non indépendants interviennent : l'effet de volume, de gradient et l'effet de structure. L'origine de ces particularités est essentiellement liée à la nature plus hétérogène du matériau béton, hétérogénéité qui souffre de non périodicité (dimensions aléatoires, défauts). Dans ce contexte, la mécanique des milieux continus et homogènes ne peut prendre en compte la complexité des phénomènes mis en jeu. Ce phénomène existe également dans les roches, mais est peu influant [60]. D'après d'autres essais de compression effectués dans le Laboratoire de mécanique sur différentes tailles d'échantillons, soit sur le grès, soit sur la craie, le phénomène de taille, même s'il existe, peut être négligé [62], [63].

4.3 ETUDE AU B.E.T. : (BRUNAUEUR - EMMET et TELLER)

Pour bien s'assurer qu'au moment du carottage de grands échantillons déjà testés en compression, la microfissuration créée aux différents déviateurs n'est pas perturbée, une étude comparative basée sur la mesure de surface spécifique a été faite (mesures B.E.T.). La surface spécifique représente la surface développée par les microdiscontinuités rapportée à 1 gramme d'échantillon. L'étude au B.E.T. est très avantageuse car elle permet la localisation des vides totaux (vides intergranulaires de microfissures). Elle se fait à partir d'un équilibre dynamique expérimental selon lequel le taux d'adsorption est égal au taux de désorption voir annexe[22]. La mesure est basée essentiellement sur le principe de l'adsorption gazeuse (concentration de molécules sur la surface du solide testé). La surface spécifique est donnée en (m^2/g), elle augmente avec la densité du réseau de microfissuration.

4.3.1 Procédure expérimentale

Après un essai de compression triaxiale sur grand échantillon et carottage de petits échantillons dans la direction transversale, on prend deux petits morceaux A et B de chacun des échantillons (figure 4.4). La méthode de B.E.T. permet de déterminer la surface spécifique des deux morceaux. On a réalisé cette étude sur des échantillons testés aux états de sollicitations suivants : $P_c = 20$ MPa, avec un déviateur de 140 MPa, et $P_c = 30$ MPa avec un déviateur de 170 MPa.

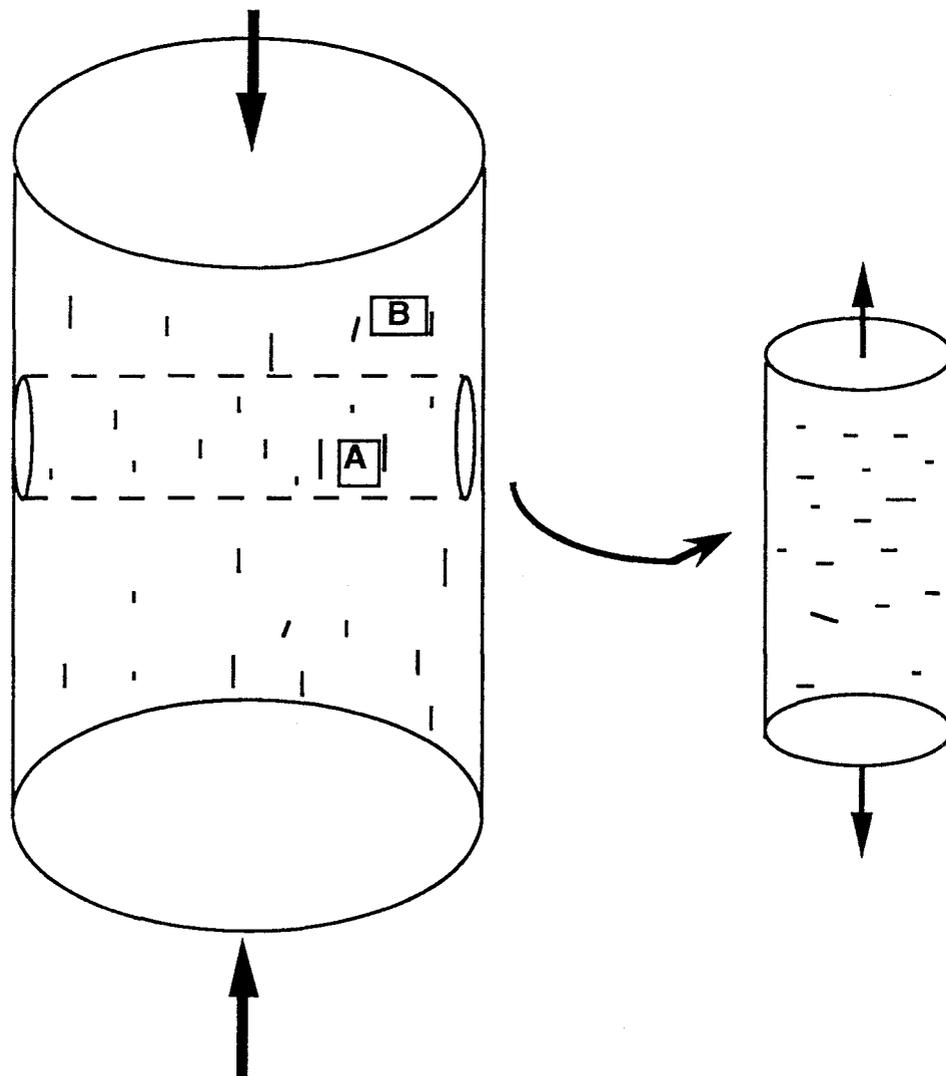
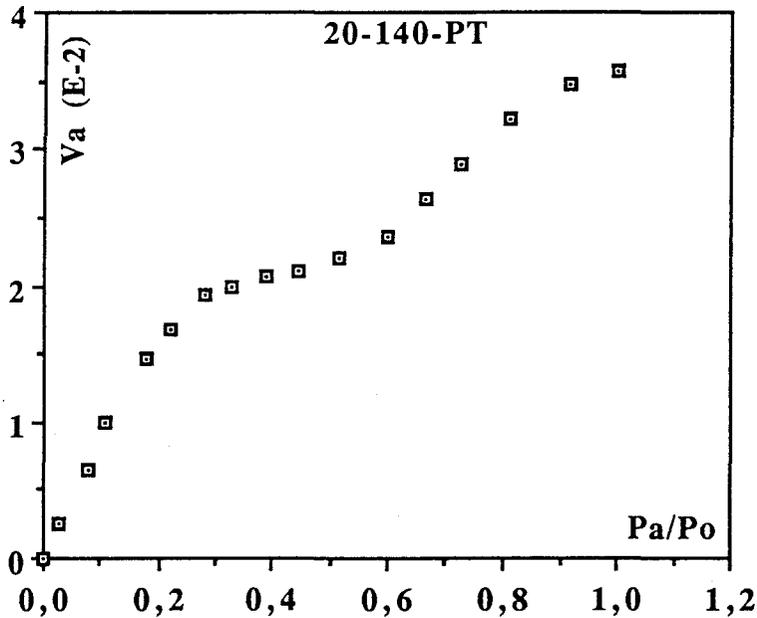


Figure 4.4 : Procédure du prélèvement d'échantillon pour la mesure de la surface spécifique

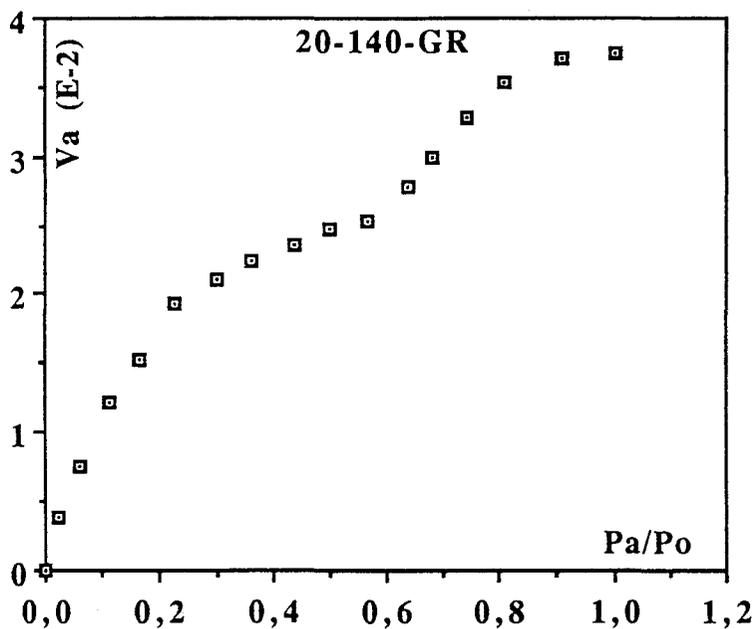
L'essai de B.E.T. a été réalisé dans le Laboratoire de mécanique sur une machine appelée sorptomètre (Annexe). Les différentes étapes à suivre pour ce type d'essai ainsi que les formules donnant la surface spécifique sont bien détaillées à l'annexe. Il faut signaler qu'un essai dure en moyenne 36 heures. La détermination de la surface spécifique d'un échantillon passe par le tracé de l'isotherme d'adsorption. L'adsorption pour un solide est définie comme étant le phénomène de concentration des molécules d'une phase gazeuse ou liquide sur la surface du solide. Le solide est appelé adsorbant, et le composé gazeux est l'adsorbat [28]. L'isotherme d'adsorption est représenté par la variation du volume V_a de gaz adsorbé en fonction de la pression relative P_a/P_o . P_a et P_o représente respectivement la pression d'équilibre à chaque cycle d'adsorption et la pression de saturation. Le volume d'azote adsorbé (gaz utilisé) peut être calculé à partir de la différence entre le volume injecté et le volume de gaz non adsorbé (récupéré).

4.3.2 Résultats et interprétations (B.E.T.)

Les deux courbes du volume d'azote adsorbé (V_a) en fonction de la pression relative P_a/P_0 , pour les deux pressions de confinement $P_c = 20$ MPa et $P_c = 30$ MPa sont présentées sur les figures (4.5) et (4.6). Les résultats déduits de ces courbes sont résumés dans le tableau 4.2. On constate que les surfaces spécifiques calculées pour les deux morceaux pour une pression de confinement sont comparables. Ceci permet de conclure que le carottage ne perturbe pas, de manière sensible le réseau de microfissuration créé par le déviateur appliqué.

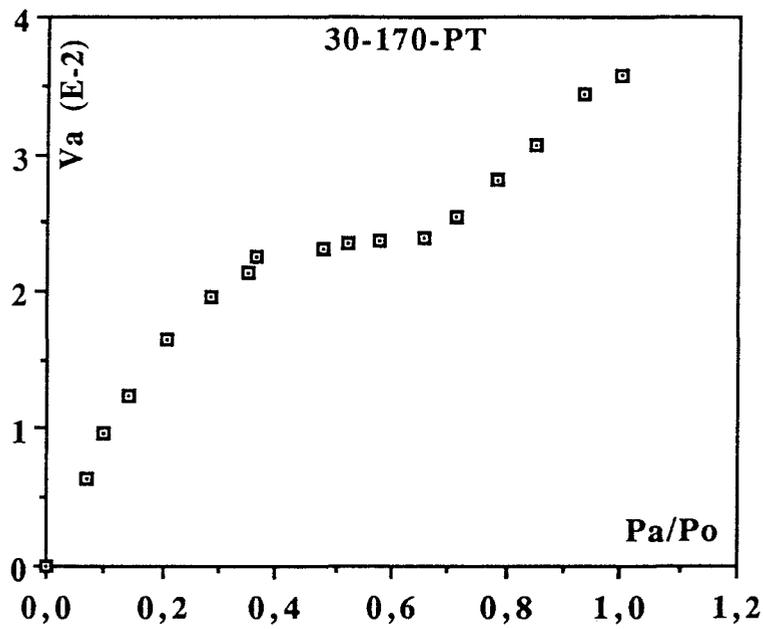


(a)

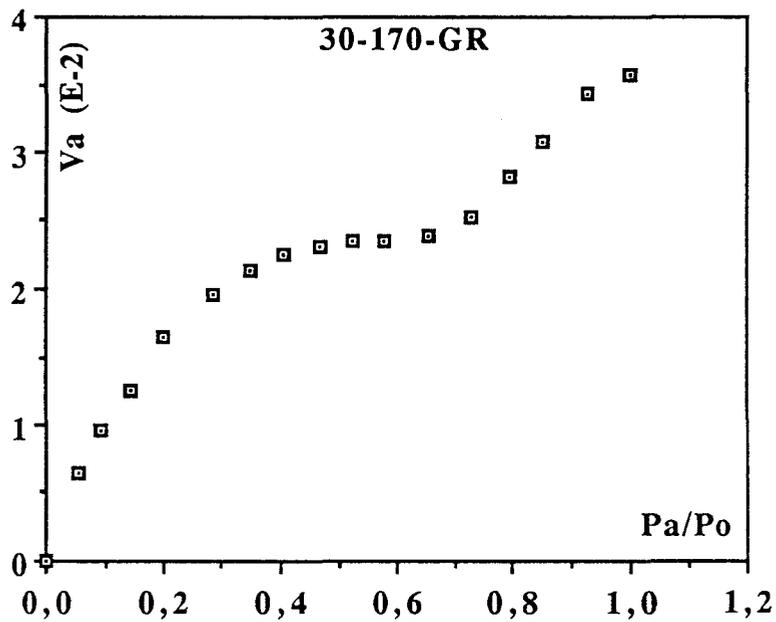


(b)

Figures 4.5 (a,b) : Courbe de volume d'azote adsorbé en fonction de la pression relative pour les petits et grands morceaux à un déviateur de 140 MPa et $P_c = 20$ MPa



(a)



(b)

Figures 4.6 : Courbe de volume d'azote adsorbé en fonction de la pression relative pour petit et grand morceau à un déviateur de 170 MPa et $P_c = 30$ MPa

$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	140	170
P_c (MPa)	20	30
S_s (m ² /g) (grand morceau)	1,712	1,621
S_s (m ² /g) (petit morceau)	1,681	1,592

Tableau 4.2 : Résultats des surfaces spécifiques pour grand et petit échantillons

4.4 ESSAIS DE TRACTION SUR ECHANTILLONS MICROFISSURES : RESULTATS ET INTERPRETATION

4.4.1 Cas de l'endommagement sous compression simple :

Les résultats d'essai de compression simple sur grands échantillons à des déviateurs de 40 % et 55 % de la résistance maximale en compression simple sont présentés sur les figures (4.7) et (4.8). On observe qu'au début de la courbe des déformations longitudinales, on a une concavité tournée vers le haut qui correspond à une zone de fermetures des microfissures déjà existante

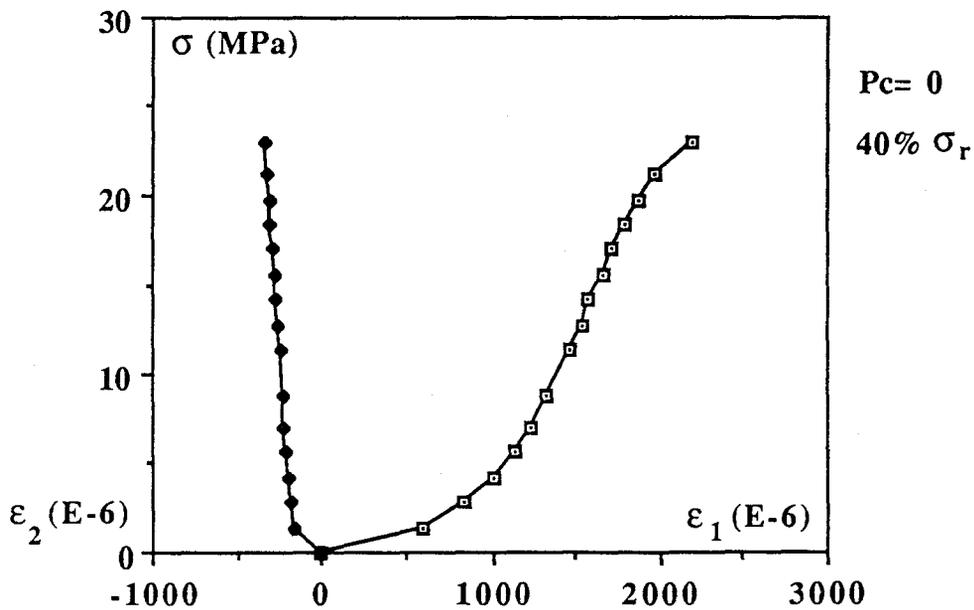


Figure 4.7 : Essai de compression simple sur grand échantillon à 40 % de la contrainte de rupture

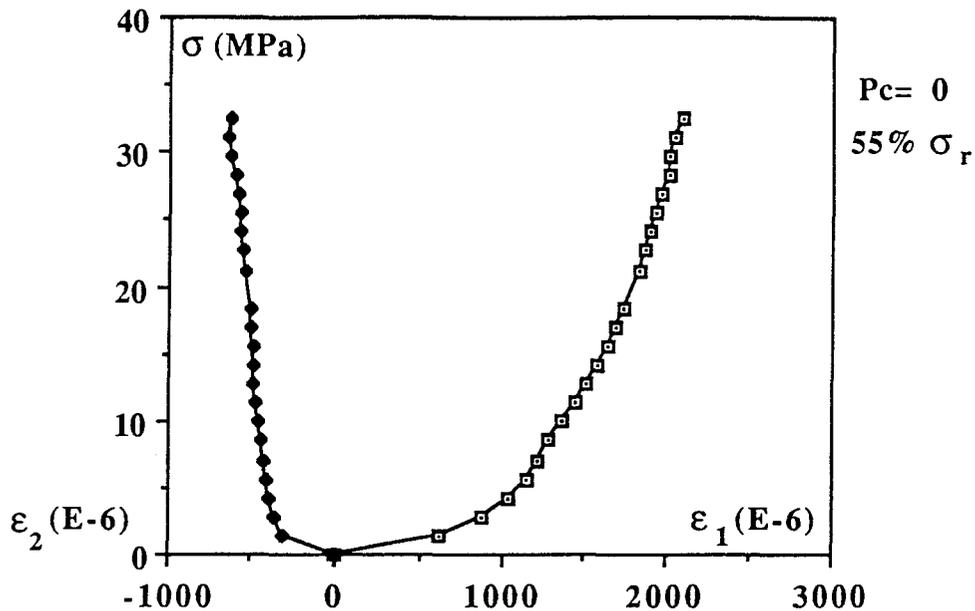


Figure 4.8 : Essai de compression simple sur grand échantillon à 55 % de la contrainte de rupture

au sein de l'échantillon. Après cette zone, le module d'élasticité longitudinal a la même valeur déjà trouvée sur les petits échantillons (chapitre 3), alors que le module d'élasticité, calculé au début de l'essai, se rapproche du module initial en traction trouvé au chapitre 2 pour un matériau vierge.

Les résultats d'essai de traction monotone qui ont été effectués sur ces grands échantillons préalablement microfissurés en compression simple sont présentés sur les figures (4.9), (4.10) et (4.11). On remarque que la résistance en traction diminue lorsque l'état de microfissuration en compression augmente. On obtient une valeur qui dépasse 1 MPa pour l'échantillon déjà microfissuré à 25 % de la contrainte à la rupture en compression. Les

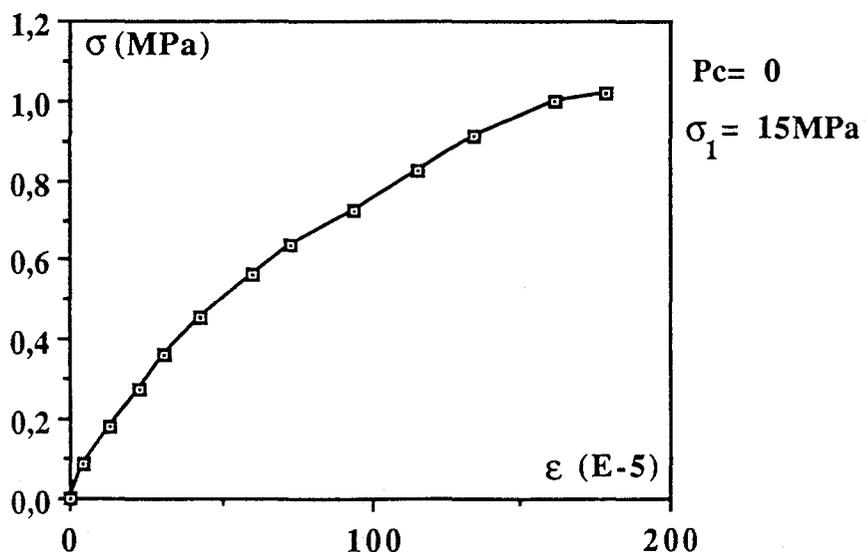


Figure 4.9 : Essai de traction monotone sur un échantillon déjà testé à 25 % σ_r de compression simple

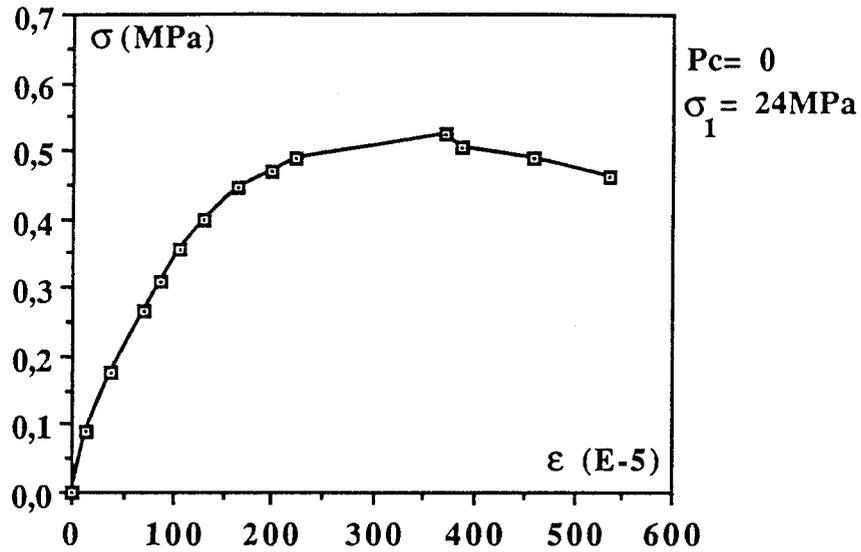


Figure 4.10 : Essai de traction monotone sur un échantillon préalablement microfissuré à 40 % σ_r de compression simple

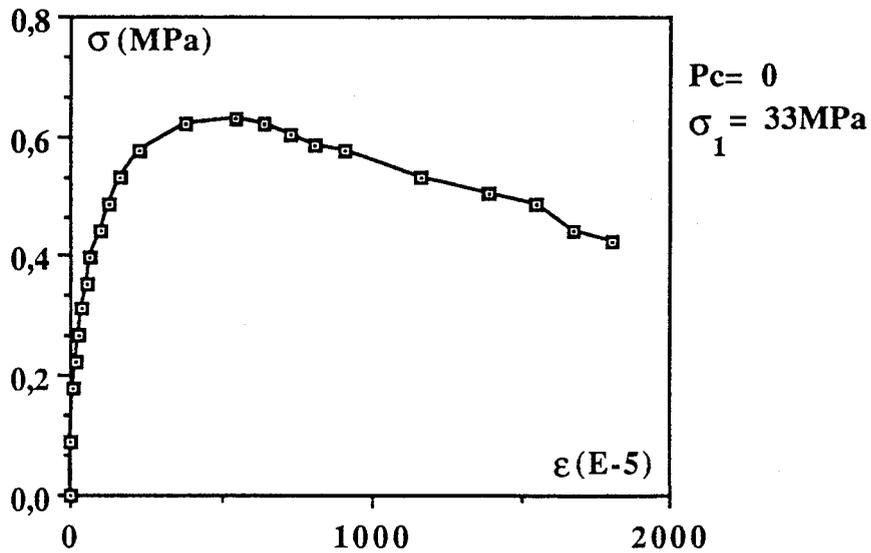


Figure 4.11 : Essai de traction monotone sur un échantillon préalablement microfissuré à 55 % σ_r de compression simple

déformations au pic sont de l'ordre de $200 \cdot 10^{-5}$ alors que pour les échantillons à 40 % et 55 %, le pic de contrainte en traction est de l'ordre de 0,6 MPa. Les déformations à la rupture sont de $550 \cdot 10^{-5}$ pour l'échantillon préalablement microfissuré à 40 % et de $1500 \cdot 10^{-5}$ pour l'échantillon testé à 55 % de la contrainte maximale en compression simple. A partir de ces essais de traction monotone, on peut calculer le module de traction initial pour ces échantillons préalablement endommagés. On observe une diminution du module initial de traction au fur et à mesure que la contrainte de compression augmente. Ce module initial de traction qui est de 1 660 MPa pour 25 % chute de valeur jusqu'à 420 MPa pour 55 % de la contrainte maximale en compression simple.

Un essai de traction avec cycles de chargement-déchargement pour un échantillon préalablement microfissuré en compression simple et à un déviateur de 25 % de la contrainte maximale de rupture en compression a été réalisé. Les résultats sont présentés sur la figure 4.12. On observe, après déchargement, la présence de déformations anélastiques non négligeables, et une

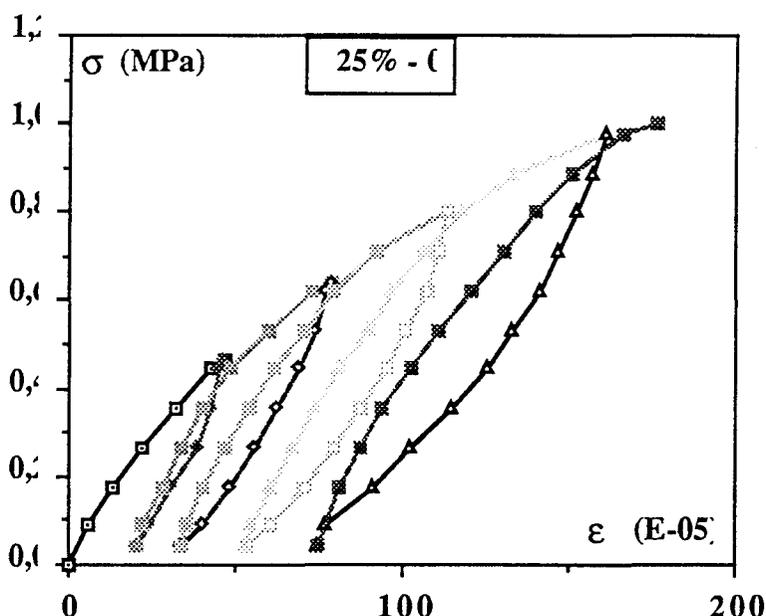


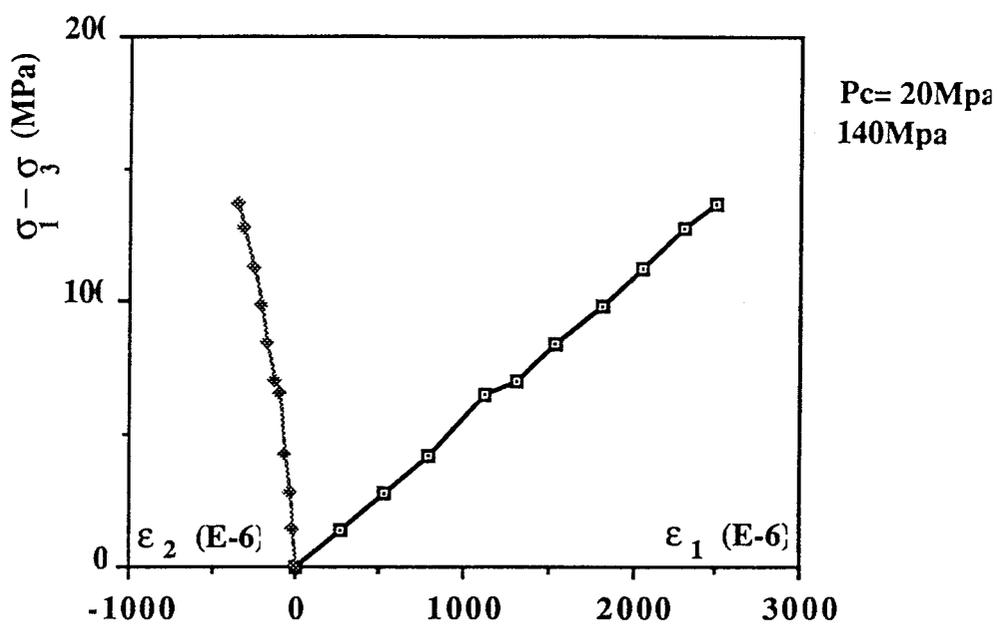
Figure 4.12 : Essai de traction avec cycles de chargement déchargement sur un échantillon préalablement microfissuré à 25 % σ_r en compression

diminution du module élastique en traction par rapport au module calculé au début de l'essai. Cela montre une progression de l'endommagement sous le chargement de traction.

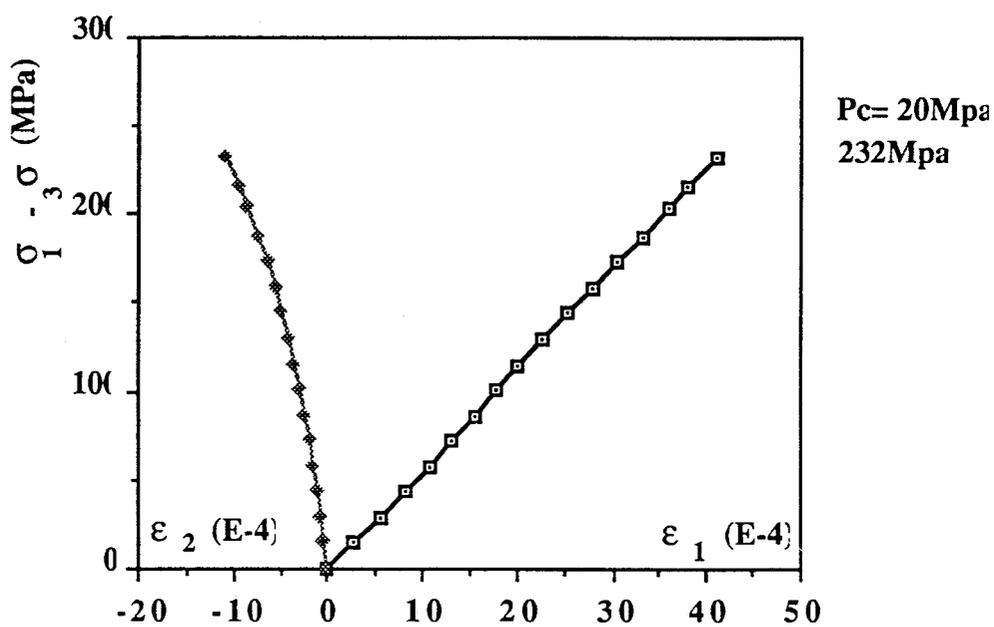
4.4.2 Cas de l'endommagement sous compression triaxiale

Les résultats d'essais triaxiaux pour des pressions de confinement $P_c = 20$ MPa, et à des déviateurs de 140 et 232 MPa, et pour $P_c = 30$ MPa, et à des déviateurs de 170, 200, 240 et 250 MPa pour les grands échantillons sont présentés sur les figures 4.13 et 4.14. On observe sur les courbes contraintes-déformations, que les déformations longitudinales restent à peu près linéaires, alors qu'il y a une perte de linéarité qui commence à se manifester dans le sens transversal, rappelant les observations faites sur les petits échantillons (chapitre III).

Les modules d'élasticité pour ces grands échantillons, et à différentes pressions de confinement, sont à peu près les mêmes. Les résultats d'essai de traction monotone qui ont été effectués sur les échantillons carottés du grand échantillon préalablement microfissurés en triaxial sont présentés sur les figures (4.15), (4.16) et (4.17). On observe une variation de l'endommagement transversal D_2 pour les différents déviateurs testés (la pression de confinement étant fixée). Pour $P_c = 10$ MPa, et à un déviateur de 65 MPa, l'endommagement dans la direction transversale est de 0,79, alors que pour un déviateur de 220 MPa, on trouve 0,9. Pour $P_c = 20$ MPa et 30 MPa, on constate le même type d'évolution. Des essais de traction avec cycles de chargement déchargement sur échantillons déjà endommagés en triaxial pour $P_c = 10, 20$ et 30 MPa, et à des déviateurs bien déterminés, sont présentés sur les figures (4.18), (4.19) et (4.20). On observe, sur ces figures, après déchargement au cours de l'essai de traction, une chute rapide du module d'élasticité en traction. On constate également l'existence de déformations anélastiques qui sont dues à des microfissures qui ne se ferment pas totalement. Pour le pic de contrainte en



(a)

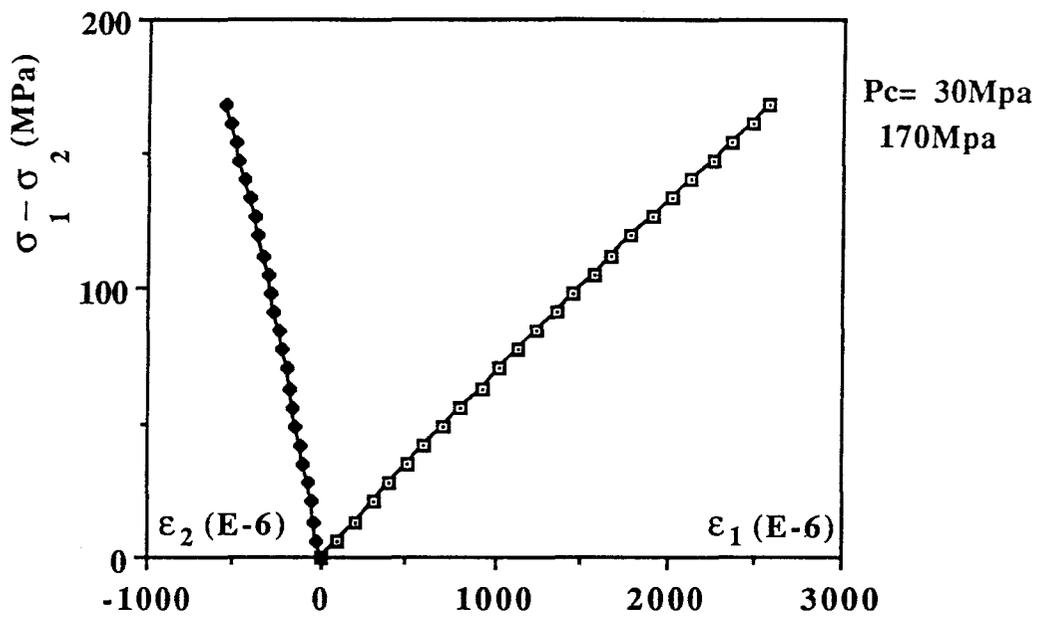


(b)

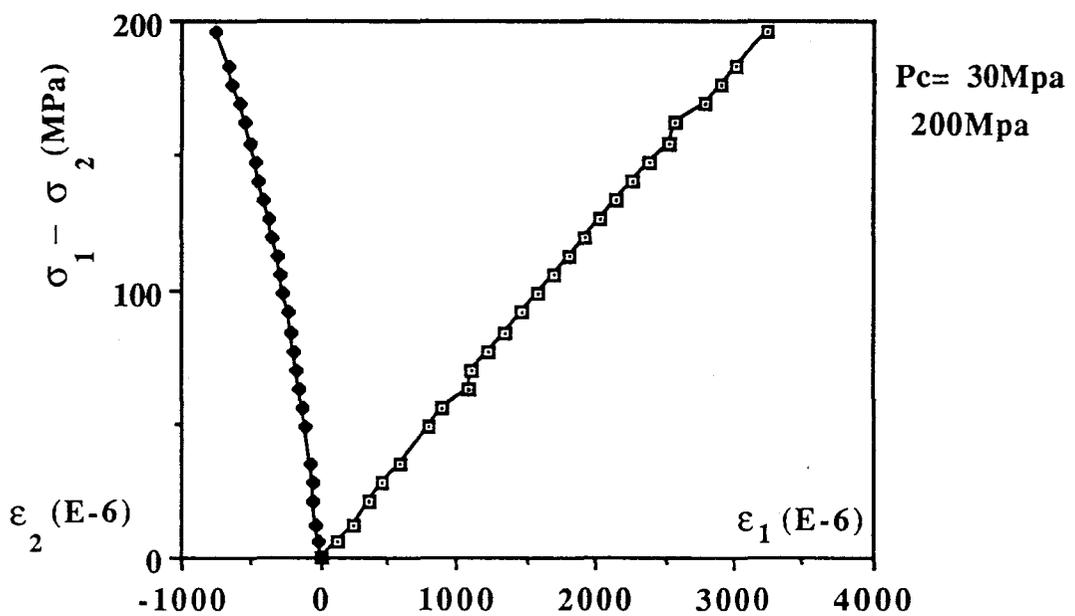
Figures 4.13 (a, b) : Essais triaxiaux sur grands échantillons à $P_c = 20 \text{ MPa}$ et à des déviateurs de 140 et 232 MPa

Pc (MPa)	S1-S2 (MPa)	E _{0t} (MPa)	S _r tra (Mpa)
0	15	1665	1.0
	24	600	0.52
	33	428.57	0.63
10	65	986	0.80
	170	562	/
	196	500	1.22
	220	400	0.60
20	140	866	1.0
	159	624	0.8
	196	468	1.0
	232	454	0.8
30	170	500	0.54
	200	520	/
	240	444	0.55
	250	325	0.44

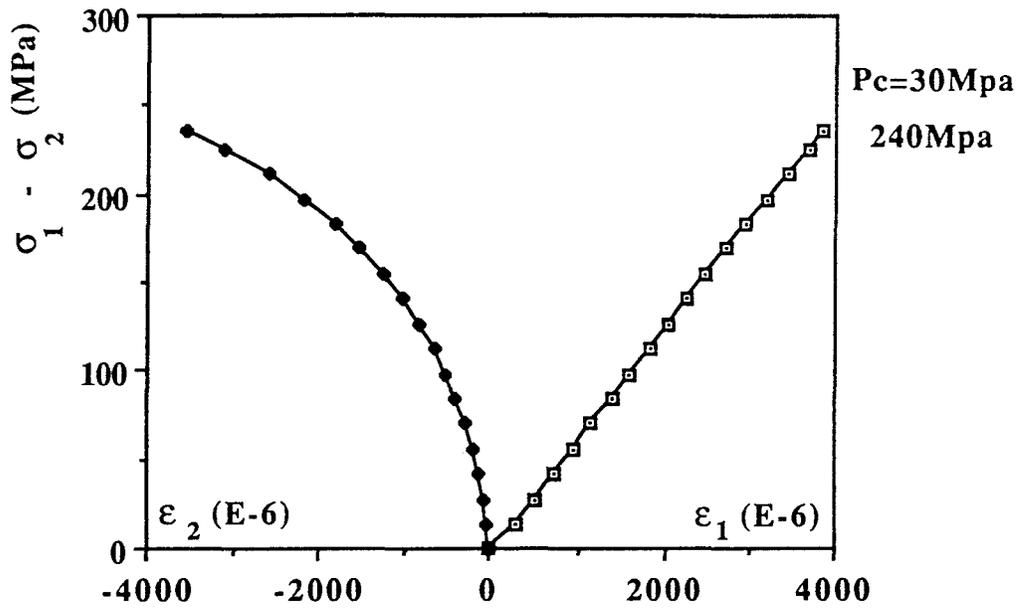
Tableau 4.3 : Résultats des caractéristiques mécaniques en traction pour les différents niveaux de déviateurs testés



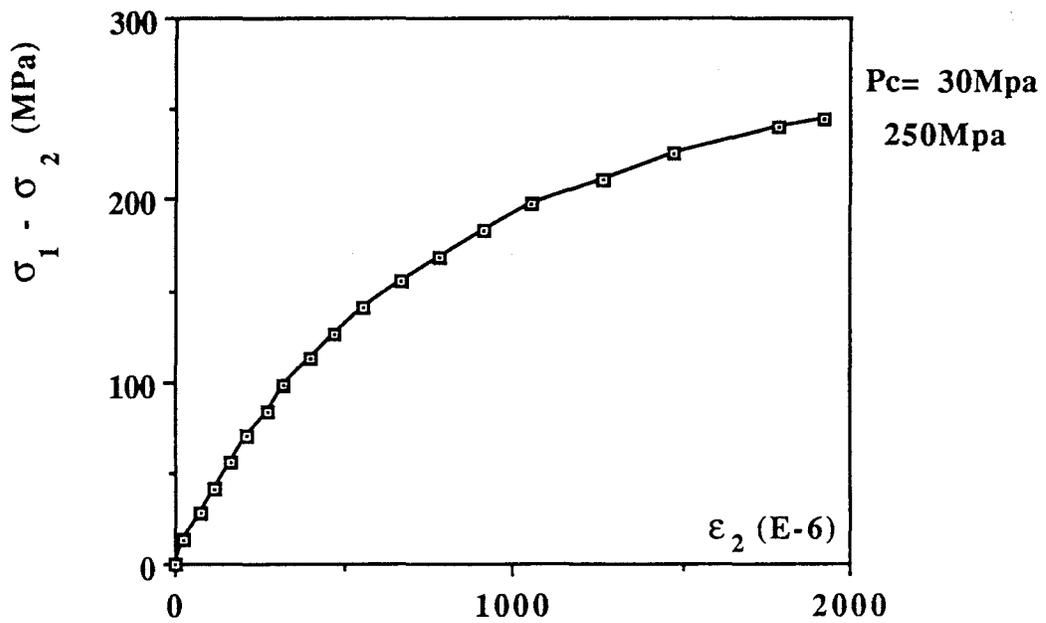
(a)



(b)



(c)



(d)

Figures 4.14 (a, b, c, d) : Essais triaxiaux sur grands échantillons à $P_c = 30 \text{ MPa}$ et à des déviateurs de 170, 200, 240, 250 MPa

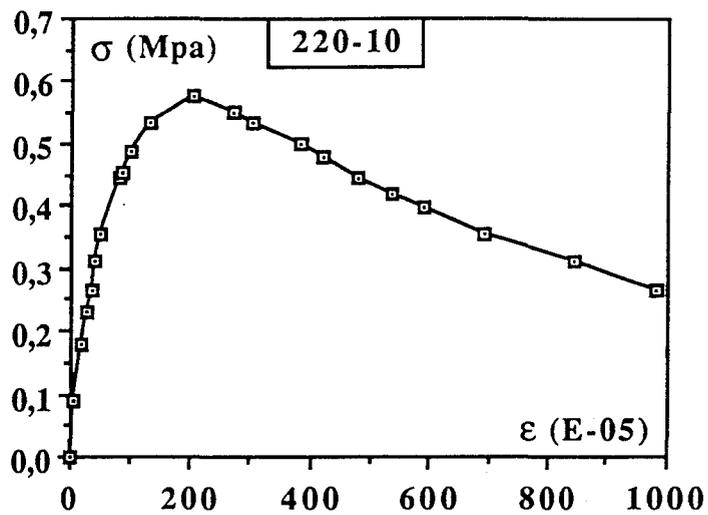
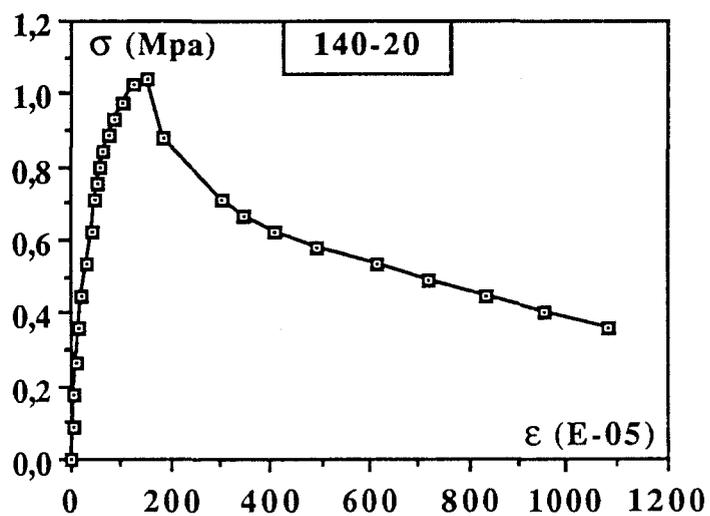
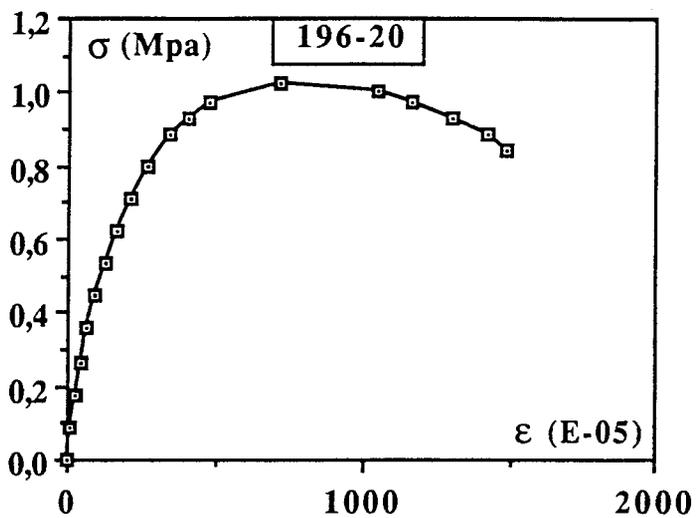


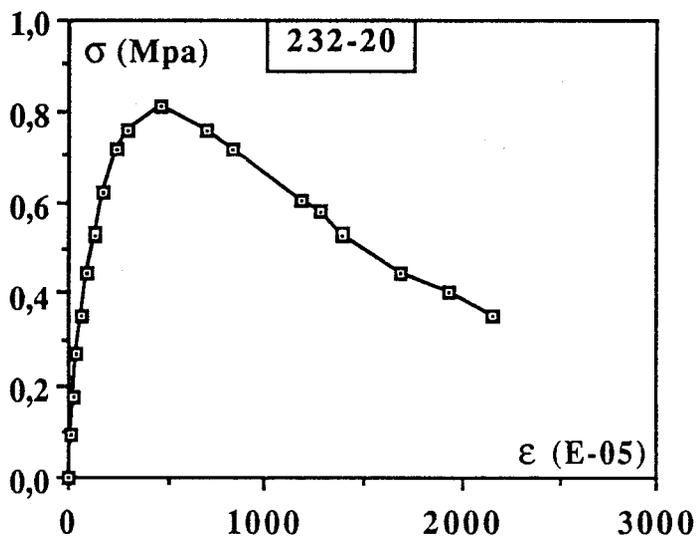
Figure 4.15 : Essai de traction monotone sur échantillon endommagé en triaxial à $P_c = 10$ MPa et à un déviateur de 220 MPa



(a)

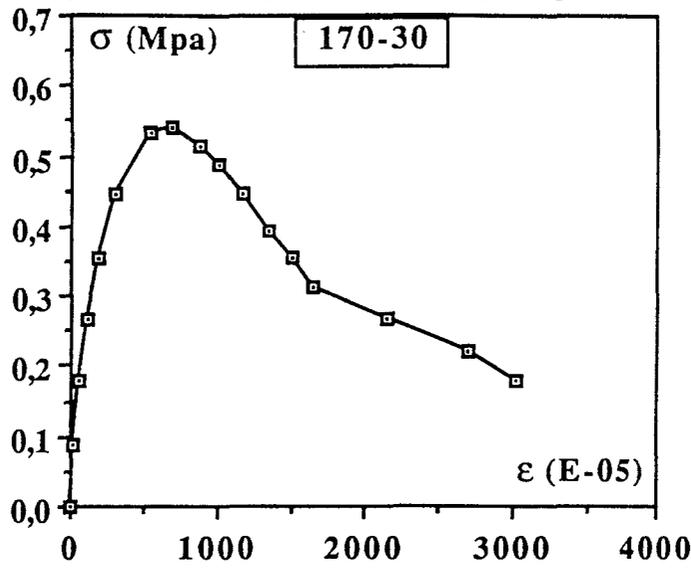


(b)

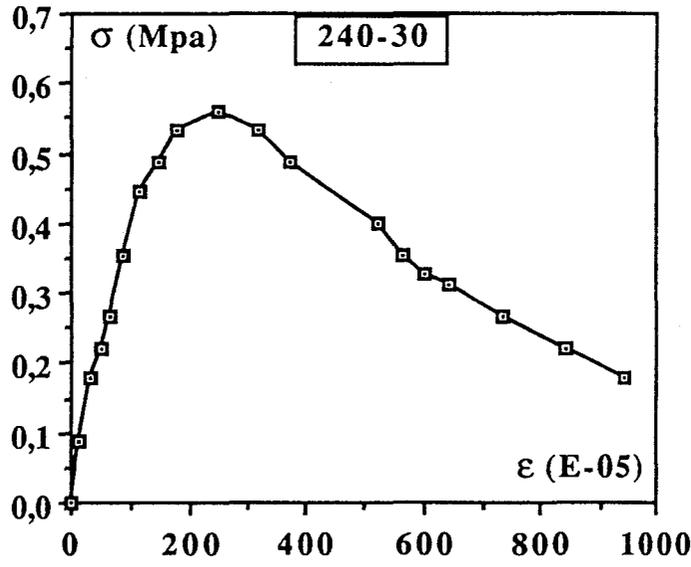


(c)

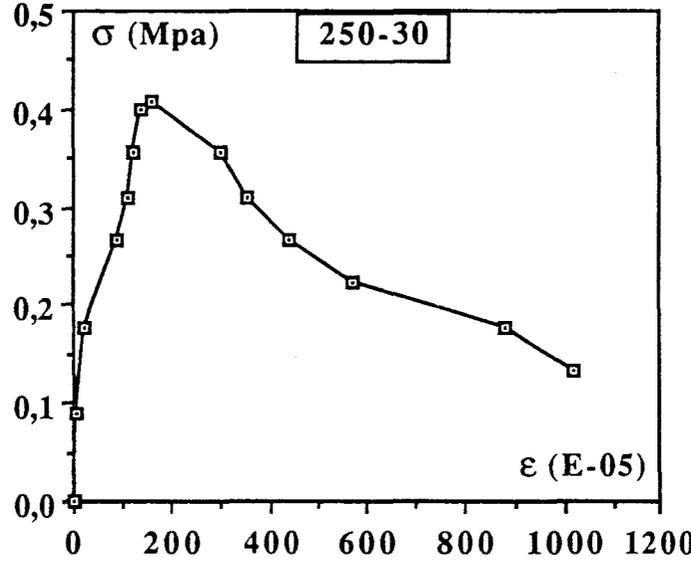
Figures 4.16 (a, b, c) : Essais de traction monotone sur des échantillons déjà testés en triaxial à $P_c = 20$ MPa et à des déviateurs de 140, 196 et 232 MPa



(a)

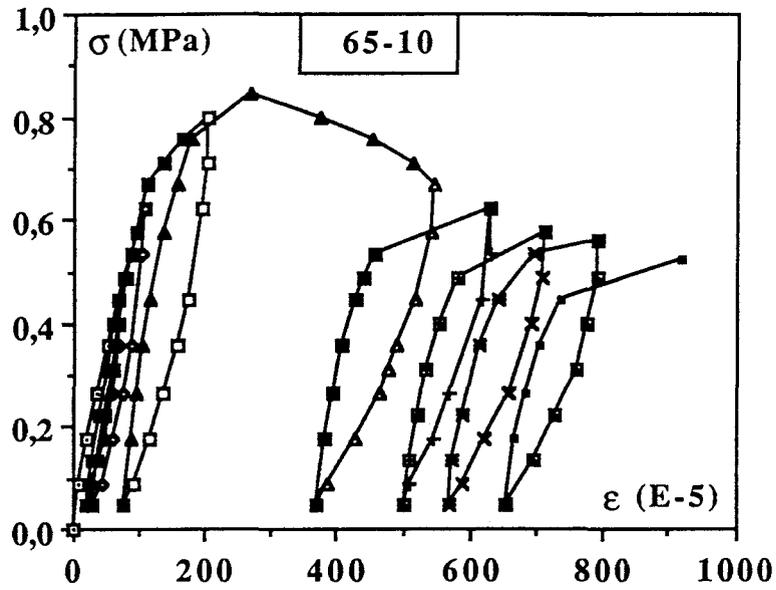


(b)

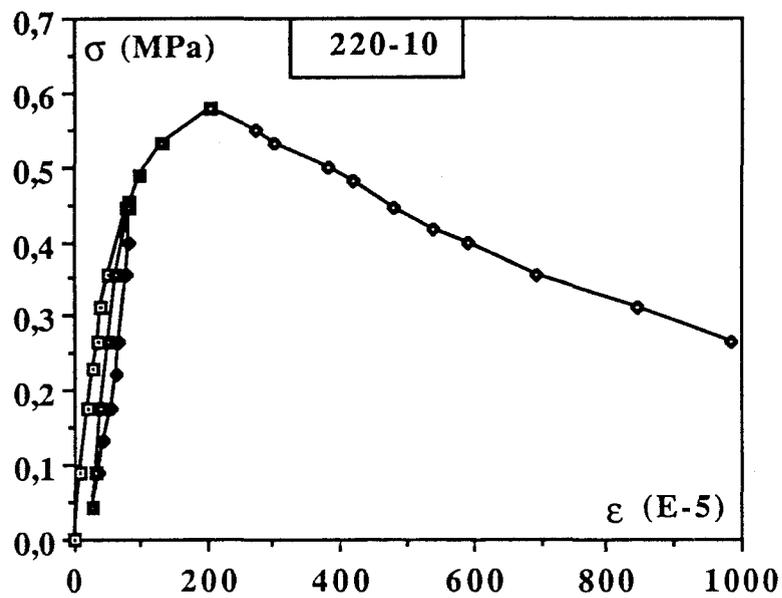


(c)

Figures 4.17 (a, b, c) : Essais de traction monotone sur des échantillons déjà testés en triaxial à $P_c = 30$ MPa et à des déviateurs de 170, 240 et 250 MPa

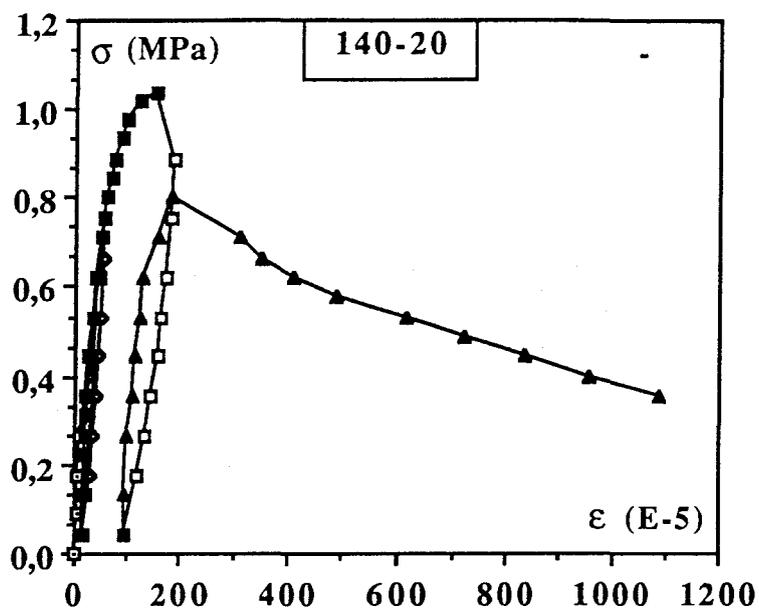


(a)

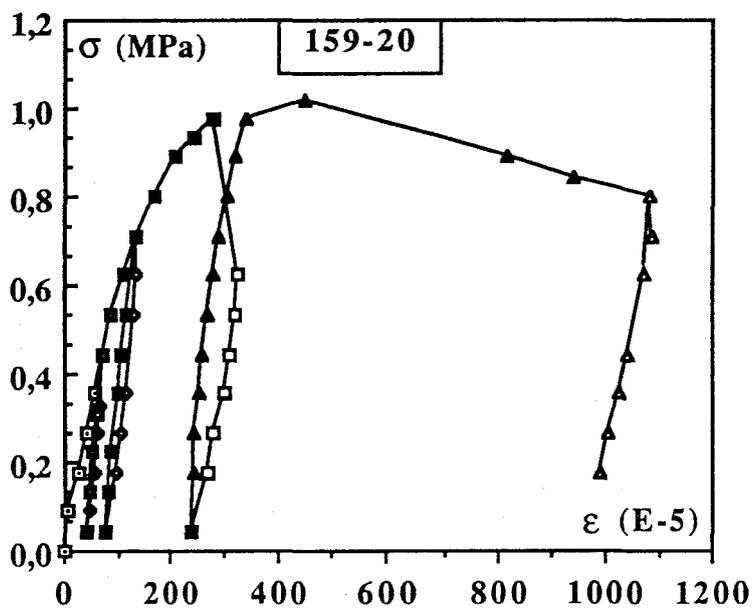


(b)

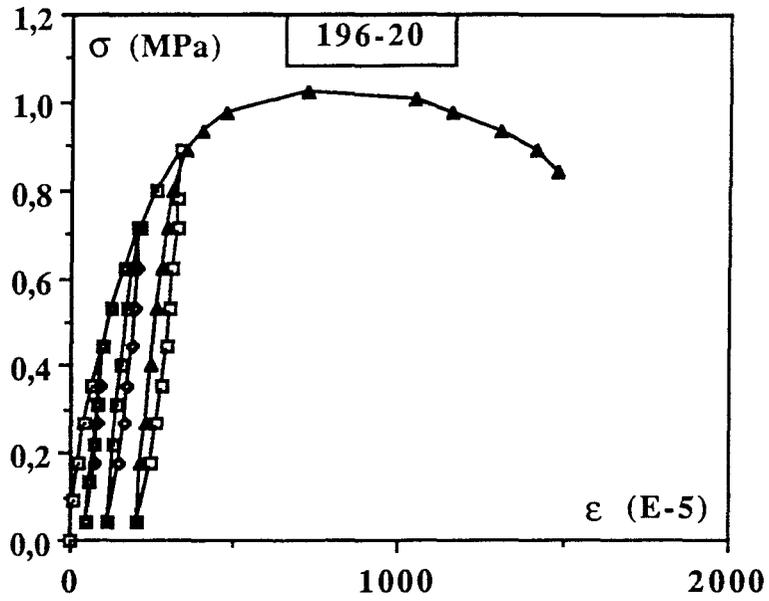
Figures 4.18 (a, b) : Essais de traction avec cycles de chargement déchargement sur des échantillons endommagés en triaxial à $P_c = 10$ MPa et déviateurs de 65 et 220 MPa



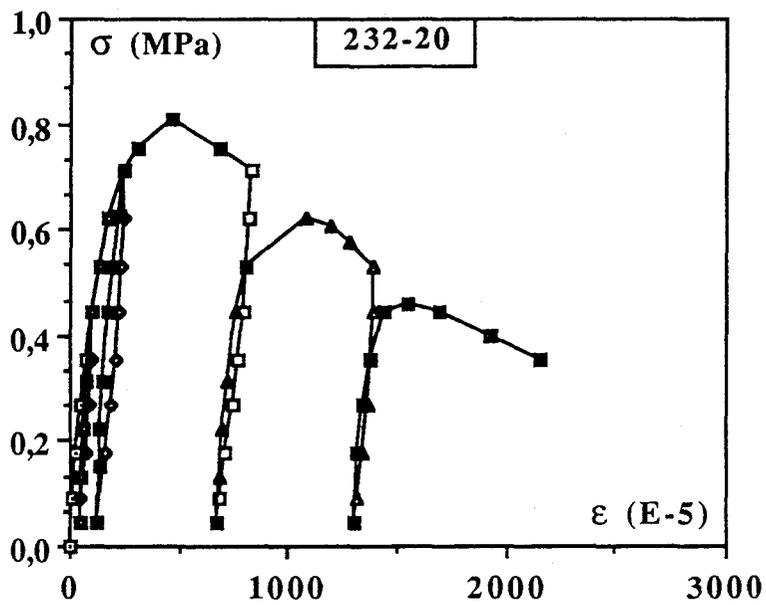
(a)



(b)

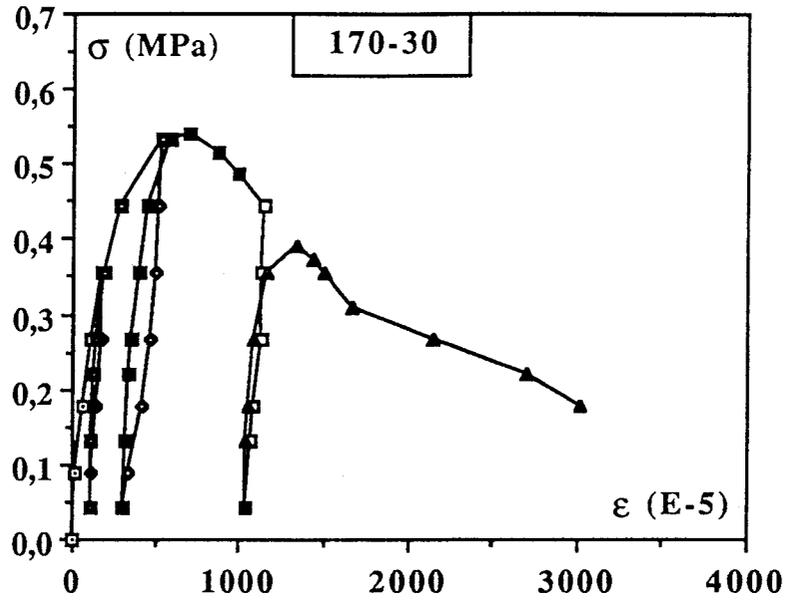


(c)

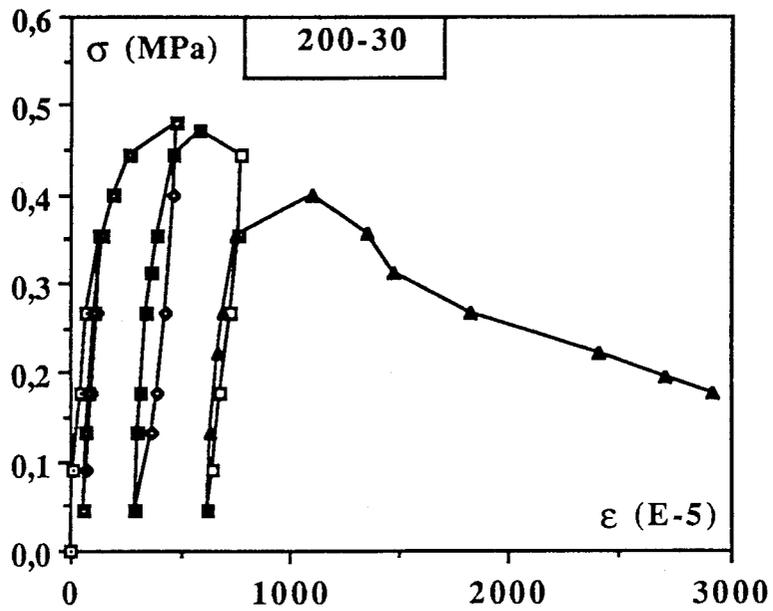


(d)

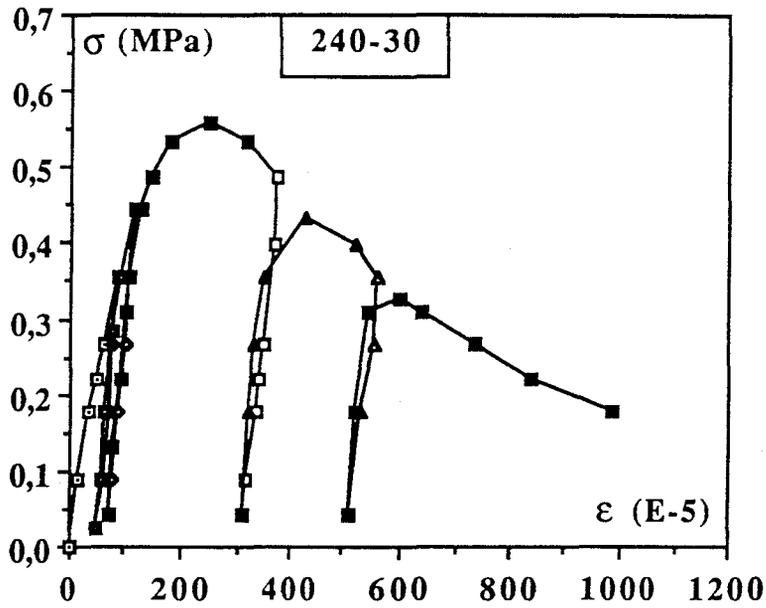
Figures 4.19 (a, b, c, d) : Essais de traction avec cycles de chargement déchargement sur des échantillons déjà endommagés en triaxial à $P_c = 20$ MPa et déviateurs de 140, 159, 196 et 232 MPa



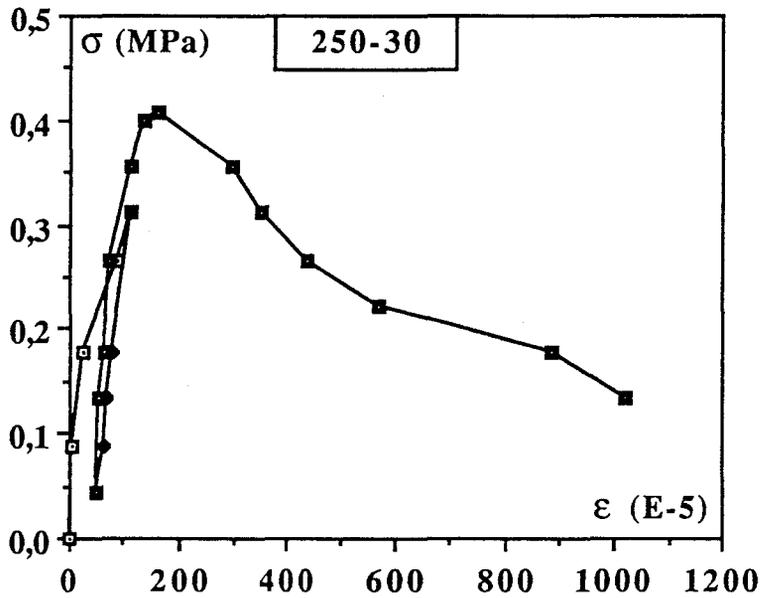
(a)



(b)



(c)



(d)

Figures 4.20 (a, b, c, d) : Essais de traction avec cycles de chargement déchargement sur des échantillons microfissurés en triaxial à $P_c = 30$ MPa et déviateurs 170, 200, 240 et 250 MPa

On observe une diminution de σ_r avec l'augmentation du niveau de déviateurs (tableau 4.3). Les résultats de l'évolution de l'endommagement (D_i) des échantillons, préalablement microfissurés sous compression triaxiale (calculé à partir des essais de traction avec cycles de chargement déchargement) en fonction des déformations anélastiques correspondantes, sont présentés sur la figure 4.21 pour $P_c = 20$ MPa, et sur la figure 4.22 pour $P_c = 30$ MPa. On observe que cette évolution suit une parabole qui commence avec de faibles valeurs d'endommagement et qui dépasse 0,95 au dernier déviateur testé (proche du déviateur à la rupture).

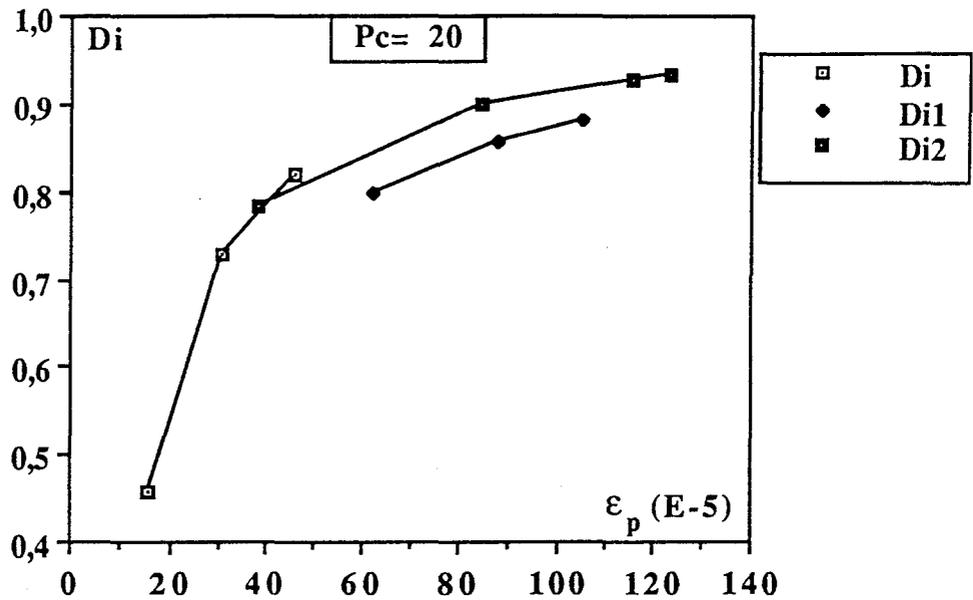


Figure 4.21 : Evolution de l'endommagement au cours d'un essai de traction avec cycles de chargement déchargement sur échantillons déjà testés en triaxial à $P_c = 20$ MPa et à différents déviateurs

Dans le premier chapitre, nous avons cité les mécanismes physiques à la base du processus d'endommagement : microfissuration, développement de microvides. Les endommagements engendrés par ces deux mécanismes sont de type surfacique (pour la microfissuration), ou de type volumique (pour les microcavités). L'endommagement surfacique est mis en jeu par des phénomènes complexes tels que le glissement par frottement ou l'ouverture des microfissures. La proportion dans laquelle interviennent chacun des mécanismes est mal connue. Il nous a cependant semblé utile de représenter l'endommagement en fonction de la densité de fissures D_f . Cette variable est définie comme étant l'écart de linéarité sur la courbe de déformations transversales (figure 4.23). Les effets endommageants des microfissures et microvides ont été théoriquement étudiés par plusieurs auteurs [45], [54]. Résumons en soulignant que le résultat recherché est l'évaluation des modules effectifs du matériau, généralement par la méthode auto-consistante dans Budiansky et O'Connell [11], ou la méthode du schéma différentiel dans Zimmerman [74].

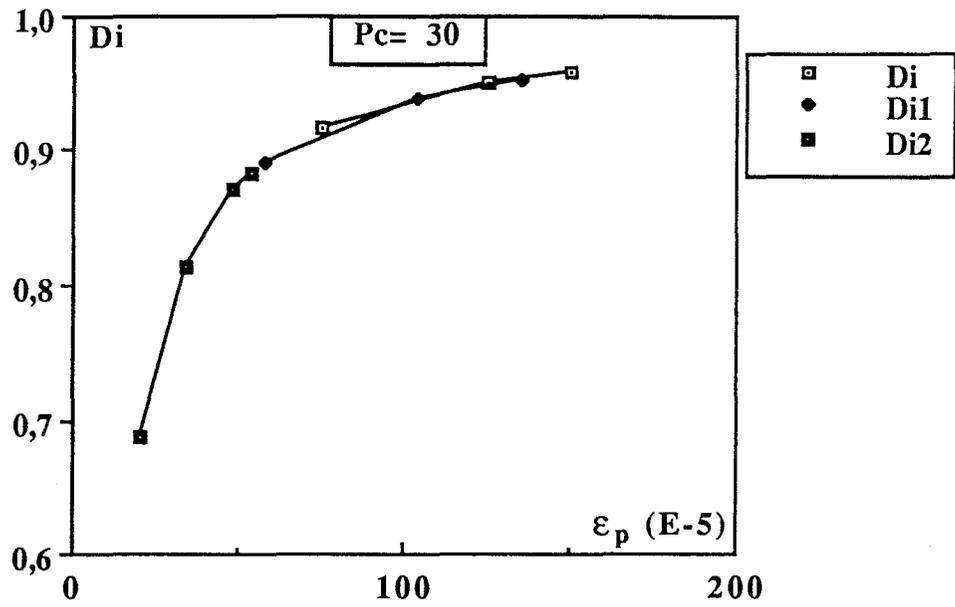


Figure 4.22 : Evolution de l'endommagement au cours d'un essai de traction avec cycles de chargement déchargement sur échantillons déjà testés en triaxial à $P_c = 30$ MPa et à différents déviateurs

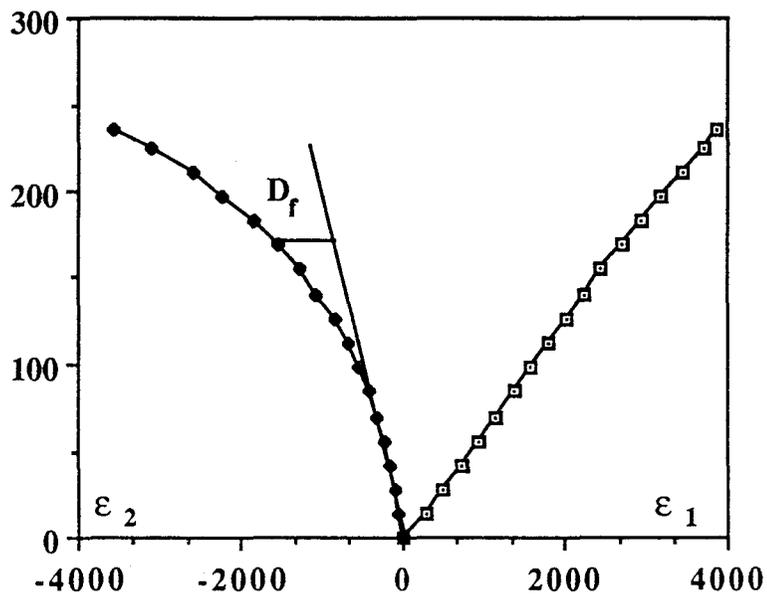


Figure 4.23 : Définition de la densité de microfissure sur une courbe triaxiale

Le résultat recherché est la corrélation de la courbe d'endommagement en compression pour les différents déviateurs testés avec la densité de microfissure D_F correspondant aux états de microfissuration. Une comparaison sera recherchée avec la courbe déjà obtenue en traction sur le matériau vierge (figure 2.18 b). Le but est de voir si on peut déterminer les valeurs d'endommagement en compression à partir d'un essai de traction avec cycles de chargement déchargement sur un matériau vierge. Les différentes valeurs d'endommagement calculées en traction pour de grands échantillons déjà testés à $P_c = 0$, $P_c = 20$ et $P_c = 30$ MPa sont représentées en fonction de la porosité de microfissure (figure 4.24). Elles montrent que l'endommagement augmente rapidement avec D_F . On remarque que les deux courbes d'endommagement en compression en fonction de la densité de fissure (D_F) et d'endommagement en traction pour un matériau vierge en fonction des déformations anélastiques (figure 4.25) ont la même allure, mais ne donnent pas des valeurs comparables. Cela peut être en partie dû à l'influence de la pression de confinement après déchargement sur les grands échantillons. Les deux courbes d'endommagement de compression en fonction des déformations transversales maximales atteintes ϵ_2 et d'endommagement de traction pour un matériau vierge en fonction des déformations anélastiques présentées sur la figure 4.26 se rapprochent l'une de l'autre, surtout pour les échantillons fortement microfissurés (déformation élevée).

Signalons enfin que nous avons tenté d'effectuer des essais de traction contrôlés en ultra-sons sur des échantillons préalablement microfissurés en compression. Ceci, dans le but de quantifier l'endommagement en compression par ultra-sons, et de faire une étude comparative. Malheureusement, nous n'avons pas pu identifier l'arrivée du signal, perturbé par le réseau de microfissures de forte densité déjà créé en compression. Les méthodes des ultrasonores apparaissent ici limitées du fait de l'endommagement élevé.

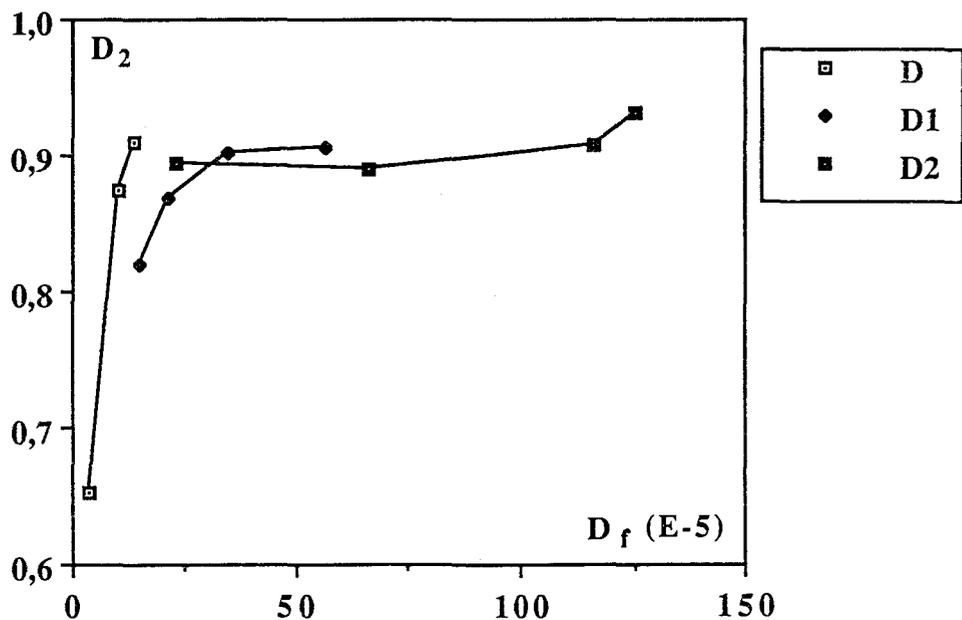


Figure 4.24 : Evolution de l'endommagement transversal en fonction de la porosité de fissure pour $P_c = 0$, à $P_c = 20$ MPa et $P_c = 30$ MPa

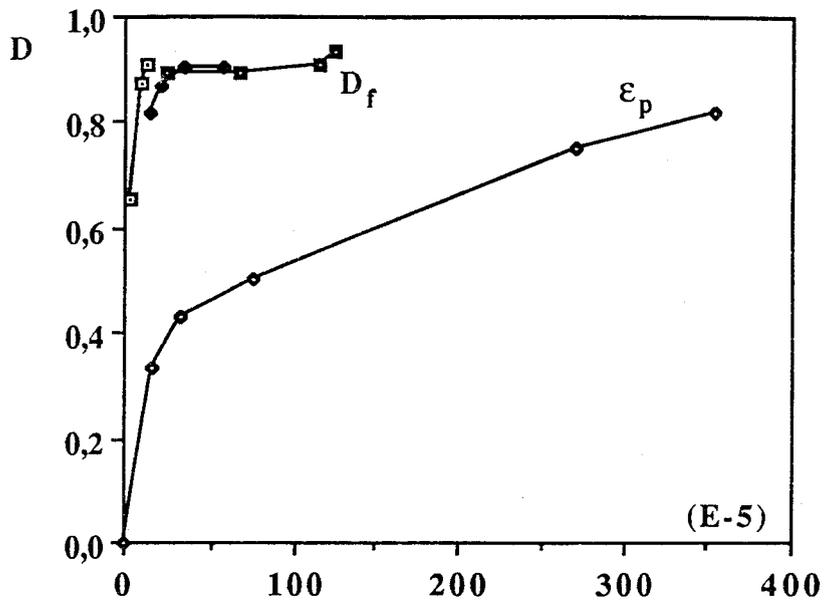


Figure 4.25 : Comparaison entre courbe de traction avec cycles de chargement déchargement d'un matériau vierge et la courbe D_2 en fonction de D_f pour différentes pressions

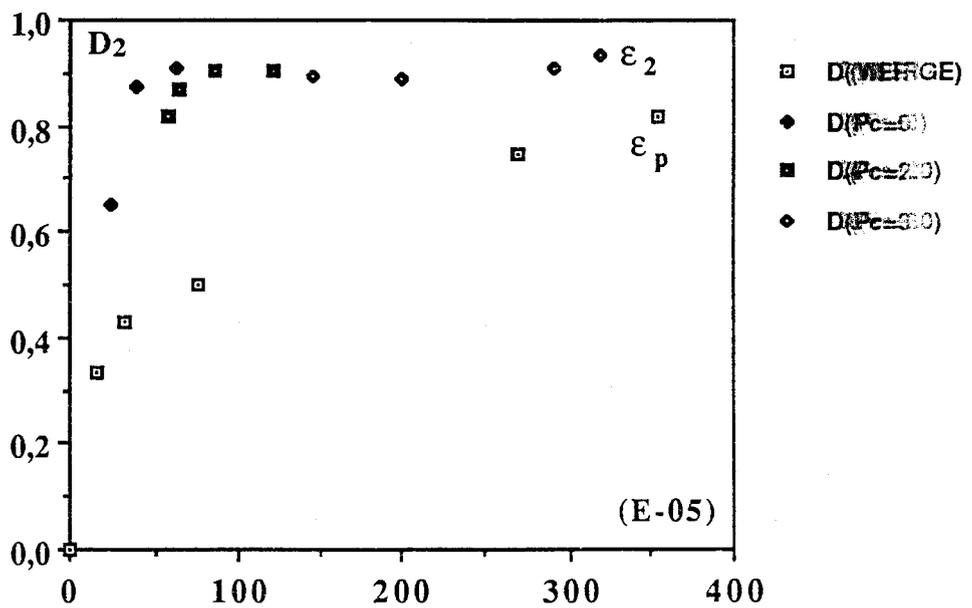


Figure 4.26 : Comparaison entre l'évolution de D de traction d'un matériau vierge et l'évolution de D_2 de compression en fonction de déformation transversale ϵ_2

4.5 ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE SUR ECHANTILLONS MICROFISSURES EN COMPRESSION TRIAXIALE.

Collombet [13] a effectué des essais de compressions sur des cubes de béton pour créer des états d'endommagement dans la direction de la compression. Les caractéristiques mécaniques élastiques déterminés dans ce type d'essai sont E_1 et ν_{12} . Par retournement du cube d'essai et en adoptant la même procédure, on peut identifier E_2 et ν_{21} . Ramtani [58] a essayé de caractériser l'état d'endommagement en compression en effectuant des essais de traction, puis une compression. Ces essais n'ont pas mené à des résultats probants du fait de la fermeture des microfissurations après l'application de l'effort de compression. Aucune variation sensible de module n'est observée pour le matériau testé (béton). Nous avons voulu dans notre étude mesurer la réponse du grès de Fontainebleau préalablement microfissuré sous sollicitation triaxiale, pour des pressions de confinement de $P_c = 10$ MPa (à des déviateurs de 65 et 170 MPa) et pour $P_c = 20$ MPa à un déviateur de 196 MPa. Des essais de compression simple avec cycles de chargement déchargement ont donc été effectués sur des échantillons carottés dans le sens transversal des grands échantillons préalablement microfissurés en triaxial (figure 4.27).

4.5.1 Résultats et interprétation

On remarque que les modules élastiques dans le sens du chargement reste à peu près inchangé au cours des cycles de chargement déchargement. On observe des déformations anélastiques négligeables pour les deux pressions de confinement $P_c = 10$ MPa et $P_c = 20$ MPa (figures 4.28 et 4.29).

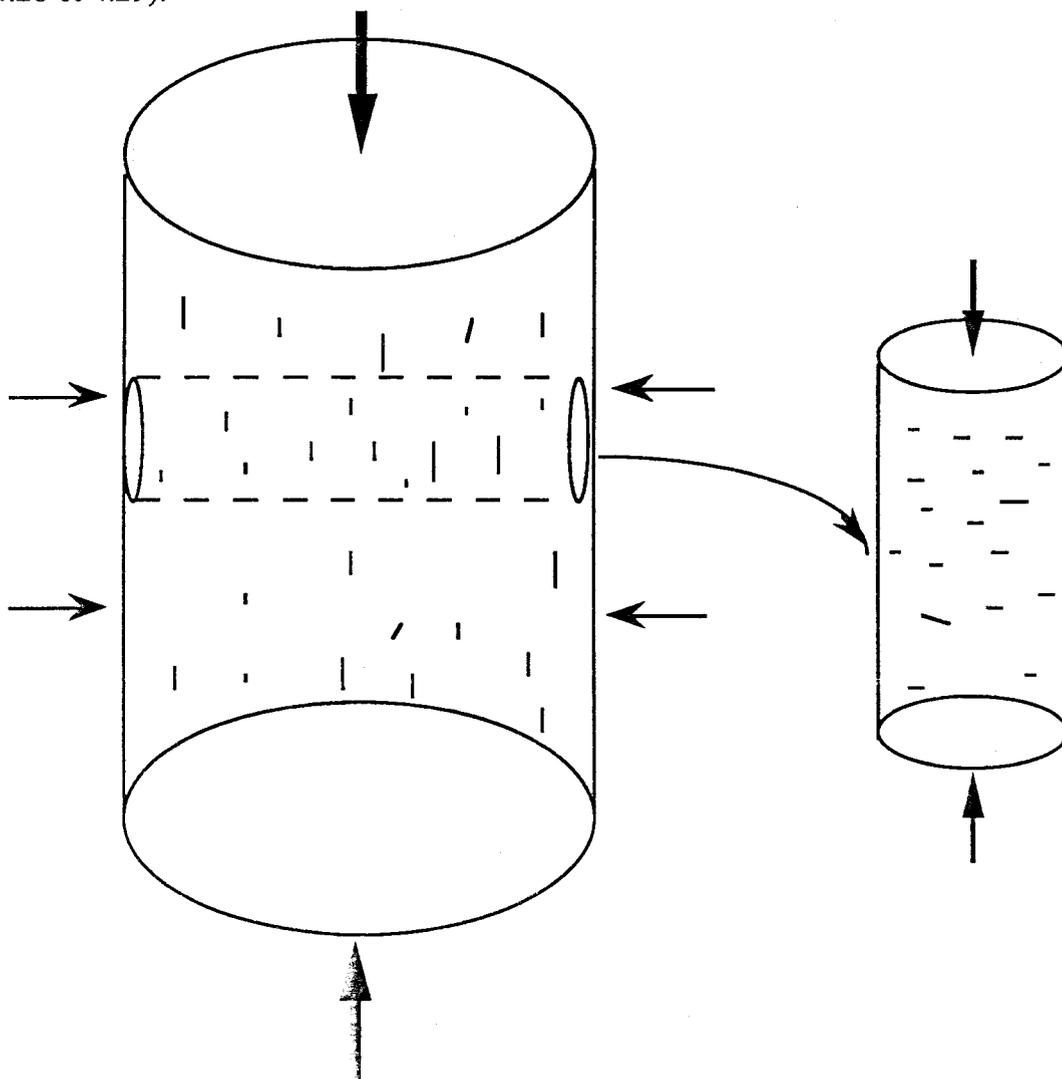
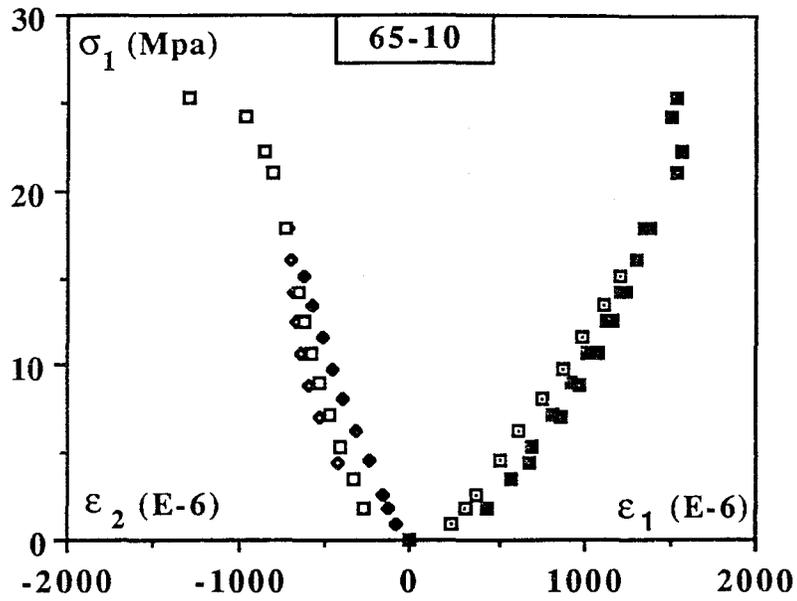
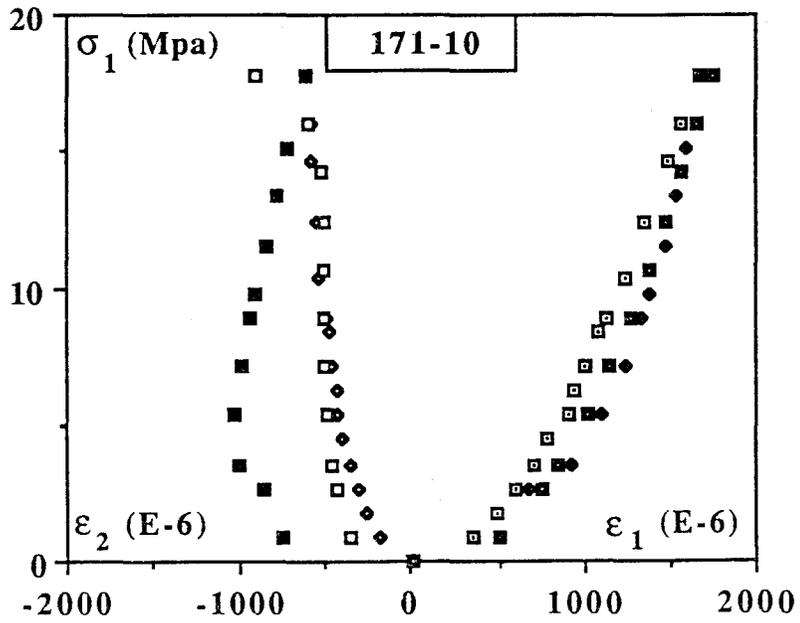


Figure 4.27 : Méthodologie de l'essai de compression sur échantillon microfissuré en compression



(a)



(b)

Figures 4.28 (a, b) : Essais de compression simple avec cycles de chargement déchargement sur échantillons préalablement

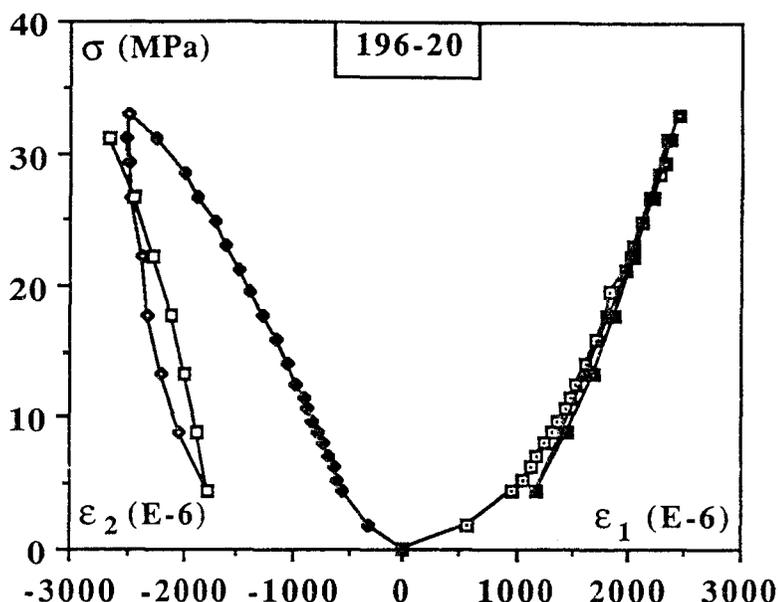


Figure 4.29 : Essais de compression simple avec cycles de chargement déchargement sur échantillons préalablement microfissurés en triaxial à $P_c = 20$ MPa

Les déformations anélastiques qui se produisent dans le sens transversal sont peu importantes, sauf pour l'essai de la figure 4.29. Par ailleurs, les valeurs des modules élastiques dans le sens du chargement diminuent par rapport au module trouvé en compression simple pour un matériau vierge ($E_{oc} = 32\ 000$ MPa). Le module élastique pour les échantillons préalablement microfissurés diminuent également avec l'augmentation du déviateur déjà appliqué. Par exemple, pour une pression de confinement de $P_c = 10$ MPa et un déviateur de 65 MPa, $E_c = 17\ 140$ MPa, alors que $E_c = 12\ 500$ MPa pour la même pression et un déviateur de 170 MPa. On remarque au début de l'essai de compression simple avec cycles de chargement déchargement sur un échantillon microfissuré en triaxial (figure 4.29) que le module élastique $E_c = 4\ 190$ MPa, alors qu'après cette zone de début, la valeur augmente pour atteindre $E_c = 21\ 000$ MPa.

4.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'endommagement en compression du grès de Fontainebleau. La caractérisation de l'endommagement dans le sens transversal a été effectuée à l'aide d'essais de traction sur des échantillons préalablement microfissurés en compression et carottés dans ce sens. A partir du calcul du module initial de traction sur ces échantillons, la détermination de l'endommagement en compression a été faite. L'objectif était de déterminer la courbe d'endommagement transversal en compression et de faire la comparaison avec les résultats de la courbe d'essai de traction avec cycles de chargement déchargement pour un matériau vierge. On a vu sur la figure 4.26 que les deux courbes ont la même allure. Même si elles s'éloignent au début, elles se rapprochent pour les niveaux de déformations élevées. Dans le but de voir l'influence du phénomène du carottage, une étude a été faite qui nous a montré que la microfissuration induite par ce phénomène reste peu importante, même pour des échantillons préalablement microfissurés. Il serait intéressant de tenter une corrélation de l'endommagement avec la surface spécifique. Enfin, une série d'essais de traction direct contrôlé en ultrasons a été effectuée sur des échantillons préalablement microfissurés. Nous avons constaté la limitation de cette méthode sur ces échantillons, car l'arrivée du signal a été perturbée par le réseau de la

CONCLUSION

Au terme de cette étude sur le comportement mécanique du grès de Fontainebleau, plusieurs résultats sont à souligner. La mise en place d'un montage de traction directe et la réalisation d'essais de traction nous ont permis d'observer le comportement sous sollicitation de traction monotone du grès. Nous avons pu enregistrer la partie post-pic de ce comportement. Pour valider les courbes obtenues, nous avons procédé à une multiplication de jauges de mesures. Cette procédure a permis de constater que la localisation des déformations ne semble apparaître que bien après le pic de contrainte en traction.

La réalisation d'essais de traction avec cycles de chargement-déchargement avant et après le pic a fourni un moyen de mesure de l'endommagement de la roche étudiée jusqu'à la contrainte de localisation de la déformation. L'endommagement atteint une valeur d'environ 0,7 au point de localisation. Dans le but de caractériser complètement et correctement l'endommagement important avant le pic et de rechercher une éventuelle corrélation, nous avons eu recours aux méthodes ultra-sonores. Celles-ci nous permettent de mesurer d'une façon continue pendant l'essai de traction les vitesses d'ondes longitudinales V_p et transversales V_s , ainsi que l'atténuation. A cet effet, un montage de traction ultra-son a été réalisé dans le laboratoire. Il faut souligner ici les limites de la méthode ultra-sonore sur ce type de matériau : à partir d'un certain stade de sollicitation, l'arrivée du signal est perturbée par le réseau de microfissuration qui se développe. Cela est particulièrement vrai pour les échantillons préalablement microfissurés en compression, et rend toute interprétation difficile.

Au cours des cycles de chargement-déchargement en traction, des déformations anélastiques non négligeables ont été observées alors qu'elles sont toujours négligées pour ce type de matériau dans la modélisation. Cette étude montre clairement la nécessité d'une prise en compte des déformations anélastiques dans la modélisation.

Une étude expérimentale complète en compression triaxiale a été effectuée à différentes pressions de confinement allant de 0 à 40 MPa. Les résultats montrent :

- un comportement initialement isotrope sous compression hydrostatique,
- par ailleurs, la résistance dans les essais de compression dépend fortement de la pression de confinement. Dans les essais triaxiaux monotones, le déviateur au pic est plus élevé quand la pression de confinement est élevée. Le module d'Young augmente légèrement avec l'augmentation de pression,
- une fissuration orientée qui induit un comportement anisotrope sous chargement déviatorique, et qui se manifeste par une perte de linéarité dans le sens transversal. Sur les courbes de déformations volumiques, on observe une phase de contractance, suivie d'une forte dilatance,
- des cycles de chargement-déchargement réalisés entraînant une faible variation du module longitudinal. L'endommagement dans cette direction est quasi-nulle,
- des déformations anélastiques quasi-nulles dans le sens longitudinal, et plus importantes dans le sens transversal. Ces dernières augmentent avec la diminution de la pression de confinement.

Pour caractériser l'endommagement anisotrope en compression, des essais de compression à des déviateurs bien déterminés, et se situant après la perte de linéarité dans le sens transversal, ont été effectués sur des grands échantillons. Ces échantillons sont carottés dans le sens transversal, après création de la microfissuration, puis testés en traction directe monotone ou avec cycles de chargement déchargement. On observe, pour le matériau préalablement endommagé en compression triaxiale, que l'application d'un chargement de traction affecte la raideur en traction (diminution de la raideur initiale en traction). Pour ces essais, des précautions préalables ont été

prises pour s'assurer que le carottage n'affecte pas le réseau de microfissurations déjà créé par le déviateur (étude B.E.T. pour la mesure de surface spécifique). De même, l'effet d'échelle, même s'il existe, peut être négligé pour le matériau testé. Enfin, nous avons tenté de faire une corrélation entre l'endommagement transversal en compression triaxiale (courbes $\sigma - \varepsilon_2$) et l'endommagement en traction pour un matériau vierge (courbes $\sigma - \varepsilon_{\text{anelastiques}}$), par l'intermédiaire de la densité de fissures. Même si ces courbes ne sont pas proches l'une de l'autre pour les faibles niveaux de chargement, on peut constater qu'elles se rapprochent sensiblement aux déviateurs élevés.

PERSPECTIVES

Au vu des essais de traction sur échantillons microfissurés en compression triaxiale, présentés au chapitre IV, certaines voies d'étude apparaissent importantes pour la poursuite de ce travail.

La réalisation d'essais de traction uniaxiale sur des échantillons préalablement endommagés en compression, mais à des déviateurs moins élevés, pour obtenir l'allure complète de l'endommagement en compression pour cette roche.

Le développement d'un modèle d'endommagement anisotrope capable de simuler l'endommagement en compression du grès ; une étude dans cette voie est en cours dans le laboratoire de mécanique.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] **ANDRIEUX S.** (1983) - "Un modèle de matériau microfissuré - Application aux roches et aux bétons" - Thèse de Docteur Ingénieur, ENPC, Paris
- [2] **BARON J. et SAUTERY R.** - "Le béton hydraulique" - Connaissance et pratique, Presses Ponts et Chaussées
- [3] **BAZANT Z.P., ZDENEK P. and Sang-Sik Kim** (1979) - "Plastic - Fracturing theory for concrete" J. of Eng. Mechanics, Division
- [4] **BENAIJA, BOULAY, DELAHOUSSE, BUBUET, TORRENTI, BERTHAUD et FOND** - (1990) - " Etude de la localisation dans un grès des Voges" - Rapport Scien, Gréco " Géomatériaux ", 181-184
- [5] **BENOUNICHE S.** (1979) - "Modélisation de l'endommagement du béton hydraulique par microfissuration en compression" - Thèse de Doctorat de 3e cycle, Paris VI
- [6] **BERTAUD Y.** (1988) - "Mesure de l'endommagement du béton par une méthode ultrasonore" - Thèse de Doctorat, Juin, Laboratoire de Mécanique et Technologie - E.N.S. de Cachan - Université Pierre et Marie Curie Paris VI
- [7] **BIENIAWSKI Z.T.** (1967) - "Mechanism of brittle fracture of rock. Part III - Fracture in tension and under long term loading". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 4, pp. 395-430
- [8] **BOURBIE T., COUSSY O., ZINSZNER B.** (1986) - "Acoustique des milieux poreux" - Publications de l'Institut Français du Pétrole - Collection "Science et Technique du pétrole", n° 27
- [9] **BUDIANSKY B.** (1965) - "On the elastic moduli of some heterogeneous materials" - J. Mech. Phys. Solids 13, 223
- [10] **BUDIANSKY B., O'CONNELL R.J.** (1977) - "Elastic moduli of cracked solid" - J. Solids structures, vol. 12, pp. 81-97
- [11] **BUI H.D. and EHRLACHER A.** (1981) - "Propagation of damage in elastic and plastic solids"
- [12] **CHABOCHE J.L.** (1978) - "Description thermodynamique et phénoménologique de la viscoplasticité cyclique avec endommagement - Thèse d'Etat, Paris VI
- [13] **COLLOMBET F.** (1985) - "Modélisation de l'endommagement anisotrope. Application au comportement du béton sous compression triaxiale" - Thèse de Doctorat de 3e cycle, Paris VI
- [14] **CORDEBOIS J.P., SIDOROFF F.** (1982) - "Endommagement anisotrope en élasticité et plasticité" - J. de Méca. Théor. et Appliquée, pp. 45-60
- [15] **CORDEBOIS J.P.** (1983) - "Critère d'instabilité plastique et endommagement ductile en grandes déformations" - Thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI
- [16] **COSTIN L.S.** (1983) - "A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock" - Journ. Geophys. Res. Vol. 88, pp. 9485-9492
- [17] **CUXAC P.** (1991) - "Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes" - Thèse de Doctorat, I.N.P.L.
- [18] **DARVE F.** (1978) - "Une formulation incrémentale des lois rhéologiques - Application aux sols" - Thèse d'Etat, Grenoble
- [19] **DHIR R.H. et SANGHA M.** (1974) - "Development and propagation of microcracks in plain concrete Materials and Structures". RILEM n° 37, p. 17-23
- [20] **DRAGON A. and MROZ Z.** () - "A continuum model for plastic brittle behaviour of rock and concrete"

- [21] **DUFALLY J.** (1980) - "Modélisation mécanique et identification de l'endommagement plastique des métaux" - Thèse de 3e cycle, Paris VI
- [22] **DUTHOIT B.** (1973) - "Méthode de mesure des vides dans les roches" - Mémoire de D.E.A., Université de Lille
- [23] **FRIEDMAN M., PERKINS R.D., GREEN S.J.** (1970) - "Observation of brittle deformation features at the maximum stress of westerly granite and solenhofen limestone". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 7, 297-306
- [24] **GOODMAN R.E., TAYLOR R.L. and BREKKE T.L.** (1968) - "A model for the mechanics of jointed rock" - SM3, ASCE, pp. 637-659
- [25] **GRIFFITH A.A.** (1924) - "The phenomena of rupture and flow in solids" - *Phil. Trans. Roy. Soc.* A 221 pp 163
- [26] **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.*, 10, 713-726
- [27] **HAYHURST D.R. and LECKIE F.A.** (1973) - "The effect of creep constitutive and damage relationships upon the rupture time of a solids circular torsion bar" - *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 21, pp. 431-446
- [28] **HENRY J.P.** (1977) - "Mécanique des roches" - Polycopié tome 1, Institut Géotechnique Génie Civil, EUDIL
- [29] **HENRY J.P.** (1978) - "Mécanique linéaire de la rupture appliquée à l'étude de la fissuration et de la fracture de roches calcaires". Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques de Lille I
- [30] **L'HERMITTE R.** (1960) - "Volume changes of concrete" 4th Int. Symp. on the chemistry of cement, Washington, pp. 659-702
- [31] **HOMAND F., HOUPERT R. et TROALEN J.P.** (1986) - "Comportement mécanique du grès de Fontainebleau" - GRECO, Rhéologie des Géomatériaux, Rapport scientifique, pp. 43-48
- [32] **HOUPERT R., HOMAND-ETIENNE F.** (1980) - "Comportement mécanique et structure des roches". C.R. 15e Colloque du Groupe Français de Rhéologie, Paris
- [33] **IKOGOU S., HENRY J.P.** (1988) - "Modélisation du grès de Fontainebleau" - GRECO, Rhéologie des Géomatériaux, Rapport scientifique, pp. 48-65
- [34] **IKOGOU S.** (1990) - "Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un grès" - Thèse de Doctorat, Université de Lille I
- [35] **JANSON J. and HULT J.** (1977) - "Fracture mechanics and damage mechanics a combined approach" - *Journal de Mécanique Appliquée*, Vol. 1, n° 1, pp. 69-84
- [36] **KACHANOV L. M.** (1958) - "Time of the rupture process under creep conditions" *Izv. Akad. Nanc. S.S.R. Otd.Teck. Nank.* N°8, pp. 26-31
- [37] **KACHANOV M.** (1981) - "A microcrack model of rock inelasticity. Part 1 : Frictional sliding on microcracks". Department of mechanics and materials science, february, pp. 19-27
- [38] **KEMENY J.M., COOK N.G.W.** (1986) - "Effective moduli, non linear deformation, and strength of a cracked elastic solid". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 23 : 107-113
- [39] **KONDO D., SHAO J.F., IKOGOU S., HENRY J.P.** (1988) - "Un modèle numérique de matériau fissuré" - 23e Colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie

- [40] **KLIMIS N., DURVILLE J.L., EHRlich J.** (1989) - "Influence de la taille des grains et de l'atténuation des ondes ultrasonores en laboratoire" - Revue Française Geotech. n° 47, pp. 29-38
- [41] **KRAJCINOVIC D. and FONSEKA G.U.** (1981) - "The continuous damage theory of brittle materials" - Dember, pp. 809-815
- [42] **KRANZ R.L.** (1983) - "Microcracks in rocks : A review" - Tectonophysics, vol. 100, pp. 449-480
- [43] **KRATOCHVIL J. and O.W., DILLON J.R.** (1969) - "Thermodynamics of Elastic Plastic Materials as a theory with Internale state variables" - Department of engineering Mechanics, University, 20 March 1969
- [44] **LADVEZE P.** (1984) - "Sur une théorie de l'endommagement anisotrope" - Rapport interne L.M.T., n° 34, Mars
- [45] **LEGENDRE D.** (1984) - "Prévision de la ruine des structures en béton par un couplage de la mécanique de l'endommagement et de la mécanique de la rupture" - Thèse de 3e cycle, Paris VI
- [46] **LEMAITRE J., CHABOCHE J.L.** (1978) - "Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement" - J. de Mécanique Appliquée, Vol. 2, n° 3, pp. 316-365
- [47] **LEMAITRE J., MAZARS J.** (1982) - "Application de la théorie de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure" - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 401, Janvier 1982, pp. 113-138
- [48] **LINO M.** (1980) - "Un modèle de matériau microfissuré" - Revue Française de Géotechnique, n° 11
- [49] **LUONG M.P.** (1989) - "Modes fondamentaux de résistance à la rupture du grès de Fontainebleau" - Rock et Great Depth, Maury, Fourmaintraux, Balkema, Rotterdam
- [50] **MARIGO J.J.** (1981) - "Forumulation d'une loi d'endommagement d'un matériau élastique" - C.R. Acad. Sc. Paris, t. 292, 25 mai, pp. 1309 - 1312
- [51] **MARIGO J.J.** (1985) - Modeling of brittle and fatigue damage for elastic material by growth of microvoids" - Engeneering fracture mechanics, vol. 21, n° 4, pp. 861-874
- [52] **MAZARS J.** (1984) - "Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure" - Thèse d'Etat, Paris VI
- [53] **MAZARS J., BAZANT Z.P.** (1989) - "Cracking and damage" - Strain localization and size effect
- [54] **MAZARS J., RAMTANI et BERTHAUD Y.** (1988) - "The unilateral behaviour of damaged concrete" - Int. Conf. on fracture of concrete and rock, Vienne
- [55] **MODEER M.** (1979) - "A fracture mechanics approach to failure analysis of concrete materials" - Report TVBM 1001, Univ. of lund sweden
- [56] **MURAKAMI S. and OHNO N.** (1980) - "A continuum theory of crup and creep damage. Proc. 3 rd IUTAM Symp. on creep in structures". Ed. by A.R.S. Ponter and D.R. Hayhust, p. 422-443, Berlin : Springer-Verlag
- [57] **NOUAILLAS D.** (1980) - "Etude expérimentale de l'endommagement de plasticité ductile anisotrope" - Thèse de 3e cycle - Paris VI
- [58] **RAMTANI S.** (1990) - "Contribution à la modélisation du comportement mutiaxial du béton endommagé avec description du caractère unilatéral" - Thèse de Doctorat de l'Université, Paris VI



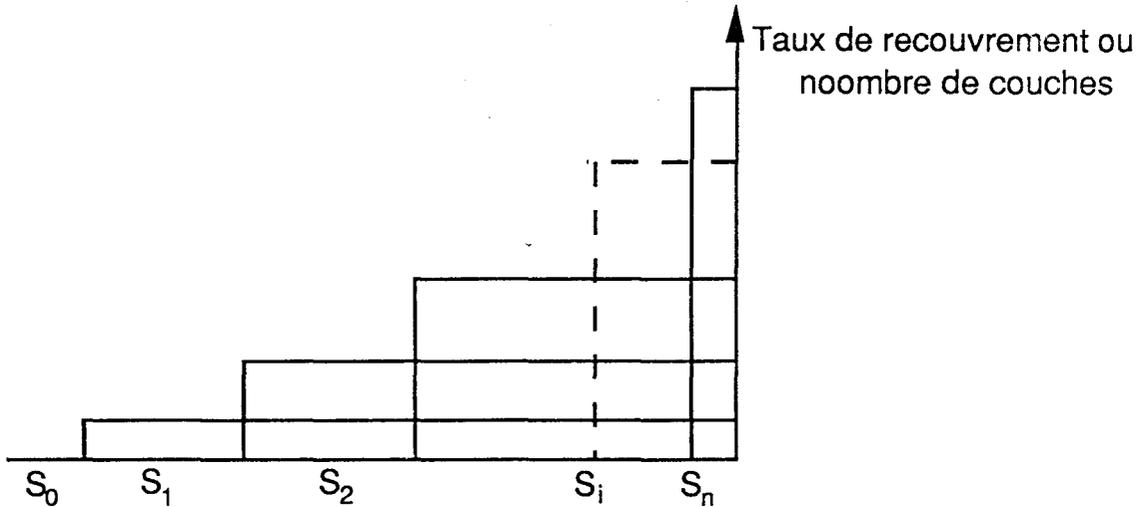
- [59] **RESENDE B. and MARTIN J.B.** (1983) - "A progressive damage continuum model for granular materials" - Non linear structural mechanics research, mai, pp. 1-18
- [60] **SANTARELLI F.** (1987) - "Theoretical and experimental investigation of the stability of axisymmetric wellbore" - Ph.D.Thesis, University of London
- [61] **SAYEHI M., KONDO D., CUXAC P., HENRY J.P.** (1990) - "Etude expérimentale de l'endommagement du grès de Fontainebleau" - 25e Colloque du Groupe Français de Rhéologie, pp. 39-49
- [62] **SHAO J.F.** (1987) - "Etude du comportement d'une craie blanche très poreuse et modélisation" - Thèse de Doctorat, Université de Lille I
- [63] **SIBAI M.** (1990) - "Interaction fluide-structure dans les milieux poreux saturés" - Thèse de Doctorat, Université de Lille I
- [64] **SLATE F.O. et OLESKI S.** (1963) - "X. rays for study of internal structure and microcracking of concrete" - J. of ACI, vol. 60, P. 575-588
- [65] **SPOONER D.C. and DONGILL J.W.** - "A quantitative assesment of damage sustained in concrete during compressive loading" - Cement and concrete association and university of London, King's College
- [66] **SUARIS W.** (1984) - "Rate sensitive damage theory for brittle solids" - A.M.ASCE PP. 985-997, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 110, n° 6, June
- [67] **TALBI S.** (1983) - "Une méthode précise pour la mise en évidence et l'étude de l'anisotropie dans les roches" - Revue de l'I.F.P., Vol. 38, n° 4, juillet et août, pp. 439-453
- [68] **TAPPONIER P., BRACE W.F.** (1976) - "Development of stress induced microcracks in westerly granite". Int. J. Rock mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 13, pp. 103-112
- [69] **TERRIEN M.** (1980) - "Emission acoustique et comportement mécanique post critique" - Bulletin des Ponts et Chaussées n° 105, pp. 65-72
- [70] **TERRIEN M., BERGUES J., SARDA J.P., ALBISSIN M.** (1984) - "Etude expérimentale de l'anisotropie d'un grès et d'un marbre" - Revue I.F.P., vol. 39, n° 6, novembre-décembre, pp. 707-715
- [71] **WASWERSIK W.R., BRACE W.F.** (1971) - "Post failure behaviour of a granite and diabase" - Rock Mech., Vol. 3, pp. 61-85
- [72] **WONG T.F.** (1985) - "Geometrie probability approach to the characterisation and analysis of microcracking in rocks". Mech. of Material, Vol. 4, p. 261-275
- [73] **WONG T.F.** (1982) - "Micromechanics of faulting in westerly granite" - Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr., Vol. 19, pp. 49-64
- [74] **ZIMMERMAN R.W.** (1990) - "Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions" - Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 23 nov.

ANNEXE A

Surface spécifique - Sorptométrie - gaz - solide - Méthode B.E.T. :

Cette méthode mise au point par Brunauer, Emmet et Teller (B.E.T.) consiste à fixer par adsorption physique ou chimique sur une surface des atomes ou molécules de gaz. La fixation de ces molécules se traduit par une réaction exothermique.

Le calcul de la surface spécifique, c'est-à-dire de la surface développée par les microdiscontinuités, rapportées à un gramme d'échantillon, se fait à partir d'un équilibre dynamique exprimant que le taux d'adsorption est égal au taux de désorption de celles-ci [22].



Pour la première couche $i = 1$

$$a_1 P S_0 = b_1 S_1 \exp \frac{E_1}{RT}$$

taux d'adsorption = taux de désorption

- P = pression du gaz
- E_i = énergie d'adsorption sur la couche i
- T = température absolue
- R = constante des gaz parfaits
- a_i, b_i = coefficients intervenant dans le calcul de probabilité de désorption qui sont fonction de la nature du gaz et de la nature du solide.

pour $i = 2$

$$a_1 P S_0 + b_2 S_2 \exp \frac{E_2}{RT} = a_2 P S_1 + b_1 S_1 \exp \frac{E_1}{RT}$$

De ces relations, il résulte d'une façon générale pour la surface S_i recouverte de i couches :

$$S_i = \frac{a_i}{b_i} P S_{i-1} \exp \frac{E_i}{RT}$$

La notion de surface spécifique doit être définie différemment pour un solide poreux et non poreux.

Pour un solide poreux, il s'agit d'une surface extérieure similaire à celle d'un solide non poreux, plus une surface intérieure bien supérieure à la précédente, laquelle est formée par des pores sur la surface totale.

Méthodologie de la détermination de la surface spécifique

Le développement des calculs pour la détermination de la surface spécifique prend en considération un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, pour l'interprétation des mesures qu'on peut citer en quatre points :

- 1°) à partir de la seconde couche de molécules adsorbées, l'énergie de liaison de celles-ci est égale à l'énergie de liquéfaction du gaz et cela pour toutes les couches suivantes.
- 2°) la présence de sites préférentiels d'adsorption est négligée (solide idéal)
- 3°) que le rapport des coefficients $a_i/b_i = \text{cte} = 1$
- 4°) on néglige de prendre en compte l'état électronique des molécules adsorbées.

I) CALCUL DE LA SURFACE SPECIFIQUE

La détermination de la surface spécifique, qui se fait à partir de l'équilibre dynamique adsorption-désorption d'un gaz qui est l'azote dans notre cas, est basée pour le calcul de la surface de la zone adsorbante. Il est nécessaire de déterminer en premier lieu le volume du gaz relatif à une couche mono-moléculaire. Le volume mono-moléculaire (V_m) est calculé en fonction de l'équation B.E.T. écrite après plusieurs transformations sous forme linéaire :

$$\Phi \frac{(n, x)}{V_a} = \frac{1}{V_m C} + \frac{\theta(n, x)}{V_m} \quad (1')$$

- V_m = volume du gaz de la couche mono-moléculaire
 C = constant dépendant de la chaleur d'adsorption et de liquéfaction
 x = pression relative P/P_0
 n = nombre de couches adsorbées
 V_a = volume du gaz adsorbé.

L'équation (1') devient après exploitation de la transformée B.E.T. qui est valable pour l'adsorption d'une monocouche sur les sites de l'adsorbant, celle d'une droite dont la pente et l'ordonnée à l'origine nous permettent de calculer V_m et C .

$$\frac{P_A}{\frac{V_A}{m} (P_o - P_A)} = \frac{1}{V_m C} \left(1 + (C - 1) \frac{P_A}{P_o} \right)$$

Le terme V_m représente donc le volume du gaz adsorbé d'une couche monomoléculaire à partir duquel nous calculons le nombre de molécules. Il est nécessaire de convertir ce terme de volume en unité de surface afin de calculer la surface spécifique de l'adsorbant. Le processus de conversion est fait comme suit :

- la quantité de molécules adsorbées en 1 cm^3 est déterminée en fonction du nombre d'Avogadro :

$$Z = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \text{ molécules}}{22\,414 \text{ cm}^3}$$

- la zone couverte par 1 cm^3 d'adsorbé (S_o) à couche mono-moléculaire est donnée par : $S_o = Z \cdot a$

où a est la section de la zone de la molécule adsorbée, définie par :

$$a = 4 \times 0,866 \left[\frac{M}{4N d \sqrt{2}} \right]^{2/3}$$

M est le poids de la molécule adsorbée
 N est le nombre d'Avogadro
 d est la densité adsorbée à l'état liquide

Si (S_o) représente la zone couverte par 1 cm^3 d'adsorbé, V_m correspondra à une zone donnée par :

$$S = S_o \cdot V_m$$

Si W est le poids de l'échantillon analysé, la surface spécifique se rapportant à 1 g sera donnée par :

$$S_s = \frac{S}{W} = \frac{S_o \cdot V_m}{W} = \frac{Z \cdot a \cdot V_m}{W}$$

D'après ce que nous venons de dire, la détermination du volume mono-moléculaire est extrêmement essentiel pour arriver au calcul final de la surface spécifique.

Pour réaliser le graphique qui représente l'isotherme d'adsorption-désorption en premier lieu, un essai à blanc a été effectué, c'est-à-dire à burette vide. Cet essai sert comme référence. Il permet notamment de déterminer le volume du gaz non adsorbé au cours d'un essai avec échantillon.

La démarche à suivre dans le calcul se présente en un certain nombre d'étapes que nous décrivons ci-dessous.

I.1 Préparation de la burette

- Peser la burette vide W_1
- Mettre l'échantillon dans la burette (quelques grammes)
- Dégazer l'échantillon à une T° 120° pour une durée de 1 h 30 mn
- Peser la burette dégazée $W = W_2 - W_1$
 W_2 : poids de l'échantillon
- Préparer l'azote liquide
- Remplir les 2 Dewars
- Mettre la burette dans le bain de l'azote liquide

I.2 Déroulement de l'essai

- Ajuster l'enregistreur à la pression atmosphérique (0° - 760 mm Hg)
- Régler le nombre de cycles. Il est préférable que le nombre de cycles soit supérieur ou égal à 20 pour avoir un cycle bien déterminé de l'échantillon. Pour un essai à blanc, 12 - 13 introductions suffisent pour avoir la valeur de la pression de saturation (P_o)
- Régler le temps de cycles. Il peut être fixé à une durée maximale de 60 mn. Pour un essai à blanc 20 mn est largement suffisant
- Régler la pression d'exercice (ex 800 mm Hg)
- Mode ADS, DES ou ADS + DES

I.3 Essai à blanc

Cet essai de référence effectué sans échantillon (burette vide introduite dans l'azote liquide) sert pour la détermination de la croissance de la pression en fonction de valeurs V_i successives (volume injecté).

La représentation graphique portant V_i (cm³) en ordonnée et la pression en abscisse donne une droite. A partir de cette courbe de calibration, on doit pouvoir déterminer le volume du gaz non adsorbé en fonction des pressions obtenues au cours de l'essai avec échantillon.

I.4 Essai avec échantillon

L'essai avec échantillon suit la même démarche que celle de l'essai à blanc. Il en diffère cependant par la représentation graphique. On détermine d'abord le volume du gaz non adsorbé pour calculer ensuite le volume du gaz adsorbé en fonction du volume injecté. $V_a = V_i - V_g$

L'isotherme d'adsorption est obtenue par la courbe $V_a = f(P_a/P_o)$

- P_a/P_o : la pression relative
 P_a : la pression d'adsorption qui est lue et dépouillée en fonction de l'enregistrement obtenu
 P_o : la pression de saturation (correspond au début de cycle demandé)

La détermination du volume d'azote introduit (V_i) dans les conditions normales est donnée par :

$$V_i = V_s \frac{P_e}{760} \frac{273}{t + 273}$$

- V_s : volume mécanique de la chambre d'introduction. La valeur prise est de 17,021 cm³ pour un coup complet et 8,460 cm³ pour un coup réduit
 P_e : pression d'exercice
 t : température de conditionnement automatique du circuit (37°C)

$$V_i = V_s \cdot P_e \cdot k \quad \text{avec} \quad k = \frac{273}{760 \cdot 310} = 0,001159$$

Le volume d'azote non adsorbé (V_g) est déterminé à partir de la courbe d'essai à blanc en fonction de la pression d'adsorption (P_a) obtenue au cours de l'essai avec échantillon.

On arrive facilement à déterminer le volume d'azote adsorbé (V_a)

$$V_a = V_i - V_g$$

II. ISOTHERME D'ADSORPTION ET DESORPTION

L'isotherme d'adsorption est la courbe en portant les valeurs du volume d'azote adsorbé (V_a) en ordonnée et les valeurs de la pression relative P_a/P_o

II.1 Procédure de détermination de l'isotherme de désorption

Ce sont les mêmes démarches que l'on a effectuées pour l'isotherme d'adsorption qui seront suivies ; seulement on fait le calcul du volume total d'azote introduit durant un cycle :

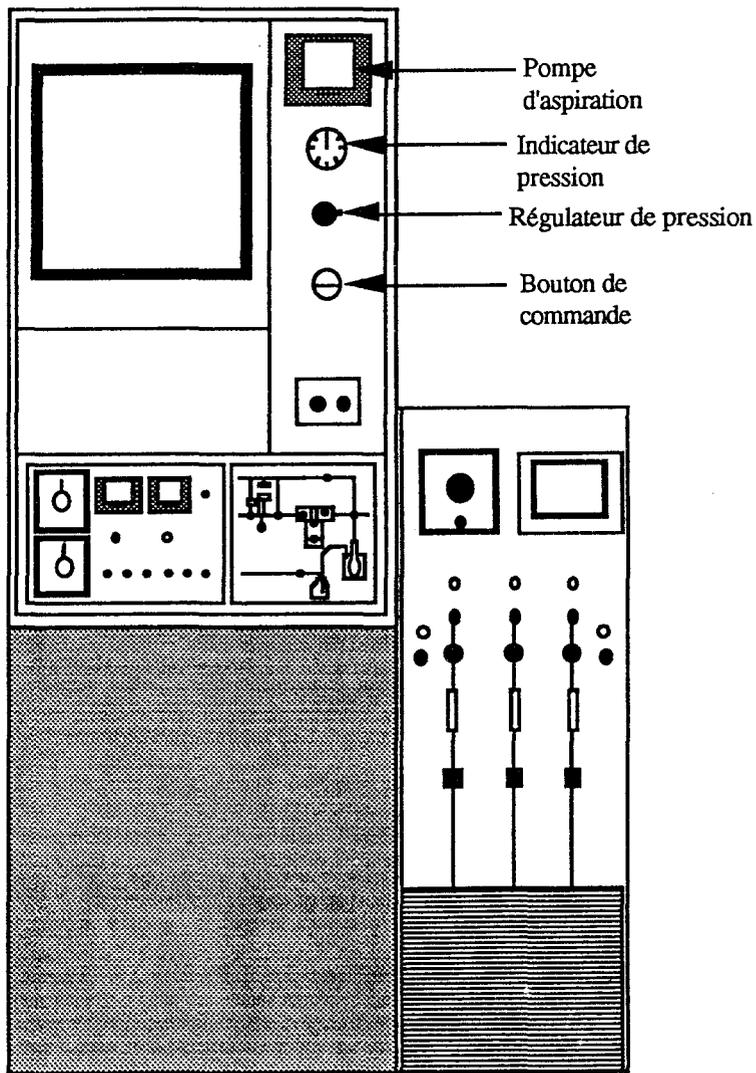
$$V_{\text{total}} = (V_s \cdot P_e \cdot k) \cdot m \quad m : \text{le nombre de cycles}$$

Le volume d'azote non désorbé V_g est déterminé à partir de la courbe d'essai à blanc, en fonction de la pression de désorption (P_d), obtenu au cours de l'essai avec échantillon. P_d est obtenu par dépouillement de l'enregistreur.

Le volume désorbé (V_d) est défini par : $V_d = V_{tot} - V_g - P_d V_z k$

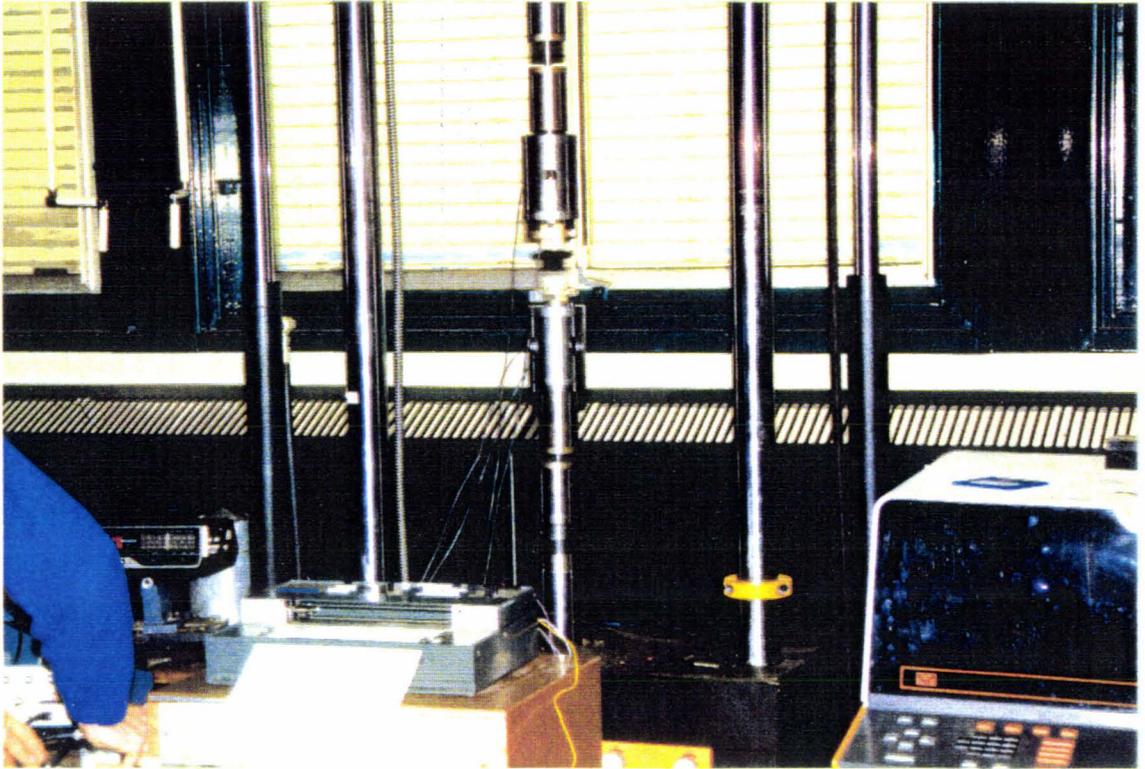
V_z : volume thermomécanique introduit dans le circuit.

L'isotherme de désorption est une courbe obtenue en portant les valeurs du volume d'azote désorbé (V_d) en ordonnée et les valeurs de la pression relative P_d/P_a en abscisse.

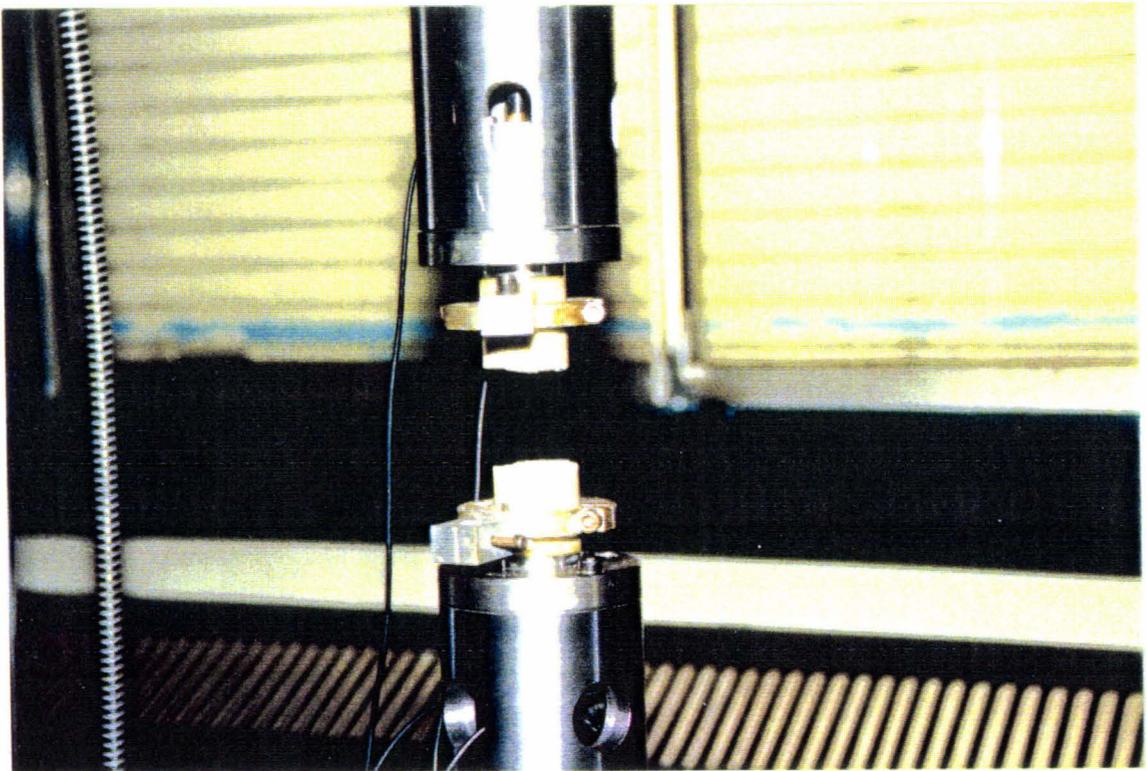


Annexe A1

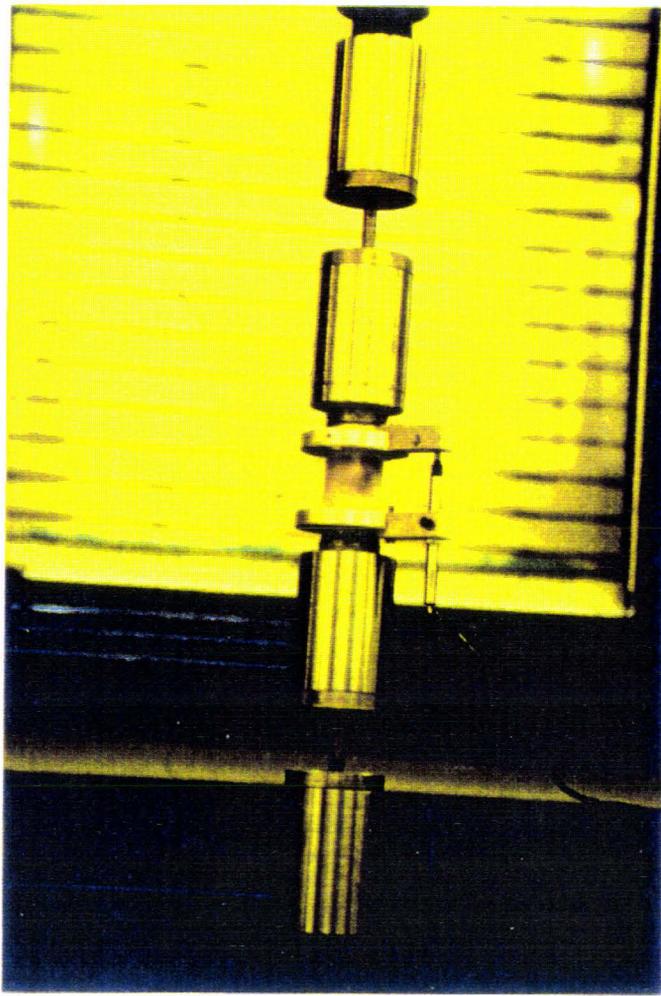
ANNEXE B



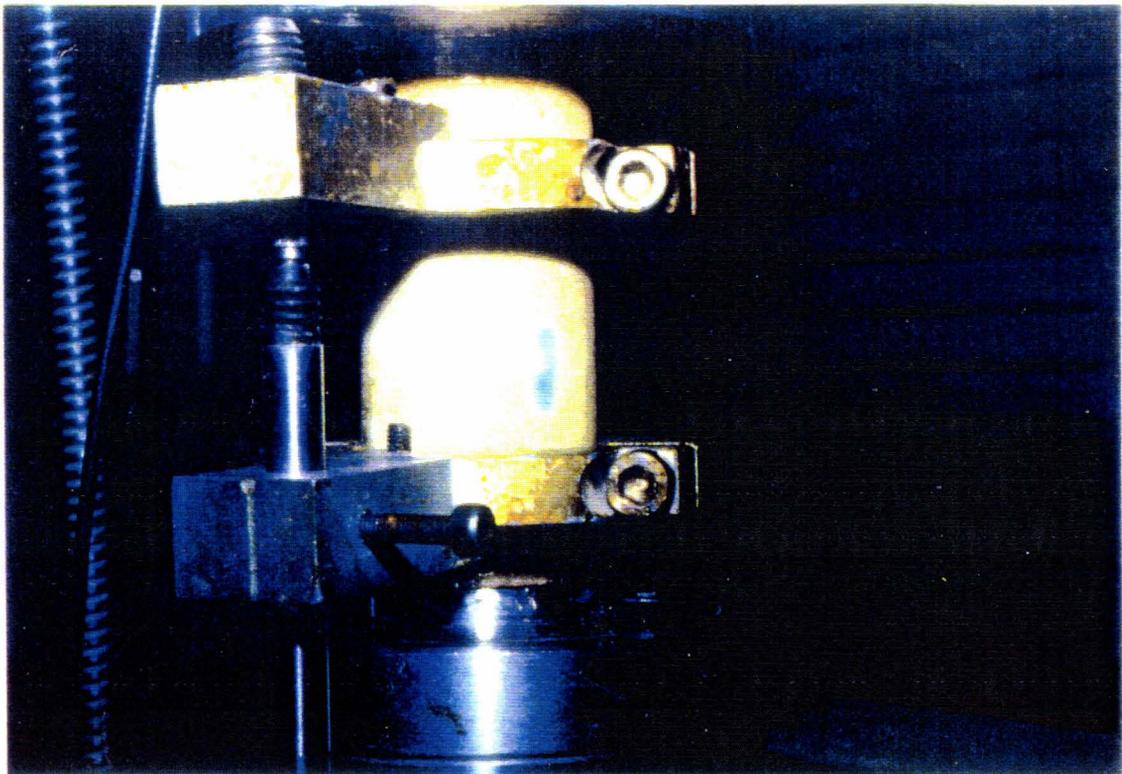
B1: Essai de traction (montage ultrason)



B2: Rupture au milieu de l'échantillon



B3: Essai de traction direct



B4: Développement des microfissures au milieu de l'échantion
au cours de l'essai