

50376
1992
323

62204

50376
N° d'ordre : 908

1992

323

THESE DE DOCTORAT

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Spécialité

GENIE CIVIL

TITRE

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT D'UN
MATERIAU ANISOTROPE (schiste ardoisier) :
CARACTERISATION DE LA RUPTURE ET DETERMINATION DES
PARAMETRES ELASTIQUES



par

HAMMADE Abdel Aziz



soutenu le 24 Juin 1992 devant le jury composé de :

Mme. F. HOMAND

INPL

Rapporteur

MM. J. P. HENRY

EUDIL-USTL

Président

I. SHAHROUR

Ecole centrale de Lille

Rapporteur

G. VOUILLE

Ecole des Mines de Paris

E. MOREL

EUDIL-USTL

P. LEBON

ANDRA



50 342498 1

RESUME

L'étude de la stabilité des ouvrages en Génie Civil nécessite la connaissance du comportement à rupture du matériau. Les recherches en cours visent à étudier le comportement à la rupture des roches anisotropes, où la structure joue un rôle important dans les travaux de Génie Civil. Le présent travail constitue une contribution dans ce sens. Il comporte deux parties.

Dans la première partie, des essais de compression isotrope et triaxiale de révolution dans des orientations différentes et aux différentes pressions de confinement ont été effectués sur un matériau supposé isotrope transverse (schiste ardoisier) avec discontinuité de structure. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les aspects fondamentaux du comportement de ce matériau.

Dans la deuxième partie, deux modèles de rupture ont été retenus pour décrire le comportement à la rupture par glissement, qui se produit dans plusieurs orientations. De façon générale, une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus à l'aide des modèles a été obtenue.

Des essais de sollicitations cycliques (chargement-déchargement), proportionnelles et d'extensions latérales pour deux orientations ont été réalisés lesquels serviront à la validation des paramètres élastiques.

Une simulation de l'essai de compressibilité, cyclique et proportionnel a été faite pour vérifier les approximations proposées pour les paramètres élastiques. Enfin, la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus à l'aide de la simulation a été effectuée.

Mots-clés : Anisotrope, roches, schistosité, rupture, isotrope transverse, cisaillement, élasticité, modèles rhéologique, simulation, schiste ardoisier, orientation.

ABSTRACT

The verification of the stability of underground structure needs a good knowledge of the geomaterials behaviour at failure. Presently, works are underprogress to study the behaviour of anisotropic rocks which are important for some applications in civil engineering. This work is a contribution to those carried on anisotropic rock. It's composed of two parts: an experimental study using the triaxial device and a modelization of the rock behaviour at failure.

In the first part, isotropic tests and axisymmetrical triaxial tests have been carried out on an assumed transverse isotropic material with structural discontinuities (schist). Different orientations and various confining pressures have been used and the results have shown the fundamental aspects of the behaviour of the material.

In the second part, two rupture models have been chosen to describe the sliding failure mechanism occurring in several orientations. As a whole, a good agreement is obtained between experimental and predicted results.

Cyclic (loading-unloading), proportional and lateral extension tests for two different orientations have been carried out, which will be used to validate the elasticity parameters.

The cyclic proportional compression test has been simulated in order to check the assumptions in for the elastic parameters. Finally a comparison between experimental and simulated results has been made.

AVANT-PROPOS

Le travail qui fait l'objet de ce mémoire a été mené au département des Matériaux fragiles du Laboratoire de Mécanique de Lille. A ce titre, qu'il me soit permis d'en remercier le professeur J.P.HENRY pour m'avoir accueilli dans son laboratoire. Il a assuré, avec efficacité et une grande patience, la direction de ce travail jusqu'à son terme, et il a toujours pris le temps de me faire profiter de son expérience et de ses connaissances. Je remercie également E.MOREL, la disponibilité et la bienveillante patience qu'il a manifesté à mon égard tout au long de cette thèse.

Madame. F. HOMAND, professeur à l'Institut National de Polytechnique de Lorraine, a bien voulu accepter, en dépit de ses lourdes responsabilités, d'être rapporteur de ce travail, et me faire profiter de sa grande expérience et ses précieuses remarques. Je lui en suis profondément reconnaissant

J'adresse mes plus vifs remerciement à Monsieur G. VOUILLE, Professeur à l'Ecole des Mines de Paris, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être examinateur de ce travail et m'a fait profiter de sa grande expérience.

Monsieur. I. SHAHROUR, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, qui a accepter d'être rapporteur de cette thèse, je tiens à lui témoigner ma profonde gratitude.

Monsieur. J. P. HENRY, Professeur à l'Ecole Univesitaire d'Ingénieur de Lille, m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Je tiens à lui témoigner de mes remerciement les plus sincères.

Je voudrais églement exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur E. MOREL, Maître de conفرance à l'Ecole Universitaire d'Ingénieur de Lille, dont l'aide et les conseils m'ont toujours été très précieux.

Je remercie également Monsieur P. LEBON, Ingénieur à l'ANDRA, qui a bien voulu participer à ce jury et de me faire profiter de son expérience.

Ces remerciements ne sauraient être complets si je n'y incluais pas tous ceux, collègues et amis, qui m'ont apporté leur soutien au cours de ces années de travail, Je citerai en particulier D. KONDO et M.SIBAI.

Je tiens également à remercier Madame Françoise HENRY pour avoir assuré la frappe de ce mémoire.

Qu'il me soit permis enfin d'adresser une pensée particulière à ma famille, notamment à mes parents, et ma femme pour leur affection et leur patience.

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre I - Etude bibliographique sur les roches anisotropes

1.1	Introduction	p. 2
1.2	Roches anisotropes	p. 2
1.2.1	Comportement mécanique	p. 2
1.2.2	Rupture dans les roches anisotropes	p. 3
1.3	Elasticité en milieux anisotropes	p. 4
1.3.1	Généralités	p. 4
1.3.2	Changement de repère	p. 5
1.3.3	Milieux orthotropes	p. 6
1.3.4	Cas des milieux isotropes transverses	p. 7
1.3.5	Cas des roches isotropes	p.10
1.4	Conclusion	p.11

Chapitre II - Etude expérimentale du comportement d'un schiste sous sollicitations sphériques et déviatoriques

		p.12
2.1	Description du matériau utilisé	p.13
2.2	Carottage et préparation des éprouvettes	p.14
2.3	Instrumentation des éprouvettes. Notation	p.15
2.3.1	Repérage d'essai	p.15
2.3.2	Instrumentation des éprouvettes	p.16
2.4	Dispositif expérimental	p.19
2.5	Conditions d'essai	p.21
2.6	Manipulations	p.22
2.6.1	Essai de compression hydrostatique	p.22
2.6.2	Essai de compression triaxiale monotone	p.23
2.7	Résultats expérimentaux	p.23
2.7.1	Compression hydrostatique	p.23
2.7.2	Compression triaxiale monotone	p.24
2.7.2.1	Aspect des courbes expérimentales	p.24
2.7.2.2	Aspect des ruptures	p.24
2.8	Conclusion	p.28

Chapitre III - Détermination des caractéristiques élastiques du schiste	p.29
3.1 Calcul des modules	p.30
3.1.1 Modules principaux E_1 et E_2	p.30
3.1.2 Influence de la pression hydrostatique	p.33
3.2 Coefficients de Poisson	p.35
3.2.1 Coefficient ν_{12} ($\theta = 90^\circ$)	p.36
3.2.2 Coefficient ν_{23} et ν_{21} ($\theta = 0^\circ$)	p.38
3.2.3 Validité de l'hypothèse élastique	p.39
3.3 Comparaison des résultats	p.41
3.4 Modules du cisaillement G_{12}	p.45
3.5 Coefficient d'anisotropie	p.49
3.6 Détermination des modules par L.V.D.T.	p.51
3.6.1 Modules E_1 et E_2	p.51
3.6.2 Modules E_θ et G_{12}	p.54
3.7 Conclusion	p.57
Chapitre IV - Modélisation du comportement à la rupture	p.58
4.1 Variation de la limite de rupture	p.60
4.2 Condition de rupture (glissement)	p.64
4.3 Modèle de glissement	p.66
4.4 Modèle de Barton	p.72
4.4.1 Présentation du modèle	p.72
4.4.2 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par les deux modèles (glissement et modèle de Barton)	p.79
4.5 Rupture en matrice	p.81
4.6 Conclusion	p.83
Chapitre V - Essais complémentaires	p.85
5.1 Essai de compressibilité	p.86
5.1.1 Description de l'essai	p.86

5.1.2	Résultats expérimentaux	p.86
5.1.3	Interprétation des résultats	p.88
5.2	Essais cycliques	p.89
5.2.1	Réalisation des essais	p.89
5.2.2	Résultats expérimentaux	p.89
5.2.3	Modules d'Young	p.91
5.2.4	Simulation des essais cycliques	p.93
5.3	Essais de chargements homogènes	p.94
5.3.1	Essais proportionnels	p.94
5.3.1.1	Description de l'essai	p.94
5.3.1.2	Résultats expérimentaux	p.95
5.3.1.3	Interprétation des résultats	p.95
5.3.2	Essais d'extension latérale	p.97
5.3.2.1	Principe de l'essai	p.97
5.3.2.2	Résultats expérimentaux	p.97
5.4	Conclusion	p.99
	Conclusion	p.100
	Bibliographie	p.103
	Annexes	p.108

INTRODUCTION

L'étude de l'anisotropie mécanique des roches se présente comme un vaste sujet, compte tenu de la grande variété des milieux rocheux : variété dans leur mode de formation (par exemple : consolidation des roches sédimentaires) et dans leur histoire de déformation (clivage de roches schisteuses). Les roches présentent assez souvent une anisotropie de structure. Cette structure orientée entraîne des variations directionnelles des propriétés mécaniques qui jouent un rôle important dans les travaux de Génie Civil tels que les excavations souterraines (tunnels, galeries) creusées dans les massifs rocheux et les grands ouvrages (barrages, ponts, etc. ...).

L'étude de la stabilité de ces types d'ouvrages nécessite la connaissance du comportement à la rupture du matériau. D'une manière générale, le comportement des roches dépend de la structure et de la sollicitation appliquée à la roche.

L'objectif de notre travail est d'étudier le comportement mécanique d'un matériau supposé isotrope transverse (schiste) sous des sollicitations isotropes, quasi-monotones, cycliques, proportionnelles et d'extension latérale dans différentes orientations de plans de schistosité, et aux différentes pressions de confinement, ainsi que sa modélisation.

Le schiste ardoisier utilisé pour cette étude est un matériau anisotrope (isotrope transverse). Il est daté de l'Ordovicien. Sa structure est caractérisée par son anisotropie structurale due à la schistosité.

Le travail présenté comporte deux parties principales :

- L'étude expérimentale du schiste sous différents chemins de sollicitation,
- La simulation du comportement à la rupture du schiste.

Les différentes parties de ce travail sont présentées en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous ferons une analyse bibliographique sur les phénomènes physiques qui sont à l'origine de l'anisotropie de structure dans les roches, ainsi sur les différents types d'anisotropie.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale du comportement du schiste. Nous y présenterons d'abord les essais de compression isotrope et triaxiale effectués sur le schiste, ainsi que les résultats obtenus. Ensuite, nous tirerons les conclusions essentielles sur le comportement du schiste.

Nous présenterons, au troisième chapitre, l'évolution des caractéristiques élastiques en fonction de l'orientation de la schistosité et de la pression de confinement. Nous comparerons nos résultats avec d'autres résultats obtenus sur un autre schiste prélevé à une distance de 2 km. Ensuite, nous présenterons les valeurs du module de cisaillement G_{12} en fonction de l'orientation θ et de la pression de confinement. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus à partir des courbes de L.V.D.T. corrigées.

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation du comportement du schiste à l'aide de deux modèles, à savoir le modèle de glissement et le modèle de Barton. Ces deux modèles seront utilisés pour décrire le comportement à la rupture du schiste. Ensuite, nous tirerons les conclusions essentielles sur la qualité de la simulation.

Dans le cinquième chapitre, nous présenterons des essais complémentaires (essais cycliques, proportionnels et extension latérale) effectués sur le schiste, ainsi que les résultats obtenus qui serviront de validation du modèle choisi.

CHAPITRE I

Etude bibliographique sur les roches anisotropes

1.1 INTRODUCTION

Les roches parfaitement isotropes sont extrêmement exceptionnelles dans la nature car ce type de roches suppose que leurs minéraux constitutifs aient cristallisé sans déformation, sous l'influence d'un champ de contraintes, et qu'elles présentent une fissuration isotrope dans leur structure.

D'une manière générale, une roche isotrope est caractérisée par l'absence de direction ou de localisation préférentielle quelque soit le type d'élément constitutif considéré. Si certaines roches sédimentaires (craie, grès, sel gemme) ou granite possèdent des caractéristiques physiques et mécaniques très proches de l'isotropie, la plupart des roches, par leur mode de formation (sédimentaires) et par leur histoire de déformation (clivage des roches schisteuses, foliation des roches métamorphiques), présentent une anisotropie de structure. Cette anisotropie peut jouer un rôle important dans les travaux de Génie Civil tels que les excavations souterraines (tunnels, galeries) creusées dans les massifs rocheux ou les grands ouvrages (barrages, ponts).

Pour mieux comprendre le phénomène de l'anisotropie et l'anisotropie de structure, nous présentons dans ce chapitre une courte étude bibliographique pour mettre en évidence les types de celle-ci et son influence sur le comportement mécanique des roches.

1.2 ROCHES ANISOTROPES

1.2.1 Comportement mécanique

Les caractéristiques d'anisotropie présentées par de nombreuses roches (marbre, argilite, grès, schiste) peuvent être dues à leur mode de formation (sédimentation) ou à leur histoire de déformation tectonique (clivage, foliation).

L'anisotropie présentée par les roches se traduit par l'existence d'une orientation ou d'une localisation préférentielle des éléments constitutifs, parallèle à une direction ou un plan qui peut être une discontinuité dans la roche. D'autres matériaux rocheux sont constitués d'une alternance de constituants différents, empilés les uns sur les autres suivant des plans.

Ces structures planes confèrent aux matériaux rocheux des caractéristiques anisotropes ou orthotropes. Selon les symétries des champs de contraintes auxquelles la roche a été soumise au cours de sa formation, différents types d'anisotropie de structure ont été distingués [74]. Les types les plus rencontrés dans la plupart des roches sont :

- ***L'orthotropie :***

Si la structure d'une roche possède trois plans de symétries orthogonaux, on dit que la roche a une structure orthotrope. C'est le cas d'une structure planaire avec une linéation dans un plan (par exemple des sédiments lités avec linéation ou des agrégats cristallins avec strates et linéation) [50].

- ***L'orthotropie de révolution :***

C'est un cas particulier de l'orthotropie dont la structure de la roche est isotrope dans un des plans de symétrie. C'est le cas de la plupart des roches schisteuses ou sédimentaires (schiste, argilite).

Les caractéristiques structurales des matériaux rocheux s'éloignent presque toujours des conditions idéales de continuité, homogénéité et isotropie. L'étude de leur comportement mécanique nécessite donc de connaître l'influence de l'anisotropie. Sur des essais de compression effectués sur des prismes de granite, Peres Rodriguez [66] a montré une anisotropie due à la structure de la roche et une anisotropie dans les résistances ultimes à la compression ; ces deux types d'anisotropie n'ayant pas les mêmes directions. On peut distinguer dans ce type de matériau une anisotropie structurelle et une anisotropie de la matrice rocheuse.

L'étude du comportement des roches anisotropes, avec des discontinuités bien marquées, est essentielle pour la stabilité des pentes et des ouvrages souterrains. Barton [9] a étudié la résistance au cisaillement des joints (discontinuités) existant dans certaines roches. En utilisant un modèle de comportement de type Coulomb, il détermine les conditions de stabilité vis-à-vis du glissement de telles roches.

La détermination des résistances à la traction pour les matériaux isotropes et anisotropes peut être effectuée à l'aide d'essais de traction directe ou essais de traction indirecte (Brésilien). Sa mise en oeuvre est simple puisqu'elle consiste à écraser une éprouvette en forme de cylindre entre les deux plateaux d'une presse. Cet essai permet de visualiser les différentes familles et l'orientation des plans d'anisotropie, car la rupture des disques se produit généralement sur ces plans [8]. Une autre technique expérimentale consiste à effectuer des essais similaires sur des anneaux [6]. Les auteurs proposent un calcul de contrainte par la méthode des éléments finis en établissant une corrélation avec les calculs classiques effectués en milieu isotrope. Les résultats obtenus d'essais réalisés sur des schistes et des granites sont très dispersés ; la rupture se produit indépendamment de l'axe de charge.

Par ailleurs, des déformations plastiques ont été remarquées dans certaines roches anisotropes, déformations plastiques dues essentiellement à la fermeture des microfissures ou à des glissements sur les plans de stratification. Ce mécanisme est notamment observé sur la diatomite [3], des calcaires grossiers [26] et argilite [57]. On verra que dans le cas du matériau étudié dans ce mémoire, les déformations plastiques sont pratiquement inexistantes.

1.2.2 Rupture dans les roches anisotropes

La structure de la roche joue un rôle prépondérant dans le mécanisme de rupture d'une roche anisotrope [73]. D'une manière générale, le mode de rupture des roches orthotropes ou/et isotropes transverses (roches schisteuses, sédimentaires) dépend de l'orientation des plans privilégiés par rapport à la direction de la contrainte principale majeure et de la pression de confinement.

Un grand nombre de résultats expérimentaux a été publié ces dernières années sur des roches sédimentaires ou schisteuses, en étudiant la variation de la résistance à la rupture en compression simple ou la variation de la résistance limite en fonction de l'orientation des plans par rapport à l'axe de charge, et, en fonction de la pression de confinement. Les courbes représentant la variation de cette dernière ont généralement une concavité tournée vers le haut. Cette allure a également été observée sur des phyllites [22], des schistes [53], [55], des calcaires [52], des schistes ardoisiers [20], [5], [69]. La valeur minima de la résistance est fréquemment située pour des valeurs θ (figure 1.1) voisines de 30° . De la littérature on peut dégager différents modes de rupture pour les roches anisotropes ([73], [74], [23]), en fonction de l'inclinaison du plan :

- rupture par extension, semblable à celles des matériaux isotropes pour $\theta = 0^\circ$. Elle se produit le long de plans. En revanche, pour $\theta = 90^\circ$, elle se produit à travers les plans de schistosité,
- rupture par glissement le long des plans de schistosité. Ce type de rupture se produit pour $30^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ et pour de faibles pressions de confinement,
- rupture de type plastique, caractérisée par une déformation globale irréversible,
- rupture avec formation de "Kink band". Le mécanisme de cette rupture est complexe. Elle apparaît aux fortes pressions de confinement et en particulier pour $\theta = 30^\circ$.

Jaeger (1960) [42] a proposé une théorie pour décrire le comportement à la rupture d'un matériau anisotrope, en considérant l'angle de frottement interne, ϕ , constant et la cohésion variant en fonction de l'orientation des plans de faiblesse.

En 1964, Walsh et Brace [76] ont proposé une modification de cette théorie en considérant que l'angle de frottement interne, ϕ , varie lui aussi en fonction de l'orientation.

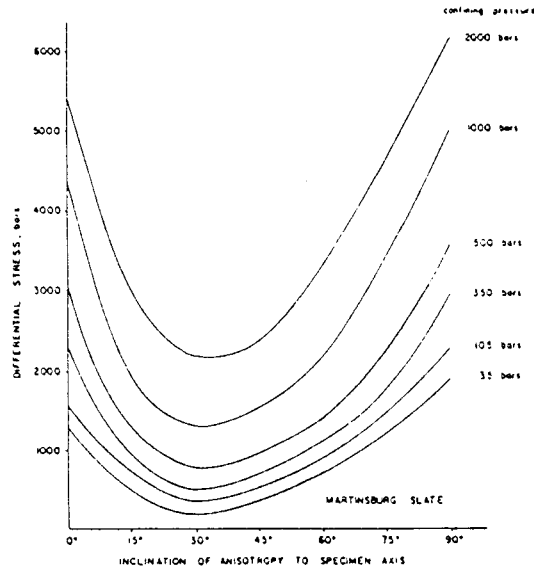


Figure 1.1 : Limite de la rupture d'une ardoise en fonction de l'orientation de plans et de la pression de confinement (d'après DONATH - 1961)

1.3 ELASTICITE EN MILIEUX ANISOTROPES

L'objectif de ce paragraphe est d'introduire les notations classiques de la théorie de l'élasticité que nous utiliserons par la suite pour déterminer les constantes élastiques d'une roche anisotrope. Nous insisterons particulièrement sur le cas de l'orthotropie de révolution (schiste) qui sera le cadre général de notre travail.

1.3.1 Généralités

D'une manière générale, la relation entre le tenseur de déformation et celui des contraintes s'écrit :

$$(1.1) \quad \{\epsilon\} = [A] \{\sigma\}$$

avec $\{\epsilon\}$: vecteur des taux de déformations
 $\{\sigma\}$: vecteur des contraintes

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2 \epsilon_{23} \\ 2 \epsilon_{31} \\ 2 \epsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}$$

[A] est la matrice élastique formée de 36 coefficients. La relation (1.1) constitue la loi de Hooke [47].

Si on admet l'existence d'un potentiel élastique, alors on peut démontrer que la matrice d'élasticité [A] est une matrice symétrique, ce qui ramène à 21 le nombre des constantes élastiques indépendantes nécessaires à caractériser un matériau anisotrope.

La caractéristique essentielle d'un milieu anisotrope est que les propriétés mécaniques varient avec la direction, et que les directions principales de contraintes ne coïncident pas avec les directions principales de déformations.

1.3.2 Changement de repère

Dans le cas d'un changement de repère, la relation de passage s'écrit tensoriellement en contraintes par la relation suivante :

$$(1.2) \quad \sigma' = {}^t [Q] \sigma [Q]$$

[Q] : la matrice de passage de l'ancien repère au nouveau repère. C'est une matrice carrée, orthogonale, de dimension 3 x 3

σ' : est le tenseur des contraintes dans le nouveau repère.

Cette relation peut être écrite sous forme matricielle :

$$(1.3) \quad \{\sigma'\} = [P] \{\sigma\}$$

[P] : une matrice de dimension 6 x 6 .

De même, nous aurons :

$$(1.4) \quad \{\varepsilon'\} = [P] \{\varepsilon\}$$

En calculant l'énergie de déformation élastique par unité de volume W dans l'ancien repère, on peut déterminer les coefficients élastiques du nouveau repère :

$$w = \frac{1}{2} {}^t \{\sigma\} \{\varepsilon\} = \frac{1}{2} {}^t \{\sigma\} [A] \{\sigma\}$$

Dans le nouveau repère :

$$w = \frac{1}{2} {}^t \{\sigma'\} [A'] \{\sigma'\}$$

En utilisant les relations (1.3) et (1.4), il vient :

$$\{\sigma\} = [P^{-1}] \{\sigma'\}$$

$$\{\varepsilon\} = [P^{-1}] \{\varepsilon'\}$$

et

$$w = \frac{1}{2} {}^t \{\sigma'\} [P^{-1}] [A] [P^{-1}] \{\sigma'\}$$

L'énergie élastique étant une grandeur invariante, la matrice d'élasticité $[A']$ dans le nouveau repère aura pour expression :

$$(1.5) \quad [A'] = {}^t[P^{-1}] [A] [P^{-1}]$$

1.3.3 Milieux orthotropes

Certains milieux naturels présentent une structure orientée planaire : orientation des grains dans un plan pour les matériaux schisteux, modules différents dus à la compaction pour les roches sédimentaires ...

Pour une structure à grains parfaitement orientés dans un plan, nous adaptons le repérage suivant :

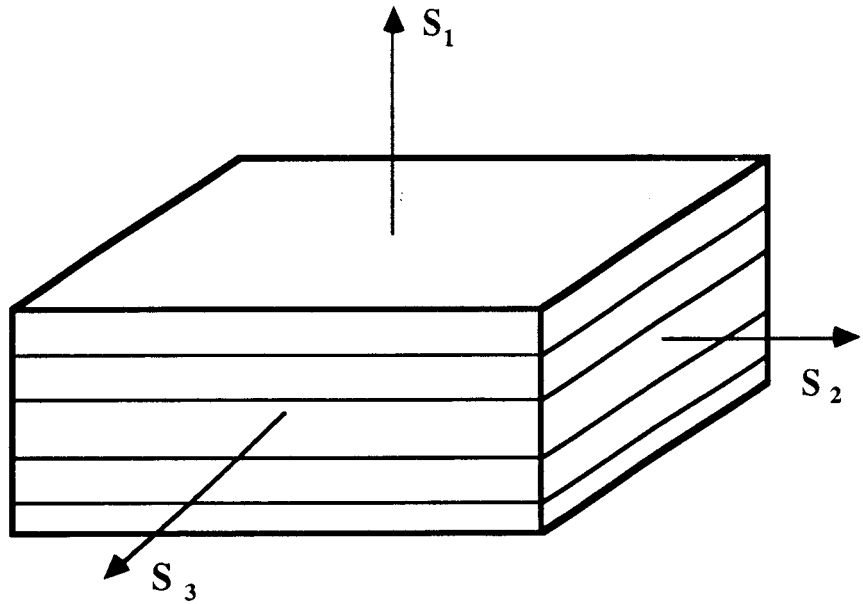


Figure 1.2 : Axes structuraux de la roche

$\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$: le repère de structure (Figure 1.2).

Notons \vec{S}_2 la direction d'allongement des grains dans le plan 2-3. \vec{S}_1 est la direction perpendiculaire au plan d'allongement des grains (plan 2-3). Notons aussi $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3$ le repère principal des contraintes.

Si le matériau possède trois plans de symétrie, la matrice d'élasticité $[A]$ dans le repère (orthogonal) $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$ s'écrit sous la forme suivante (tableau 1.1) :

		CAUSE							
		Contrainte normale direction			Cisaillement dans plan				
		\vec{S}_1	\vec{S}_2	\vec{S}_3	(\vec{S}_2, \vec{S}_3)	(\vec{S}_3, \vec{S}_1)	(\vec{S}_1, \vec{S}_2)		
		σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{23}	σ_{31}	σ_{12}		
EFFET	Allongement direction	\vec{S}_1	ϵ_{11}	$+1/E_1$	$-v_{21}/E_2$	$-v_{31}/E_3$	0	0	0
		\vec{S}_2	ϵ_{22}	$-v_{12}/E_1$	$+1/E_2$	$-v_{32}/E_3$	0	0	0
		\vec{S}_3	ϵ_{33}	$-v_{13}/E_1$	$-v_{23}/E_2$	$+1/E_3$	0	0	0
	Variation angle droit plan	(\vec{S}_3, \vec{S}_2)	$2\epsilon_{23}$	0	0	0	$1/G$	0	0
		(\vec{S}_3, \vec{S}_1)	$2\epsilon_{31}$	0	0	0	0	$1/G$	0
		(\vec{S}_1, \vec{S}_2)	$2\epsilon_{12}$	0	0	0	0	0	$1/G$

Tableau 1.1 : Matrice d'élasticité dans le repère $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$

La notation utilisée dans le tableau 1.1 pour les coefficients de Poisson v_{ij} , i représente l'indice lié à la direction de la cause et j l'indice lié à la direction de l'effet. Puisque la matrice [A] est symétrique, alors nous aurons la relation :

$$(1.6) \quad \frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j}$$

Le nombre des coefficients indépendants dans la matrice d'orthotropie [A] est donc égal à neuf coefficients.

1.3.4 Cas des milieux isotropes transverses

Supposons que le plan \vec{S}_2 et \vec{S}_3 est un plan isotrope, autrement dit, les directions \vec{S}_2 et \vec{S}_3 ne jouent aucun rôle entre la cause et l'effet. \vec{S}_1 est un axe de symétrie de structure et perpendiculai

re au plan d'isotropie (\vec{S}_2, \vec{S}_3) . C'est le cas du schiste ardoisier qui fait l'objet de notre travail. En admettant une isotropie transversale, dans ce cas, nous aurons $E_2 = E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13}$, $\nu_{23} = \nu_{32}$, $G_{12} = G_{13}$ et la matrice d'élasticité $[A]$ s'écrit :

$$(1.7) \quad [A] = \begin{matrix} \vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3 \\ \vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{21}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

avec
$$\frac{1}{G_{23}} = \frac{2(1 + \nu_{23})}{E_2}$$

La description du milieu isotrope transverse est donc faite à l'aide des coefficients $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}$ et G_{12} , soit au total 5 coefficients indépendants car :

$$(1.8) \quad \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

La détermination de ces cinq coefficients sera réalisée à partir d'essais triaxiaux dans différentes orientations par rapport au plan d'isotropie (\vec{S}_2, \vec{S}_3) .

Changement de repère

Pour un milieu isotrope transverse, on peut supposer qu'on a une rotation d'angle $\theta = (\vec{X}_1, \vec{S}_2)$ autour de l'axe de $\vec{X}_3 = \vec{S}_3$ (Figure 1.3).

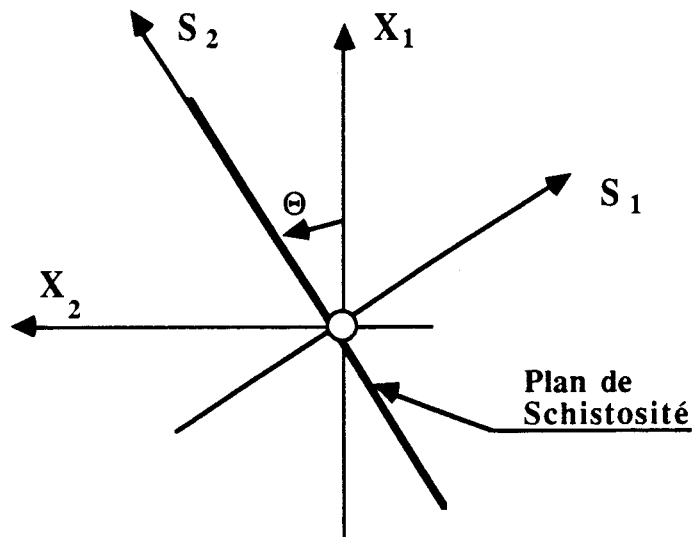


Figure 1.3 : Rotation de repère

La matrice de passage [Q] de la relation (1.2) s'écrit donc :

$$(1.9) \quad [Q] = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En calculant σ' tenseur de contrainte dans le repère $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3$, puis en réécrivant ce tenseur sous forme matricielle $\{\sigma'\}$, on obtient la matrice de passage [P] de la relation (1.3) :

$$(1.10) \quad [P] = \begin{bmatrix} \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & -2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & 0 & 0 & 0 & \sin^2\theta - \cos^2\theta \end{bmatrix}$$

La relation (1.5) nous permet de trouver les coefficients d'élasticité dans le repère $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3$ [47]. Les coefficients élastiques sont :

$$(1.11) \quad \begin{aligned} a'_{11} &= \frac{\sin^4\theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\cos^4\theta}{E_2} \\ a'_{22} &= \frac{\cos^4\theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{E_2} \\ a'_{33} &= \frac{1}{E_2} \\ a'_{12} &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2\theta \cos^2\theta - \frac{\nu_{12}}{E_1} \\ a'_{13} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} \sin^2\theta - \frac{\nu_{23}}{E_2} \cos^2\theta \\ a'_{23} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} \cos^2\theta - \frac{\nu_{23}}{E_2} \sin^2\theta \\ a'_{44} &= \frac{\cos^2\theta}{G_{12}} + \frac{\sin^2\theta}{G_{23}} \\ a'_{55} &= \frac{\sin^2\theta}{G_{12}} + \frac{\cos^2\theta}{G_{23}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a'_{66} &= 4 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{1}{G_{12}} \\
 a'_{16} &= - \left[2 \left(\frac{\sin^2\theta}{E_1} - \frac{\cos^2\theta}{E_2} \right) - \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) (\sin^2\theta - \cos^2\theta) \right] \sin\theta \cos\theta \\
 a'_{26} &= - \left[2 \left(\frac{\cos^2\theta}{E_1} - \frac{\sin^2\theta}{E_2} \right) - \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) (\sin^2\theta - \cos^2\theta) \right] \sin\theta \cos\theta \\
 a'_{36} &= - 2 \left(\frac{\nu_{23}}{E_2} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \sin\theta \cos\theta \\
 a'_{45} &= - \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{1}{G_{23}} \right) \sin\theta \cos\theta \\
 a'_{14} &= a'_{15} = a'_{24} = a'_{25} = a'_{34} = a'_{35} = a'_{46} = a'_{56} = 0
 \end{aligned}$$

1.3.5 Cas des roches isotropes

Dans ce cas, les roches sont caractérisées par l'absence de direction ou de localisation préférentielle quelque soit le type d'élément constitutif. Le nombre des coefficients indépendants de la matrice d'élasticité [A] se réduit à deux (E et ν) :

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

avec $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$

1.4 CONCLUSION

Différents paramètres sont à l'origine de l'anisotropie de la structure dans les roches, et en particulier dans les roches sédimentaires et schisteuses. L'anisotropie mécanique qui en résulte peut se traduire par des phénomènes très divers : anisotropie continue ou discontinue de la résistance limite [73], différents modes de rupture, etc. ...

L'identification des coefficients caractéristiques de l'élasticité repose sur l'évolution de raideur dans des essais statiques ou dans des essais de propagation d'ondes dans différentes orientations de schistosité, afin de pouvoir déterminer ces coefficients. Dans le chapitre suivant, nous étudierons le comportement d'une roche isotrope transverse (schiste ardoisier) sous compression triaxiale.

CHAPITRE II

**Etude expérimentale du comportement d'un schiste
sous sollicitations sphériques et déviatoriques**

Introduction

L'étude du comportement mécanique d'une roche anisotrope (schiste ardoisier), et l'influence de cette anisotropie sur les paramètres élastiques ainsi que sur les caractéristiques à la rupture, nécessite la réalisation d'un grand nombre d'essais. Ces essais peuvent être classés en deux types:

- *Essais de base* :
 - Essais de compression hydrostatique,
 - Essais de compression triaxiale monotone dans différentes orientations,
- *Essais de chargements homogènes* :
 - Essais cycliques (chargement - déchargement).
 - Essais de compression triaxiale avec déchargement latérale (extension latérale),
 - Essais proportionnels.

Les essais de base servent à comprendre les aspects fondamentaux du comportement mécanique de la roche étudiée, ainsi ils permettent de calculer notamment tous les paramètres élastiques et leur évolution en fonction de l'orientation de schistosité et de la pression de confinement.

Les essais triaxiaux classiques ont été réalisés dans plusieurs orientations par rapport au plan de schistosité et aux différentes pressions de confinement. Par contre, les essais cycliques (chargement - déchargement) ont été effectués pour deux orientations (0° et 90°).

2.1 DESCRIPTION DU MATERIAU UTILISE

Le matériau utilisé est un schiste ardoisier provenant de la carrière de Trelazé (Maine et Loire). Il est daté de l'Ordovicien moyen. La structure d'un schiste ardoisier est caractérisée par son anisotropie structurale due essentiellement à la schistosité. Le développement de la schistosité ardoisière constitue un phénomène complexe dans lequel plusieurs mécanismes doivent concourir [46] : un raccourcissement des minéraux perpendiculairement au plan de clivage (axe 1, Figure 2.1) et une recristallisation des minéraux dans le plan 2,3. Notons qu'il peut exister localement des inclusions de pyrite dans la structure du schiste.

La structure de cette roche fait donc apparaître deux types d'anisotropies : une anisotropie de module due à l'orientation préférentielle des minéraux et une anisotropie du comportement, notamment à la rupture, due à la schistosité.

Laqueche [46] a montré par la méthode ultra-sonore que le matériau est isotrope dans le plan 2,3 (Figure 2.2). Son comportement est donc isotrope transverse.

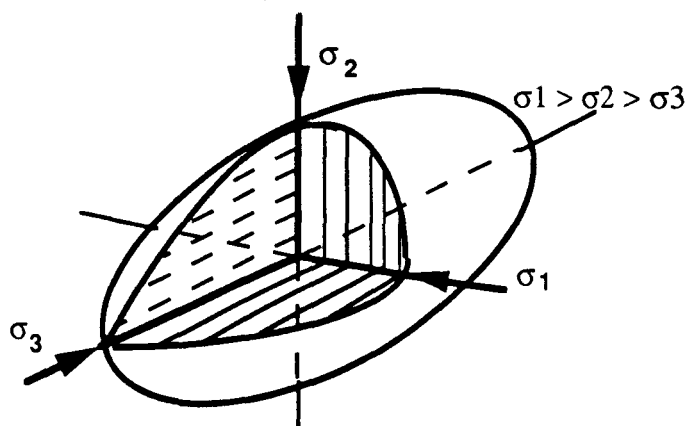


Figure 2.1 : Structure du schiste

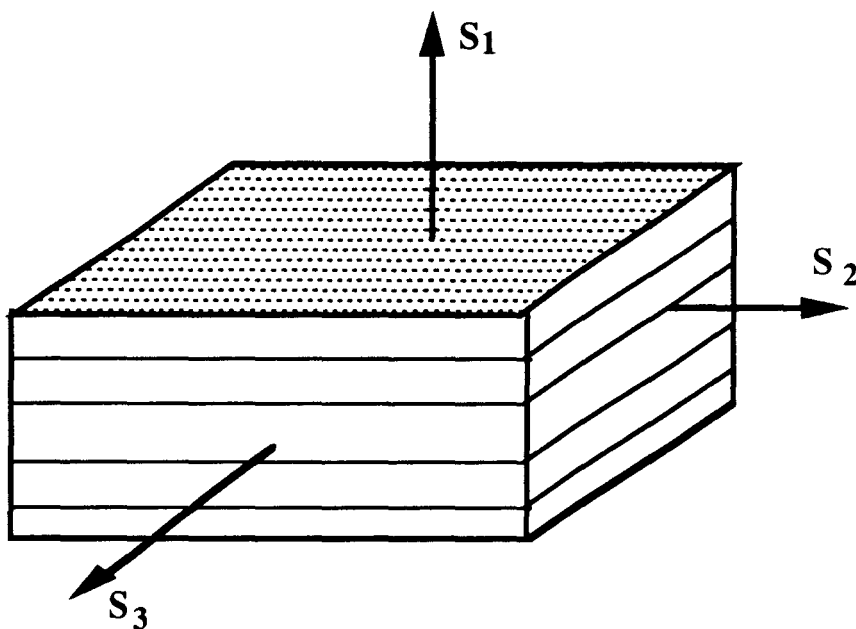


Figure 2.2 : Orientation du schiste

2.2 CAROTTAGE ET PREPARATION DES EPROUVETTES

Lors du prélèvement des blocs de schiste dans la mine, nous avons essayé d'obtenir un matériau se rapprochant le plus possible d'un milieu homogène, continu et orthotrope de révolution. Afin d'éviter une grande dispersion des résultats, tous les blocs utilisés ont été prélevés dans un même endroit de la carrière

Les éprouvettes utilisées pour la réalisation des essais sont découpées à partir de carottes cylindriques prélevées dans des blocs non fissurés. Elles ont été découpées dans différentes directions par rapport à l'axe privilégié du matériau. Le diamètre des éprouvettes utilisées est de 37 mm.

La technique de carottage est schématisée sur la figure (2.3). On place le bloc sur un plateau inclinable suivant un plan d'isotropie du matériau (parallèle au plan de schistosité), puis il suffit d'incliner le plateau jusqu'à l'angle choisi.

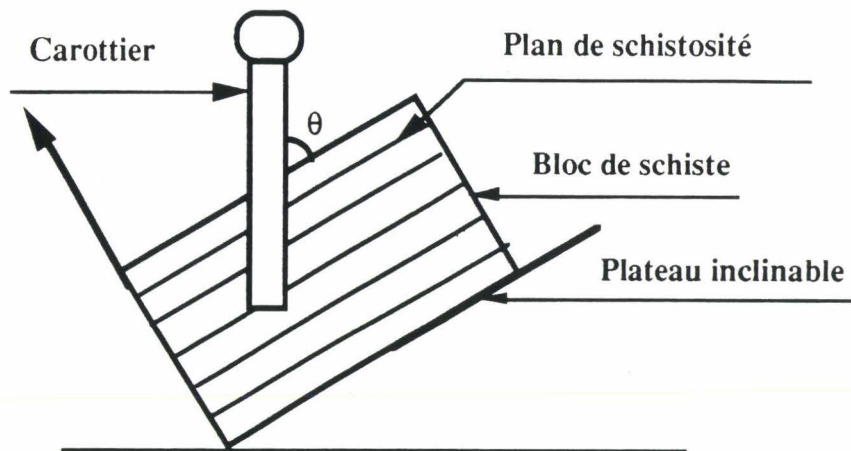


Figure 2.3 : Schéma du carottage

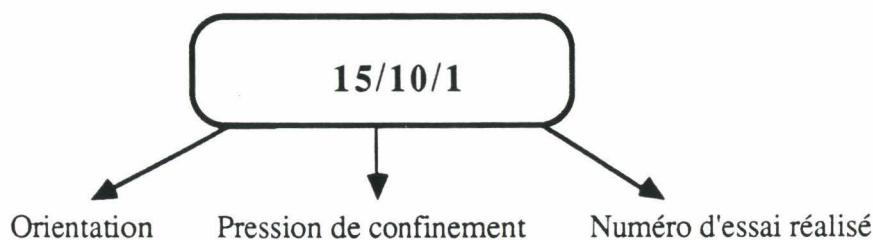
2.3 INSTRUMENTATION DES EPROUVETTES.

2.3.1 Repérage d'essai

Les essais triaxiaux classiques ont été effectués sur des éprouvettes dans des orientations diverses par rapport au plan de schistosité (figure 2.4).

Les orientations testées sont $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 90^\circ$. Chaque orientation a été sollicitée à différentes valeurs de pression de confinement $P_c = 5 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 20 \text{ MPa}, 30 \text{ MPa}$ et 40 MPa . D'autres valeurs de pressions ont été utilisées pour augmenter la précision pour certaines orientations (90°). Si l'on note θ l'angle entre l'axe d'application de contrainte σ_1 et le plan de faiblesse (isotrope).

Afin de classer tous les essais réalisés, chaque test a été identifié de la manière suivante [30].



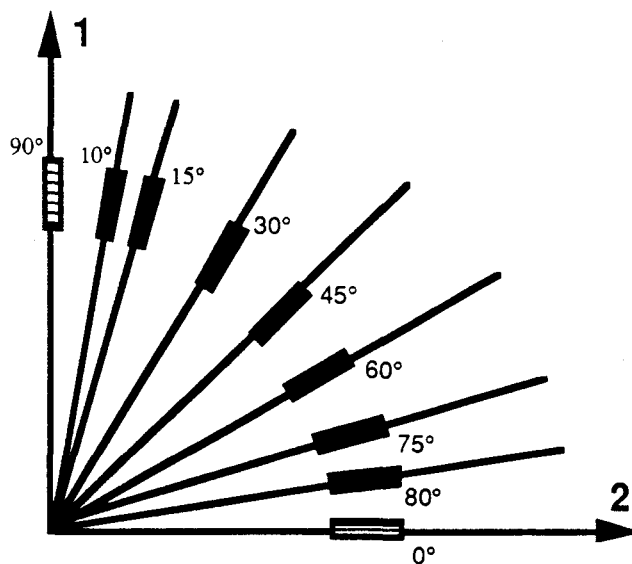


Figure 2.4 : Orientation des éprouvettes testées

2.3.2 Instrumentation des éprouvettes

a) Les éprouvettes à $\theta = 90^\circ$

Toutes les éprouvettes de cette orientation ont été munies de quatre jauges d'extensométrie (longueur 10 mm) pour bien caractériser le champ de déformation. La mesure retrouvée est la moyenne des deux jauges, tant pour les jauges transversales que pour les jauges longitudinales (Figure 2.5).

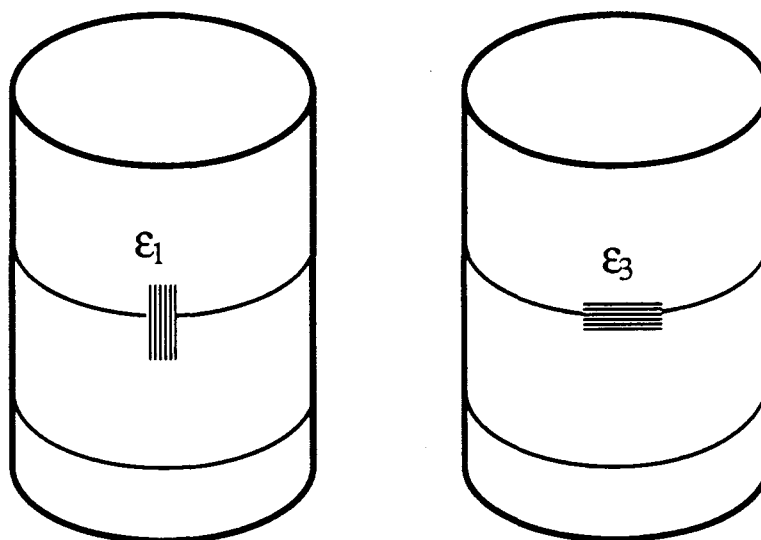


Figure 2.5 : Position des jauges pour éprouvettes à $\theta = 90^\circ$

b) Les éprouvettes à $\theta = 0^\circ$

Toutes les éprouvettes de cette orientation ($\theta = 0^\circ$) ont été instrumentées de six jauges d'extensométrie (10 mm, 5 mm), d'où quatre jauges transversales, deux d'entre elles sont collées parallèlement au plan de schistosité, tandis que les deux autres sont collées perpendiculairement au plan de schistosité (Figure 2.6). De la même manière, la mesure de la déformation sera la moyenne.

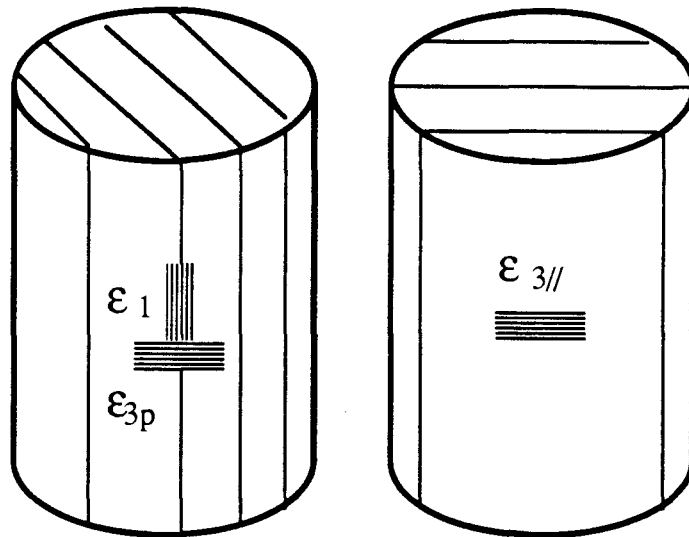


Figure 2.6 : Position des jauges pour éprouvettes à $\theta = 0^\circ$

c) Les éprouvettes à $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$

Les éprouvettes de ces orientations ont été instrumentées de la même manière :

- Une rosette (45, longueur 10 mm) est placée perpendiculairement au plan de schistosité. La déformation mesurée dans la direction \vec{X}_1 sera notée ϵ_1 , tandis que celle mesurée dans la direction \vec{X}_2 sera notée ϵ_{3p} . Enfin, le signal enregistré par la jauge à 45° sera noté ϵ_{45r} . (Figure 2.7.c).
- Une jauge (longueur 10 mm) est placée dans la direction $\vec{X}_3 \equiv \vec{S}_3$ (Figure 2.7.a). La déformation enregistrée sera notée $\epsilon_{3//}$.
- Une jauge (longueur 10 mm) est placée dans la direction \vec{S}_2 (Figure 2.7.b). Autrement dit dans le plan diamétralement opposé à la rosette précédente. Son signal sera noté ϵ_r .

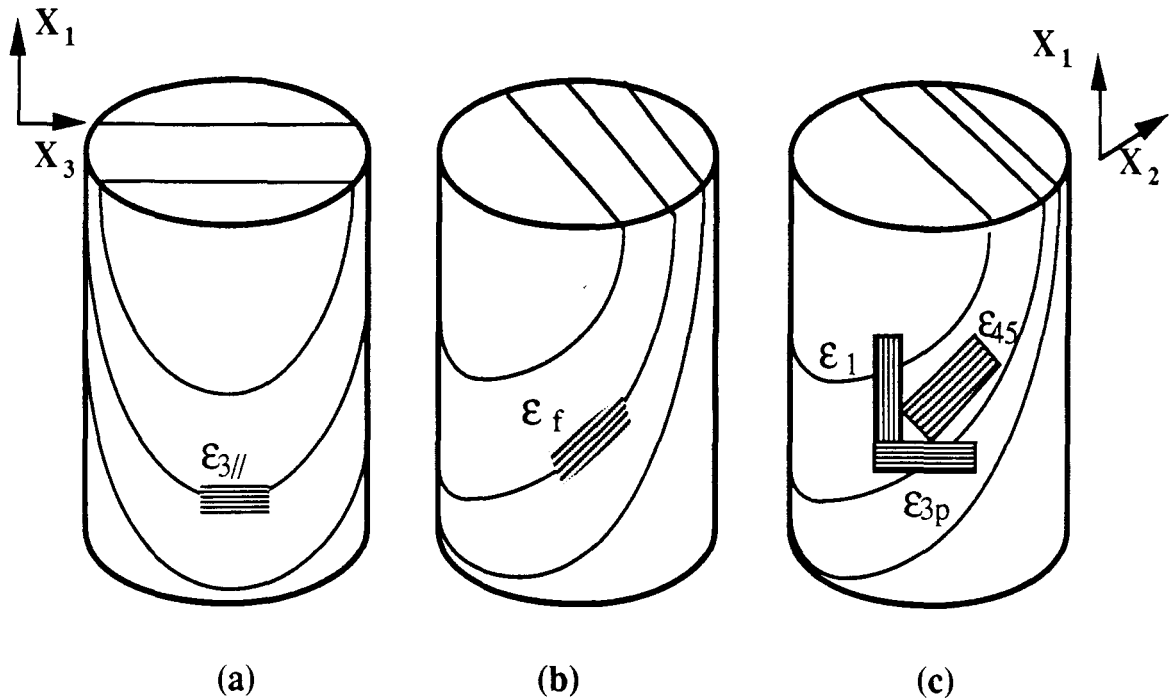


Figure 2.7 : Position des jauges pour éprouvettes à $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$

d) Les éprouvettes à $\theta = 10^\circ$ et 80°

L'instrumentation des éprouvettes à $\theta = 10^\circ$ et 80° est différente de celle décrite précédemment car le déclenchement d'un plan de schistosité à une charge assez faible provoque le décollement de la rosette sans qu'on ait assez d'informations sur l'état de l'éprouvette qui ne permet pas d'interpréter l'essai. La position retenue sous les jauges est décrite sur la figure 2.8.

- Deux jauges transversales sont collées dans la direction $\vec{X}_3 \equiv \vec{S}_3$ (parallèles au plan de schistosité). La mesure sera la moyenne et leur signal sera noté $\epsilon_{3//}$ (Figure 2.8.a).
- Deux jauges longitudinales (longueur 10 mm), dans la direction \vec{X}_1 . Leur signal enregistré sera noté ϵ_1 (Figure 2.8.b).
- Deux jauges transversales aussi dans la direction \vec{X}_2 (perpendiculairement au plan de schistosité), et qui mesurent la déformation ϵ_{3p} (Figure 2.8.c).

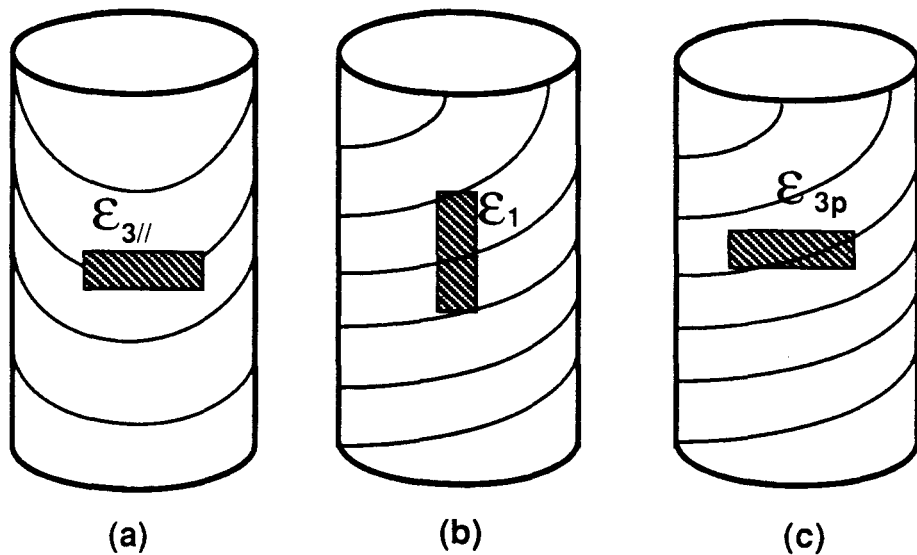


Figure 2.8 : Position des jauges pour éprouvettes à $\theta = 10^\circ$ et 80°

2.4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Pour réaliser un essai, on met l'échantillon dans une cellule remplie d'huile qui permet d'appliquer une pression de confinement ($P_c = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1$). L'ensemble est mis sous une presse hydraulique. L'effort axial (σ_1) est appliqué par l'intermédiaire d'un piston traversant le chapeau supérieur de la cellule. Les signaux des jauges sont enregistrés sur une chaîne d'acquisition automatique. La figure 2.9 montre le schéma de principe de l'essai.

- *La presse*

La presse hydraulique asservie et utilisée pour la réalisation des essais triaxiaux est une presse INSTRON, Modèle 8033, de capacité maximale 50 tonnes. Elle a une grande sensibilité en asservissement force contrôlée et déplacement contrôlé. Elle peut également simuler un grand nombre de chemins de sollicitations tels que les sollicitations cycliques.

- *La cellule d'essai*

La cellule utilisée a une capacité de 100 MPa. Elle est à axes décentrés, ce qui lui permet de recevoir un collier de mesure pour mesurer les déformations transversales globales. Elle se compose principalement :

- d'un plateau inférieur muni d'une embase décentrée sur laquelle se place l'échantillon,
- d'un corps de cellule cylindrique,
- d'un plateau supérieur muni d'un piston permettant d'appliquer la charge axiale à l'échantillon,

- de six tirants solidarissant les deux plateaux (inférieur et supérieur). Les différents passages (fluide, liaison électrique) s'effectuent au niveau du plateau inférieur.

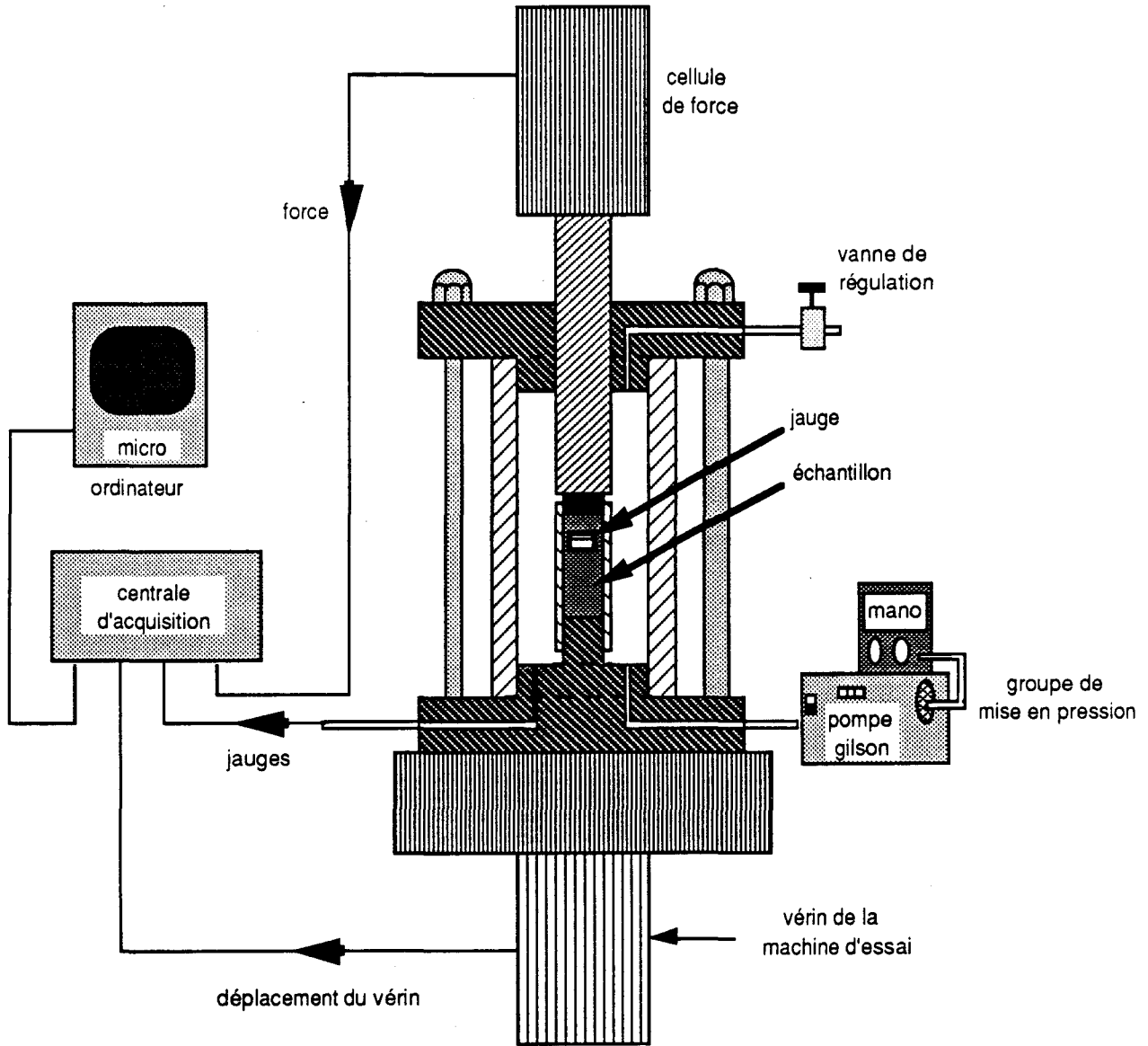


Figure 2.9 : Schéma de principe du dispositif expérimental

- **La pompe**

La montée en pression de confinement s'effectue à l'aide d'une pompe Gilson dont la capacité maximale est de 60 MPa. Elle assure la régulation de la pression avec une précision de 0,1 MPa. Le confinement est contrôlé par un capteur. La pompe ne peut pas réguler elle-même d'éventuels dépassements de la pression de confinement imposée, une microvanne de régulation permet d'ajuster le confinement en cours d'essai.

- *Acquisition des données*

Les mesures des jauges sont effectuées sur une centrale d'acquisition de données Vishay-Micromesures. Celle-ci possède 20 voies d'extensométrie. Elle est pilotée par un micro-ordinateur I.B.M. PS 30. Les mesures sont converties automatiquement en micro-déformations et stockées sur une disquette. La chaîne d'acquisition possède, en outre, deux entrées analogiques pour enregistrer l'effort axial (force appliquée), lu sur le capteur de force de la presse hydraulique et le déplacement du vérin.

- *Gainage de l'échantillon*

Afin d'éviter que l'huile ne rentre dans l'échantillon, celui-ci est protégé par une jaquette en silastène. Ce matériau, très souple, supporte de grandes déformations. Les fils de jonction des jauges traversent la jaquette. L'étanchéité est assurée localement par un mastic à base de silicone (photo 2.1).



Photo 2.1 : Gaine silicone et passage des fils de jauges d'extensométrie

2.5 CONDITIONS D'ESSAI

D'une manière générale, les résultats expérimentaux sur les roches dépendent fortement des conditions d'essai : vitesse de chargement, élancement des éprouvettes, teneur en eau, température et conditions aux limites.

- *Vitesse de chargement*

De façon générale, une augmentation de vitesse de chargement provoque un accroissement des modules élastiques, et une augmentation de la résistance apparente en compression des roches [32], [70]. Afin de respecter les conditions de sollicitation quasi-statique, nous avons utilisé une vitesse de chargement de l'ordre de 1.5×10^{-4} mm/s en déplacement contrôlé et de 2.5×10^{-2} KN/S en force contrôlée.

- *Elancement des éprouvettes*

La résistance en compression et le module d'élasticité des roches diminuent quand l'élancement de l'éprouvette augmente. Une valeur supérieure à 3 peut provoquer la rupture par flambage des éprouvettes ; en revanche, un élancement inférieur à 1,5 augmente l'influence du frettage sur les caractéristiques mécaniques et gêne le développement des plans de rupture [40]. Afin d'éviter les deux phénomènes, nous avons choisi pour toutes les éprouvettes un élancement égal à deux.

- *Influence de la teneur en eau*

Une augmentation de la teneur en eau provoque la chute de la résistance à la rupture et du module élastique [1]. Homand et Cuxac [37] ont étudié la variation de la vitesse des ondes ultra-sonores sur des échantillons de schiste ardoisier bien saturés. Les mesures effectuées montrent une légère augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultra-sonores avec le degré de saturation. Cette propriété a été également relevée par Ramana et Venkatanarayana [65]. Tous nos essais ont été réalisés sur des échantillons quasi-saturés.

- *Influence de la température*

L'influence de la température sur la structure et la composition minéralogique des roches se manifeste à travers le développement de la microfissuration amorcé par l'anisotropie de la dilatation thermique, minéralogique et structurale, ou par l'existence de défauts en forme de pores dans les cristaux. Cette influence sur les caractéristiques mécaniques des roches dépend de leur sensibilité au traitement thermique jusqu'à une certaine température [38], [39].

Homand et Cuxac [37] ont étudié le comportement de ce schiste à une température de 250°C sur des éprouvettes de trois directions différentes par rapport au plan de schistosité. Ils ont constaté que les paramètres mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson, résistance ultime et la limite élastique) diminuent pour les éprouvettes dont l'axe est parallèle à la schistosité. Par contre, ces paramètres sont moins sensibles dans le cas des éprouvettes dont l'axe est perpendiculaire à la schistosité. En ce qui nous concerne, les essais ont été effectués à la température ambiante.

2.6 MANIPULATIONS

2.6.1 Essai de compression hydrostatique

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un champ de contraintes isotrope ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$). 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. La pression de confinement est appliquée par une pompe "Gilson". Cet essai va nous permettre de bien quantifier le degré d'anisotropie du schiste.

2.6.2 Essai de compression triaxiale monotone

Le principe de cet essai consiste à soumettre l'échantillon à un champ de contraintes hydrostatiques jusqu'à une valeur donnée. On maintient la pression de confinement constante, et on augmente la contrainte axiale (σ_1) jusqu'à la rupture de l'échantillon. Les essais ont été effectués à différentes pressions de confinement : 5 MPa, 10, 20, 30, 40 MPa. Cependant, d'autres valeurs intermédiaires ont été utilisées, afin de préciser quelques points particuliers comme c'est le cas pour $\theta = 90^\circ$.

2.7 RESULTATS EXPERIMENTAUX

2.7.1 Compression hydrostatique

a) *Eprouvettes à $\theta = 0^\circ$*

Les courbes contraintes-déformations transversales perpendiculaires au plan de schistosité montrent une phase importante de serrage des plans de schistosité ou/et de fermeture des microfissures situées dans le plan, et que le schiste a un comportement anisotrope transverse. En effet, les courbes contraintes-déformations longitudinales et transversales parallèles au plan de schistosité sont pratiquement linéaires et confondues. La déformation volumique des pores est de l'ordre de 3×10^{-4} , et la pression de fermeture des microfissures est de l'ordre de 7,5 MPa (Figure Annexe A).

b) *Eprouvettes à $\theta = 90^\circ$*

Les courbes contraintes-déformations longitudinales montrent une phase importante de serrage des plans de schistosité ou/et de fermeture des microfissures situées dans le plan de schistosité. Elles confirment aussi le comportement anisotrope du schiste. La porosité de fissures est de l'ordre de $6,5 \times 10^{-4}$. En revanche, les déformations transversales sont quasiment linéaires et sont cinq fois plus petites que les déformations longitudinales. La déformation volumique des pores est 7×10^{-4} et la pression de fermeture des fissures est de 9 MPa.

c) *Eprouvettes à $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$*

Les courbes contraintes-déformations longitudinales et transversales pour l'orientation $\theta = 45^\circ$ sont confondues et présentent une petite phase de serrage des microfissures dans les plans de schisto-

sité. En revanche, les courbes de la jauge dans la direction S_2 (cf Figure 2.7.c) et la jauge à 45° de la rosette sont quasiment linéaires et confondues. La déformation volumique de microfissures est de l'ordre de 3×10^{-4} , et la pression de fermeture des microfissures est égale à 7 MPa (Figure Annexe A). Par contre, pour les autres orientations ($15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$), leurs courbes confirment le comportement anisotrope du schiste sous sollicitation isotrope. De la même façon, les déformations longitudinales présentent une phase de serrage pour toutes les orientations. Par contre, les autres déformations transversales (parallèles et perpendiculaires) sont confondues et quasiment linéaires. La déformation volumique des microfissures existantes dans les plans de schistosité est égale à 4×10^{-4} . La pression de fermeture de celle-ci est de l'ordre de 6 - 6,5 MPa (Figures Annexe A).

2.7.2 Compression triaxiale monotone

2.7.2.1 Aspect des courbes expérimentales

a) *Eprouvettes à $\theta = 0^\circ$*

Les courbes contraintes-déformations longitudinales et transversales parallèles au plan de schistosité sont quasiment linéaires quelque soit la valeur de la pression de confinement. Par contre, les déformations transversales perpendiculaires au plan de schistosité présentent une perte de linéarité assez rapide. Elles sont deux fois plus grandes que celles parallèles au plan, ce qui laisse supposer que la rupture s'est produite dans le plan de schistosité (Figures Annexe B).

b) *Eprouvettes à $\theta = 90^\circ$*

D'une manière générale, les courbes contraintes-déformations longitudinales présentent une partie linéaire correspondant au comportement élastique du matériau. On observe sur les courbes contraintes-déformations transversales une rapide perte de linéarité, cela montre le comportement anisotrope du schiste sous sollicitations triaxiales monotones (Annexe B).

c) *Eprouvettes à $\theta = 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 80^\circ$*

Les courbes contraintes-déformations longitudinales présentent une partie linéaire (Annexe B). Il faut éventuellement tenir compte d'une phase de mise en place de l'échantillon et du système expérimental. Ceci peut se traduire par une phase de serrage sur les courbes (Annexe B, essai 75/40/1 et essai 75/0/1). Cependant, dans de nombreux cas, on peut avoir une rupture de pente (Annexe B, essai 15/30/1). Cette rupture de pente peut s'expliquer par le déclenchement d'un glissement plan sur plan comme mécanisme de rupture.

Enfin, il faut remarquer que les jauges fortement influencées par les plans de faiblesse ($\epsilon_{3p}, \epsilon_{3f}, \epsilon_{//}$) donnent des signaux incohérents. Ceci peut résulter du déclenchement rapide des plans dont l'effet est éventuellement le décollement de la jauge (Annexe B).

d) *Eprouvettes à $\theta = 45^\circ$*

Les essais de cette orientation ($\theta = 45^\circ$) sont les plus difficiles à réaliser et à exploiter. On constate que les courbes expérimentales obtenues sont totalement inexploitable. Il semble que la rupture ait lieu pour des charges très faibles (Annexe B). Il faut signaler qu'il est très difficile de visualiser une partie élastique pour cette orientation, ce qui explique la forte dispersion des résultats (Annexe B, essais à $\theta = 45^\circ$).

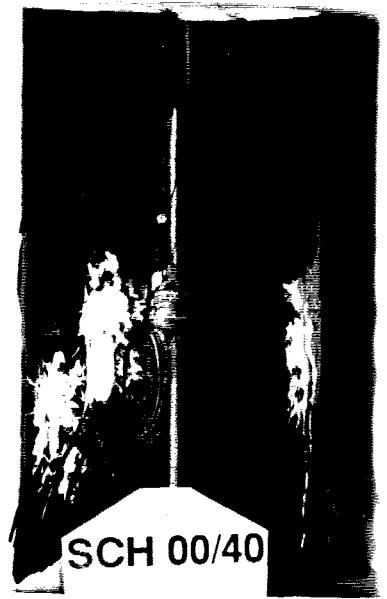
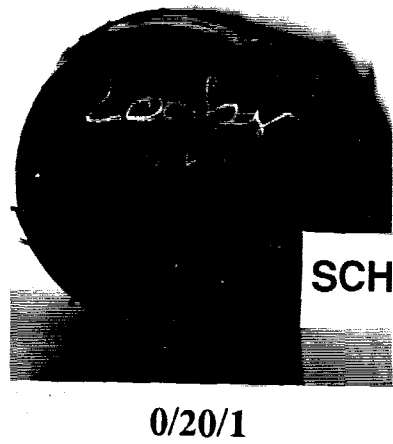
2.7.2.2 Aspect des ruptures

Le mode de rupture des roches anisotropes, soumises à un état de contrainte triaxiale de révolution, dépend d'une part de l'orientation des axes privilégiés du matériau par rapport à la direction de la contrainte principale majeure [73], [22], [25], et d'autre part de la valeur de la pression de confinement [55], [51], [72].

a) *Eprouvettes à $\theta = 0^\circ$*

Pour une pression de confinement nulle, la rupture a lieu par décollement des plans de schistosité. La cohésion entre les plans disparaît complètement à la rupture.

A mesure que la pression de confinement augmente, la rupture va se produire dans la matrice rocheuse suivant des plans faiblement orientés par rapport à l'axe de chargement σ_1 (photo 2.a). Les déformations augmentent considérablement en fonction de la pression. En revanche, la perte de la cohésion entre les plans de schistosité à la rupture n'est pas totale, ainsi que la résistance du matériau.



Photos 2 (a. et b.) : Mode de rupture pour les orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$

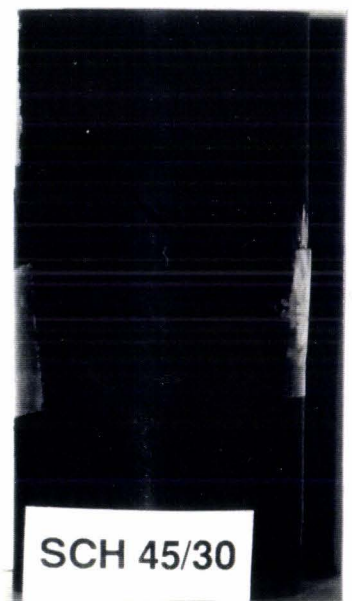
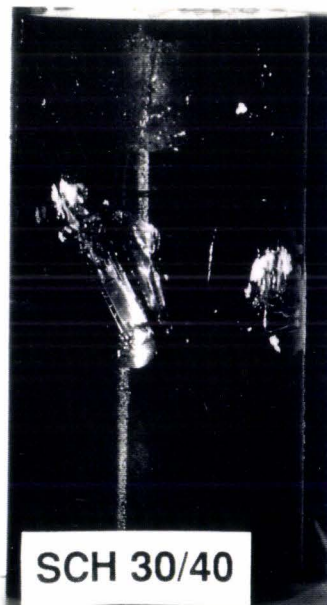
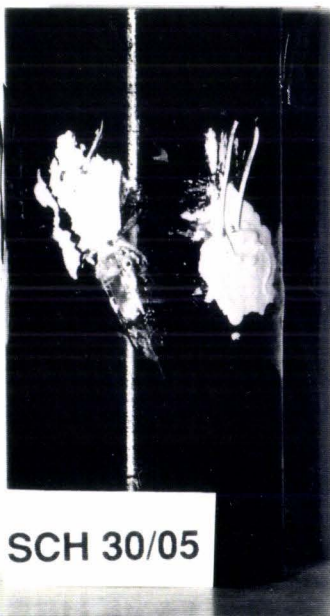
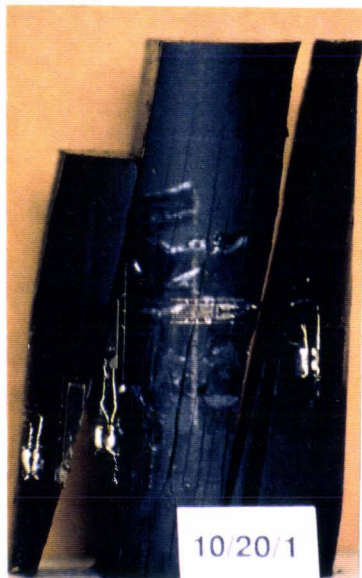
b) Eprouvettes à $\theta = 90^\circ$

Dans cette série d'essais, la rupture a eu lieu exclusivement dans la matrice rocheuse quelque soit la pression de confinement. Elle se propage à travers les plans de schistosité faisant un angle de rupture d'environ 25° . Le matériau perd complètement sa résistance à la rupture (Photo 2.b).

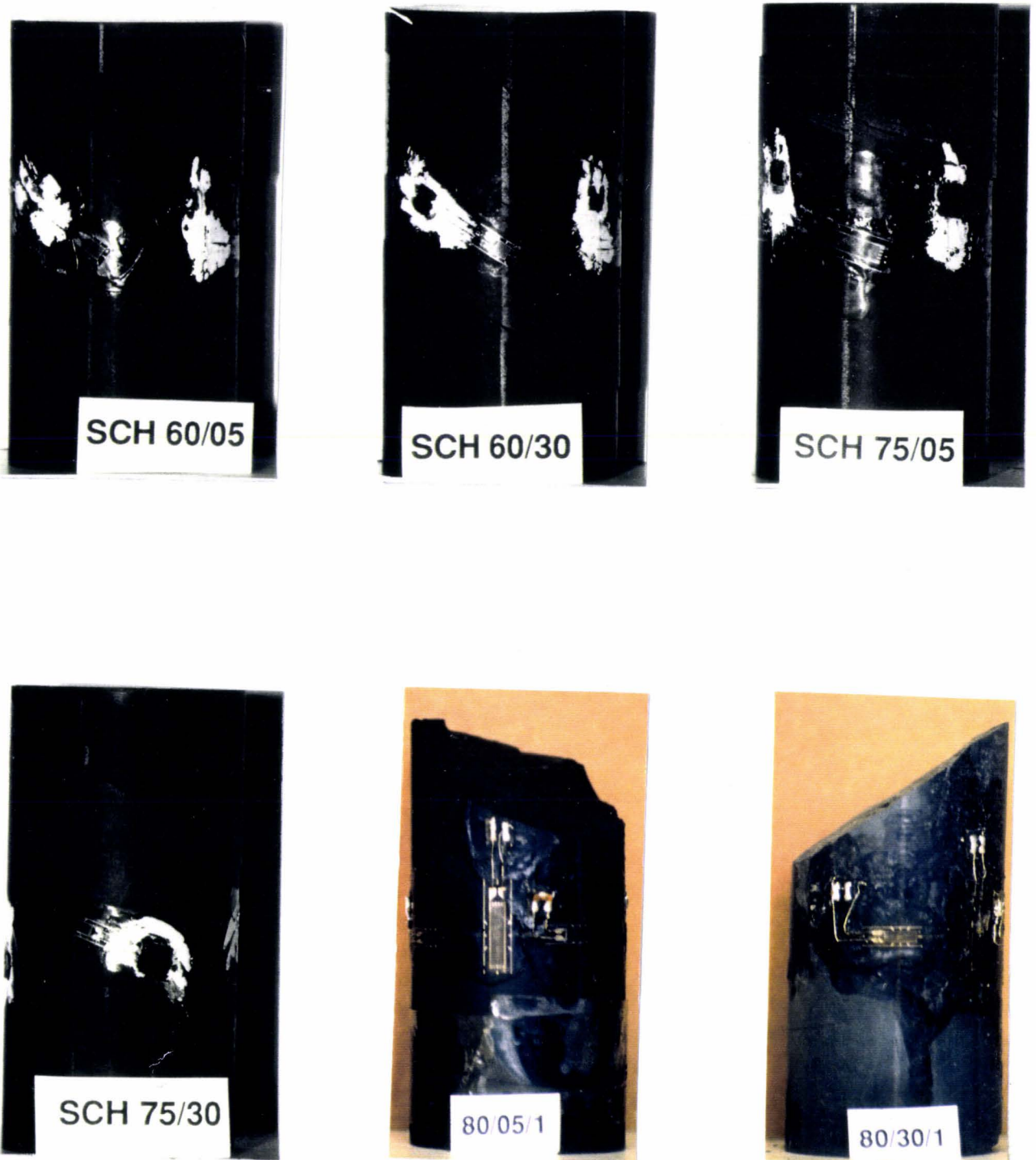
c) *Eprouvettes à $\theta = 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 80^\circ$*

D'une manière générale, pour toutes les orientations, la rupture s'est produite suivant les plans de faiblesse (par glissement), pour des faibles pressions. Par contre, aux fortes pressions, on observe plusieurs plans de schistosité participant au mécanisme de rupture par exemple ($\theta = 30^\circ, \theta = 15^\circ$) (photos 3).

On peut, en outre, remarquer dans certains essais, un déclenchement faisant passer la rupture d'un plan à l'autre ($\theta = 75^\circ, \theta = 80^\circ$) (photos 4).



Photos 3 : Mode de rupture pour les orientations $\theta = 10, 15, 30$ et 45°



Photos 4 : Mode de rupture pour les orientations $\theta = 60^\circ, 75^\circ$ et 80°

2.8 CONCLUSION

Nous avons pu mettre en évidence le rôle essentiel que joue l'anisotropie de structure dans le comportement du schiste.

Les éprouvettes ont été instrumentées par jauges d'extensométrie, afin de déterminer les différents modules de la loi élastique. Nous avons constaté que l'utilisation des jauges d'extensométrie pour l'orientation à 45° est inutile car le déclenchement rapide des plans de glissements dont l'effet est éventuellement le décollement de la rosette. Il est recommandé d'utiliser un collier de mesures pour les déformations post-rupture où les jauges deviennent inefficaces.

En ce qui concerne le mode de rupture qui varie avec l'orientation des plans de faiblesse, on remarque que la rupture a eu lieu essentiellement par glissement le long des plans de faiblesse, sauf pour les orientations $\theta = 0^\circ$ et 90° pour lesquelles la rupture a eu lieu dans la matrice rocheuse.

CHAPITRE III

Détermination des caractéristiques mécaniques du schiste

Dans ce chapitre, nous allons étudier à l'aide des essais effectués, le comportement mécanique d'une roche anisotrope, et en particulier isotrope transverse (schiste). On s'intéressera également à l'évolution du mode de rupture suivant l'orientation de la schistosité d'une part, et suivant l'influence de la pression de confinement, d'autre part.

Les données expérimentales décrites au chapitre II nous permettent de quantifier la variation du module d'Young, du coefficient de Poisson et de la résistance limite. Elles serviront aussi à préciser l'évolution de l'anisotropie de ces caractéristiques mécaniques en fonction de la pression.

3.1 CALCUL DES MODULES

3.1.1 Modules principaux E_1 et E_2

Sous l'hypothèse d'isotropie transverse, la matrice d'élasticité $[A]$ d'un milieu orthotrope de révolution s'écrit sous la forme suivante [47] :

$$(3.1) \quad [A] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

$$\text{avec } \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}$$

La détermination des coefficients ($E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}$) (§ chapitre I) s'effectue à l'aide de plusieurs types d'essais. Les modules élastiques (E_1 et E_2) seront mesurés dans la partie linéaire de la courbe contraintes-déformations longitudinales (ϵ_1). Notons que parfois on peut avoir au début de la courbe une partie non linéaire due au serrage des plans de faiblesse et de mise en place du système expérimental. Cette phase n'intervient donc pas dans la mesure des modules élastiques par exemple (Annexe B, essai 90/0/2). Certains essais (90/20/1 et 90/30/1) présentent une rupture de pente plus ou moins marquée lorsque la pression augmente. Ce comportement peut être expliqué par l'amorce de glissement plan sur plan qui se produit bien avant la rupture totale de l'échantillon.

Leur détermination s'effectue à partir d'essais coaxiaux, autrement dit à $(\theta = 0^\circ \text{ et } 90^\circ)$. Les résultats sont reportés dans les tableaux (3.1 et 3.2).

N° Essai	E_1 (MPa)
90/00/1	31 200
90/00/2	34 300
90/2,5/1	37 400
90/05/1	37 400
90/7,5/1	41 200
90/10/1	38 100
90/20/1	41 350
90/30/1	42 200
90/40/1	42 700

N° Essai	E_2 (MPa)
0/00/1	117 500
0/05/1	123 000
0/10/1	181 000
0/10/2	114 000
0/20/1	153 000
0/20/2	120 000
0/30/1	120 000
0/40/1	620 000
0/40/2	118 000

Tableau 3.1 : Valeurs du module E_1

Tableau 3.2 : Valeurs du module E_2

Loureiro Pinto [62] a déterminé les caractéristiques mécaniques de trois types de schistes en symétrie axiale pour une pression de confinement nulle (voir tableau 3.3 et figure 3.1).

D'autres auteurs [73], [50], [66], [68] et [37] ont déterminé les modules élastiques à partir d'essais de compression simple pour divers types de roches anisotropes. Le tableau (3.4) rassemble les variations des modules élastiques en fonction de l'orientation de schistosité (θ). Une autre méthode par propagation d'ondes ultra-sonores a été utilisée pour déterminer les modules dynamiques et caractériser l'anisotropie des roches [46], [4] et [18], [37].

Roche	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12}	ν_{12}	ν_{23}
Schiste n° 1	76 300	97 600	27 800	0,21	0,27
Schiste n° 2	42 000	78 600	21 000	0,145	0,22
Schiste n° 3	20 400	64 800	8 100	0,07	0,13

Tableau 3.3 : Caractéristiques élastiques des trois schistes obtenues par Pinto

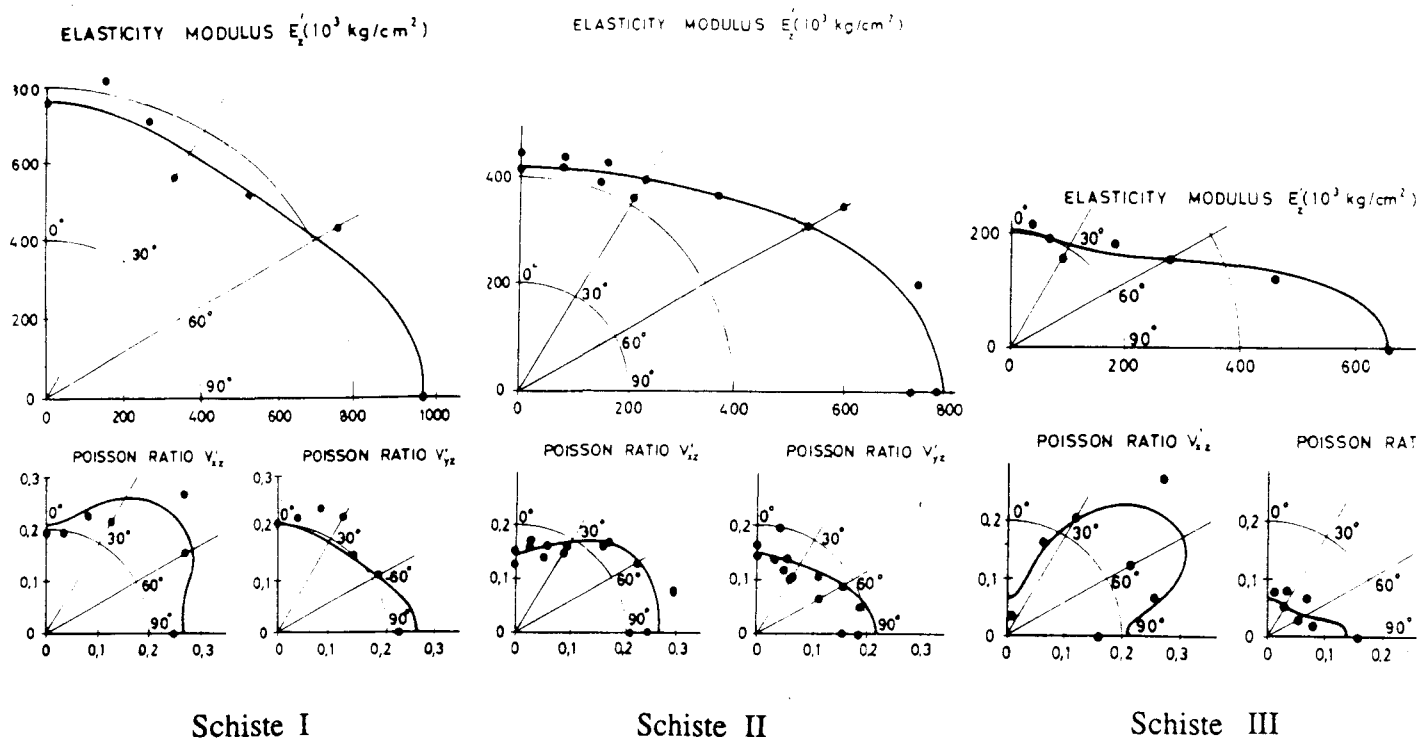


Figure 3.1 : Caractéristiques élastiques en fonction de l'orientation (Pinto)

Auteurs	θ	90°	80°	70°	60°	45°	30°	20°	15°	0°
Pinto schiste n° 1	E (MPa)	96 600			87 300	72 500	65 500	76 600	83 000	76 500
	ν	0,25			0,31	0,38	0,25	0,24	0,2	0,19
Pinto schiste n° 2	E (MPa)	77 800	76 500		68 900	50 700	40 400	45 400	44 700	44 600
	ν	0,21	0,31		0,26	0,22	0,19	0,16	0,18	0,13
Pinto schiste n° 3	E (MPa)	26 590	47 300		31 700	26 100	18 500	20 400	20 800	
	ν	0,16	0,26		0,25	0,39	0,24	0,18	0,04	
Masure phyllades	E (MPa)	31 000		33 000	36 000	45 000			93 000	103 000
	ν	0,14		0,15	0,14	0,15			0,18	0,2
Syries	E (MPa)	45 700		40 400		52 100				23 900
Rodriguez	E (MPa)	77 800	72 700							

Tableau 3.4 : Modulus élastiques en fonction de l'orientation de plans

3.1.2 Influence de la pression hydrostatique

D'une manière générale l'augmentation de la pression hydrostatique modifie le comportement et augmente le caractère ductile de la roche [50].

Une augmentation de la pression de confinement provoque un accroissement de la résistance limite qui dépend de l'orientation des plans privilégiés par rapport à la contrainte principale majeure. Elle diminue aussi l'anisotropie des roches [5], [22],[53], [17], [21] et [72], cela explique la fermeture des plans de faiblesse.

Le tableau 3.2 montre que le module E_2 est pratiquement indépendant de la pression [48]. Certains essais (tableau 3.2, essai 0/10/1 et essai 0/20/1) ont donné des valeurs beaucoup plus élevées 181 000 et 153 000 MPa. On remarque dans cette série d'essais que la charge axiale est appliquée parallèlement aux plans de schistosité. Le serrage de ces plans se produit au début de l'essai sous l'effet de la pression de confinement, sans augmentation importante de la raideur du matériau.

Il faut signaler l'existence d'hétérogénéité plus rigides (lentilles de pyrite) qui peuvent renforcer le matériau et augmenter d'une façon considérable les caractéristiques mécaniques de la roche. Les essais de vérification (tableau 3.2, essais 0/10/2 et 0/20/2) sur des échantillons comportant moins d'hétérogénéité ont cependant abouti à des valeurs en bonne corrélation avec l'ensemble de la série. La figure 3.2 montre la variation de E_2 en fonction de la pression de confinement.

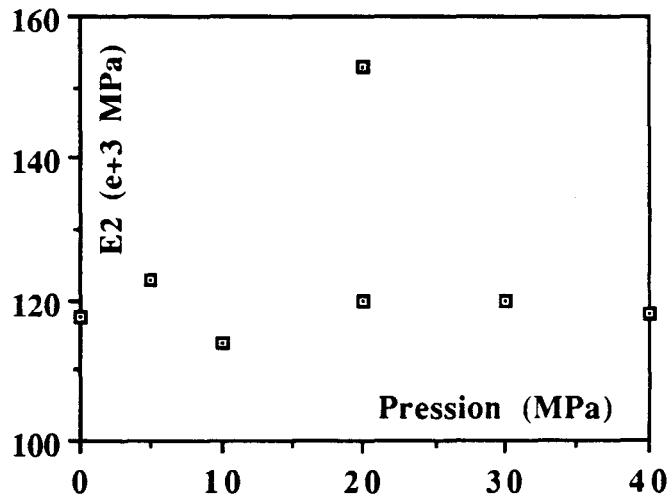


Figure 3.2 : Variation de E_2 en fonction de la pression de confinement

En revanche, le module E_1 (essais à $\theta = 90^\circ$) est fortement influencé par la pression de confinement (figure 3.3). Cette augmentation du module E_1 a aussi été observée par [69] sur les schistes de Lacaune et par [29] sur les granites (figure 3.4).

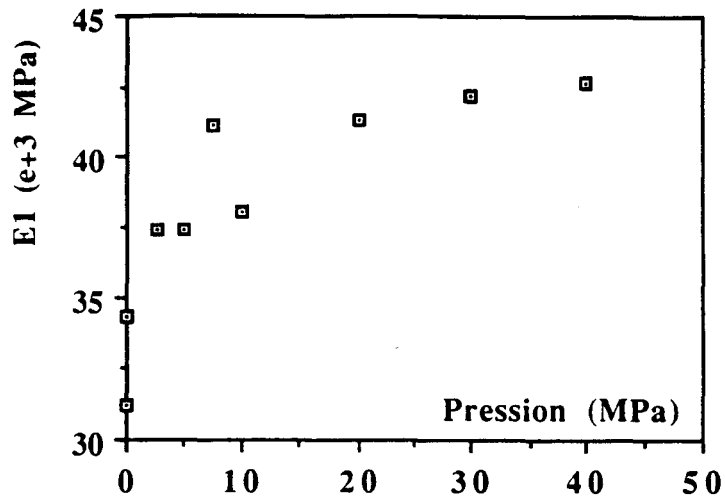


Figure 3.3 : Variation de E_1 en fonction de la pression de confinement

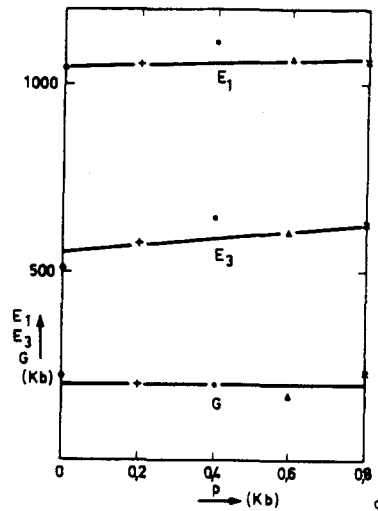


Figure 3.4 : Evolution des modules élastiques (E_1 , E_2 , G) en fonction de la pression de confinement - Lerau (1981)

Dans cette série d'essais ($\theta = 90^\circ$), la charge axiale est appliquée perpendiculairement aux plans de schistosité. Dans un premier temps, il se produit un serrage des plans dont l'importance augmente avec la pression, et qui se traduit par l'augmentation de la raideur du matériau.

Kulhawy [43] a donné une expression du module en fonction de la pression sous la forme d'une loi de puissance. Santarelli [71] a légèrement modifié cette expression en utilisant une puissance de $(1 + \sigma_3)$. La figure 3.5 donne un exemple obtenu par Santarelli sur un grès.

Dans notre cas, nous pouvons donner les approximations suivantes :

- | | | | | |
|-------|---|--|------------------------|------------|
| Loi 1 | : | $E_1 = 36\ 000 \cdot \sigma_3^{0,046}$ | Loi de Kulhawy | $R = 0,94$ |
| Loi 2 | : | $E_2 = 33\ 190 (1 + \sigma_3)^{0,072}$ | Loi de Kulhawy modifié | $R = 0,93$ |

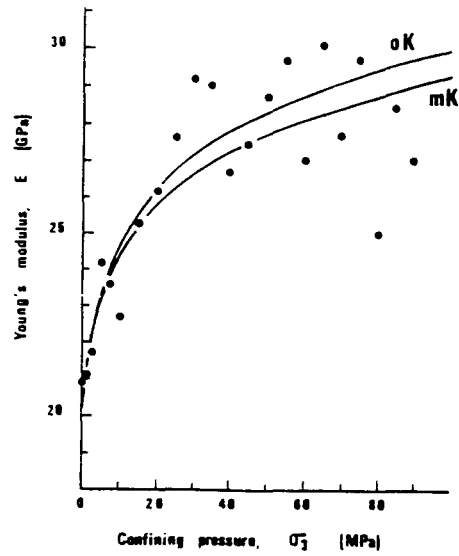


Figure 3.5 : Exemple de dépendance du module d'Young avec la pression grès de Doddington (Santarelli, 1987) - Approximations par la loi originale de Kulhawy et la loi modifiée (mk)

La figure 3.6 montre les résultats obtenus en utilisant ces deux lois.

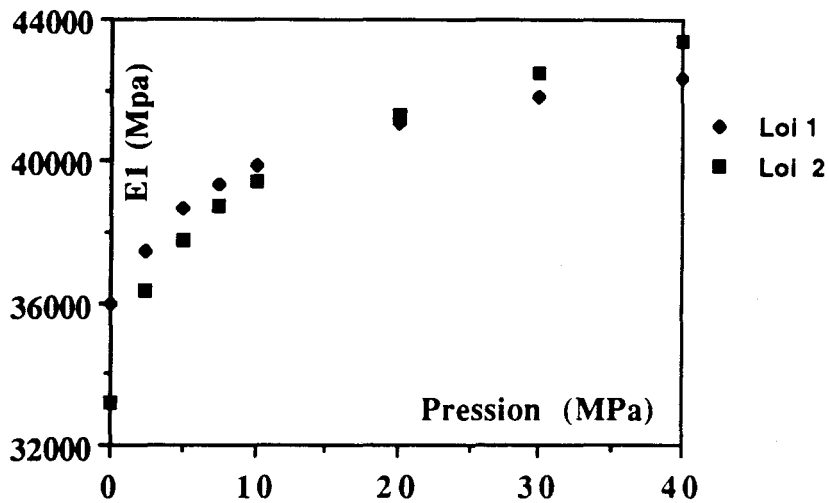


Figure 3.6 : Dépendance de E_1 avec la pression et corrélation

3.2 COEFFICIENTS DE POISSON

Les coefficients de Poisson (ν_{12} , ν_{23} , ν_{21}) ont été déterminés dans la partie linéaire de la courbe contraintes-déformations transversales (ϵ_t) des essais à $\theta = 0^\circ$ et 90° .

Avec les conventions choisies au chapitre II (paragraphe 2.3), les essais dont l'axe de la charge est perpendiculaire aux plans de schistosité ($\theta = 90^\circ$) donnent la valeur du coefficient ν_{12} . En revanche, à partir d'autres essais ($\theta = 0^\circ$), on peut déterminer les deux autres coefficients (ν_{21} , ν_{23})

l'un ν_{21} est donné par les jauges placées perpendiculairement aux plans de schistosité, l'autre ν_{23} par les deux jauges parallèlement aux plans.

3.2.1 Coefficient ν_{12} ($\theta = 90^\circ$)

Hadley K. [29] et Lerau J. [48] ont également montré l'influence de la pression de confinement sur les coefficients de Poisson des granites et des schistes de Lacaune (figure 3.7), en particulier ν_{12} qui augmente légèrement avec la pression de confinement.

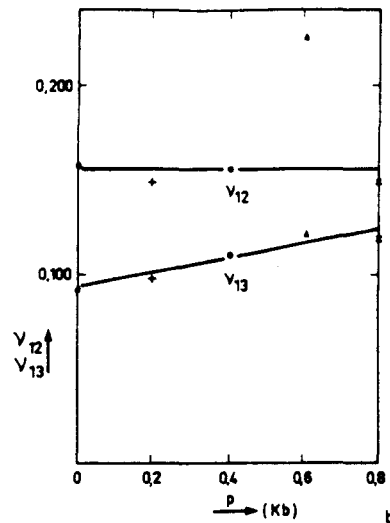


Figure 3.7 : Variation des coefficients de Poisson en fonction de la pression de confinement - Lerau (1981)

Les valeurs du coefficient ν_{12} ($\theta = 90^\circ$) pour différents essais sont reportées dans le tableau 3.5.

N° Essai	ν_{12}
90/00/1	0,22
90/00/2	0,175
90/2,5/1	0,13
90/05/1	0,14
90/7,5/1	0,16
90/10/1	0,15 - 0,2
90/20/1	0,11
90/30/1	0,15
90/40/1	0,1

Tableau 3.5 : Valeurs du coefficient de Poisson ν_{12}

Dans ce tableau, nous avons reporté plusieurs valeurs pour l'essai 90/10/1, puisque certains essais (Annexe B, essai 90/10/1) montrent une rupture de pente très marquée qui explique l'initiation rapide de la rupture. La deuxième valeur de ν_{12} (0,22) pour l'essai (90/10/1) correspond à des caractéristiques résiduelles.

Les valeurs reportées dans le tableau 3.5 montrent que le coefficient ν_{12} décroît légèrement avec la pression de confinement. Ce type de comportement a déjà été observé par Santarelli (1987), (figure 3.8). Il faut rappeler qu'il est difficile de déterminer une loi de variation compte tenu de la forte dispersion des résultats. Une régression linéaire [30] donnerait (figure 3.9) :

$$\nu_{12} = 0,155 - 0,001 \sigma_3 \quad R = 0,66$$

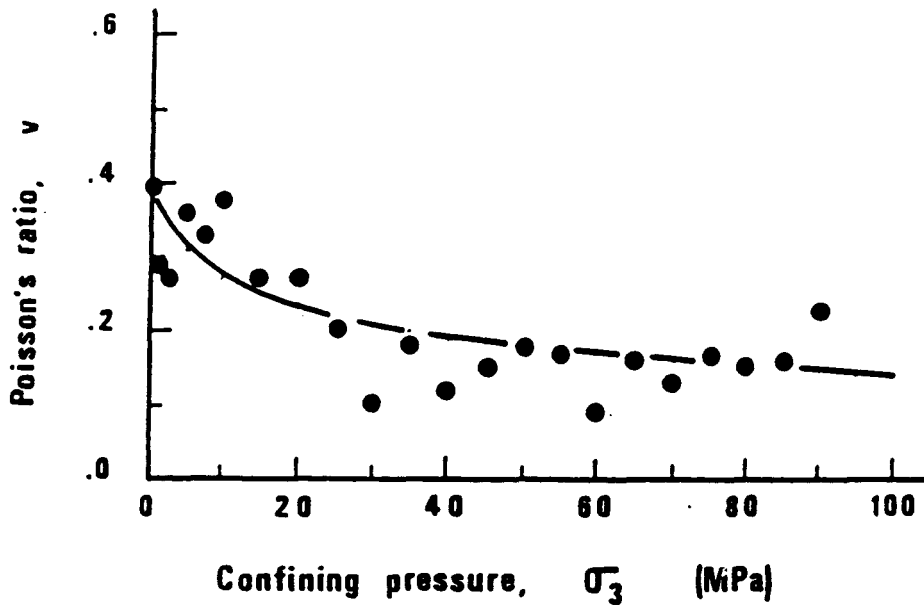


Figure 3.8 : Variation du coefficient de Poisson pour le grès Doddington (Santarelli, 1987)

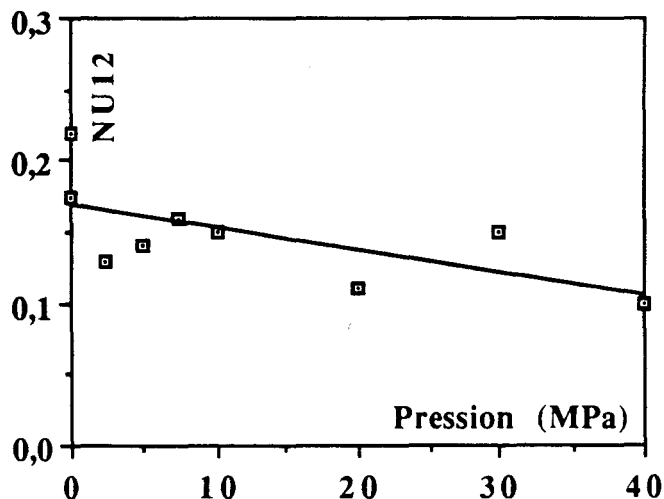


Figure 3.9 : Evolution de ν_{12} avec la pression de confinement

3.2.2 Coefficient ν_{23} et ν_{21} ($\theta = 0^\circ$)

La détermination des coefficients (ν_{23} et ν_{21}) s'effectue à l'aide des courbes contraintes déformations transversales (parallèlement ($\epsilon_{3//}$) et perpendiculairement ($\epsilon_{3\perp}$)) aux plans de schistosité. Le tableau 3.6 résume tous les résultats obtenus pour différentes pressions de confinement.

N° Essai	ν_{21}	ν_{23}
0/00/1	0,39	0,12
0/05/1	0,42	0,175
0/10/1	0,31	0,12
0/10/2	0,43	0,16
0/20/1	0,5	0,19
0/20/2	0,27	0,165
0/30/1	0,23	0,13
0/40/1	0,34	0,2

Tableau 3.6 : Valeurs des coefficients de Poisson ν_{21} et ν_{23}

Pour certains essais (0/0/1, 0/30/1), la détermination du coefficient ν_{21} a été rendue délicate par le déclenchement rapide de la fissuration (Annexe B, courbe $\epsilon_{3\perp}$ 0/30/1). La pente à l'origine est ainsi réduite et la mesure de ν_{21} n'a pu s'effectuer que sur quelques points.

La variation des coefficients ν_{21} et ν_{23} en fonction de la pression de confinement est donnée sur les figures (3.10 et 3.11).

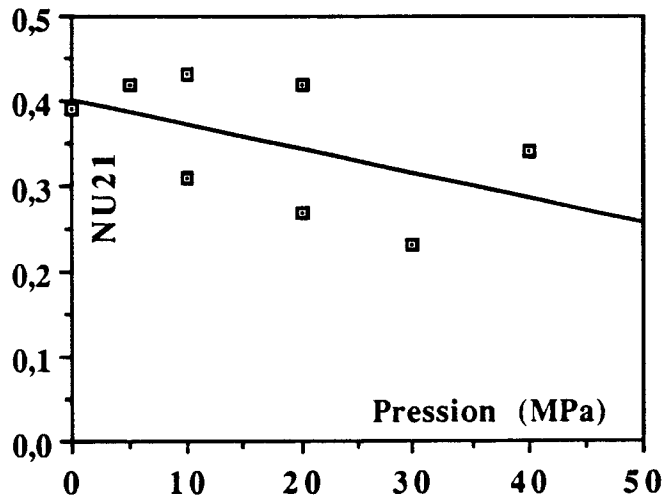


Figure 3.10 : Evolution de ν_{21} avec la pression de confinement

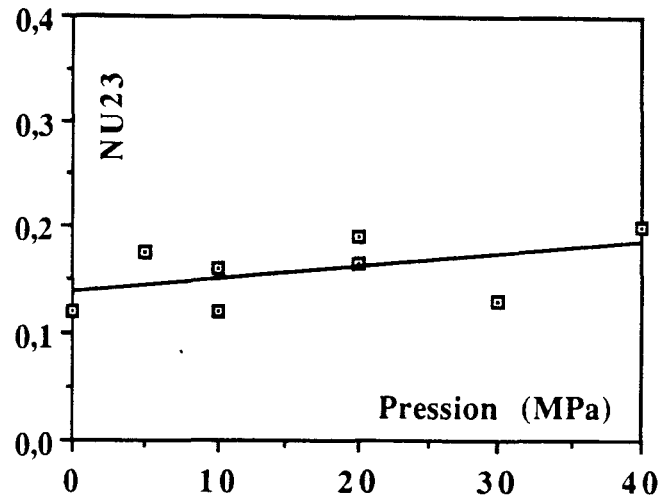


Figure 3.11 : Evolution de ν_{23} avec la pression de confinement

On constate par cette variation que le coefficient ν_{21} décroît nettement avec la pression. Par contre, le coefficient ν_{23} croît légèrement avec la pression.

On obtient les régressions suivantes :

$$\nu_{21} = 0,396 - 0,0029 \sigma_3 \quad R = 0,46$$

$$\nu_{23} = 0,137 + 0,001 \sigma_3 \quad R = 0,5$$

Les mauvaises valeurs des régressions pour les coefficients ν_{21} et ν_{23} s'expliquent par la forte dispersion des résultats obtenus.

3.2.3 Validité de l'hypothèse élastique

Nous avons fait jusqu'à présent l'hypothèse d'un comportement élastique pour le matériau étudié (schiste) qui imposait que :

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

Il est important de vérifier la validité de cette hypothèse. Calculons la valeur des différents rapports en prenant les déterminations expérimentales ; nous obtenons le tableau suivant (tableau 3.7).

Nous constatons une forte différence à pression nulle ; par contre aux pressions élevées, cette différence s'amenuise. Il faut toutefois tenir compte de la difficulté à déterminer les modules d'Young (E_1 et E_2), notamment en compression simple et de la dispersion des résultats.

Pression	ν_{12}/E_1 (10^{-6} MPa)	ν_{21}/E_2 (10^{-6} MPa)
0	7,05	3,32
0	5,1	3,32
5	3,74	3,41
10	3,9	3,77
20	2,66	3,27 - 2,25
30	3,55	1,92
40	2,2	2,88

Tableau 3.7 : Valeurs expérimentales de ν_{12}/E_1 , ν_{21}/E_2

Nous allons utiliser les lois de variations déterminées en 3.1.2, 3.2.1 et 3.2.2, afin de diminuer cet écart.

$$E_1 = 33\,190 (1 + \sigma_3)^{0,072}$$

$$E_2 = 119\,000$$

$$\nu_{12} = 0,155 - 0,001 \sigma_3$$

$$\nu_{21} = 0,374 - 0,003 \sigma_3$$

L'ensemble de ces résultats est reporté au tableau 3.8

Pression	ν_{12}/E_1 (10^{-6} MPa)	ν_{21}/E_2 (10^{-6} MPa)	Moyenne
0	4,67	3,14	3,91
5	3,97	3,02	3,49
10	3,68	2,89	3,28
20	3,27	2,64	2,95
30	2,94	2,39	2,66
40	2,65	2,13	2,39

Tableau 3.8 : Valeurs de ν_{12}/E_1 , ν_{21}/E_2 et les valeurs moyennes déterminées à partir des approximations

On constate encore une différence à faible pression et qui diminue avec l'augmentation de la pression. On peut cependant dire que l'hypothèse élastique est assez bien vérifiée.

3.3 COMPARAISON DES RESULTATS

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier l'homogénéité du site de prélèvement, est de caractériser les dispersions qui peuvent provenir de la mise en oeuvre différente des essais dans différents laboratoires sur une roche provenant d'un même endroit et celles induites par les prélèvements.

Nous avons réalisé deux séries d'essais sur un schiste, prélevé à 2 kms de distance du premier site de prélèvement, mais dans la même lithologie. Les essais ont été effectués dans deux directions différentes ($\theta = 0^\circ$ et 90°), et pour les mêmes valeurs de pression que précédemment. L'ensemble des courbes correspondant au deuxième prélèvement est reporté en annexe C. Les tableaux (3.9 et 3.10) résument les valeurs des modules pour les deux prélèvements.

Pression (MPa)	E_1 (MPa)	E_{1A} (MPa)	E_2 (MPa)	E_{2A} (MPa)
0	34 300	44 000	117 500	106 200
5	37 400		123 000	
10	38 100	52 000	114 000	93 000
20	41 350	42 000	120 000	101 000
30	42 200	54 500	120 000	109 000 / 101 000
40	42 700	78 000	118 000	111 000 / 121 000

Tableau 3.9 : Valeurs des modules E_1 et E_2 pour les deux prélèvements

E_1, E_2 : modules pour le premier prélèvement

E_{1A}, E_{2A} : modules pour le deuxième prélèvement

Pression	ν_{12}	ν_{12A}	ν_{21}	ν_{21A}	ν_{23}	ν_{23A}
0	0,175	0,15	0,39	0,40	0,12	0,12 / 0,16
10	0,15 / 0,2	0,17	0,43	0,37	0,16	0,22
20	0,11	0,22	0,27	0,35	0,165	0,15
30	0,15	0,27	0,23	0,33	0,13	0,22 / 0,15
40	0,1	0,31	0,34	0,34 / 0,38	0,2	0,13 / 0,20

Tableau 3.10 : Valeurs des coefficients de Poisson pour les deux prélèvements

$\nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{23}$: coefficients pour le premier prélèvement

$\nu_{12A}, \nu_{21A}, \nu_{23A}$: coefficients pour le deuxième prélèvement

On peut constater que le module (E_2) ne varie pratiquement pas avec la pression (figure 3.12). En outre, on constate qu'il n'y a aucune différence significative entre les deux prélèvements. Par contre, le module E_1 (figure 3.13) augmente considérablement avec la pression de confinement [48]. On constate que la valeur de E_1 (second prélèvement) pour un confinement nul est beaucoup plus importante ($\cong 44\ 000$ MPa) que celle du premier prélèvement. Il faut tenir compte du nombre restreint d'essais effectués qui ne permet cependant pas de tirer des conclusions définitives.

Cependant, il est clair que le module E_1 varie en fonction de la pression de confinement pour les deux prélèvements. Cette variation est très remarquée pour le deuxième prélèvement.

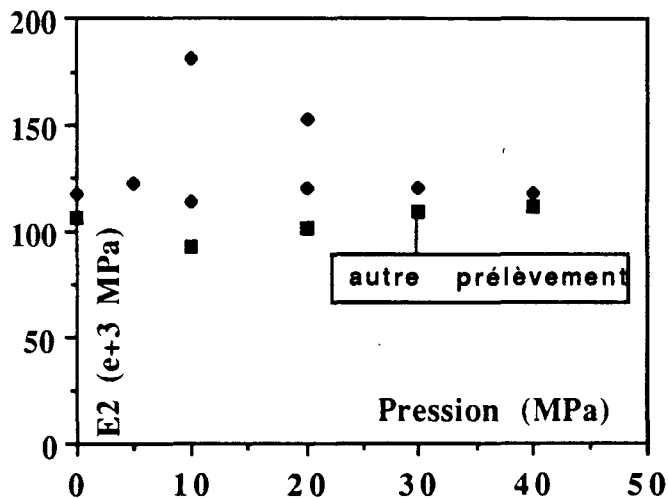


Figure 3.12 : Comparaison des modules d'Young E_2

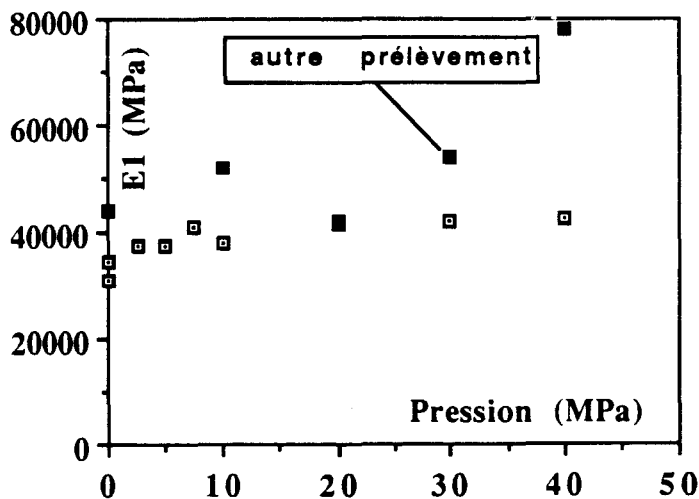


Figure 3.13 : Comparaison des modules d'Young E_1

La figure (3.14) montre les valeurs de ν_{12} en fonction de la pression de confinement. Le coefficient ν_{12} du second prélèvement varie d'une manière tout à fait différente par rapport au

premier prélèvement. On observe une forte augmentation avec la pression, alors que dans le premier ν_{12} diminue légèrement avec la pression. Cette augmentation a été remarquée par [48] pour le schiste et par Hadley [29] pour les granites. On peut néanmoins affirmer qu'aux pressions inférieures à 20 MPa les valeurs sont comparables pour les deux prélèvements.

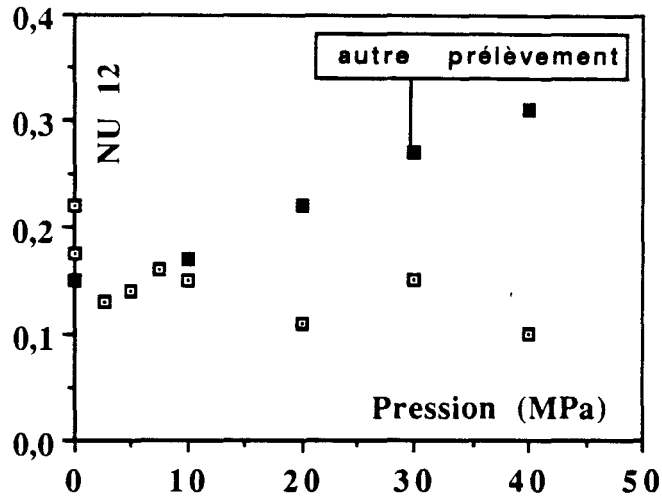


Figure 3.14 : Comparaison des coefficients de Poisson ν_{12}

En ce qui concerne les coefficients ν_{23} (figure 3.15), on constate que les valeurs sont tout à fait comparables pour les deux prélèvements. Par contre, ce n'est pas le cas pour les coefficients ν_{21} (figure 3.16) pour lequel on peut constater une certaine variation.

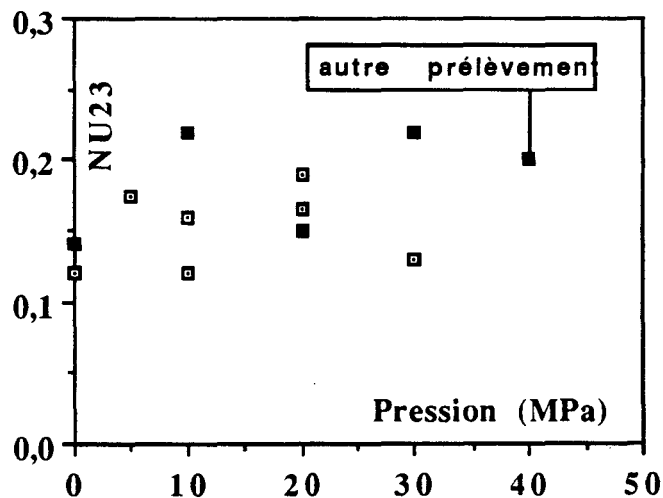


Figure 3.15 : Comparaison des coefficients de Poisson ν_{23}

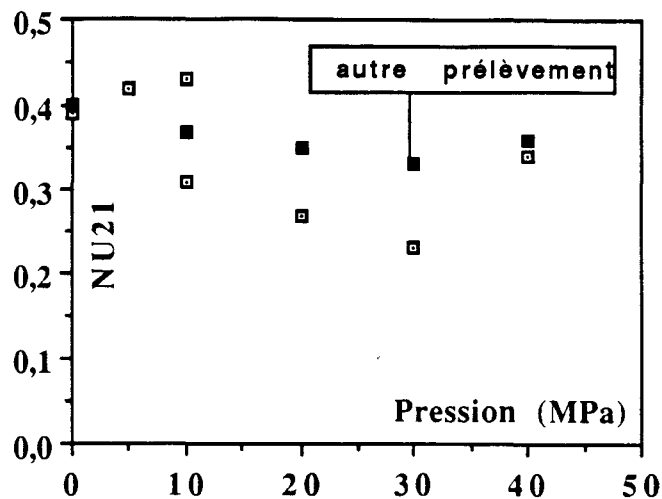


Figure 3.16 : Comparaison des coefficients de Poisson ν_{21}

On a vu au paragraphe 3.2.2 que le coefficient ν_{21} du premier prélèvement diminue avec la pression ; en revanche, il n'est pratiquement pas affecté pour le second prélèvement.

Malgré quelques incertitudes sur certaines valeurs, il apparaît que les résultats des deux prélèvements sont comparables et assez proches. Nous pouvons donc estimer que le matériau (schiste) est relativement homogène à l'échelle du massif.

De nombreux auteurs [37], [56] ont caractérisé ce type de matériau (schiste) à partir des essais en compression simple. Il faut préciser que tous les paramètres élastiques sont déterminés par des jauges d'extensométrie. Tous les résultats obtenus par différents laboratoires sur le même matériau (schiste) sont reportés dans le tableau 3.11.

Modules	Nouveau	Ancien	NANCY	MOREL
E_1	32 750	44 000	40 700	40 800 / 47 000
E_2	117 500	106 200	110 400	97 200 / 111 100
ν_{12}	0,175	0,15	0,16	0,10 / 0,11
ν_{21}	0,39	0,4	0,35	0,36 / 0,4
ν_{23}	0,12	0,12 / 0,16	0,17	0,17 / 0,19

Tableau 3.11 : Comparaison de différents résultats

Globalement, on peut constater que la dispersion liée au site de prélèvement ou à la technique d'essais des différents laboratoires reste faible et qu'il y a une bonne concordance des résultats.

3.4 MODULE DU CISAILLEMENT G_{12}

Si nous prenons la matrice d'élasticité $[A]$ pour un milieu isotrope transverse (chapitre I), nous remarquons qu'il y a cinq coefficients indépendants [47]. Les essais coaxiaux ($\theta = 0^\circ$ et 90°) fournissent les valeurs de 4 coefficients (E_1 , E_2 , ν_{12} et ν_{23}).

Théoriquement, le coefficient E_θ est donné par la relation 3.5 que nous rappelons ici :

$$(3.2) \quad \frac{1}{E_\theta} = \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_2}$$

A partir de cette relation, on peut déduire le module de cisaillement G_{12} qui est pratiquement impossible à mesurer par des jauges d'extensométrie.

Le coefficient E_θ est déterminé dans la partie linéaire de la courbe contraintes-déformations longitudinales (ϵ_1). Les valeurs expérimentales des modules (E_θ) pour diverses valeurs de θ et de la pression sont reproduites dans le tableau 3.12.

	0 (MPa)	5 (MPa)	10 (MPa)	20 (MPa)	30 (MPa)	40 (MPa)
10°	72 500	75 000	70 000	75 000	76 900	86 000
15°	40 600	28 000	17 340	21 940	16 500	37 700
30°	45 800	33 000	15 390	15 400	13 500	54 000
45°	15 480	11 890	10 000	10 810	48 300	12 300
60°	17 895	36 750	20 090	12 860	12 500	24 000
75°	40 000	21 000	30 500	32 000	32 650	26 810
80°	45 000	45 000	46 800	46 050	47 000	50 400

Tableau 3.12 : Valeurs expérimentales du module $E(\theta)$

Peres Rodrigues [66] a présenté pour les roches granitiques les variations des modules (E_θ) avec l'orientation (θ) sous forme régulière assimilable à une ellipse. Pour les chistes par contre, cette variation présente un minimum (Peres Rodrigues [67] ; Pinto [61]).

Le module de cisaillement G_{12} peut être déterminé par deux méthodes :

- une détermination statique déduite de la relation donnant E_{θ} (3.5),
- une méthode dynamique par les ondes ultra-sonores.

Compte tenu de la dispersion et l'incertitude de certains résultats, la détermination du module G_{12} est souvent très difficile à calculer statiquement. Par contre, ce module est aisément calculable par la méthode ultra-sonore (Homand [37], [18]).

Afin d'approcher les résultats obtenus statiquement, nous allons proposer la méthode suivante :

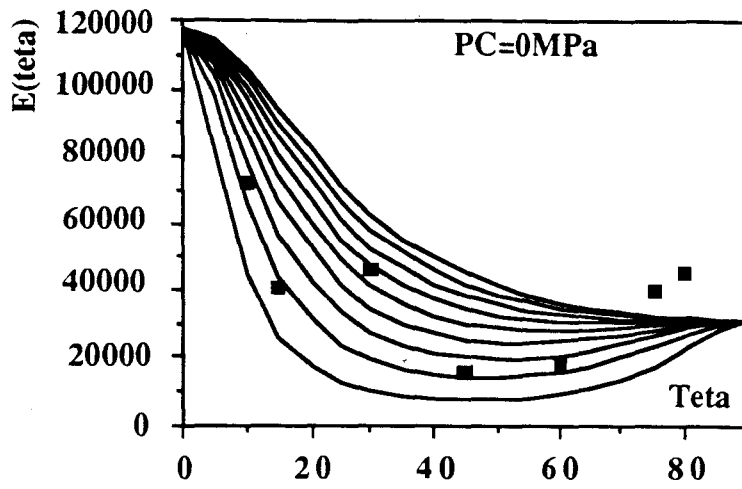
Homand et Cuxac [37] ont déterminé par la méthode ultra-sonore tous les modules dynamiques des trois blocs de schiste. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3.13.

Modules dynamiques	bloc M	bloc G	bloc P
E_1 (MPa)	40 127	39 157	40 151
E_2 (MPa)	99 919	100 688	100 667
E_3 (MPa)	100 109	100 374	100 919
G_{12} (MPa)	14 846	14 788	14 155
G_{13} (MPa)	14 368	14 610	13 743
G_{23} (MPa)	49 987	50 046	50 172
$\nu_{13} = \nu_{12}$	0,34	0,34	0,32
$\nu_{31} = \nu_{21}$	0,44	0,43	0,44
$\nu_{32} = \nu_{23}$	0,18	0,16	0,17

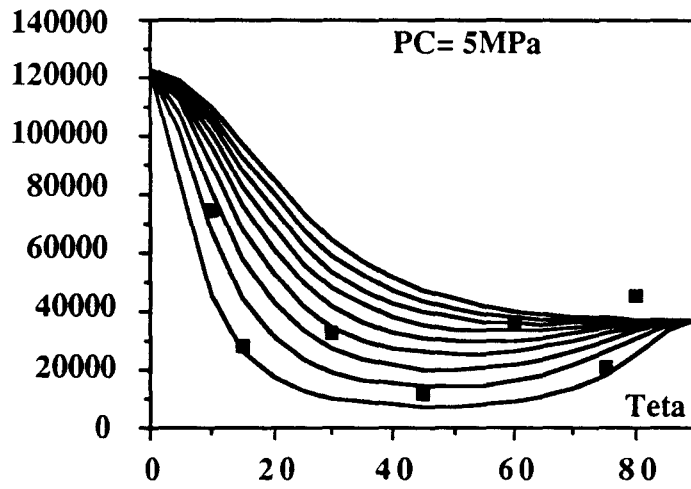
Tableau 3.13 : Modules dynamiques pour trois blocs de schiste

Nous nous servons de la valeur maximale de G_{12} du module dynamique déterminé à l'I.N.P.L. (Homand, 1989), soit $G_{12} = 14\ 500$ MPa : • On trace les courbes théoriques de E_{θ} pour chaque valeur de pression en faisant varier le module G_{12} avec un pas de 2 000 MPa à partir de 2 000 MPa, puis on superpose aux courbes tracées précédemment les valeurs expérimentales de E_{θ} , ce qui nous permet de déterminer une valeur approchée de G_{12} .

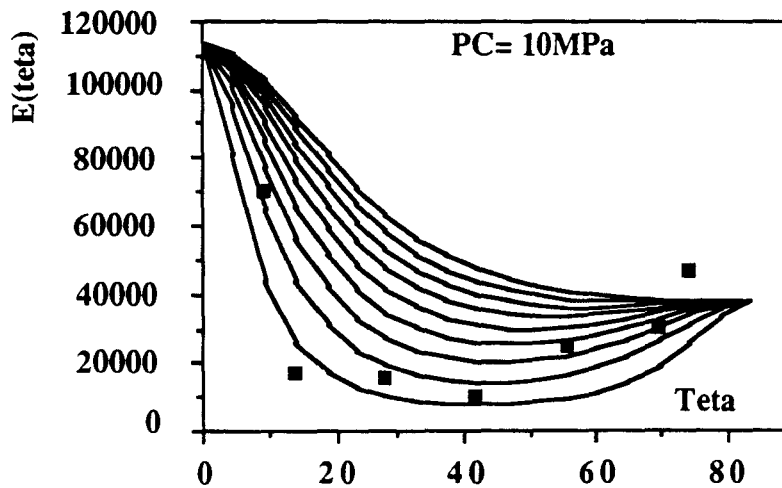
Les courbes obtenues sont données par la figure 3.17 où on peut remarquer que pour les orientations 15° et 30°, les valeurs expérimentales se situent aux environs de 3 000 MPa. Par contre pour les autres orientations, et en particulier à 45°, la forte dispersion des résultats ne permet pas de donner des valeurs précises. Néanmoins, on peut affirmer que la valeur de G_{12} est inférieure aux valeurs déterminées par la méthode ultra-sonore. Il semble que le module G_{12} varie en fonction de l'orientation θ [48], et est indépendant de la pression. Le tableau 3.14 résume les estimations de G_{12} déterminées à partir des courbes de E_{θ} .



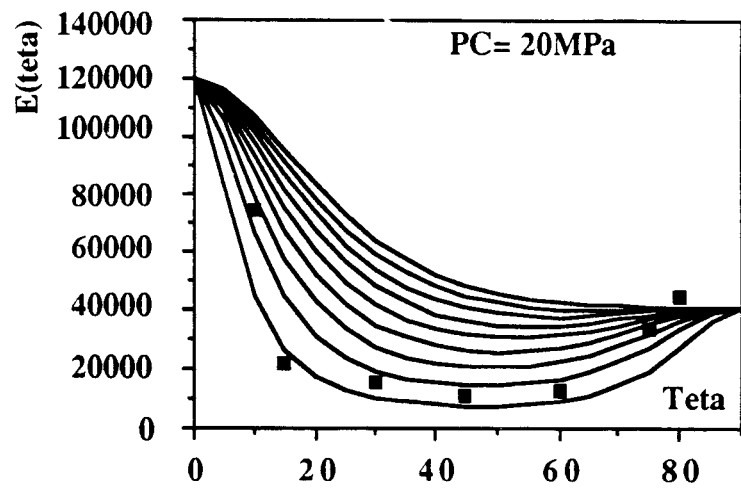
(a)



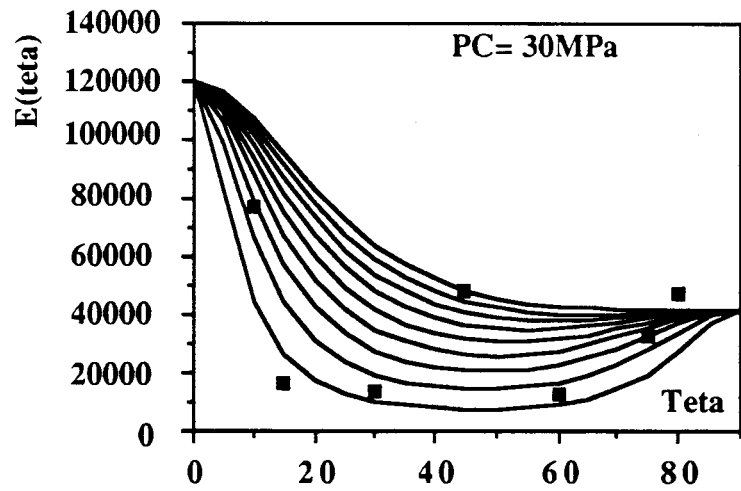
(b)



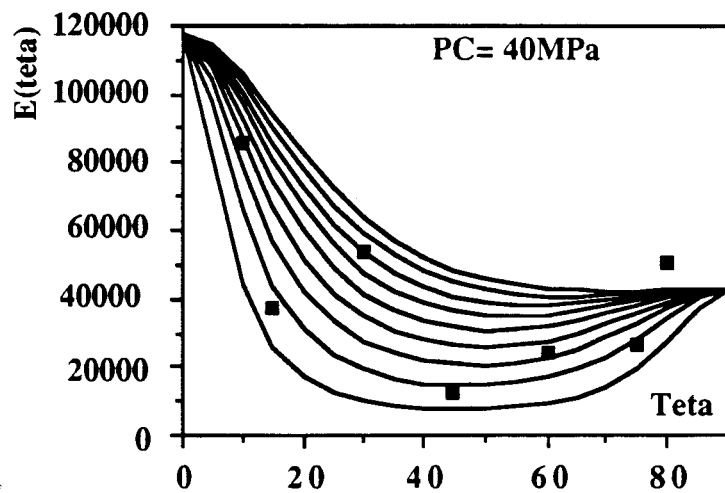
(c)



(d)



(e)



(f)

Figures 3.17 : Variation du module $E(\theta)$ pour différentes valeurs de G_{12} et comparaison avec les points expérimentaux (pour différentes pressions de confinement)
 a) 0 MPa - b) 5 MPa - c) 10 MPa - d) 20 MPa - e) 30 MPa - f) 40 MPa

	0 (MPa)	5 (MPa)	10 (MPa)	20 (MPa)	30 (MPa)	40 (MPa)
10°	5 000	5 000	4 800	5 000	6 000	
15°	3 500	2 000	< 2 000	2 000	< 2 000	3 000
30°	11 000	7 500	3 000	3 000	3 000	2 000
45°	4 500	3 000	3 000	3 000	> 14 500	3 000
60°	4 500	14 000	7 000	3 000	3 000	6 000
75°	> 14 500	3 000	6 000	7 000	6 000	6 000
80°	> 14 500	> 14 500	> 14 500	> 14 500	> 14 500	> 14 500

Tableau 3.14 : Valeurs approximatives de G_{12} déterminées à partir des courbes $E(\theta)$

3.5 COEFFICIENT D'ANISOTROPIE

Sirieys [74] a caractérisé l'anisotropie des modules élastiques d'une roche isotrope transverse à l'aide de deux paramètres :

$$(3.3) \quad K = \frac{E_1}{E_2} \quad \text{si } K < 1 \text{ la structure est planaire}$$

$K > 1$ la structure est linéaire

$$(3.4) \quad d = \frac{E_1}{G_{12}} - 2(1 + \nu_{12})$$

En ce qui concerne le paramètre d_1 Laqueche [46] a utilisé une formulation simplifiée dérivée de l'équation (3.4) :

$$(3.5) \quad y = \frac{G_{23}}{G_{12}}$$

Les roches schisteuses ont généralement un coefficient K compris entre 0,2 et 0,8, ce qui confirme la planéité de leur structure (37). Les valeurs du rapport $y = (G_{23}/G_{12})$ (3.5) varient entre 1.4 et 3.5 d'où cette variation qui prouve le glissement dans les plans de schistosité.

Les résultats obtenus par certains auteurs sont résumés dans le tableau 3.15.

Auteurs	K	d	ν_{12} / ν_{13}
Pinto 1970	0,782	0,32	1,27
Schiste du Portugal	0,535 0,315	- 0,294 0,155	0,89 2
Pinto 1970 Schiste Grauwacke	0,383 0,213 0,23	4,24 2,52	
Vouille - Habib 1965 Schiste ardoisier	0,47		2,18
Saint-Leu Schiste ardoisier	0,49		2,83

Tableau 3.15 : Valeurs du coefficient d'anisotropie élastique

Le tableau 3.16 montre une comparaison entre les valeurs de ces deux paramètres (K, d) obtenus par F. Homand [37] pour trois blocs différents de schiste et nos résultats sur le même matériau.

Nous constatons qu'il n'y a aucune différence significative entre les deux résultats. Cela prouve la bonne qualité de mesures tant dynamiques que statiques. En outre, il faut rappeler que le paramètre γ (3.5) est très difficile à déterminer à l'aide de nos mesures statiques. Sa grande valeur indique le glissement facile dans les plans de schistosité. En revanche, les valeurs du paramètre K sont très proches et confirment que la structure du schiste est planaire.

Auteurs	K	Y
F. Homand bloc M	0,4	3,48
F. Homand bloc G	0,39	3,42
F. Homand bloc P	0,4	3,65
A. Hammade	0,29	3,62

Tableau 3.16 : Valeurs du coefficient d'anisotropie du schiste

3.6 DETERMINATION DES MODULES PAR L.V.D.T.

Dans ce paragraphe, nous allons essayer d'interpréter les essais triaxiaux à partir des mesures fournies par le capteur de déplacement interne (LVDT) de la machine d'essais. Ceci permet d'obtenir des valeurs pour les modules, même si les jauges ne donnent pas des signaux interprétables. Il faut aussi noter que cette mesure permet la validation des essais réalisés et la détermination des caractéristiques résiduelles du glissement le long de la schistosité à la différence des jauges qui se décolle en général à l'approche de la rupture de l'échantillon.

En comparant les courbes obtenues par jauges et par L.V.D.T. pour un même essai, on peut distinguer les parties élastiques linéaires données par les deux mesures (figure 3.18). La différence entre les deux pentes explique que le L.V.D.T. mesure la déformation de l'ensemble (dispositif d'essai et l'échantillon).

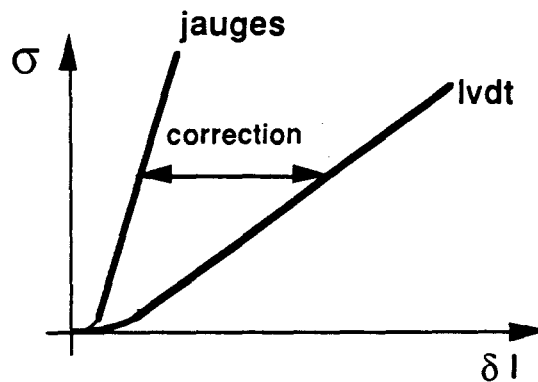


Figure 3.18 : Principe du dépouillement

Cette comparaison nous permet de conclure sur l'origine de l'écart entre les deux méthodes et pour les différents essais considérés (zones linéaires bien définies).

La correction à apporter au L.V.D.T. afin de ne tenir compte que de la déformation de l'échantillon est de $3,5 \times 10^{-3}$ mm/MPa pour un échantillon de 37 mm de diamètre et pour le montage utilisé. Cette correction a été effectuée pour toutes les orientations et pour tous les essais triaxiaux, sauf pour les essais de compression simple (Annexe C).

3.6.1 Modules E_1 et E_2

L'ensemble des résultats obtenus par jauges et par L.V.D.T. pour le module E_1 ($\theta = 90^\circ$) et sa variation en fonction de la pression de confinement est donné dans le tableau 3.17 et la figure 3.19 [31]. On peut constater que les variations sont du même type à la dispersion près.

N° Essai	E_1 (Jauge)	E_1 (LVDT)
90/0/1	31 200	
90/2,5/1	37 400	39 600
90/05/1	37 400	34 098
90/7,5/1	41 200	31 140
90/10/1	38 100	47 950
90/20/1	41 350	37 410
90/30/1	42 200	37 370
90/40/1	42 700	33 016

Tableau 3.17 : Valeurs du module E_1 obtenues par jauges et par LVDT

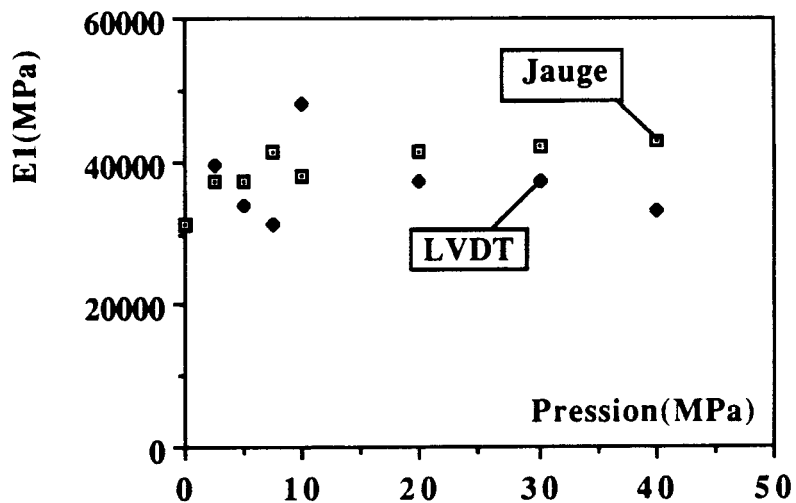


Figure 3.19 : Variation de E_1 en fonction de la pression

Les valeurs du module E_2 ($\theta = 0^\circ$) obtenues par les deux méthodes, et la variation de celui-ci en fonction de la pression de confinement sont données dans le tableau 3.18 et la figure 3.20.

N° Essai	E_2 (Jauge)	E_2 (LVDT)
00/0/1	117 500	
0/05/1	123 000	81 411
0/10/1	181 000	176 500
0/10/2	114 000	69 176
0/20/1	153 000	189 000
0/20/2	120 000	156 370
0/30/1	120 000	143 500
0/40/1	620 000	220 000
0/40/2	118 000	117 670

Tableau 3.18 : Valeurs du module E_2 obtenues par jauges et par LVDT

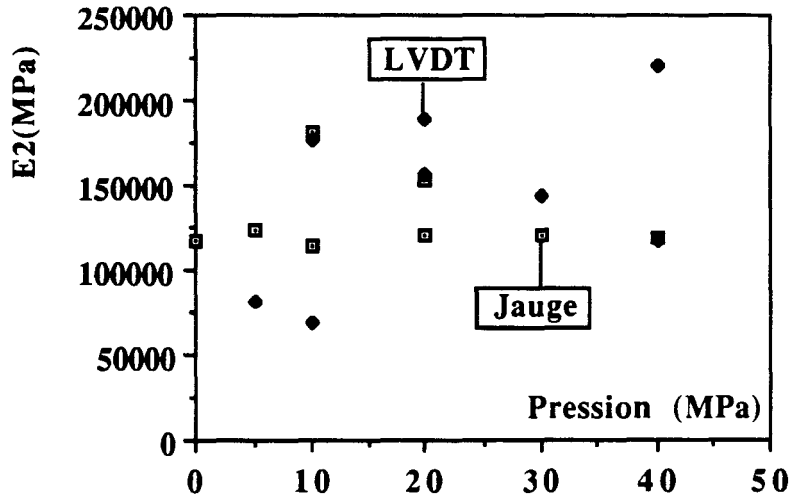


Figure 3.20 : Variation de E_2 en fonction de la pression

L'écart observé entre les valeurs de deux méthodes est très important. Cela peut être dû au fait que la correction à apporter dans le cas de E_2 est importante par rapport à la correction précédente. Une petite erreur peut ainsi induire une dispersion considérable sur les valeurs des modules. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser un capteur L.V.D.T. entre les deux plateaux, afin de réduire la correction.

3.6.2 Modules E_{θ} et G_{12}

Les valeurs des modules $E(\theta)$ déterminées par L.V.D.T. (tableau 3.19) sont pratiquement plus faibles que celles obtenues par jauges (tableau 3.12), ce qui justifie une correction faible par rapport à la mesure L.V.D.T. Il faut signaler que les courbes obtenues par L.V.D.T. présentent une partie linéaire importante à partir de laquelle on détermine E_{θ} , ce n'est pas le cas pour les courbes obtenues par jauges, car le déclenchement des plans se produit à une charge très faible sans avoir plus d'informations sur l'état de l'échantillon.

	5 (MPa)	10 (MPa)	20 (MPa)	30 (MPa)	40 (MPa)
10°	13 500/18 200	6 700	17 500/14 500	66 000	
15°	25 488	10 450	35 787	14 514	17 479
30°		11 358	7 627	11 359	9 858
45°	4 333	7 750	10 800	5 333	12 307
60°	11 412	12 656		18 409	20 900
75°	18 245	36 860/26 600	26 700/32 500	32 000	26 800
80°	22 000	43 800	60 300/48 000	70 000	7 400

Tableau 3.19 : Valeurs du module $E(\theta)$ obtenues par L.V.D.T.

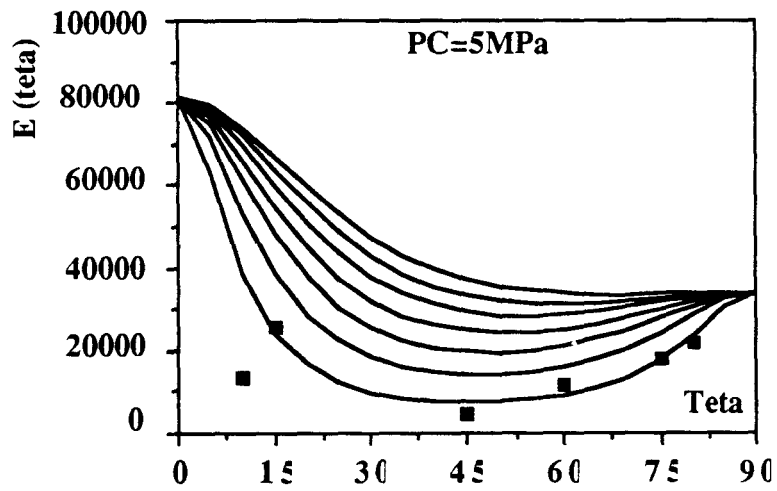
Pour les mêmes raisons que celles citées dans la précédente étude, nous allons utiliser la même méthode que celle décrite au paragraphe 3.4 pour déterminer les valeurs de G_{12} à partir du L.V.D.T. Les valeurs de $E(\theta)$ précédemment déterminées étant faibles, il en résulte que celles du module G_{12} (tableau 3.20) le sont aussi, comparativement aux valeurs obtenues à l'aide des jauges (tableau 3.16).

Nous étudions la variation de E_{θ} en fonction de (θ) en faisant varier G_{12} de la même manière que précédemment avec un pas de 2 000 MPa, et pour différentes valeurs de la pression de confinement (figure 3.21). On constate que les valeurs de G_{12} obtenues par LVDT sont comparables avec celles obtenues par jauges. Cela prouve la qualité de la validation par LVDT pour certains essais.

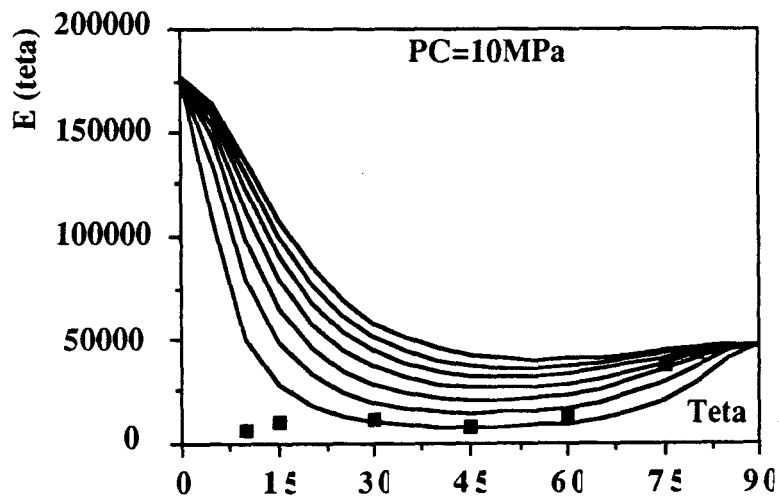
D'une manière générale, on peut constater que les valeurs obtenues par L.V.D.T. sont en bonne concordance avec les valeurs obtenues par jauges, en particulier pour les essais à $\theta = 90^{\circ}$ où on observe les variations du E_1 en fonction de la pression de confinement. Il faut noter que les mesures données par L.V.D.T. intègrent un comportement avec les glissements prématurés, tandis que les jauges mesurent les déformations locales. Elles permettent aussi la validation des essais réalisés par jauges, et ainsi de déterminer des caractéristiques résiduelles du glissement le long des plans à la différence des jauges qui se décolent en général à la rupture.

Pression Orientation	5 (MPa)	10 (MPa)	20 (MPa)	30 (MPa)	40 (MPa)
10°	< 2000	> 2000	< 2000	3500	
15°	2000	< 2000	3000	< 2000	< 2000
30°		2000	< 2000	> 2000	2000
45°	< 2000	2000	3000	< 2000	2700
60°	> 2000	> 2000		5000	6000
75°	2000	6000	4000	7000	6000
80°	2000	7500	> 14500	> 14500	> 14500

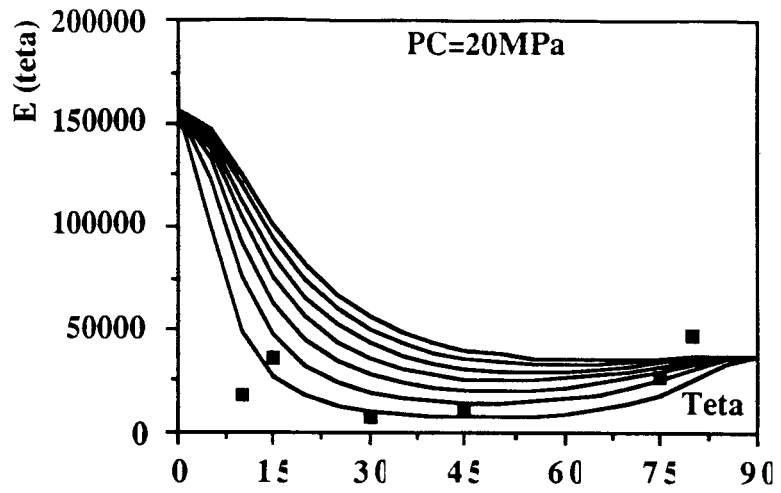
Tableau 3.20 : Valeurs approximatives de G_{12} déterminées à partir des courbes $E(\theta)$ de LVDT



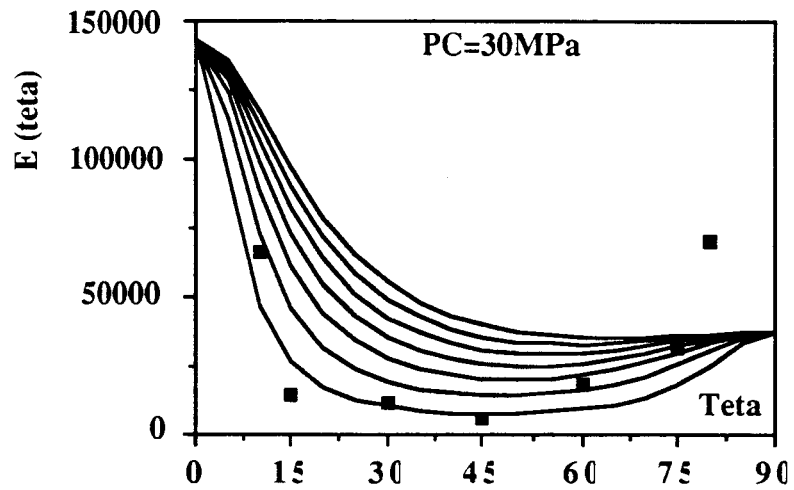
(a)



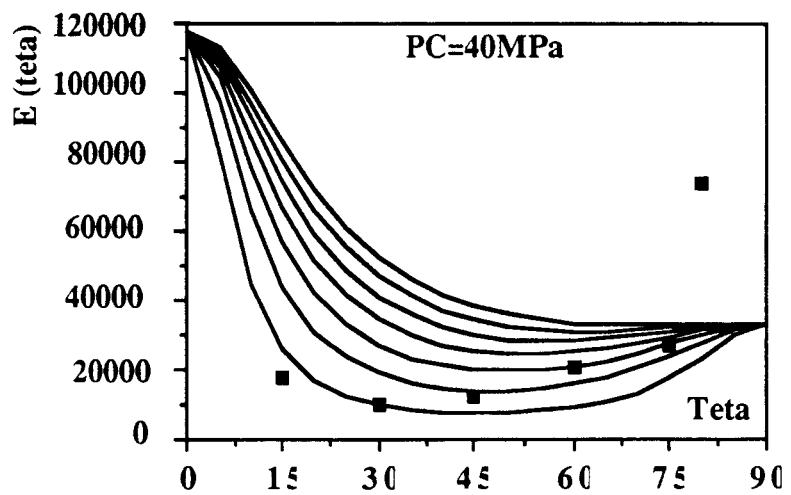
(b)



(c)



(d)



(e)

Figures 3.21 : Variation du module $E(\theta)$ pour différentes valeurs de G_{12} et comparaison avec les points expérimentaux déterminés à partir des courbes LVDT (pour différentes pressions de confinement)

a) 5 MPa - b) 10 MPa - c) 20 MPa - d) 30 MPa - e) 40 MPa

3.7 CONCLUSION

L'étude des caractéristiques mécaniques du schiste ardoisier nous a permis de mettre en lumière un certain nombre de points fondamentaux.

Le module E_1 pour les deux prélèvements est fortement influencé par la pression de confinement. Quant au module E_2 , il semble indépendant de la pression pour les deux prélèvements, même si, dans certains essais, on a observé une augmentation globale des caractéristiques mécaniques induites par l'existence d'hétérogénéités (lentilles de pyrite) dans la structure de l'échantillon.

L'étude d'un deuxième prélèvement situé dans le même massif, nous a donné des résultats proches des résultats précédents, ce qui montre une bonne homogénéité du massif.

Compte tenu des incertitudes, il apparaît que les valeurs obtenues pour les modules (E_1 et E_2) sont comparables avec celles d'autres auteurs (Morel E.[56], Homand F. [37]), ainsi que leur variation avec la pression de confinement.

Par ailleurs, il semble que le coefficient ν_{12} décroît avec la pression de confinement, de même que pour le coefficient ν_{21} . En revanche, le coefficient ν_{23} croît légèrement avec la pression.

CHAPITRE IV

Modélisation du comportement à la rupture

L'étude de la stabilité des ouvrages dans les milieux rocheux nécessite la connaissance du comportement à la rupture du matériau. Le comportement des roches dépend généralement de la structure et de la sollicitation appliquée à la roche.

Des expériences simples effectuées par Hoek et Bieniawski [12], [13] ont permis de schématiser l'apparition du phénomène de développement de la fissuration en milieu isotrope. Il n'est pas question ici d'en donner tous les arguments. Nous rappelons simplement que la rupture fragile relève d'un processus de microfissuration qui se développe perpendiculairement à la plus petite contrainte principale.

De nombreux auteurs [15], [75], [60] ont décrit la déformation des roches fragiles à structure isotrope et ont distingué quatre phases dans l'évolution du phénomène précédant la rupture. D'autres ont présenté des courbes de déformation de roches à comportement élasto-plastique [28], [49]. Les courbes contraintes-déformations longitudinales (ϵ_l) et transversales (ϵ_t) (figure 4.1) montrent les quatre phases distinctes :

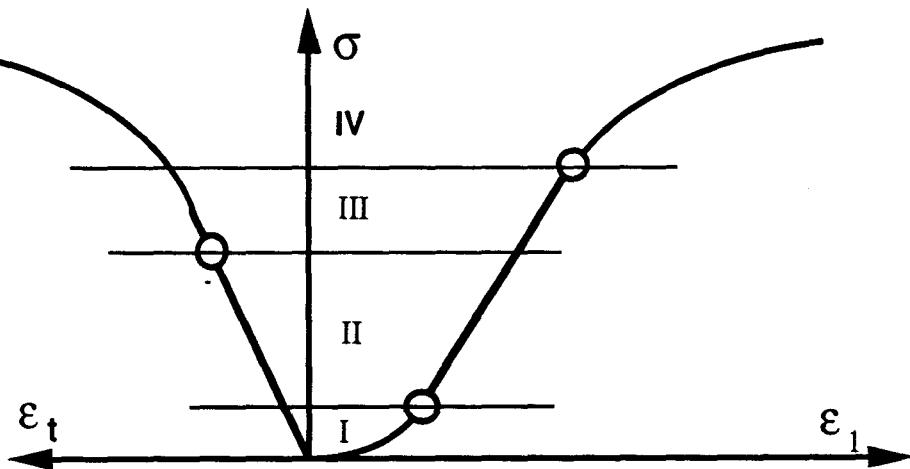


Figure 4.1 : Courbe contrainte-déformation longitudinale et transversale d'un matériau fragile

* **zone 1 :**

La courbe contraintes-déformations longitudinales présente une concavité tournée vers le haut. Il s'agit d'une zone de fermeture des microfissures sous l'effet de déviateur $\sigma_1 - \sigma_3$.

* **zone 2 :**

Les deux courbes (déformations longitudinales et transversales) sont linéaires. Cette phase est limitée par le seuil de microfissuration au-delà duquel toute croissance de l'effort se traduit par la propagation des fissures pré-existantes et / ou la formation de fissures nouvelles dans le matériau. Le comportement dans cette phase est élastique.

* **zone 3** :

Dans cette zone les courbes contraintes-déformations longitudinales restent toujours linéaires, tandis que les déformations transversales perdent leur linéarité. Dans ce cas, la naissance des microfissures parallèles à l'axe de chargement induit une dilatance de l'échantillon.

* **zone 4** :

On observe dans cette zone une augmentation rapide des déformations. Le développement intense de la microfissuration peut conduire dans cette phase à une localisation des déformations.

Pour traduire ces limites à la rupture, de nombreux critères peuvent être utilisés. Notons que celui de Lade [44], [45] est particulièrement adapté à de nombreuses roches et matériaux fragiles.

Les roches à anisotropie planaire discontinue (schiste, argilite) sont caractérisées par l'orientation, parallèlement à un ou plusieurs plans, de certains groupes de minéraux et des fissures principales disposées dans les plans de discontinuité.

L'originalité des phénomènes de rupture fragile des roches à anisotropie planaire réside dans le fait qu'elles présentent dans de nombreux cas de sollicitations, un développement de la fissuration conduisant très rapidement à la rupture (rupture par glissement ou par extension).

Plusieurs études généralisent aux milieux anisotropes les critères utilisés pour des milieux isotropes particuliers. Ainsi, pour les roches, Jaeger [42] propose deux généralisations du critère de Coulomb, l'une s'appliquant aux milieux constitués d'une matrice isotrope entrecoupée par un seul ou plusieurs plans de faiblesse parallèles, l'autre décrivant le comportement d'un matériau finement stratifié dont la cohésion varie continuellement avec l'orientation.

D'autres auteurs comme Barron [8], Walsh et Brace [76] proposent des critères d'initiation et de propagation de fissures basés sur la théorie de Griffith [27] et sur la modification apportée par Maclintok et Walsh [54]. En accord avec Hoek [34], ils supposent l'existence de deux systèmes de microfissures, l'un orienté parallèlement aux plans de faiblesse des roches stratifiées ou clivées, l'autre constitué de fissures orientées aléatoirement dans la matrice ayant un comportement isotrope en rupture.

Nous pouvons citer également les développements de critères appropriés [33], [14], [58] pour modéliser le comportement des roches anisotropes.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de trouver un critère de rupture pour décrire le comportement à la rupture d'un matériau fortement anisotrope et à comportement fragile (schiste).

4.1 VARIATION DE LA LIMITE DE RUPTURE

Ces dernières années, de nombreux résultats expérimentaux sur des roches schisteuses ou / et sédimentaires (orthotrope de révolution) ont été publiés. Ces études portent sur l'évolution de la résistance à la rupture en fonction de l'orientation de la schistosité par rapport à l'axe de chargement et de la pression de confinement [22], [34], [17], [53], [5], [2].

Dans ce paragraphe, nous allons étudier la variation de la limite de rupture, en fonction de l'orientation (θ) et de la pression, d'un matériau isotrope transversal (schiste) dont le plan (\vec{S}_2, \vec{S}_3) correspond au plan de faiblesse (isotrope).

Les limites de rupture ont été déterminées pour chaque orientation et pour chaque pression de confinement. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau (4.1). La figure 4.2 montre l'évolution de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ à la rupture en fonction de l'orientation (θ) des plans de schistosité et pour différentes pressions.

Pression Orientation	$P_c = 0$ MPa	$P_c = 5$ MPa	$P_c = 10$ MPa	$P_c = 20$ MPa	$P_c = 30$ MPa	$P_c = 40$ MPa
0°	74,5/120	183/109	175/110	245/193,7/237	255/225	330/305/254
10°	16,7	47/33,5/58	60	83/70,5	89/100	120
15°	25	65	53	70	83	78
30°	7,8/18/12	13/25	18/29,5	35	44	48
45°	10/12	18	13,5/20	40/33	31	42
60°	37	33	39/21/22,5	23	57,5	57,5
75°	70	90	136	137,5/131,6	110	137
80°	134	90	120	153,5/143,5	165	156
90°	150/148	250/226	230	255/253	329,4/290	309/319

Tableau 4.1 : Valeurs de la limite de rupture $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en fonction de l'orientation (θ) pour différentes pressions de confinement

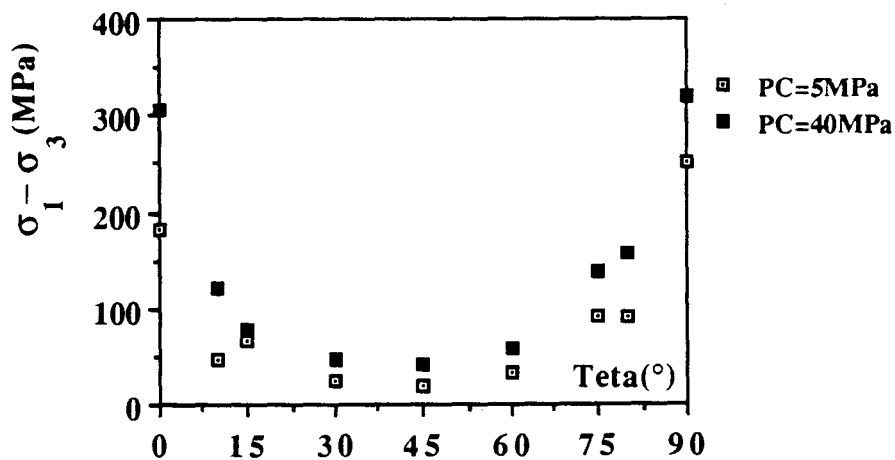


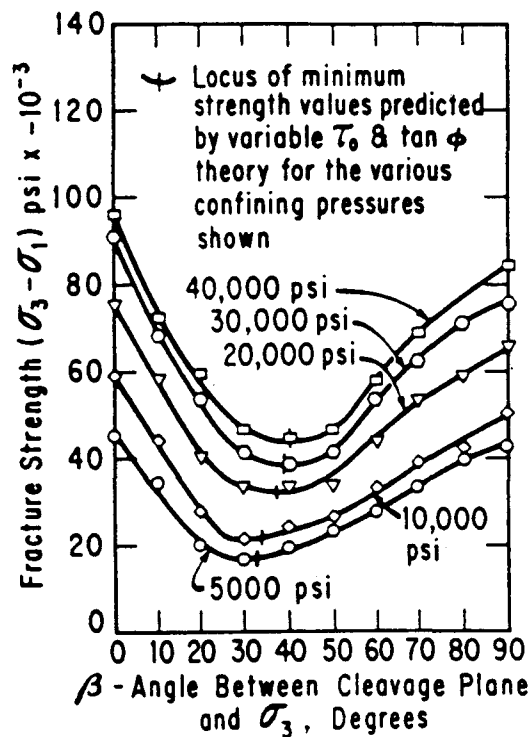
Figure 4.2 : Variation de la limite de rupture $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en fonction de θ pour différentes pressions

On remarque qu'aux orientations privilégiées ($\theta = 0^\circ$ et 90°), la limite de rupture est beaucoup plus élevée que pour les autres orientations, et ce quelque soit la pression de confinement. Le maximum de résistance obtenu dans nos essais correspond à $\theta = 90^\circ$. Ce maximum a été obtenu à cette valeur de θ par Mc Lamore [53], [5], [2] ; par contre, il se situerait à $\theta = 0^\circ$ pour Mello [55].

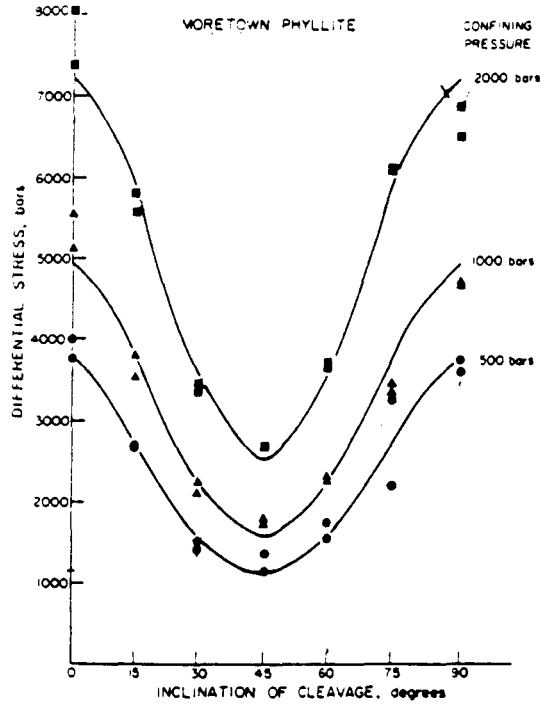
Le minimum est généralement observé pour $30^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$, quelque soit la pression. Les valeurs observées sur le schiste se trouvent aux environs de 40° . Le fait que la limite à la rupture est élevée pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$ peut expliquer par la différence des mécanismes de rupture (en matrice et par glissement).

Nous avons remarqué au chapitre II que le mécanisme de rupture en matrice domine pour les orientations $\theta = 0^\circ$ et 90° , tandis qu'aux autres orientations $\theta = 15^\circ$ et 75° , la rupture se produisait exclusivement par glissement plan sur plan. Cependant, pour les orientations de 10° et 80° , la rupture semble combiner les deux mécanismes (en matrice et par glissement). Ce type de comportement a déjà été observé par de nombreux auteurs (Figures 4.3.a, 4.3.b) [53], [24].

Différentes théories ont été élaborées pour modéliser ce type d'évolution de la limite de rupture en fonction de l'orientation des plans de schistosité d'une part, et en fonction de la pression de confinement d'autre part . Nous pouvons notamment citer [42], [35], [76], [53], [7] et [24]. Globalement, ces théories prédisent les limites de rupture en séparant les deux mécanismes de rupture (en matrice pour $\theta = 0^\circ$ et 90° , et par glissement pour les autres orientations).



(a)



(b)

Figures 4.3 : Variation de la limite de rupture en fonction de l'orientation (θ)
 (a) : d'une ardoise - Mac Lamore (1967)
 (b) : d'une phyllite - Donath (1972)

D'après Hoek (1983) [35], la courbe théorique de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ à la rupture en fonction de l'orientation des plans de faiblesse, a l'allure donnée par la figure (4.4). Si nous regardons bien cette courbe, on remarque que le palier représente la rupture en matrice, tandis que la courbe incurvée représente le glissement plan sur plan.

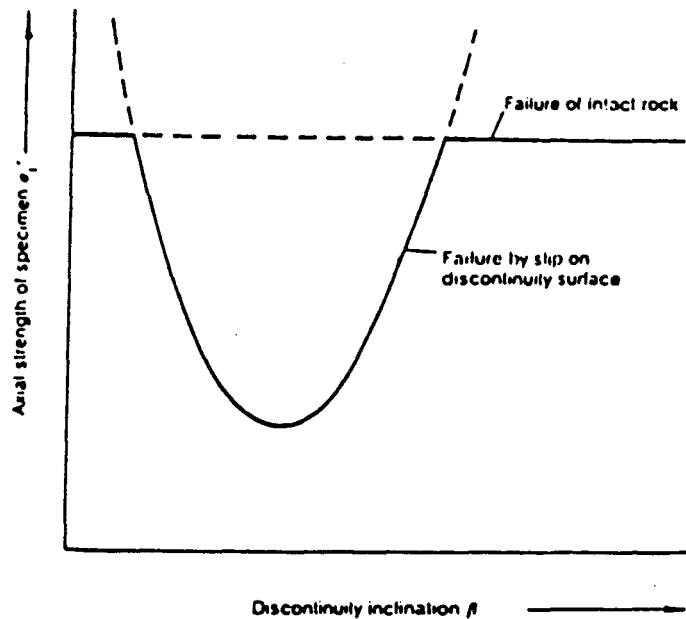


Figure 4.4 : Allure théorique de la courbe $\sigma_1 - \sigma_3$

Comparons nos résultats expérimentaux obtenus figure 4.2 avec la courbe théorique de Hoek [35]. On observe que le palier ne semble jamais atteint expérimentalement. En revanche, la partie incurvée des courbes expérimentales est très aplatie par rapport à la courbe théorique.

Les courbes varient continuellement en passant par un minimum se situant entre 30° et 45° [24], [53], quelque soit la pression. Ce phénomène peut s'expliquer par la très faible cohésion entre les plans de schistosité et par le glissement qui se produit à une charge très faible. Nous remarquons aussi que la limite de rupture augmente plus rapidement avec la pression pour $\theta = 90^\circ$ que pour $\theta = 0^\circ$, alors que pour les autres orientations, elle augmente très légèrement avec la pression de confinement.

4.2 CONDITION DE RUPTURE (GLISSEMENT)

Dans ce paragraphe, nous allons utiliser deux critères (Coulomb et Barton) pour décrire le comportement d'un matériau anisotrope transverse (schiste).

Nous allons rappeler brièvement les conditions de stabilité le long d'un plan de faiblesse dont le comportement est régi par une loi de frottement de type Coulomb.

$$(4.1) \quad |\tau| = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$$

avec : $|\tau|$ module du vecteur de cisaillement dans le plan de faiblesse
 σ est la contrainte normale appliquée à ce plan.

Le but est de déterminer les paramètres de rupture dans les essais triaxiaux, compte tenu de la structure du matériau (isotrope transverse), le problème est ramené à un problème plan. On suppose que les contraintes appliquées sont principales dans le repère $(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3)$, et orientées par rapport au plan de discontinuité selon la figure 4.5. L'action de la partie (2) sur la partie (1), peut être décrite dans le plan de Mohr par la figure 4.6. Nous aurons en supposant $\sigma_1 \geq \sigma_3$ les relations suivantes :

$$(4.2) \quad \sigma_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta = \sigma_m + \tau_m \cos 2\theta$$

$$|\tau| = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta = \tau_m \sin 2\theta$$

avec :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \text{et} \quad \tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Si on introduit la relation (4.2) dans l'équation (4.1), alors la condition de stabilité s'écrit :

$$(4.3) \quad \sigma_1 [\sin (2\theta - \phi) - \sin \phi] - \sigma_3 [\sin (2\theta - \phi) + \sin \phi] < 2c \cos \phi$$

ou encore :

$$(4.4) \quad \sigma_1 \sin \theta \cos (\phi - \theta) - \sigma_3 \cos \theta \sin (\phi - \theta) + c \cos \phi > 0$$

La condition de rupture s'obtiendra en remplaçant les inégalités par des égalités. Dans ce cas, nous trouverons les expressions les plus utilisées pour décrire la rupture :

$$(4.5) \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c + \sigma_3 \operatorname{tg} \phi)}{(1 - \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \theta) \sin 2 \theta}$$

$$(4.6) \quad \sigma_1 = \frac{2 c c_o \operatorname{tg} \phi}{(1 - k) \sin (2 \theta - \phi) \cos e_c \phi - (1 + k)}$$

avec
$$k = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

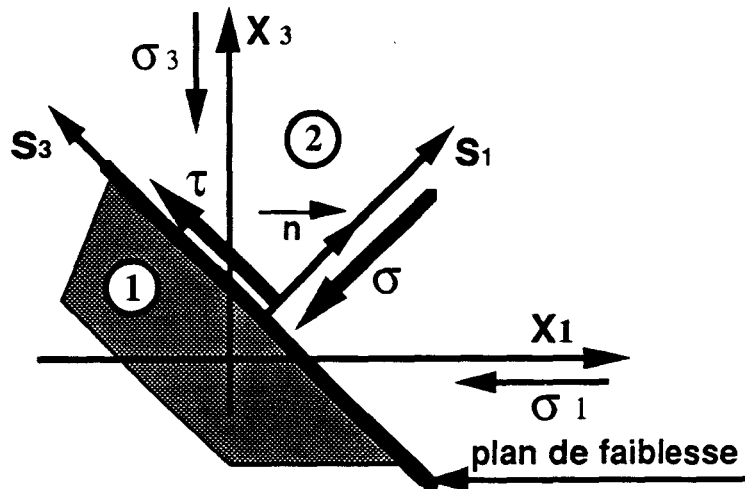


Figure 4.5 : Etude de stabilité en problème plan

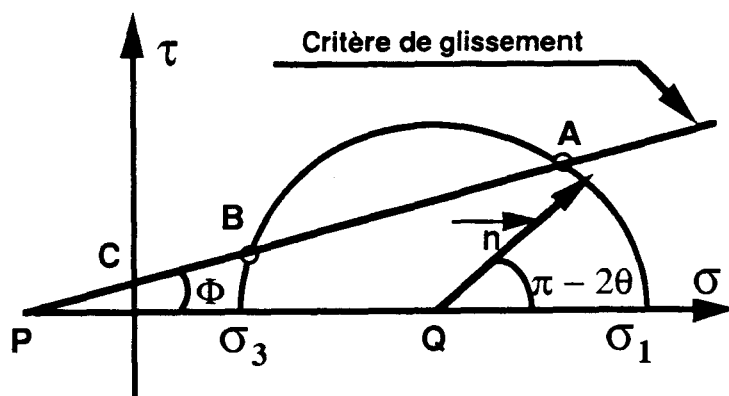


Figure 4.6 : Représentation dans le plan de Mohr de la condition de stabilité

La relation (4.5) donne le déviateur nécessaire pour qu'il y ait glissement lorsque σ_3 et ϕ sont fixés.

4.3 MODELE DE GLISSEMENT

La loi de glissement décrite précédemment au paragraphe (4.2) peut être simplifiée en première approximation de la manière suivante :

$$(4.7) \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c + \sigma_3 \operatorname{tg} \phi)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \phi} - \operatorname{tg} \phi}$$

A partir de cette loi, nous allons déterminer les caractéristiques du glissement plan sur plan à partir d'essais de 10° à 80° .

D'après les théories décrites précédemment, la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (ϕ) varient en fonction de l'orientation des plans de faiblesse.

Pour déterminer ces deux paramètres, nous allons tracer l'enveloppe des cercles de Mohr correspondant aux limites de rupture pour chaque orientation. Un exemple de cercle de Mohr pour $\theta = 45^\circ$ est représenté sur la figure 4.7. Donath [24] signale que la méthode des enveloppes de

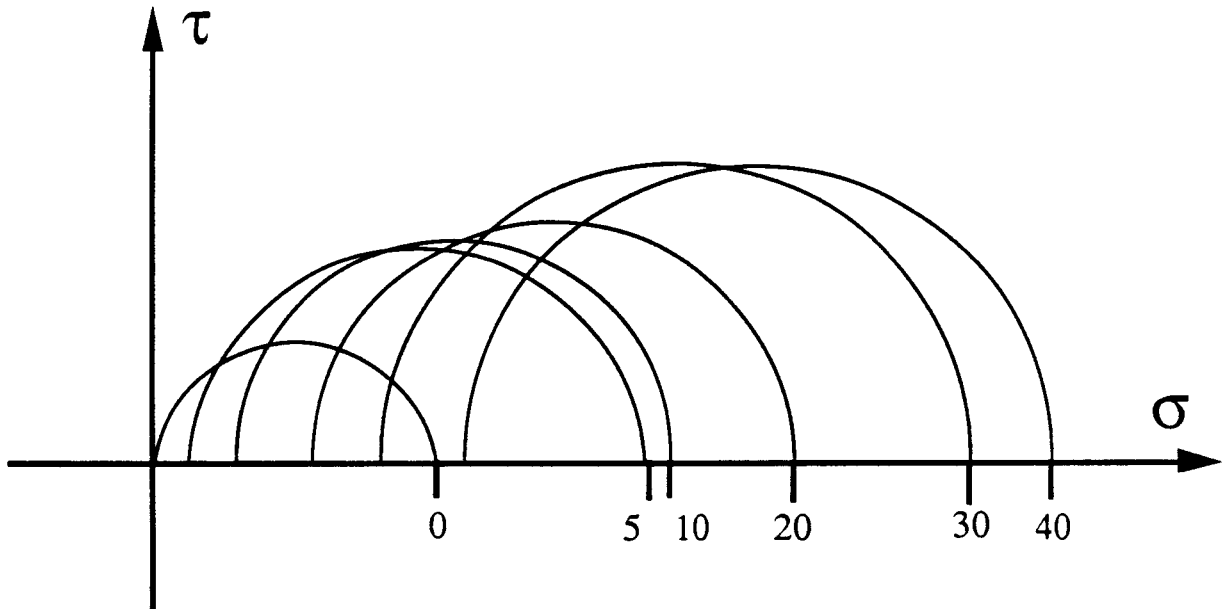


Figure 4.7 : Cercles de Mohr pour l'orientation 45°

cercle de Mohr est imprécise pour définir une cohésion et un angle de frottement interne pour un milieu anisotrope. Pour déterminer ces paramètres, nous allons utiliser la méthode de Raleigh et Paterson (1965) [64] qui consiste à tracer les valeurs de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en fonction de la pression de confinement (σ_3), puis de tracer les droites de régression linéaires pour chaque orientation.

La figure 4.8 donne l'allure des courbes obtenues pour chaque orientation. En identifiant les termes des régressions linéaires et de la relation (4.7), on peut déterminer les caractéristiques du glissement (c et ϕ) pour chaque orientation. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau (4.2).

Orientation	C (MPa)	ϕ (°)	Tag (ϕ)
0°	18,95	47	
10°	12,36	28,62	0,5457
15°	15,16	21,22	0,388
30°	5,2	18,6	0,3365
45°	4,796	15,64	0,28
60°	6,85	18,86	0,3415
75°	25,56	24,895	0,464
80°	28,06	29,02	0,555
90°	39,86	42,06	

Tableau 4.2 : Valeurs de C et ϕ pour les différentes orientations (θ)

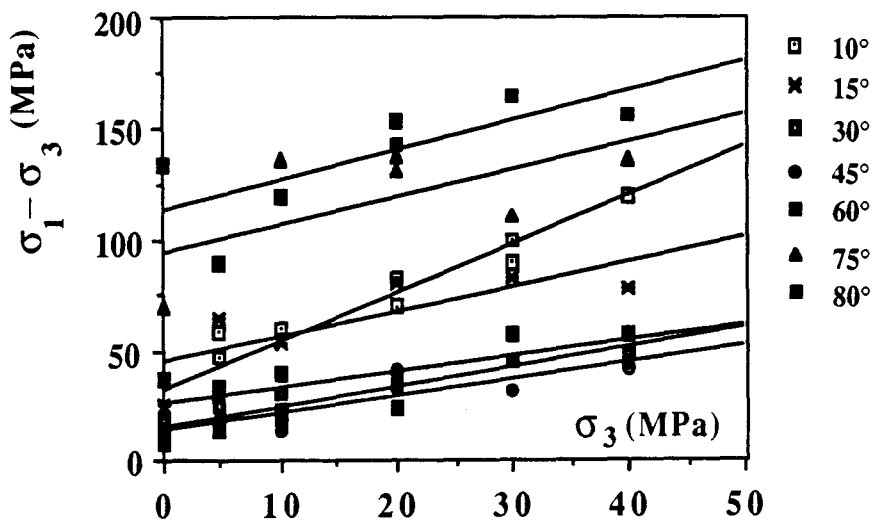


Figure 4.8 : Variation de ($\sigma_1 - \sigma_3$) à la rupture en fonction de la pression (σ_3)

Droites de régression :

$\theta^\circ = 10^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 31,32 + 2,21 \sigma_3$	$R = 0,914$
$\theta^\circ = 15^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 44,31 + 1,135 \sigma_3$	$R = 0,614$
$\theta^\circ = 30^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 13,79 + 0,94 \sigma_3$	$R = 0,873$
$\theta^\circ = 45^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 12,36 + 0,81 \sigma_3$	$R = 0,796$
$\theta^\circ = 60^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 24,81 + 0,74 \sigma_3$	$R = 0,453$
$\theta^\circ = 75^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 93,99 + 1,23 \sigma_3$	$R = 0,414$
$\theta^\circ = 80^\circ$	$\sigma_1 - \sigma_3 = 113,46 + 1,34 \sigma_3$	$R = 0,542$

On reporte sur les figures 4.9 et 4.10 les courbes des variations de la cohésion (c) et de l'angle de frottement interne (ϕ) en fonction de l'orientation.

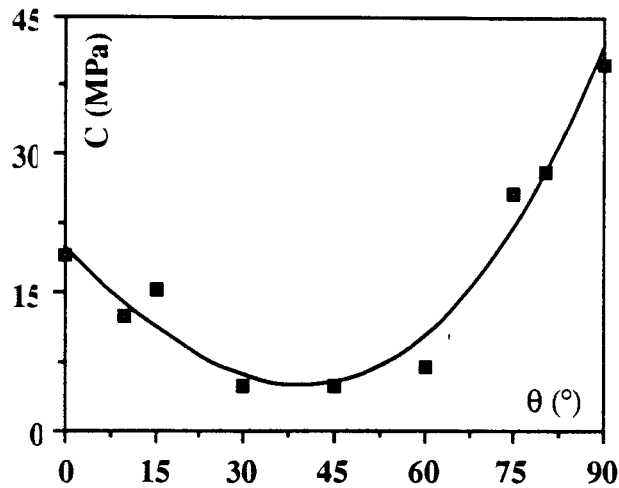


Figure 4.9 : Variation de la cohésion en fonction de l'orientation (θ)

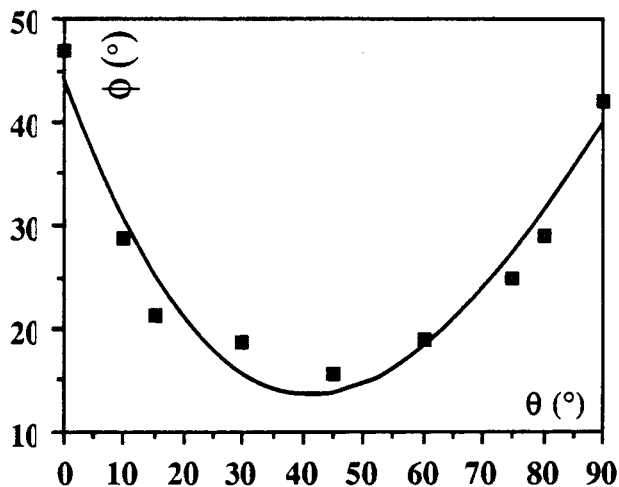


Figure 4.10 : Variation de l'angle de frottement en fonction de l'orientation (θ)

Nous constatons que les courbes de cohésion (c) et l'angle de frottement (ϕ) en fonction de l'orientation (θ) passent par un minimum qui se situe aux environs de 38° . Cela prouve que le glissement très facile pour les orientations 45° . Ce type de résultats a déjà été mis en évidence par d'autres auteurs (Mac Lamosre et Gray) [53].

Les relations proposées (4.8 et 4.9) décrivent la variation de c et ϕ en fonction de l'orientation des plans de schistosité.

$$(4.8) \quad c = A_{1,2} - B_{1,2} [\cos 2 (\beta - \theta)]^n$$

d'où : A_1, B_1 sont deux constantes pour $0^\circ \leq \beta \leq \theta$.

A_2, B_2 sont deux constantes pour $\beta < \theta \leq 90^\circ$.

β : représente l'orientation θ où la valeur de la cohésion est minimale

n : est un paramètre qui dépend du type de l'anisotropie

$n = 1, 3$ pour une anisotropie planaire ((schiste)); et $5, 6$ pour une anisotropie linéaire.

$$(4.9) \quad \text{tg } \phi = c_{1,2} - D_{1,2} [\cos 2 (\xi - \theta)]^m$$

avec :

c_1, D_1 : sont deux constantes pour $0^\circ \leq \xi \leq \theta$.

c_2, D_2 : sont deux constantes pour $\xi < \theta \leq 90^\circ$.

ξ : représente l'orientation θ où la valeur de l'angle de frottement ϕ est minimum.

m : est un paramètre qui dépend lui aussi du type de l'anisotropie

$m = 1,3$ pour une anisotropie planaire ((schiste)); et $5, 6$ pour une anisotropie linéaire.

En déterminant les constantes A_1, B_1, c_1 et D_1 , on trouve alors les relations suivantes :

$$(4.10) \quad c = 14,65 - 14,45 [\cos 2 (45 - \theta)]^3$$

$$(4.11) \quad \text{tg } \phi = 0,69 - 0,46 [\cos 2 (45 - \theta)]^3$$

pour $0^\circ \leq \beta = \xi \leq \theta$ avec $\beta = \xi = 45^\circ$.

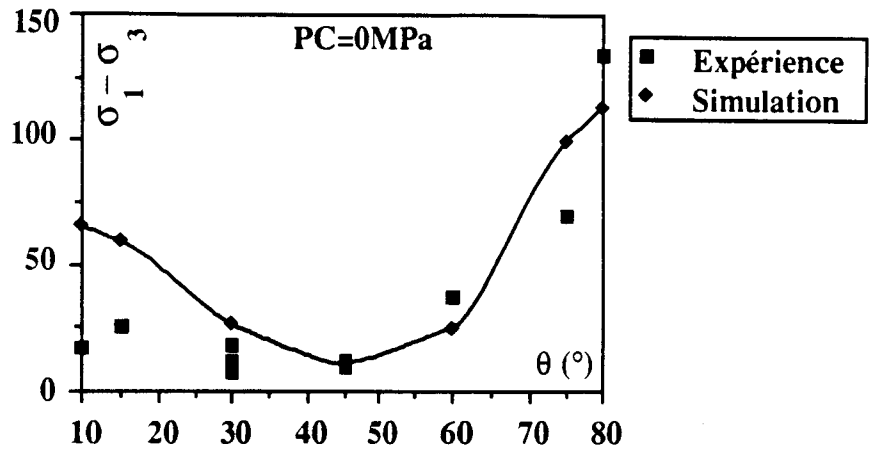
De la même manière, on détermine les constantes A_2, B_2, c_2 et D_2 , on trouve les relations suivantes :

$$(4.12) \quad c = 38,73 - 45,62 [\cos 2 (45 - \theta)]^3$$

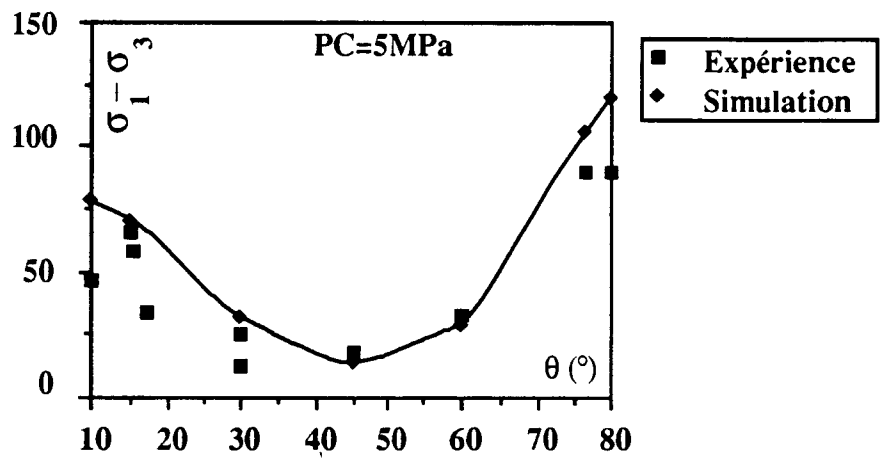
$$(4.13) \quad \text{tg } \phi = 0,44 - 0,213 [\cos 2 (45 - \theta)]^3$$

pour $\xi = \beta < \theta \leq 90^\circ$.

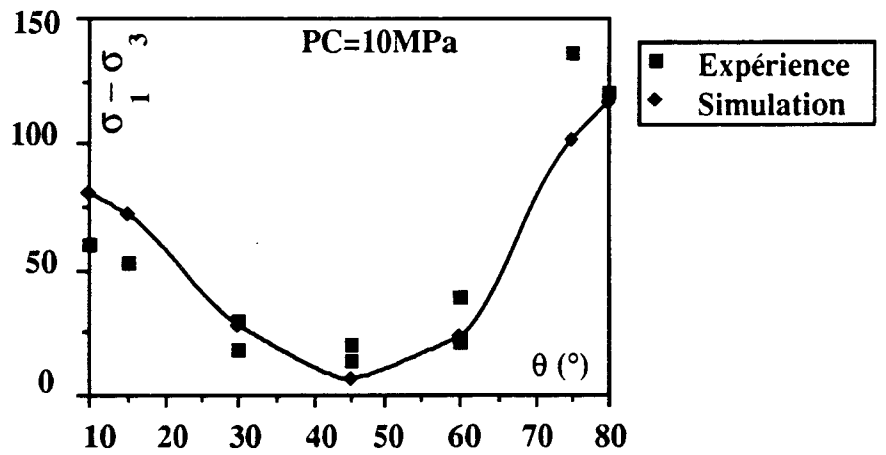
En introduisant les valeurs de la cohésion c et $\text{tg } \phi$ dans l'équation 4.7, on peut alors calculer la contrainte σ_1 à la rupture en fonction de la pression et de l'orientation. La figure 4.11 montre les résultats obtenus. Les courbes obtenues montrent que le modèle décrit bien le comportement du schiste à la rupture, en particulier la rupture par glissement plan sur plan, et ceci pour toutes les pressions de confinement. Elles confirment que la résistance limite est minimale pour $\theta \equiv 45^\circ$, quelque soit le confinement. En revanche pour les orientations 10° et 80° , on remarque une différence entre les deux résultats qui peut s'expliquer par la différence de mécanisme de rupture pour ces orientations.



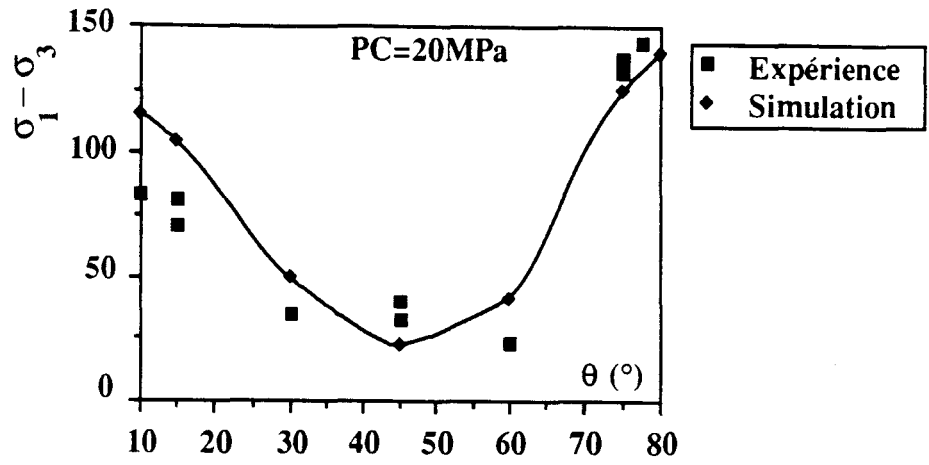
(a)



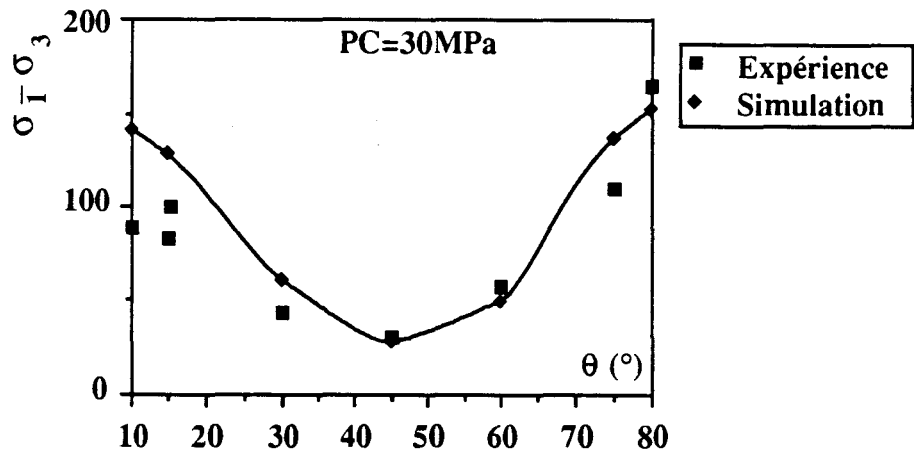
(b)



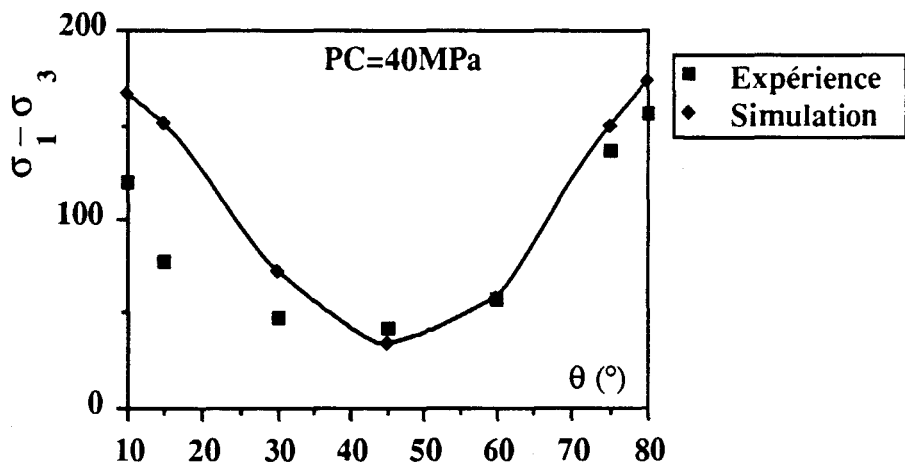
(c)



(d)



(e)



(f)

Figures 4.11 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par le modèle pour différentes pressions de confinement

4.4 MODELE DE BARTON

Des nombreuses lois empiriques ont été développées pour modéliser le comportement d'un matériau possédant un plan de discontinuité (joint) à la rupture par glissement. Nous citons Paton (1966) [59], Brown (1970) [16] et Barton (1976) [9], [10], [11]. Nous allons utiliser le modèle de Barton pour décrire le comportement du schiste.

4.4.1 Présentation du modèle

Après de nombreuses expériences sur des joints de natures diverses, Barton propose le modèle suivant :

$$(4.16) \quad \tau = \sigma_n \tan \left[20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right) + 30^\circ \right]$$

avec : σ_c : contrainte de rupture en compression simple
 σ_n : contrainte normale appliquée

Barton généralise alors cette relation en faisant les remarques suivantes :

- Il a remplacé le coefficient 30° (particulier à un matériau) par le coefficient ϕ intersèque au matériau qui sera testé,
- Barton a testé sa loi sur un joint fabriqué artificiellement et considéré très rugueux. Il a montré que le coefficient 20 est représentatif de ce type de joint, mais est trop élevé pour des joints lisses. Il préconise alors l'utilisation de la variable JRC pour caractériser la rugosité des joints. Il remarque par ailleurs que ce coefficient (JRC) est égal à 0 pour les joints lisses et à 20 pour les joints très rugueux.

Enfin la mise en place du critère (4.14) a été réalisée sur un matériau sec. Or, la présence d'eau au niveau du joint entraîne un comportement différent. Barton préconise de remplacer σ_c par un coefficient JCS (Joint Compressiv Characteristic) qui exprime la résistance du joint. Ces remarques amènent la loi de rupture suivante :

$$(4.17) \quad \tau = \sigma_n \tan \left[\text{JRC} \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma} \right) + \phi \right]$$

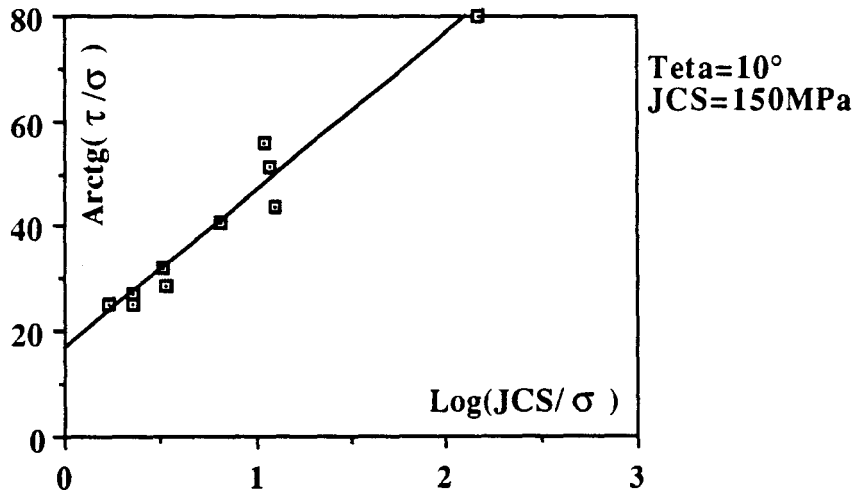
En définitive, la loi de Barton s'exprime en fonction de trois paramètres JRC, ϕ et JCS. Le paramètre JCS est facile à déterminer expérimentalement ; il est égal à la résistance à la compression simple pour $\theta = 90^\circ$. Il est égal à 150 MPa pour nos essais.

Il nous reste donc à déterminer les deux autres paramètres JRC et ϕ . La relation 4.15 peut s'écrire sous la forme suivante :

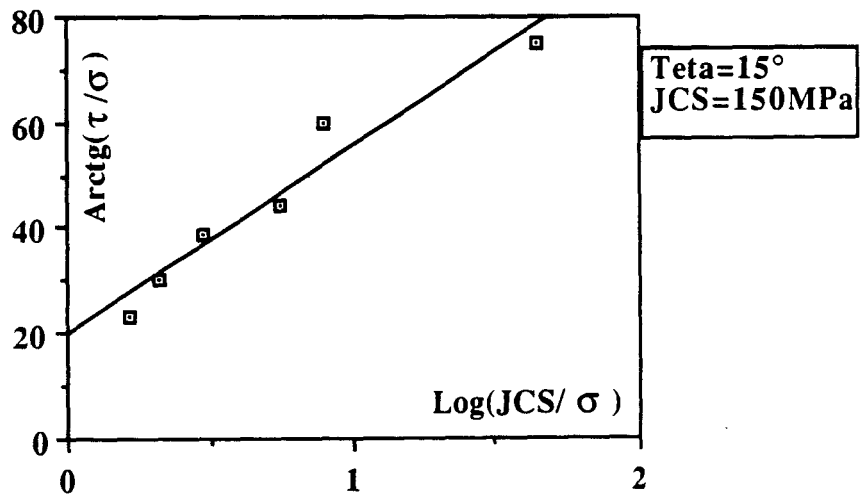
$$(4.18) \quad \text{artan} \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right) = \text{JRC} \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma} \right) + \phi$$

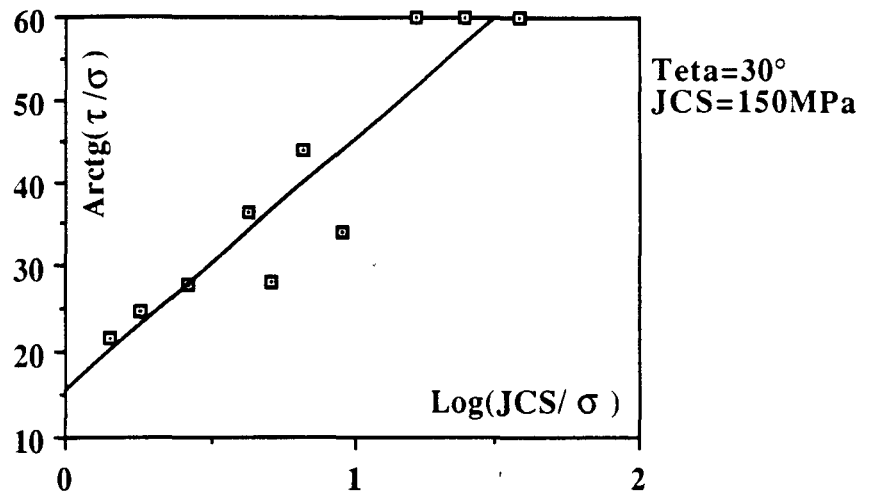
avec
$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad \text{et} \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

Nous remarquons que les paramètres JRC et ϕ sont les coefficients d'une droite (équation 4.16) par la méthode des moindres carrés pour chaque orientation (figures 4.12). Les résultats obtenus pour chaque orientation sont donnés dans le tableau 4.3.

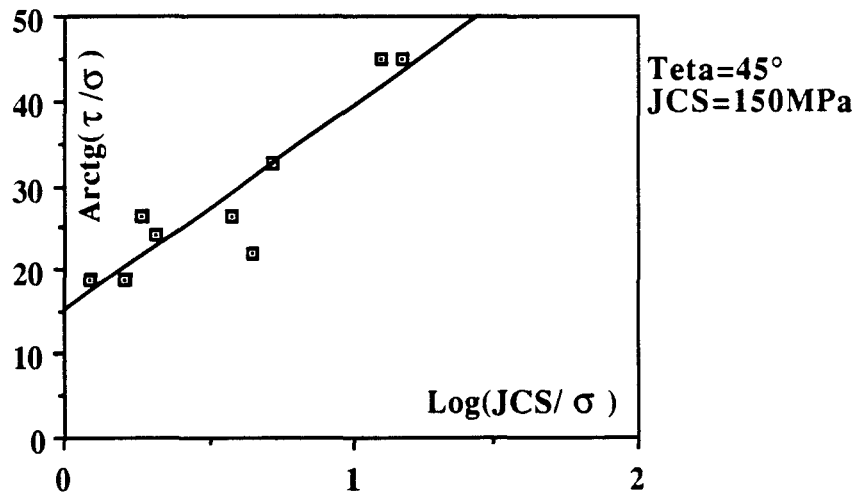


(a)

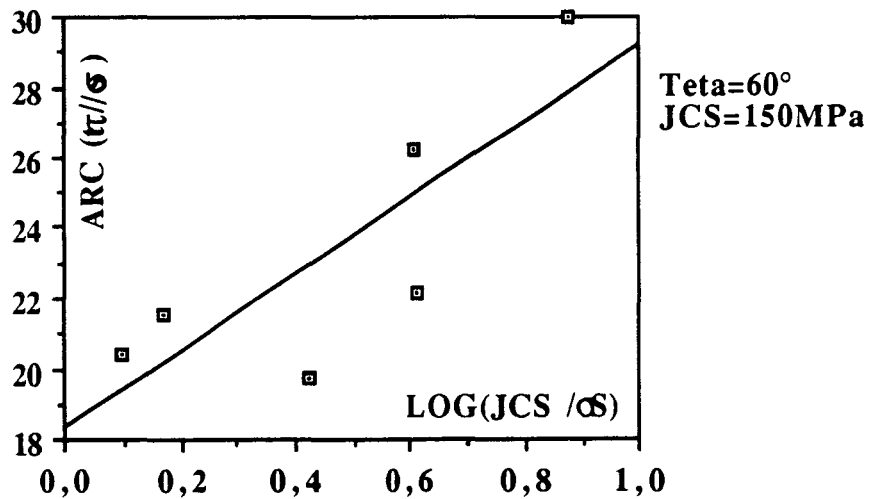




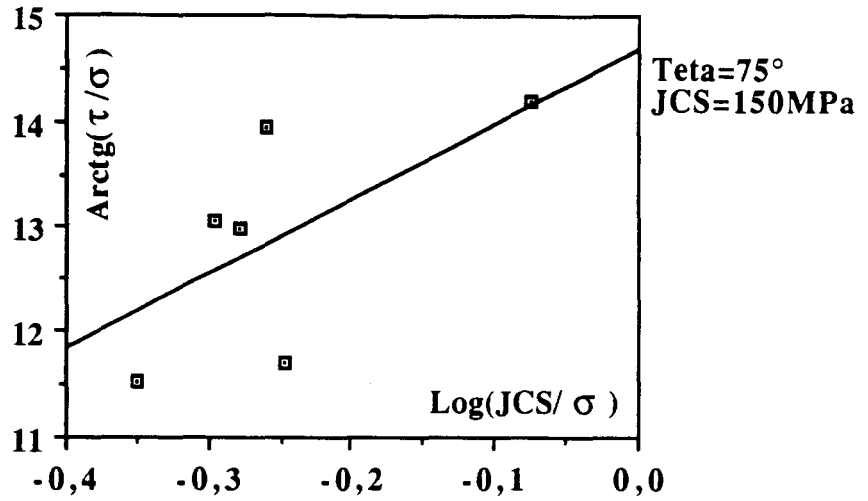
(c)



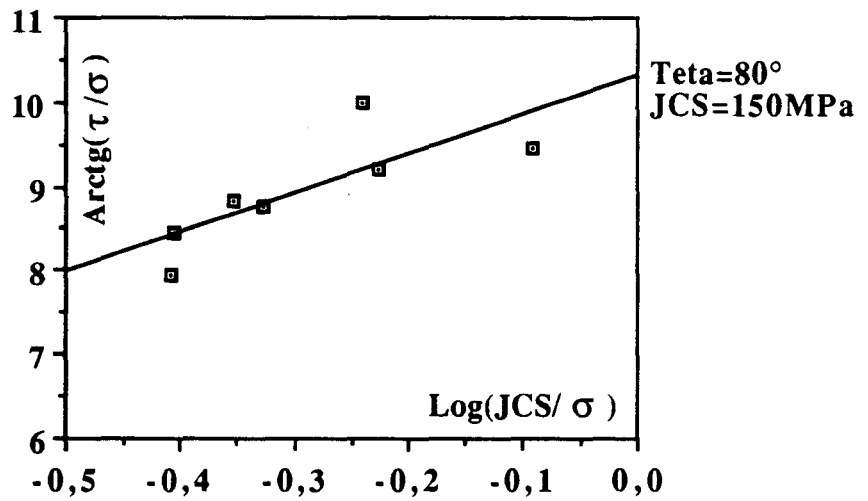
(d)



(e)



(f)



(g)

Figures 4.12 : Détermination des paramètres du modèle de Barton (JRC et ϕ) pour chaque orientation

θ (°)	JCS	JRC	ϕ (°)
10°	150	29,84	8,474
15°	150	35,733	9,89
30°	150	29,87	7,22
45°	150	23,99	8,73
60°	150	11,97	14,42
75°	150	7,07	12,75
80°	150	3,981	8,9

Tableau 4.3 : Valeurs des paramètres de Barton JRC, JCS et ϕ pour chaque orientation (θ)

Nous constatons que les valeurs de JRC sont supérieures à 20 pour les orientations $\theta = 30^\circ$ et 45° , ce qui est contraire à la condition de rugosité de joints, et en particulier pour ces deux orientations où le glissement se produit très rapidement et à une charge très faible (joints lisses). De plus, les valeurs de JRC pour les orientations $\theta = 75^\circ$ et 80° semblent très faibles caractérisant un glissement de plans quasiment lisses, ce qui n'est absolument pas le cas au regard des valeurs de rupture. Cela peut s'expliquer par le fait que le glissement ne caractérise pas tout seul la rupture du matériau.

Les figures 4.13 et 4.14 donnent respectivement les variations de ϕ et JRC en fonction de l'orientation de schistosité.

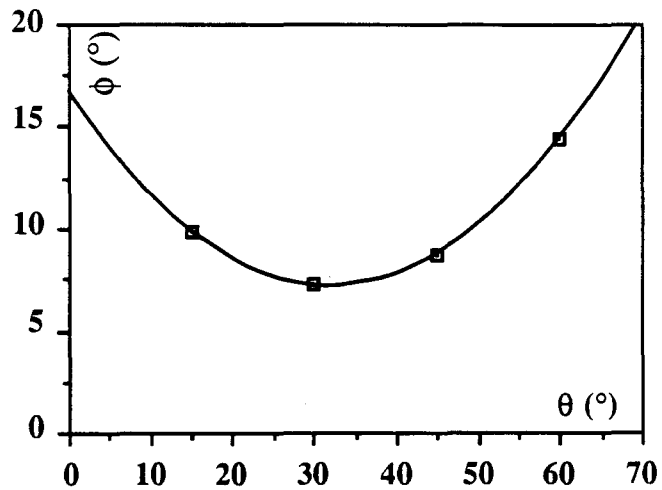


Figure 4.13 : Variation de ϕ en fonction de l'orientation (θ)

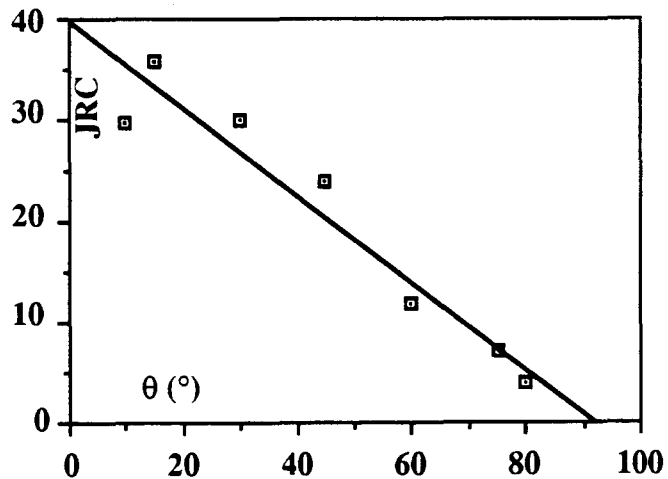


Figure 4.14 : Variation de JRC en fonction de l'orientation (θ)

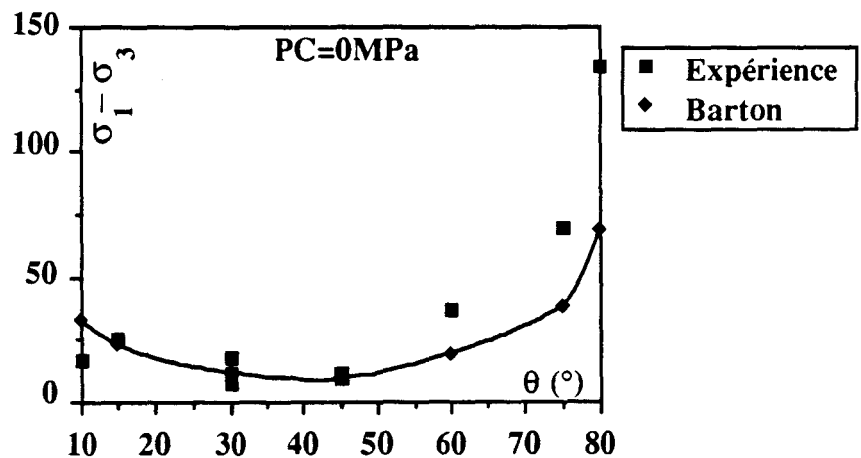
Notons que pour les orientations $\theta = 0^\circ$ et 90° le critère de Barton ne peut pas être appliqué car la charge est appliquée perpendiculairement aux plans de schistosité où le cisaillement est pratiquement nul.

Pour les deux paramètres JRC et ϕ , nous proposons les approximations suivantes :

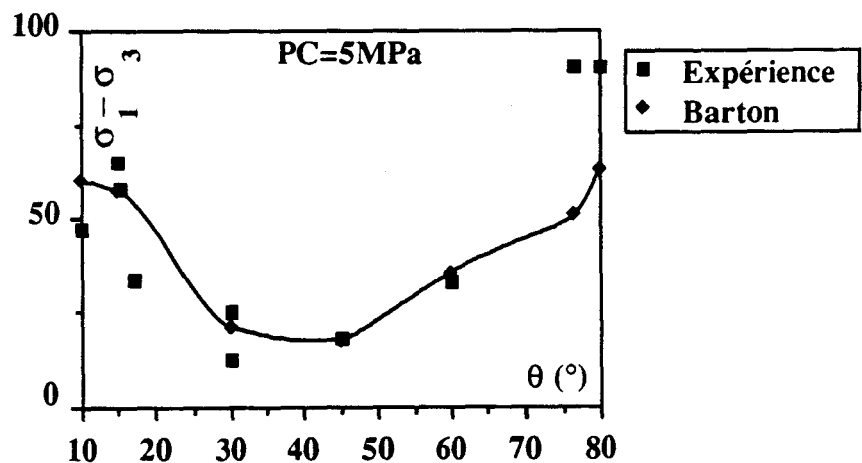
$$(4.19) \quad JRC = 39,82 - 0,423 \theta \quad R^2 = 0,931$$

$$(4.20) \quad \phi = 16,74 - 0,596 \theta + 0,0928 \theta^2 \quad R^2 = 0,545$$

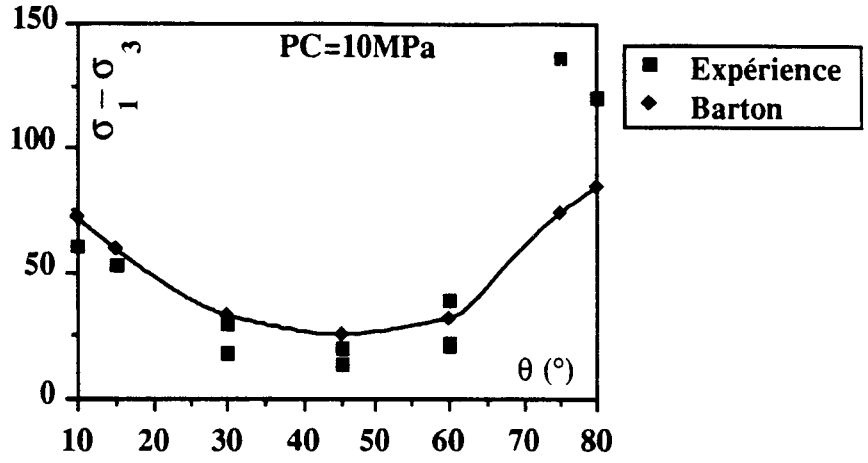
A partir de ces deux relations, nous pouvons calculer la valeur de JRC et ϕ pour chaque orientation. En remplaçant JRC et ϕ dans la relation 4.17, nous pouvons calculer numériquement les valeurs de σ_1 à la rupture. La figure 4.16 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par le critère de Barton en fonction de la pression et de l'orientation de plans de schistosité.



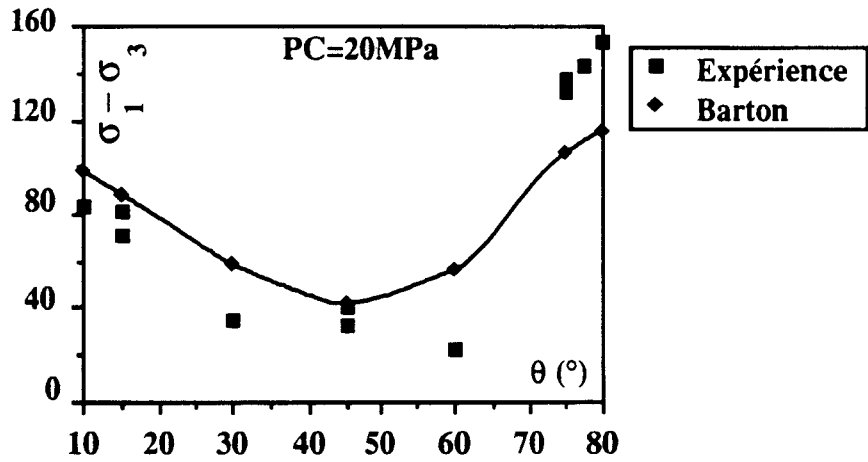
(a)



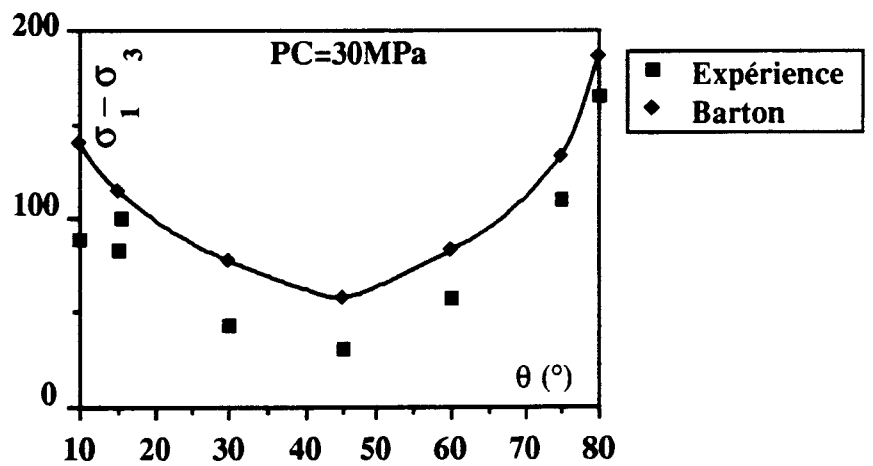
(b)



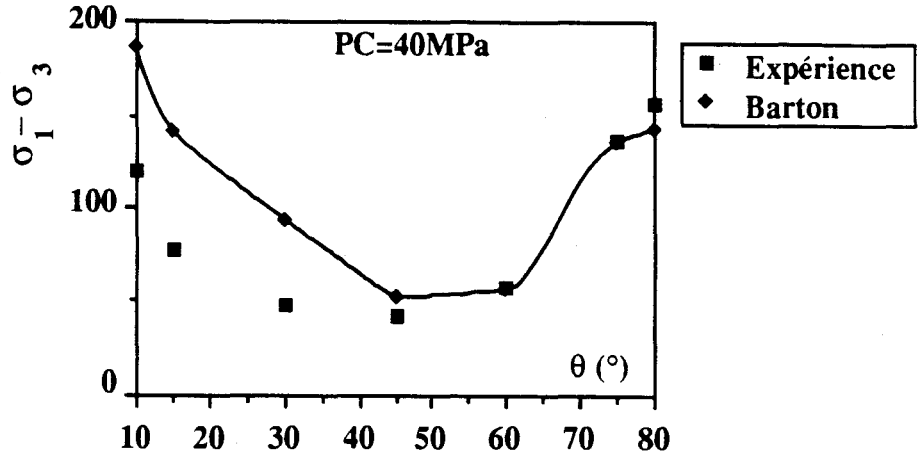
(c)



(d)



(e)



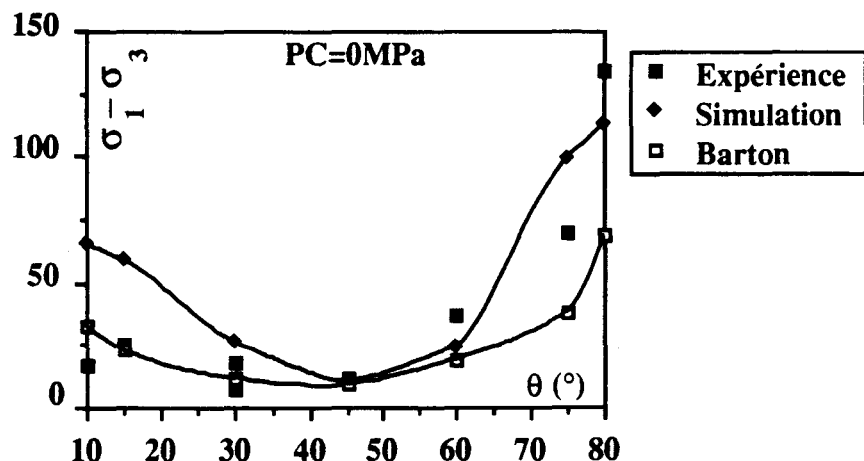
(f)

Figures 4.15 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par le modèle de Barton pour différentes pressions de confinement

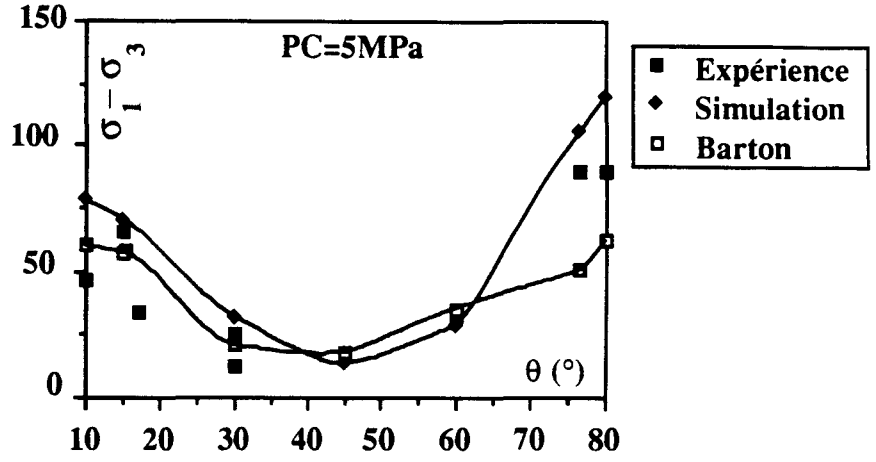
Nous pouvons constater au vu de cette comparaison que le critère de Barton décrit bien le comportement à la rupture par glissement et en particulier pour $\theta = 45^\circ$ et aux faibles pressions de confinement. Mais aux fortes pressions, le critère décrit mal le comportement à la rupture. Cela peut s'expliquer par le fait que la rupture se produit dans plusieurs plans de schistosité à fortes pressions de confinement, ce qui ne coïncide pas avec l'hypothèse de Barton d'une rupture dans un seul joint et dans un matériau homogène. On peut constater que le critère de Barton ne peut pas décrire le comportement à la rupture du schiste. Il serait cependant nécessaire d'utiliser un modèle ou un critère qui peut décrire les deux mécanismes à la fois (rupture par glissement et en matrice).

4.4.2 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par les deux modèles (glissement et Barton)

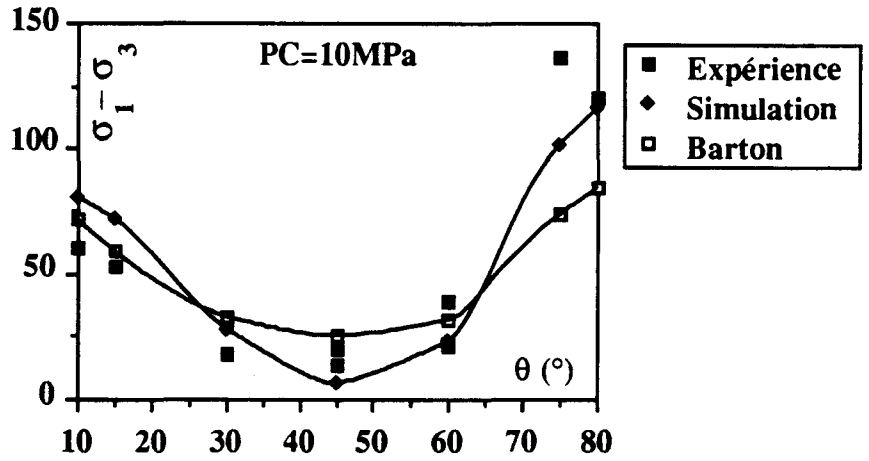
Les figures 4.16 montrent la comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux de la simulation en fonction de l'orientation (θ) et de la pression de confinement :



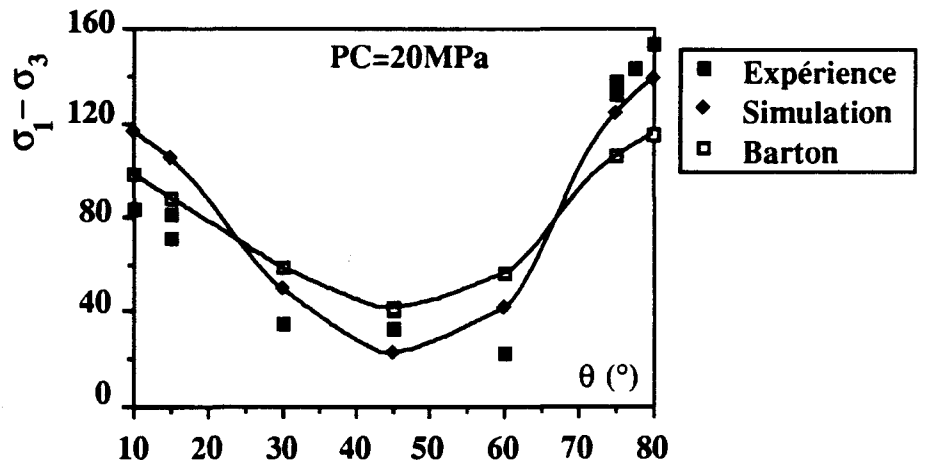
(a)



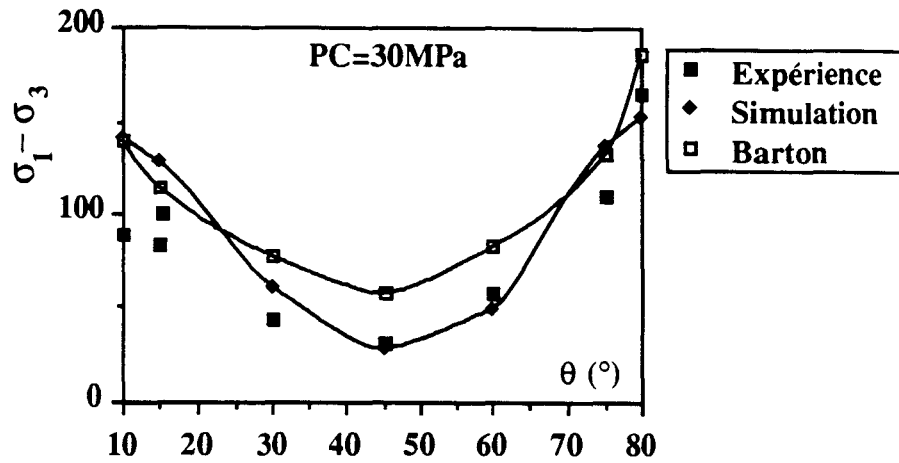
(b)



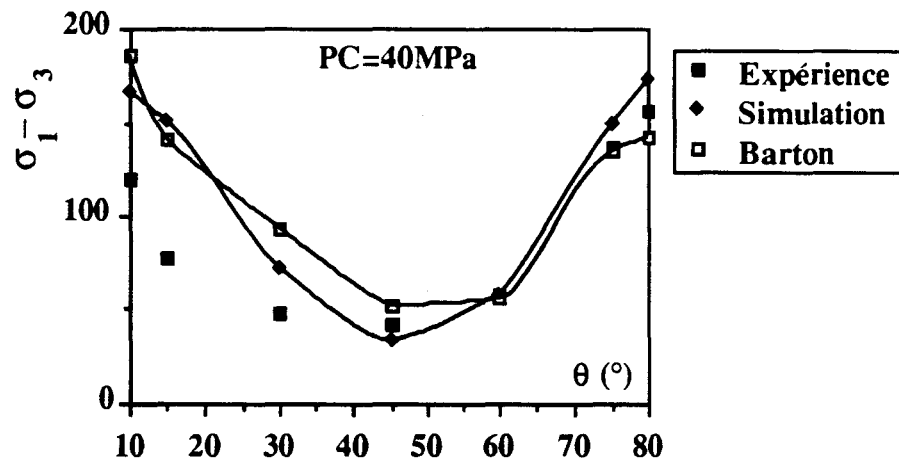
(c)



(d)



(e)



(f)

Figures 4.16 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par les deux modèles (glissement et Barton)

Nous remarquons que pour des pressions de confinement inférieures à 20 MPa, les deux modèles décrivent bien le comportement à la rupture par glissement, et en particulier pour les orientations (30° , 45° , 60°) où il y a un glissement facile. Au-delà de cette valeur de pression, on remarque une certaine divergence, en particulier pour le modèle de Barton. Cela peut s'expliquer par le fait que la rupture à forte pression de confinement se produit dans plusieurs plans de schistosité, ce qui ne coïncide pas avec l'hypothèse de Barton. Les résultats obtenus par le modèle de glissement restent plus ou moins en bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

4.5 RUPTURE EN MATRICE

Nous avons précédemment remarqué pour certaines orientations (0° et 90°) la prépondérance du mécanisme de rupture en matrice. Pour décrire le comportement à la rupture en matrice, plusieurs critères (Lade-Coulomb) ont été publiés pour décrire ce type de comportement. Nous allons utiliser le critère de Coulomb pour décrire la rupture de schiste dans ce cas.

$$(4.19) \quad \tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

d'où : c et ϕ : représentent cette fois des caractéristiques de la matrice et non plus des paramètres de glissement plan sur plan.

En exprimant ce critère dans le plan (p, q) , nous aurons :

$$(4.22) \quad q = c \cos \phi + p \sin \phi$$

avec :

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \text{et} \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Sur les figures (4.17 et 4.18) sont représentées les variations de q en fonction de p pour les deux orientations ($\theta = 0^\circ$ et 90°).

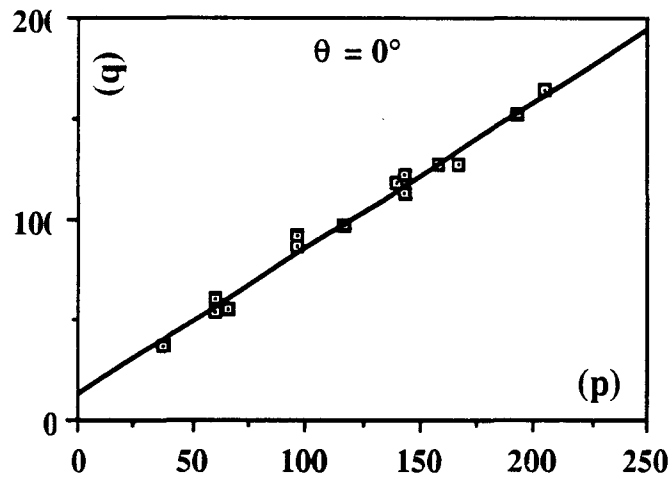


Figure 4.17 : Variation de q en fonction de p : $\theta = 0^\circ$

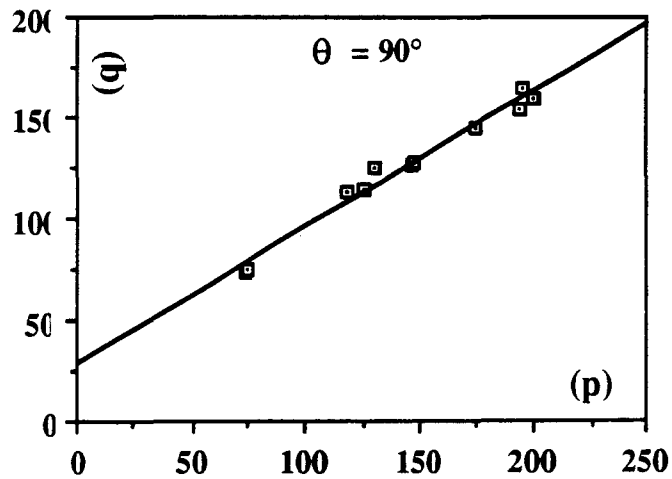


Figure 4.18 : Variation de q en fonction de p : $\theta = 90^\circ$

Les équations de ces variations linéaires sont les suivantes :

$$\begin{aligned} 0^\circ \quad q &= 12,922 + 0,7313 P & R &= 0,986 \\ 90^\circ \quad q &= 28,316 + 0,670 P & R &= 0,978 \end{aligned}$$

A partir de ces équations, on peut déterminer les valeurs de c et ϕ de la matrice pour chaque orientation. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau (4.4).

θ (°)	C (MPa)	ϕ (°)
0°	18,94	47
90°	38,42	42,53

Tableau 4.4 : Valeurs de c et ϕ pour les orientations $\theta = 0^\circ$ et 90°

Nous remarquons que les valeurs de l'angle de frottement interne ϕ sont très proches. La cohésion déterminée à $\theta = 0^\circ$ est très inférieure à la cohésion à 90° . On peut expliquer ce phénomène en se reportant aux ruptures observées pour les deux orientations. On remarque en effet qu'à $\theta = 0^\circ$, la rupture peut avoir lieu par décollement des plans de schistosité, ce qui tend à diminuer la cohésion du matériau. Il serait cependant intéressant d'utiliser d'autres critères tenant compte des différents mécanismes intervenant dans la rupture.

4.6 CONCLUSION

Sur la base des essais triaxiaux effectués selon des orientations différentes par rapport à la structure du matériau, les limites de rupture ont été déterminées pour chaque orientation et chaque pression de confinement. En ce qui concerne l'évolution de cette limite en fonction de l'orientation (θ), on remarque que la rupture a une allure presque parabolique et qui passe par une valeur minimum à $\theta = 45^\circ$ et par des valeurs élevées obtenues pour $\theta = 0^\circ$ et 90° . En utilisant la loi de glissement, le comportement à la rupture par glissement a été caractérisé par deux paramètres : la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (ϕ). Nous observons que la cohésion (c) passe par un minimum aux alentours de $\theta = 38^\circ$; de même pour l'angle de frottement interne (ϕ) le minimum est obtenu pour $\theta = 45^\circ$.

Nous avons aussi utilisé le critère de Barton pour décrire le comportement à la rupture dans un plan de schistosité. Les paramètres du critère (JRC et ϕ) ont été exprimés en fonction de l'orientation θ . Le paramètre JRC est présenté comme une fonction linéaire de θ , et l'autre paramètre (ϕ) apparaît comme un polynôme de second degré en θ . Ce critère ne peut pas être utilisé pour toutes les orientations puisque pour les orientations de $\theta = 0^\circ$ et 90° , le cisaillement est nul. Les résultats obtenus montrent que le critère de Barton décrit bien le comportement à la rupture par glissement et en particulier à faible pression de confinement.

On peut constater que le critère de Barton ne peut pas à lui tout seul décrire le comportement d'un matériau anisotrope (schiste) qui combine à la fois les deux mécanismes de rupture (rupture par glissement et rupture en matrice).

CHAPITRE V

Essais complémentaires

Dans le précédent chapitre nous avons mis en lumière le comportement global du schiste en réalisant des essais dans des orientations différentes par rapport au plan d'isotropie. Dans le présent chapitre, nous présentons l'autre partie d'essais de base (essai de compressibilité et essais cycliques) et les essais de chargements homogènes (essais proportionnels et essais d'extension latérale).

5.1 ESSAI DE COMPRESSIBILITE

L'essai de compressibilité permet de caractériser l'état de microfissuration initiale qui jouera un grand rôle dans les propriétés mécaniques du matériau.

5.1.1 Description de l'essai

L'essai est effectué sur un cube de 7 cm de côté, lequel a été instrumenté de six jauges d'extensométrie (longitudinale et transversale) selon le schéma de la figure 5.1. Il a été introduit dans une jaquette en silastène, afin de le protéger de l'huile de confinement. L'ensemble est placé dans une cellule de capacité de 100 MPa qui sera soumis à un champ de contrainte hydrostatique ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$), par une pompe Gilson. Deux cycles de chargement-déchargement ont été réalisés jusqu'à une pression de confinement de 55 MPa.

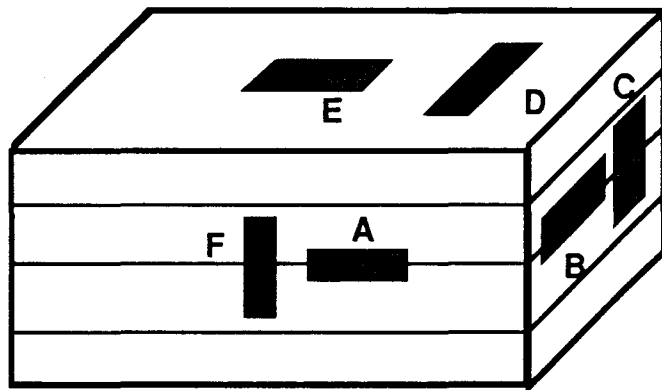


Figure 5.1 : Position des jauges sur le cube pour l'essai de compressibilité

5.1.2 Résultats expérimentaux

La figure 5.2 donne les résultats obtenus par les jauges (C et E) qui sont placées perpendiculairement au plan de schistosité. Nous observons sur cette courbe l'existence d'une phase importante de serrage, ce qui signifie la fermeture de toutes les microfissures disposées entre les plans de schistosité. La pression de fermeture des microfissures est d'environ 9,5 MPa.

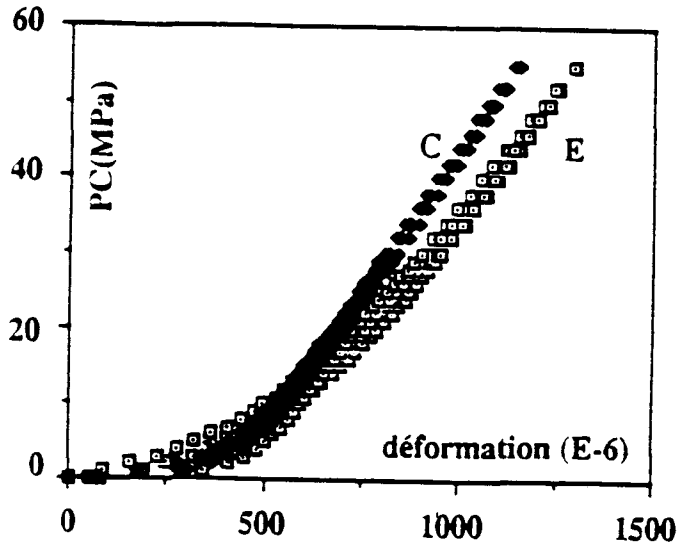


Figure 5.2 : Courbe contrainte-déformation pour les jauges C et E (pour les deux cycles)

A partir de cette pression, les déformations deviennent linéaires et réversibles dans les deux cycles de chargement. En revanche, pour les autres orientations de jauges (A, B, D et F), on remarque que les déformations sont quasi-linéaires. La zone de serrage est pratiquement inexistante, sauf pour la jauge (D) qui présente une légère zone qui peut être due à l'existence d'une microfissuration perpendiculaire à sa direction. Les jauges E et C présentent une zone élastique de pente légèrement différente. Ceci pourrait traduire, compte tenu des observations précédentes, les hétérogénéités locales du matériau. Quant aux autres jauges (A, B, D, F), les pentes des parties élastiques sont quasi-identiques (Annexe D).

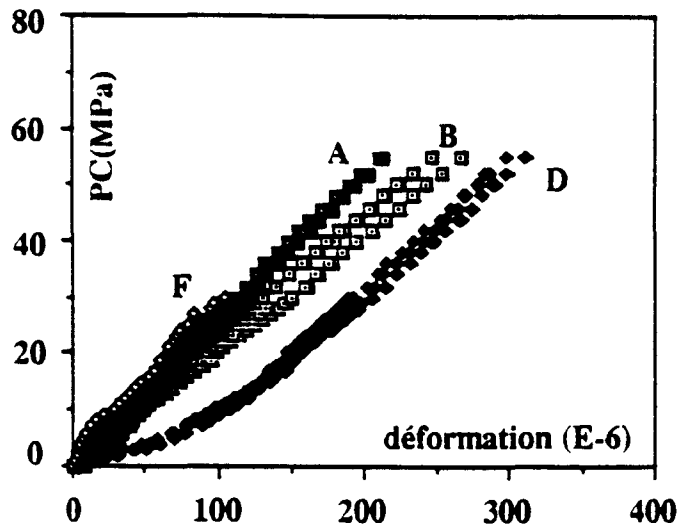


Figure 5.3 : Courbe contrainte déformation pour les jauges A, B, D et F (pour les deux cycles)

5.1.3 Interprétation des résultats

Pour simuler l'essai de compressibilité avec les modules obtenus précédemment, nous allons utiliser les approximations proposées en fonction de la pression de confinement.

En utilisant les relations 1.7 chapitre I, les signaux théoriques des différentes jauges devraient être, dans le cadre de l'élasticité linéaire :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_E = \left[\frac{1}{E_1} - \frac{2\nu_{21}}{E_2} \right] P_c = \left[\frac{1 - 2\nu_{12}}{E_1} \right] P_c$$

$$\varepsilon_A = \varepsilon_B = \varepsilon_D = \varepsilon_F = \left[\frac{-\nu_{12}}{E_1} + \frac{1 - \nu_{23}}{E_2} \right] P_c$$

Les résultats obtenus sont donnés par les figures (5.4 et 5.5). Pour les jauges C et E, nous remarquons que les parties linéaires sont très bien reproduites, alors que pour les autres jauges (A, B, D et F), les parties linéaires sont à peu près bien reproduites jusqu'à 30 MPa. Au-delà de cette valeur, nous remarquons une légère divergence. Nous avons constaté que le coefficient ν_{12} joue un rôle important et qu'il était pris très faible à haute pression.

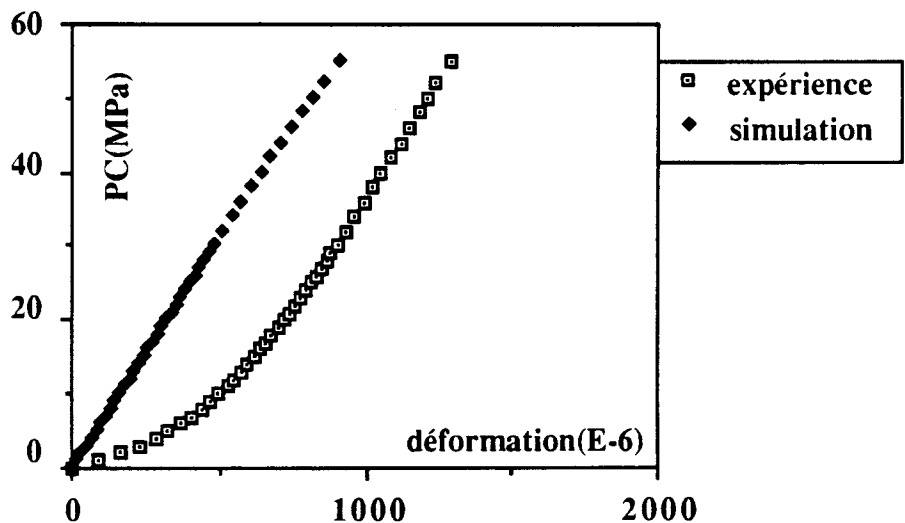


Figure 5.4 : Comparaison prédiction-expérience pour l'essai de compressibilité (jauge C - 1ère montée)

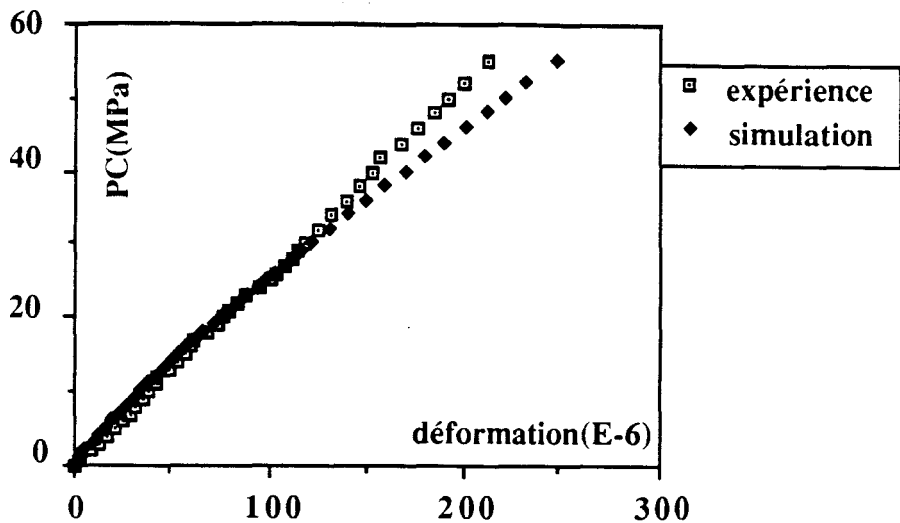


Figure 5.5 : Comparaison prédiction-expérience pour l'essai de compressibilité (jauge A - 1ère montée)

5.2 ESSAIS CYCLIQUES

Le but de cette série d'essais est de caractériser l'endommagement et de tester le comportement du matériau (schiste) en cours de micro-fissuration.

5.2.1 Réalisation des essais

Nous avons réalisé ce type d'essais sur deux orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$ aux différentes pressions de confinement (5 MPa, 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa). L'instrumentation et les caractéristiques géométriques des éprouvettes sont les mêmes que celles décrites au paragraphe (2.3.2), chapitre II.

Dans un premier temps, l'éprouvette est soumise à un champ de contrainte hydrostatique ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$), jusqu'à une valeur donnée. On maintient ensuite la pression constante, et on monte la contrainte axiale jusqu'à un niveau donné, puis on effectue un déchargement jusqu'à l'état isotrope. On recharge de nouveau jusqu'à un niveau de contrainte axiale supérieur au précédent niveau de chargement. On redécharge, et ainsi de suite jusqu'à la rupture.

5.2.2 Résultats expérimentaux

a) Eprouvettes à $\theta = 90^\circ$

Les courbes sont présentées dans l'Annexe D. Nous remarquons que les déformations longitudinales permanentes et les boucles d'hystérésis sont pratiquement nulles quelque soit la pression de confinement (figure 5.6). De plus, nous constatons que pour des pressions inférieures à 30 MPa, les déformations sont linéaires et réversibles, ce qui induit un comportement élastique linéaire du schiste. Au-delà de cette pression, on remarque que les déformations montrent une légère perte de linéarité. Quant aux courbes contraintes-déformations transversales, elles sont sensiblement linéaires jusqu'à 50 % du pic pour toute pression de confinement. Par ailleurs, les déformations permanentes sont quasiment nulles, ainsi que les boucles d'hystérésis négligeables.

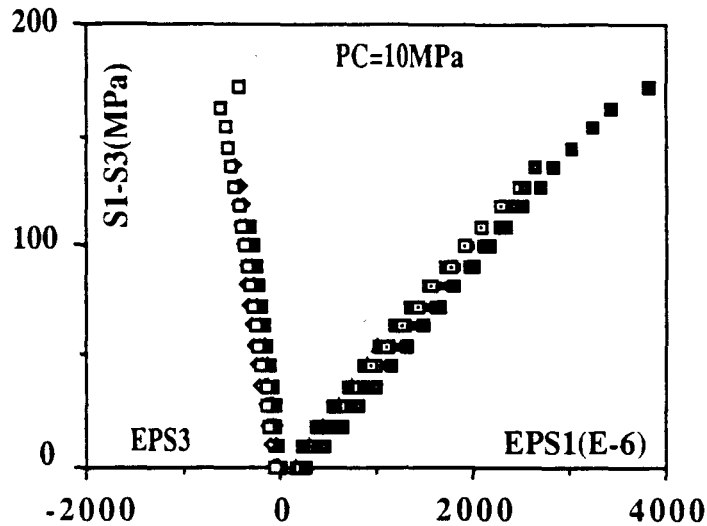


Figure 5.6 : Courbe contraintes-déformations en chargement-déchargement rechargement pour $\theta = 90^\circ$

b) *Eprouvettes à $\theta = 0^\circ$*

Les courbes contraintes-déformations longitudinales (Annexe D) sont quasi linéaires et réversibles quelque soit la pression de confinement. Cependant, nous remarquons pour des pressions inférieures à 20 MPa (figure 5.7), l'apparition de déformations permanentes qui peut être dues au décollement d'un des plans de schistosité. Au-delà de cette valeur de pression, les déformations permanentes sont quasi nulles.

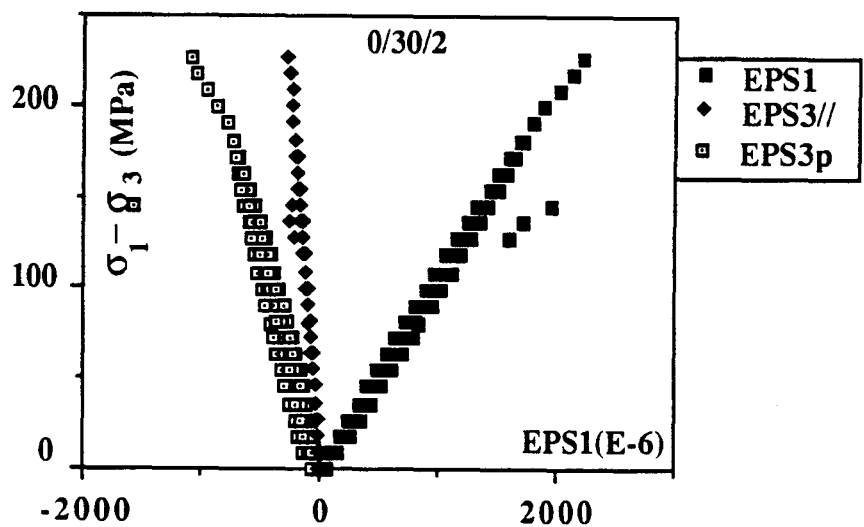


Figure 5.7 : Courbe contraintes déformations en chargement-déchargement-rechargement pour $\theta = 0^\circ$

Les déformations transversales parallèles sont généralement plus faibles que les déformations transversales perpendiculaires, et pratiquement linéaires quelque soit la pression de confinement. Elles sont négligeables de même que les boucles d'hystérésis. En revanche, pour les déformations transversales perpendiculaires on remarque l'apparition de déformations permanentes d'autant plus importantes que la pression de confinement est faible. Les boucles d'hystérésis croissent avec la pression de confinement jusqu'à 20 MPa. Cela peut provenir d'un déclenchement des plans de schistosité par les cycles de chargement-déchargement. Au-delà de 20 MPa, les boucles d'hystérésis diminuent, cela peut être du fait du serrage des plans de schistosité à une pression de confinement élevée.

5.2.3 Module d'Young

Pour caractériser les chemins de déchargement, nous avons calculer les modules sécants afin d'éviter la prise en compte des boucles d'hystérésis qui apparaissent parfois dans les courbes expérimentales, et en particulier pour $\theta = 90^\circ$.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les tableaux 5.1 et 5.2. Nous constatons que les modules sécants augmentent avec les cycles de chargement-déchargement pour des pressions nulles ou égales à 5 MPa. Au-delà de cette pression, les modules sécants pour les deux orientations ($\theta = 0^\circ$ et 90°) diminuent avec les cycles de chargement-déchargement. Cela explique l'endommagement du matériau Les figures 5.6 et 5.7 montrent la variation des modules sécants avec les cycles de chargement-déchargement.

N° cycles	$P_c = 0 \text{ MPa}$	$P_c = 5 \text{ MPa}$	$P_c = 10 \text{ MPa}$	$P_c = 20 \text{ MPa}$	$P_c = 30 \text{ MPa}$	$P_c = 40 \text{ MPa}$
Cycle 1	27 595	53 673	61 602	54 798	52 158	58 708
Cycle 2	38 221	57 582	61 111	56 218	49 825	60 405
Cycle 3	39 231	55 158	58 838	56 971	48 932	59 226
Cycle 4	41 598	54 657	56 829	51 828	48 329	57 670
Cycle 5		56 643	56 173	53 043	46 884	54 478
Cycle 6			51 855	50 970	52 551	52 430
Cycle 7						56 667

Tableau 5.1 : Valeurs du module E_1 en fonction des cycles de chargement-déchargement pour différentes pressions de confinement

N° cycles	$P_c = 0 \text{ MPa}$	$P_c = 5 \text{ MPa}$	$P_c = 10 \text{ MPa}$	$P_c = 20 \text{ MPa}$	$P_c = 30 \text{ MPa}$	$P_c = 40 \text{ MPa}$
Cycle 1	215 639	118 357	111 416	106 222	113 397	105 603
Cycle 2	161 607	113 402	115 094	103 947	112 322	102 717
Cycle 3	160 491	128 987	94 118	100 800	113 153	94 510
Cycle 4	160 497	101 172	110 585	99 310	110 232	96 634
Cycle 5	159 241			96 305	109 910	
Cycle 6	154 175			97 018		
Cycle 7				124 699		

Tableau 5.2 : Valeurs du module E_2 en fonction des cycles de chargement-déchargement pour différentes pressions de confinement

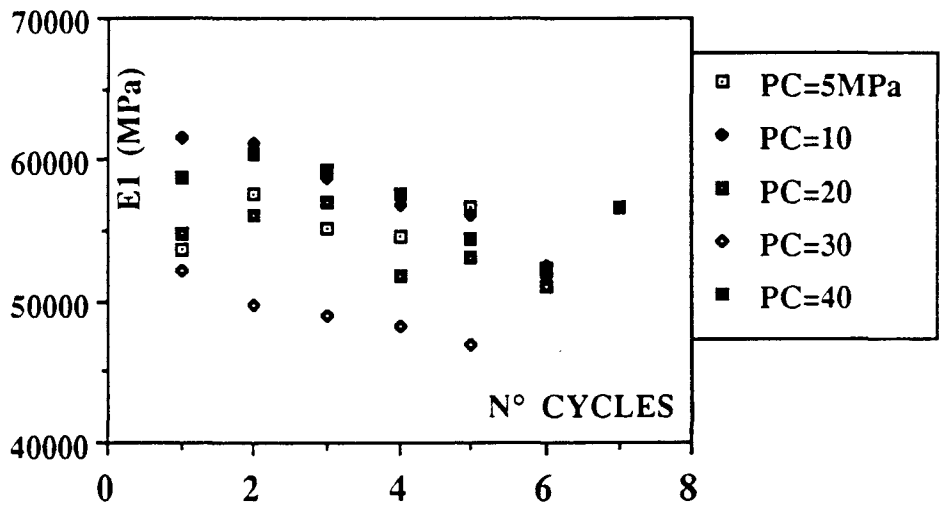


Figure 5.8 : Variation du module d'Young en fonction de cycles de chargement

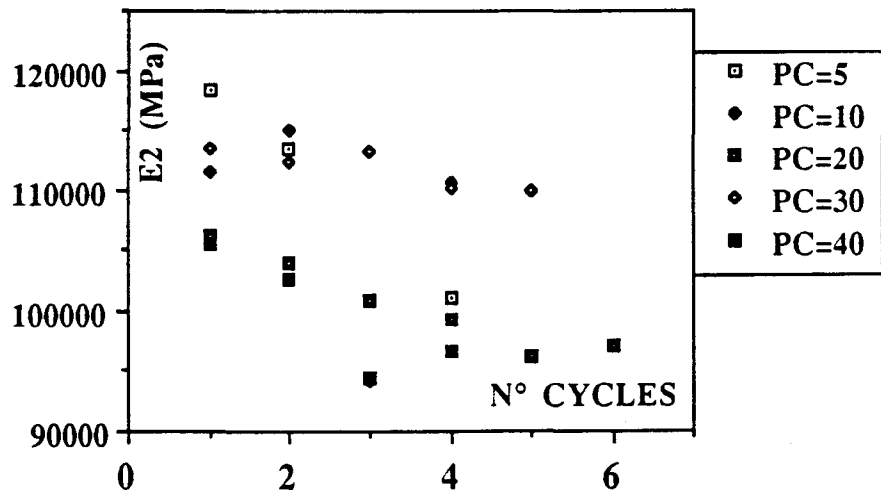


Figure 5.9 : Variation du module d'Young en fonction de cycles de chargement

5.2.4 Simulation des essais cycliques

Pour simuler les essais cycliques, nous avons utilisé les approximations proposées précédemment pour les coefficients élastiques en fonction de la pression de confinement. Les résultats obtenus sont donnés dans l'annexe D. Nous constatons une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et la simulation (figures 5.10 et 5.11), en particulier les déformations longitudinales où les parties linéaires sont pratiquement identiques. Quant aux déformations transversales, nous remarquons que les parties linéaires sont assez bien reproduites, et que la divergence commence avec la perte de linéarité. Les relations utilisées dans le cadre d'élasticité linéaire sont :

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \frac{1}{E_1} \sigma_{11} - \frac{2\nu_{21}}{E_2} \sigma_{22} \\ \epsilon_{22} &= \frac{-\nu_{12}}{E_1} \sigma_{11} + \frac{1}{E_2} \sigma_{22} - \frac{\nu_{32}}{E_2} \sigma_{22} \\ \epsilon_{33} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1} \sigma_{11} - \frac{\nu_{23}}{E_2} \sigma_{22} + \frac{1}{E_2} \sigma_{22} \end{aligned}$$

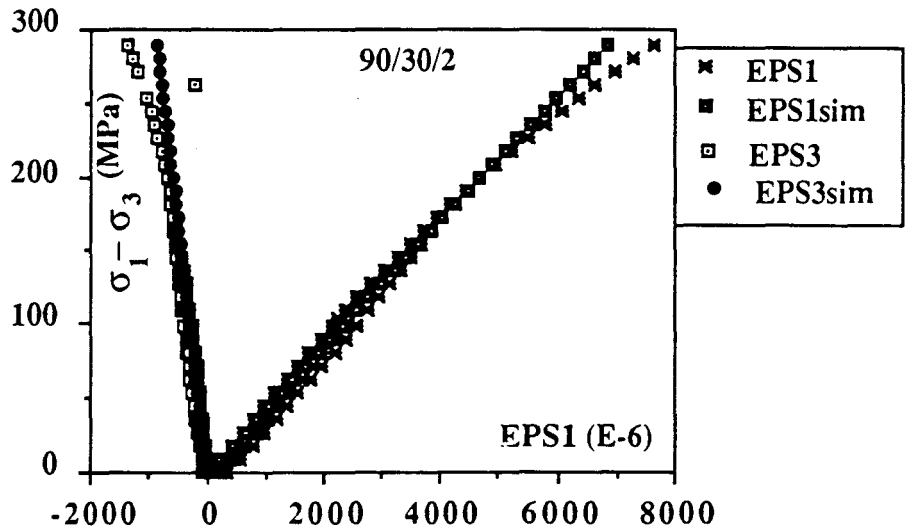


Figure 5.10 : Courbe de comparaison expérience- simulation en sollicitations cycliques pour $\theta = 90^\circ$

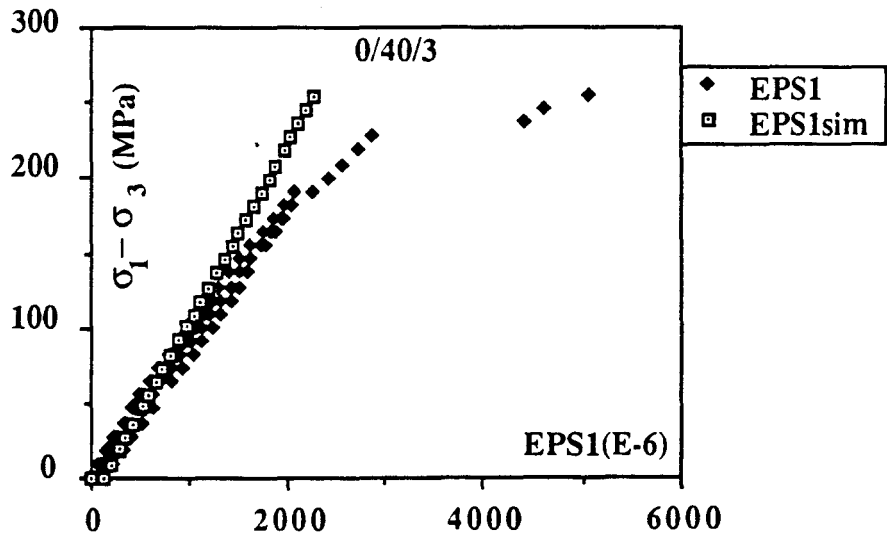


Figure 5.11a : Courbe de comparaison expérience - simulation en sollicitations cycliques pour $\theta = 0^\circ$

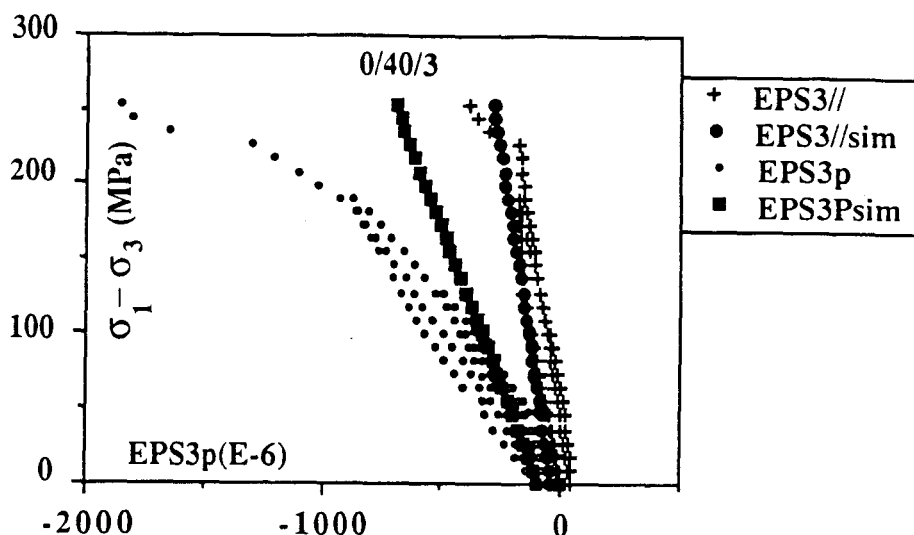


Figure 5.11b : Courbe de comparaison expérience- simulation en sollicitations cycliques pour $\theta = 0^\circ$

5.3 ESSAIS DE CHARGEMENTS HOMOGENES

Le but de cette série d'essais est d'étudier le comportement du matériau (schiste) sous différents chemins de sollicitation et de vérifier par la suite la validité du modèle choisi pour simuler le comportement du schiste. Les essais présentés sont :

- les essais proportionnels $K = \frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ ($K = \text{constante}$)
- les essais d'extension latérale $\sigma_1 - \sigma_3 = \alpha \sigma_R$

5.3.1 Essais proportionnels

5.3.1.1 Description de l'essai

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à un champ de contrainte isotrope $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$ jusqu'à une pression de confinement donnée. On maintient cette pression constante et on applique une charge axiale jusqu'à atteindre le rapport désiré $(\sigma_1/\sigma_3) = K$. On maintient cette fois-ci la contrainte axiale σ_1 constante et on remonte la pression d'une valeur égale à P_c précédente. On applique de nouveau la contrainte axiale σ_1 jusqu'à atteindre le rapport K , et ainsi de suite jusqu'à la rupture (figure 5.8). Les éprouvettes utilisées ont plus ou moins les mêmes caractéristiques géométriques : diamètre 37 mm et la hauteur égale à 75 mm. La vitesse de l'essai asservi en déplacement contrôlé est de 1.5×10^{-4} mm/s. Elles sont instrumentées de la même façon que celles décrites au paragraphe 2.3.2, chapitre II. Les essais ont été réalisés pour les deux orientations les plus importantes $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$, aux différentes valeurs du rapport $K = \sigma_1/\sigma_3$ ($K = 1.5, K = 2, K = 3$ et $K = 5$).

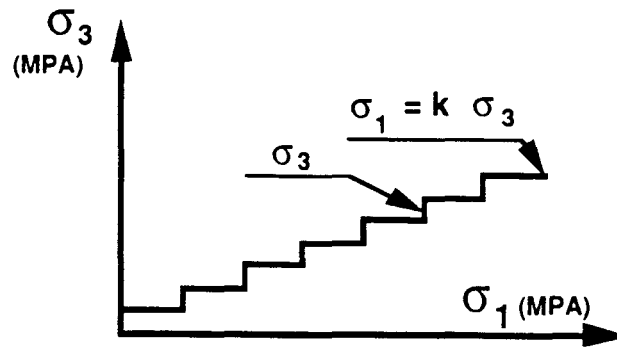


Figure 5.12 : Chemin de sollicitation proportionnelle (σ_1/σ_3) = k

5.3.1.2 Résultats expérimentaux

a) *Eprouvettes à $\theta = 90^\circ$*

Les résultats obtenus sont présentés dans l'Annexe E. Sur ces courbes, nous remarquons l'apparition d'une zone de serrage pour tous les rapports (K), et elle est d'autant plus importante que le rapport K est faible. De plus, le comportement sous sollicitation proportionnelle est identique avec celui sous sollicitation isotrope. Nous observons aussi que pour des rapports inférieurs à $K = 5$, la rupture n'a jamais été atteinte, même à une pression de confinement relativement élevée (55 MPa), alors que pour le rapport $K = 5$, la rupture a été obtenue à une pression inférieure à 50 MPa.

b) *Eprouvettes à $\theta = 0^\circ$*

Les résultats obtenus nous permettent de remarquer que la zone de serrage des microfissures existantes entre les plans de schistosité est d'autant plus importante que le rapport K (Annexe E) est faible. Les mesures données par les jauges collées perpendiculairement au plan de schistosité sont très grandes par rapport aux autres mesures de jauges. Quant aux déformations longitudinales et transversales, parallèles au plan de schistosité, elles sont quasi linéaires pour des rapports inférieurs à $K = 5$. Nous remarquons pour ce rapport, la mise en évidence d'une perte de linéarité des déformations, tant longitudinales que transversales. Pour ce qui concerne la rupture, nous pouvons faire les mêmes observations que pour $\theta = 90^\circ$.

5.3.1.3 Interprétation des résultats

Afin de simuler les essais de sollicitations proportionnelles et de vérifier les modules élastiques, nous allons utiliser les approximations proposées précédemment, et toujours dans le cadre d'élasticité linéaire. Dans notre cas, nous avons $\sigma_{33} = \sigma_{11}/K$:

$$\epsilon_{11} = \left(\frac{1}{E_1} - \frac{2\nu_{21}}{E_2} + \frac{1}{K} \right) \sigma_{11}$$

$$\epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \left(\frac{-\nu_{12}}{E_1} + \frac{1-\nu_{23}}{E_2} + \frac{1}{K} \right) \sigma_{11}$$

Les résultats comparatifs expérience-simulation pour chaque essai effectué, sont présentés dans l'Annexe E.

D'après ces courbes de comparaisons, nous remarquons une bonne concordance entre l'expérience et la simulation, tant pour les déformations axiales que pour les déformations transversales, et en particulier pour un rapport σ_{11}/σ_{33} élevé (figures 5.13 et 5.14). Cependant ces résultats sont encourageants et montrent que les valeurs proposées pour les modules d'Young et les coefficients de Poisson sont réalistes

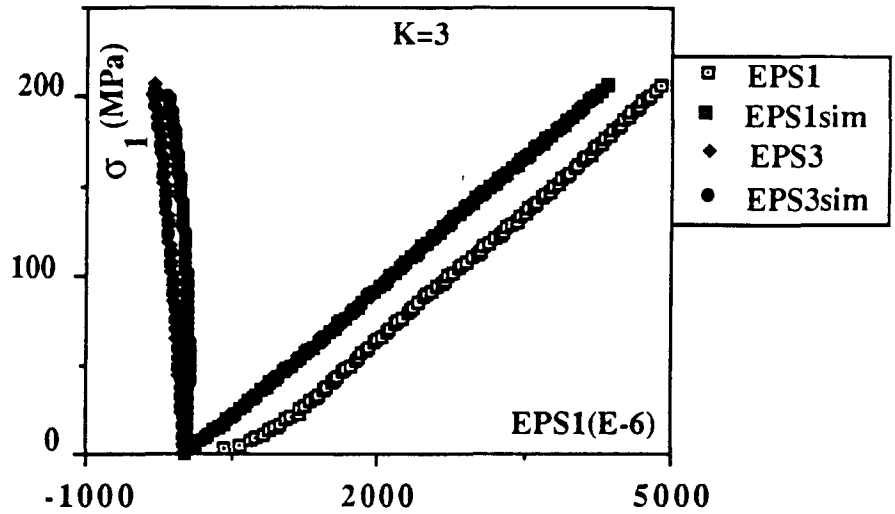


Figure 5.13 : Courbe de comparaison expérience- simulation en sollicitations proportionnelles pour ($\theta = 90^\circ$)

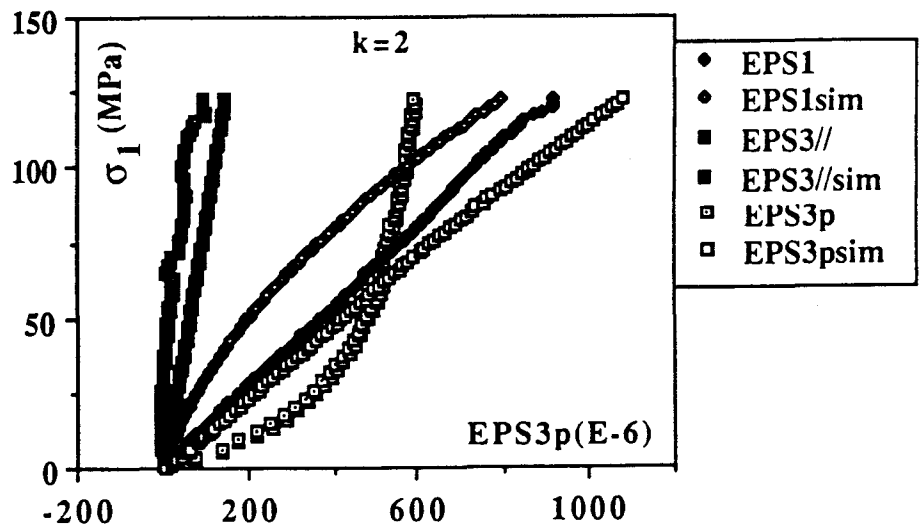


Figure 5.14 : Courbe de comparaison expérience- simulation en sollicitations proportionnelles pour ($\theta = 0^\circ$)

5.3.2 Essai d'extension latérale

5.3.2.1 Principe de l'essai

C'est un essai triaxial particulier dans lequel on décharge la contrainte latérale ($\sigma_3 = P_c$) tout en gardant la contrainte axiale (σ_1) constante. L'objectif de cet essai est essentiellement de simuler les problèmes de creusement dans les ouvrages souterrains ou la déplétion dans les réservoirs pétroliers.

Le principe de l'essai consiste à soumettre l'éprouvette à un champ de contrainte hydrostatique ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$) jusqu'à une pression donnée $\sigma_3 = P_c$, puis on maintient la pression de confinement constante et on applique une contrainte axiale ($\sigma_1 - \sigma_3 > 0$) jusqu'à une certaine valeur de la contrainte à la rupture ($\sigma_1 - \sigma_3$) = $\alpha \cdot \sigma_R$

d'où σ_R : est la contrainte à la rupture pour un essai triaxial monotone

α : est un coefficient < 1 .

Quand la valeur $\sigma_1 - \sigma_3 = \alpha \sigma_R$ est atteinte, on maintient cette valeur constante pour pouvoir commencer l'essai d'extension latérale en déchargeant la contrainte latérale (pression de confinement) jusqu'à la rupture.

Les éprouvettes utilisées sont les mêmes que celles utilisées pour la réalisation des essais proportionnels, et pour les mêmes orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$. Les valeurs du coefficient (α) sont ($\alpha = 0,4$, $\alpha = 0,5$ et $\alpha = 0,65 \sigma_R$), tandis que les pressions de confinement sont 5 MPa, 10 MPa et 20 MPa. L'essai est asservi dans un premier temps en déplacement contrôlé avec une vitesse de $1,5 \times 10^{-4}$ mm/s, alors que dans un deuxième temps, il le sera en force contrôlée avec une vitesse de chargement de $2,5 \times 10^{-2}$ KN/S. Les mesures sont effectuées tous les 0,5 MPa, et après la stabilisation des déformations.

5.3.2.2 Résultats expérimentaux

a) *Eprouvettes à $\theta = 90^\circ$*

La figure 5.14 montre que les déformations longitudinales sont quasi linéaires quelque soit la pression de confinement, alors que les déformations transversales mettent en évidence une perte de linéarité juste avant d'atteindre la rupture. D'autre part, on remarque que le comportement en extension latérale est identique au comportement triaxial monotone du moins pour ce qui concerne l'allure des courbes. De plus, le déviateur des contraintes à la rupture est généralement inférieur à celui observé dans un essai de compression triaxiale monotone à la même pression de confinement. Ceci prouve qu'il y a une influence du chemin de sollicitation sur le comportement à la rupture du matériau. Cette influence a été observée sur le comportement d'un matériau isotrope [40].

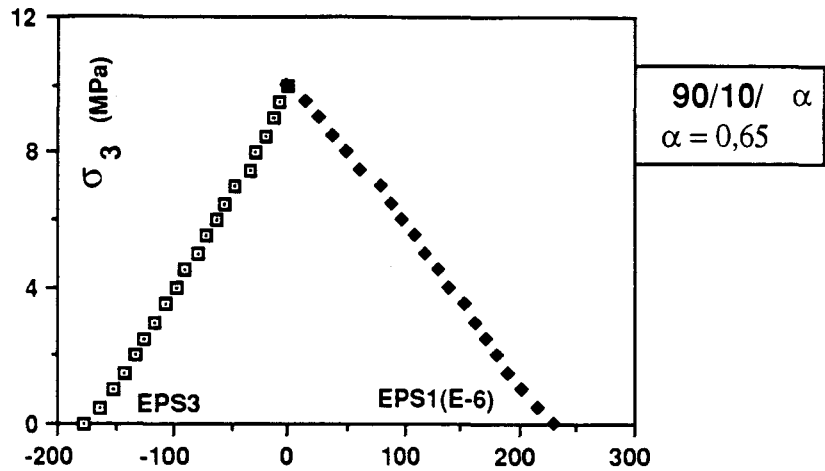


Figure 5.15 : Courbe contraintes-déformations en déchargement latérale pour $\theta = 90^\circ$

b) *Eprouvettes à $\theta = 0^\circ$*

Les résultats obtenus (figure 5.15) montrent que les déformations, tant longitudinales que transversales, perdent la linéarité à 50 % de la limite de rupture. Ceci peut se traduire par la facilité de décollement des plans de schistosité en déchargeant surtout la contrainte latérale ($\sigma_3 = P_c$).

Quant à la contrainte de rupture, elle est nettement inférieure à celle observée dans un essai triaxial monotone pour la même pression de confinement. Pour ce qui concerne le comportement en extension latérale, nous pouvons faire les mêmes observations que pour $\theta = 90^\circ$.

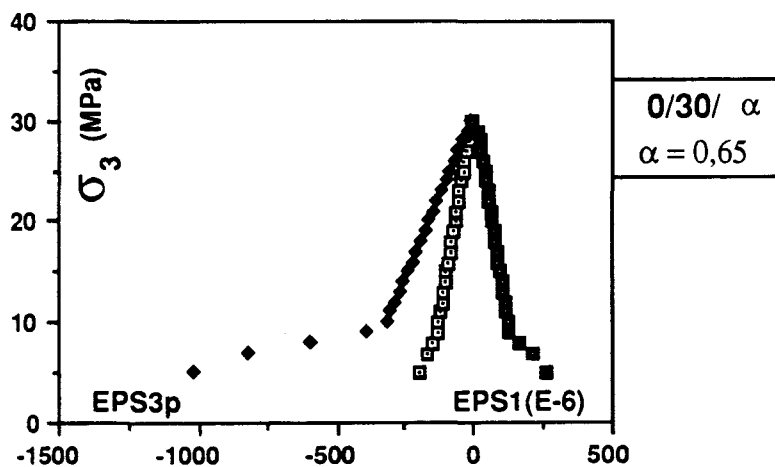


Figure 5.16 : Courbes contraintes-déformation en déchargement latérale pour $\theta = 0^\circ$



5.4 CONCLUSION

A partir de l'essai de compressibilité, nous avons constaté que les microfissures sont situées dans les plans de schistosité (jauges C et E), et que le comportement du schiste sous sollicitation hydrostatique est anisotrope.

Les essais cycliques montrent que pour l'orientation $\theta = 90^\circ$, les déformations permanentes sont quasiment nulles quelque soit la pression. Les modules d'Young secants diminuent légèrement avec le nombre de cycles de chargement. En revanche, pour l'autre orientation $\theta = 0^\circ$, nous observons parfois des déformations permanentes qui peuvent être dues au décollement d'un ou plusieurs plans de schistosité, en particulier pour des pressions inférieures à 20 MPa.

Les résultats obtenus pour les deux orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$ à partir des essais proportionnels montrent que la zone de serrage est d'autant plus importante que le rapport K est faible. Pour les rapports K inférieurs à 5, la rupture n'a jamais eu lieu tant pour $\theta = 0^\circ$ que pour $\theta = 90^\circ$. Nous avons également observé que le module d'Young diminue sensiblement avec le rapport K . Ceci prouve l'anisotropie du comportement sous cette sollicitation.

Par ailleurs, nous avons remarqué que la limite de la rupture dans l'essai d'extension latérale est considérablement inférieure à celle observée dans l'essai triaxial monotone à la même pression de confinement.



CONCLUSION

Des essais de compression isotrope et triaxiale de révolution, dans des orientations différentes par rapport à la structure du matériau et les pressions de confinement étudiées vont jusqu'à 40 MPa, ont été effectués sur une roche anisotrope (schiste).

Les résultats obtenus ont permis de mettre en lumière les aspects fondamentaux du comportement du matériau et de montrer que le schiste a :

- un comportement anisotrope transverse sous sollicitation isotrope,
- une fissuration située dans les plans de schistosité induit à un comportement anisotrope,
- le mécanisme majeur de rupture est un mécanisme de glissement le long du plan de schistosité. Ce mécanisme est valable pour toutes les orientations du plan de schistosité, sauf pour les orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$ pour lesquelles la rupture a lieu dans la matrice,
- la résistance à la rupture dans les essais de compression dépend fortement de l'orientation de plans de schistosité θ et de la pression de confinement.

En ce qui concerne l'influence de la pression de confinement sur les coefficients élastiques, nous avons remarqué, que tous les modules sont fortement influencés par la pression, excepté le module E_2 ($\theta = 0^\circ$), qui semble indépendant de la pression de confinement.

Les essais effectués pour différentes orientations θ par rapport aux directions de schistosité ont permis de déterminer le module de cisaillement G_{12} qui peut être également déterminé à l'aide des méthodes ultra-sonores. Pour les orientations $\theta \leq 45^\circ$, G_{12} déterminé à l'aide des essais triaxiaux est égal à 3 000 MPa, c'est-à-dire qu'il est inférieur aux valeurs obtenues par les mesures ultrasoniques. Au-delà de cette orientation, on remarque que le module G_{12} augmente sensiblement avec l'orientation θ .

L'interprétation des essais triaxiaux, à partir des mesures fournies par le capteur de déplacement (LVDT) de la machine d'essai a permis de contrôler les résultats des essais effectués et de déterminer des caractéristiques résiduelles du glissement le long du plan de schistosité.

L'étude d'un deuxième prélèvement de roche, situé à une distance d'environ 2 km dans le même massif, nous a donné des résultats assez proches des résultats précédents, ce qui montre une relative bonne homogénéité du massif étudié.

Au travers de l'étude des caractéristiques mécaniques du schiste ardoisier, nous avons pu évaluer l'anisotropie de la cohésion et de l'angle de frottement interne et quantifier l'évolution de l'anisotropie des modules et des résistances limites en fonction de la pression.

Les résultats expérimentaux montrent que la variation du déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) à la rupture en fonction de l'orientation θ a une allure parabolique et qu'elle passe par une valeur minimale d'environ $\theta \cong 45^\circ$ quelque soit la pression de confinement.

Pour la modélisation du comportement du schiste à la rupture sous compression, nous proposons deux modèles : un modèle de glissement et le modèle de Barton. Le plan de glissement a été caractérisé par deux paramètres : la cohésion et l'angle de frottement interne. La comparaison entre les résultats obtenus par les deux modèles et ceux obtenus expérimentalement montre une bonne concordance en particulier pour $\theta = 45^\circ$.

Les essais cycliques (chargement-déchargement) ont montré que le schiste a un comportement pratiquement élastique linéaire. Les déformations permanentes et les boucles d'hystérésis sont quasi-nulles, en particulier pour $\theta = 90^\circ$. Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque la pression de confinement est élevée. En revanche, on remarque parfois des déformations permanentes pour $\theta = 0^\circ$ dues au déclenchement d'un des plans de schistosité.

Enfin, les résultats obtenus à partir des essais de chargements homogènes (essais proportionnels et essais d'extension latérale) ont montré l'influence du chemin de sollicitation sur les caractéristiques mécaniques du matériau étudié (schiste), en particulier sur la limite de rupture et le module d'Young. Pour les rapports K inférieurs à 5, la rupture n'a jamais eu lieu dans ce type de sollicitation, tant pour $\theta = 0^\circ$ que pour $\theta = 90^\circ$.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ALLIROT D.** (1976) - "Contribution à l'étude de l'anisotropie des déformations et de rupture d'une roche stratifiée". Thèse de Doctorat - I.N.P. Grenoble
- [2] **ALLIROT D. et BOEHLER J.P.** (1977) - "Evolution des propriétés mécaniques d'une roche stratifiée sous pression de confinement".
- [3] **ALLIROT D., BOEHLER J.P. et SAWCZUK A.** (1977) - "Irreversible deformation of an anisotropic rock under hydrostatic pressure" - *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 14, pp. 77-83
- [4] **ATTEWELL P.B.** (1970) - "Triaxial anisotropy of wave velocity and elastic moduly in state and their concordance with fabrie and tectonic symmetry". *Int. J. Mech. Min. Sci.*, Vol. 7, pp. 193-207
- [5] **ATTEWELL P.B., SANDFORD M.R.** (1974) - "Intrinsic shear strength of a brittle anisotropic rock I. Experimental and mechanical interpretation". *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. abstr.*, Vol. 11, pp. 423-430. Pergamon Press. Printed in Great Britain
- [6] **BARLA G., INNAUROTO N.** (1973) - "Indirect tensile testing of anisotropic rocks". *Rocks. Mech.* 5, pp. 215-230.
- [7] **BARRON K.** (1971) - "Brittle fracture initiation in and ultimate failure of rocks. Part. II - Anisotropic rocks Theory. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 8, n° 6, pp. 553-563. Pergamon press. Printed in Geart Britain.
- [8] **BARRON K.** (1971) - "Brittle fracture initiation in and ultimate failure of rocks. Part. III - Anisotropic rocks Experimental Resultats. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 8, n° 6, pp. 565-575. Pergamon press. Printed in Geart Britain.
- [9] **BARTON N.R.** (1973) - "Review of a new shear-strength criterion for rock joints". *Engineering Geology*, 7, pp. 287-332.
- [10] **BARTON N.R.** (1976) - "The shear strength of rock and rock joints". *Int. J. Rock. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 13, pp. 255-279. Pergamon press. Printed in Great Britain.
- [11] **BARTON N.R.** (1972) - "A model study of rock-joint deformation". *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 9, pp. 579-602. Pergamon Press. Printed in Great Britain.
- [12] **BIENAWSKI Z.T.** (1967) - "Mechanism of brittle fracture of rock. Theory of the fracture process". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 4, pp. 395-406.
- [13] **BIENAWSKI Z.T.** (1967) - "Stability concept of brittle fracture propagation in rocks". *Eng. Geol.*, 2, pp. 149-162
- [14] **BOEHLER J.P.** (1975) - "Contributions théoriques et expérimentales à l'étude des milieux plastique anisotropes". Thèse de Doctorat ès sciences. Grenoble 1975
- [15] **BRACE W.F.** (1964) - "Brittle fracture of rock. State of stress in the Earth's crust". Elsevier, pp. 111-178.
- [16] **BROWN E.T.** (1970) - "Strength of a model of jointed rock". *Journal of the soil mechanics and foundation division ASCE*, vol. 96. N° SM2, pp. 685-704. Proceedings of the American society of civil engineers.
- [17] **CHENEVERT M.E. et GATLIN C.** (1965) - "Mechanical anisotropies of laminated sedimentary rocks". *Society of petroleum engineers journal*, vol. 5, pp. 65-67, March (1965).
- [18] **CUXAC P.** (1991) - "Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes". Thèse de doctorat à l'I.N.P.L. - Ecole Nationale Supérieures de Géologie de Nancy.
- [19] **CUXAC P., HOMAND F. HAMMADE A., MOREL E.** (1990) - "Comportement mécanique d'un schiste ardoisier". *C.R. 25° Colloque G.F.R.*, pp. 101-112.

- [20] **DAYRE M. et SIRIEYS P.** (1965) - "Anisotropie des modules élastiques et des résistances à la rupture des roches métamorphiques" - C.R. Acad. Sc. Paris, 260, pp. 4440-4443.
- [21] **DEKLOTZ E.J., BROWN J.W. and STEMLER O.A. LT.CE, USA** : "Anisotropy of a schistose gneiss". Rapport du 1er congress. ISMR. Lisbonne, vol. 1, pp. 607-611
- [22] **DONATH F.A.** (1961) - "Experimental study of shear failure in anisotropic rocks". Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 72, pp. 985-990.
- [23] **DONATH F.A.** (1968) - "The development of kink bands in brittle anisotropic rock". Geol. Soc. of Am. Memoir, 115 p., pp. 452-493
- [24] **DONATH F.A.** (1972) - "Effects of cohesion and granularity on deformational behavior of anisotropic rock". Geol. Soc. Amér. Memoir, 135, pp. 95-128.
- [25] **DONATH F.A.** (1964) - "Strength variation and deformational behavior in anisotropic rocks, state of stress in the earth's crust". American Elsevier publishing company, New York, pp. 281-298
- [26] **GOGUEL J.** (1975) - "La déformation des roches". Annales des Mines, Février-Mars, pp. 33-36.
- [27] **GRIFFITHS V.D. and J.H. PREVOST** (1988) - "The properties of anisotropic conical failure surfaces in relation to the Mohr-Coulomb criterion". Int. Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol. 12, pp. 497-504.
- [28] **HABIB P. et MORLIER P.** (1969) - "La courbe intrinsèque des bétons". Colloque de Géotechnique, Toulouse (4). Mars 1969.
- [29] **HADLEY K.** (1975) - "Azimuthal variation of dilatancy". Journal of Geophysical Research 80, 35, pp. 4845-4850.
- [30] **HAMMADE A., MOREL E. et HENRY J.P.** (1990) - "Etude méthodologique sur roches anisotropes : Etude d'un modèle simplifié de comportement". Rapport ANDRA : 623-RP. LML 90.001.
- [31] **HAMMADE A., HENRY J.P. et MOREL E.** (1990) - "Etude méthodologique en milieu anisotrope : Rapport du dépouillement des essais triaxiaux par capteur LVDT, comportement post-rupture". Rapport ANDRA, RS 91.04.
- [32] **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'état, Université des Sciences et Techniques de Lille.
- [33] **HILL R.** (1950) - "The mathematical theory of plasticity". Clarendon press, Oxford 1950.
- [34] **HOEK E.** (1964) - "Fracture of anisotropic rock" - Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 64, n° 10, pp. 511-518.
- [35] **HOEK E.** (1983) - "Strength of jointed rocks masses". Geotechnique, Vol. 33., n° 3, pp. 187-223.
- [36] **HOEK E. et BROWN E.T.** (1980) - "Underground excavations in rock". Institution of mining and metallurgy, London 527 pp.
- [37] **HOMAND F. et CUXAC** (1989) - "Etudes méthodologiques sur roches anisotropes". Rapport sur le comportement mécanique, 623 RP. ENR 89/004.
- [38] **HOMAND F., HOUPERT R.** (1979) - "Comportement mécanique des roches en fonction de la température". Revue Française de Géotechnique. ENSG Nancy.
- [39] **HOUPERT R., HOMAND-ETIENNE F.** (1979) - "Influence de la température sur le comportement mécanique des roches". C.R. 4e, Congres Internat. Mec. Roches. Montreux, pp. 177-180

- [40] **IKOGOUE S.** (1990) - "Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un grès". Thèse de Doctorat, Université de Sciences et Techniques de Lille I.
- [41] **JAEGER J.C., NG.G.W. COOK** (1971) - "Fundamental of rock mechanics". 3rd ed Chapman and Hall, London, 593 pp. 1971.
- [42] **JAEGER J.C.** (1960) - "Shear failure of anisotropic rocks". *Geol. mag.* Vol. 97, n° 1, pp. 65-72.
- [43] **KULHAWY F.H.** (1975) - "Stress deformation properties of rock and rock discontinuities" - *Eng. Geol.*, Vol. 1, pp. 327-350
- [44] **LADE R.V.** (1982) - "Three parameters failure criterion for concrete". *J. Eng. Mech. ASCE*, Vol. 104, N° EM3, pp. 850-863.
- [45] **LADE R.V. & KIM M.K.** (1984) - "Modelling rock strength in three dimension". *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.* Vol. 21, n° 1, pp. 21-23.
- [46] **LAQUECHE H.** (1985) - "Détermination de l'énergie de fracturation des roches anisotropes et sismogénèse". Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I.
- [47] **LEKHNISTKII S.G.** (1963) - "Theory of elasticity of an anisotropic elastic body". Hoden Day Inc. San Francisco.
- [48] **LERAU J., SAINT C. LEU, SIRIEYS P.** (1981) - "Anisotropie de la dilatance des roches schisteuses". *Rocks Mechanics*, Vol. 13, pp. 185-196.
- [49] **MASURE P.** (1969) - "Cisaillement de mortiers de ciment et comparaison avec l'essai triaxial". Colloque de Géotechnique Toulouse (4). Mars 1969.
- [50] **MASURE P.** (1970) - "Comportement des roches à anisotropie planaire discontinue. Application à l'étude de la stabilité des excavations souterraines". Thèse ès Sciences. Faculté des Sciences de Nancy.
- [51] **MAURER W.C.** (1965) - "Shear failure of rocks under compression". *Society of petroleum Engineers journal*, April 5, Vol. 5, pp. 167-176.
- [52] **Mc GILL G.E., RANEY J.A.** (1970) - "Experimental study of faulting in an anisotropic inhomogeneous dolomitic". *Geol. Soc., of Amer., Bull.* 81, 10, pp. 2949-2958.
- [53] **Mc LAMORE R. and GRAY K.E.** (1967) - "The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks". *Journal of Engineering for industry*, pp. 62-73. February (1967).
- [54] **Mc LINTOCK et WALSH J.B.** (1962) - "Friction on Griffith cracks under pressure"- *Proc. 4th. U.S. Nat. Cong. Appl. Mech. Berkeley*, pp. 1015-1021.
- [55] **MELLO F. MENDES** (1971) - "About the anisotropy of uniaxial compressive strength in schistose rocks". *Symposium Soc. Int. Mécanique des roches, Nancy*. pp. 11-13.
- [56] **MOREL E.** (1986) - "Contribution à l'étude de la propagation des discontinuités dans des roches anisotropes. Mise au point d'une technique de calcul utilisant l'intégrale de Cauchy et étude expérimentale d'un schiste ardoisier" - Thèse de Doctorat, Université de Lille I.
- [57] **NIANDOU H.** (1993) - "Etude du comportement rhéologique d'argilite et modélisation" - Thèse de Doctorat (à paraître).
- [58] **NOVA R.** (1986) - "An extended Cam Clay model for soft anisotropic rocks" - *Computers and Geotechnics* 2, pp. 69-88.
- [59] **PATON F.D.** (1966) - "Multiple modes of shear failure in rocks" - *Proc. 1st. Congress". Int. J. Rock Mech.* Lisbonne, Vol. 1, pp. 521-524.

- [60] **PERAMI R. et THENOZ B.** (1969) - "Comparaison des comportements de divers granites soumis à des uniaxiales de microfissuration". 2e Colloque sur la fissuration des roches. Revue de l'Industrie Minérale. Paris, pp. 50-62.
- [61] **PINTO J.L.** (1970) - "Deformability of schistous rocks". Proc. 2nd Congress. ISRM, Belgrade, Vol. 1, pp. 2-30.
- [62] **PINTO J.L.** (1979) - "Determination of the elastic constants of anisotropic bodies by diametral compression tests". Proc. Congress. ISRM, Montreux Vol. 2, pp. 359-363.
- [63] **PINTO J.L.** (1966) - "Stress and stain in an anisotropic-orthotropic body". Proc. 1er. Congress. ISRM. Lisbonne, 7, pp. 625-635.
- [64] **RALEIGH S. et PATERSON P.** (1965) - "Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implication". Journ. Geophys. Research. Vol. 70, pp. 3965-3985.
- [65] **RAMANA Y.V., VENKATANARANA B.** (1973) - "Laboratory studies on kolar rocks". Int. J. rock. Mech. Min. Sci., Vol. 10, pp. 465-484
- [66] **RODRIGUES E.P.** (1966) - "Anisotropy of granites. Modulus of elasticity and ultimate strength ellipsoids joint systeme. Slope attitudes and their correlation". Proc. 1 Congress. ISRM, Lisbonne, Vol. 1, pp. 69-88.
- [67] **RODRIGUES E.P.** (1970) - "Anisotropy of rocks. Most probable surfaces of the ultimate stresses and of the moduli of elasticity". Proc. 2. Congress. ISRM, Belgrade, Vol. 1, pp. 1-20.
- [68] **RODRIGUES E.P.** (1979) - "The anisotropy of the moduli of elasticity and the ultimate stresses in rocks and rock masses" - Proc. 4. Cong. ISRM, Montreux, Vol. 2, pp. 517-523.
- [69] **SAINT LEU C., LERAU J. et SIRIEYS P.** (1978) - Mécanisme de rupture des schistes de Lacaune (Tarn). Influence de la pression isotrope". Bull. Soc. Fr. Miné. Cristall. 101, pp. 437-442.
- [70] **SANGHA C.H. et DHIR R.K.** (1972) - "Influence of time on the strength deformation and fracture properties of a lower devonian sandstone". Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol. 9, pp. 343-354.
- [71] **SANTARELLI F.** (1987) - "Theoretical and experimental investigation of the stability of the axisymmetric wellbore" - Ph.D. Thesis Imperial College London.
- [72] **SCHMIDT R.A., HUDDLE C.W.** (1977) - "Effect of confining pressure on fracture toughness of Indiana Limestone". Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 14, pp. 289-293.
- [73] **SIRIEYS P.M.** (1971) - "Contribution à l'étude des lois de comportement des structures rocheuses". Thèse de Doctorat Université de Grenoble.
- [74] **SIRIEYS P.M.** (1982) - "Anisotropie mécanique des roches. Comportement mécanique des solides anisotropes". Colloque Int. CNRS, pp. 481-532.
- [75] **WALSH J.B.** (1965) - "The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks". J. Geoph. Res. 70, (2), pp. 399-411.
- [76] **WALSH J.B., BRACE W.F.** (1964) - "A fracture criterion for brittle anisotropic rock". Journal of Geophysical Research, Vol. 69, pp. 3449-3456.

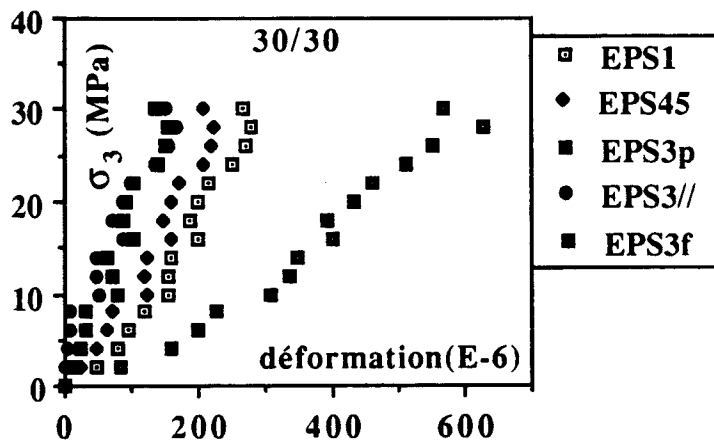
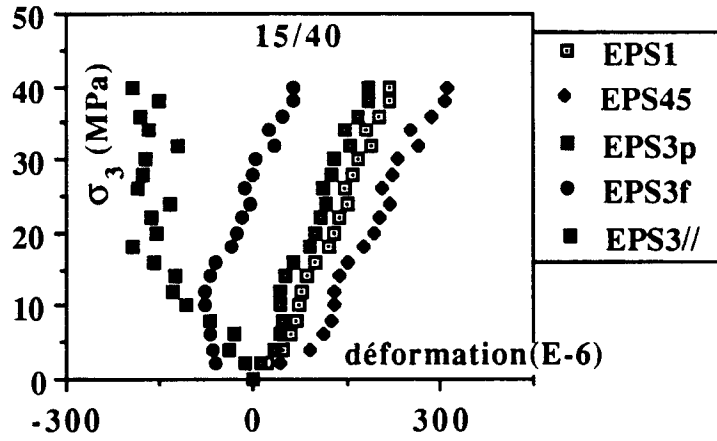
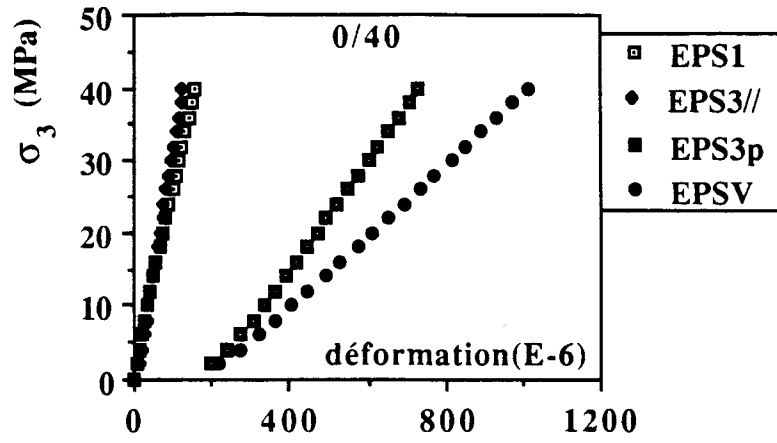
ANNEXES

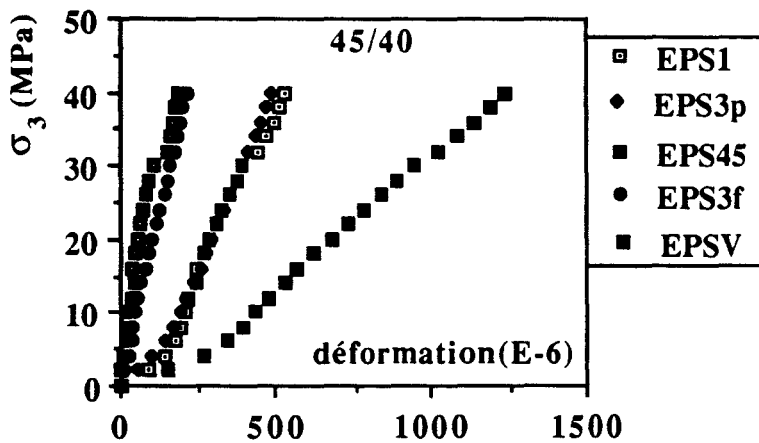
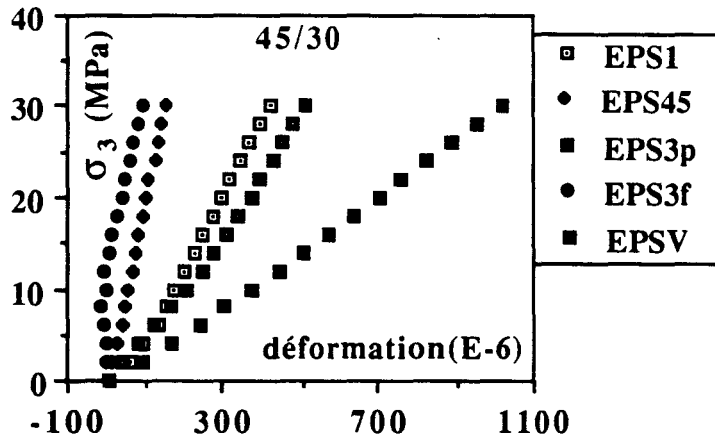
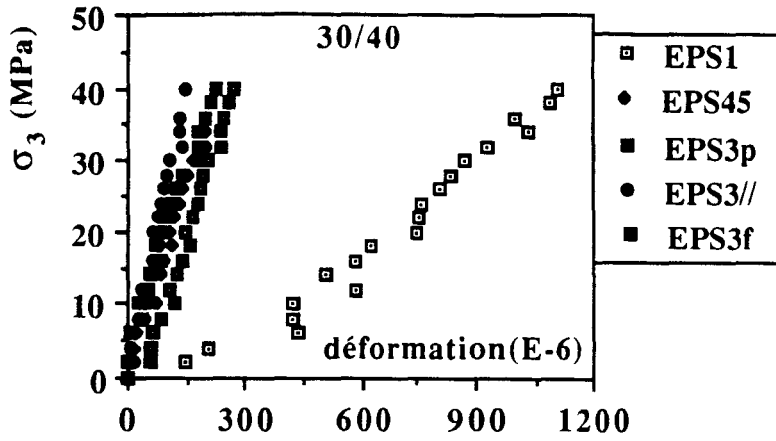
**Résultats expérimentaux des essais
(solicitations isotropes, axiales monotones, L.V.D.T., cycliques,
proportionnelles et extensions latérales)**

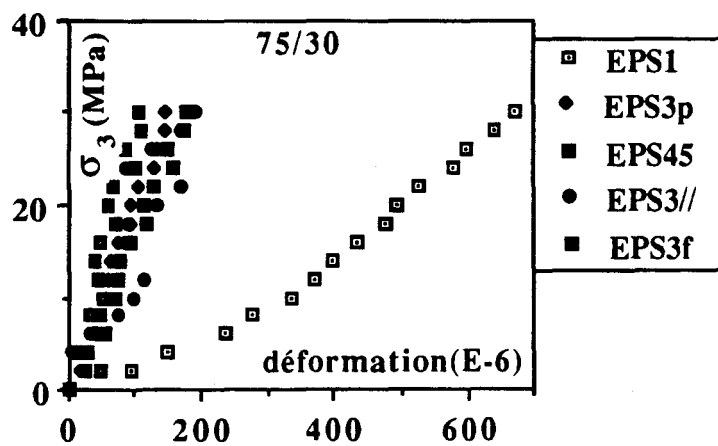
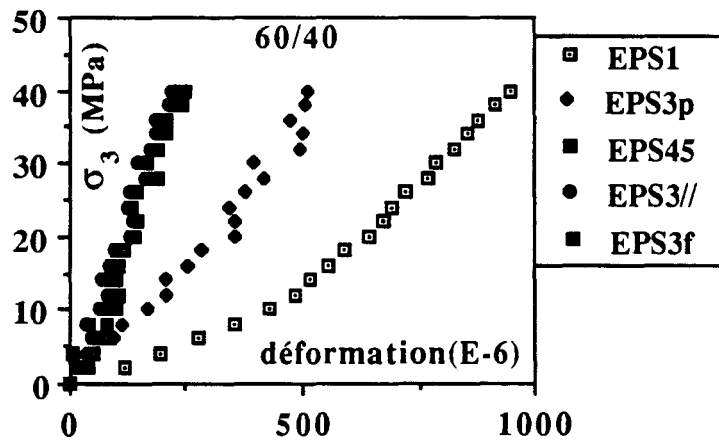
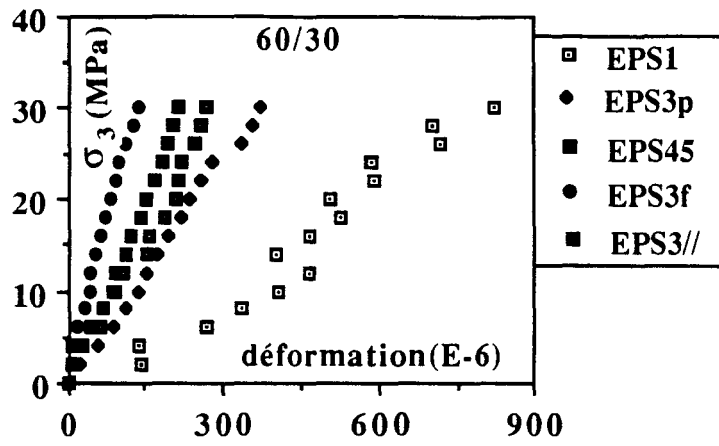
ANNEXE A

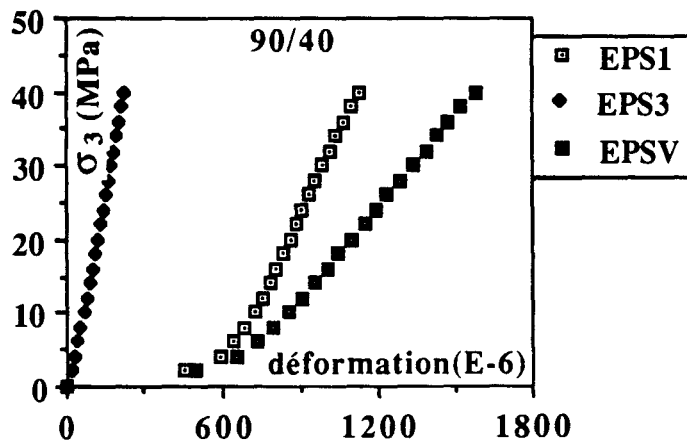
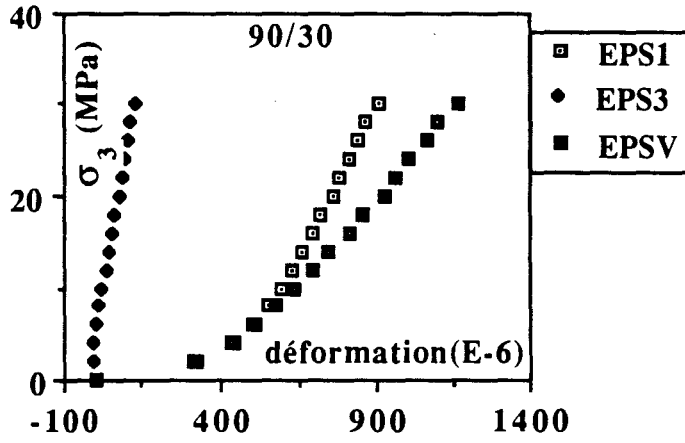
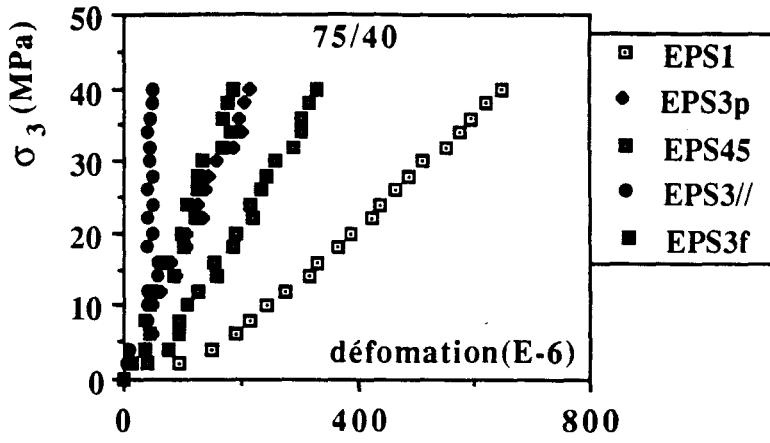
Résultats des essais hydrostatiques

Les essais sont classés par orientation et par pression





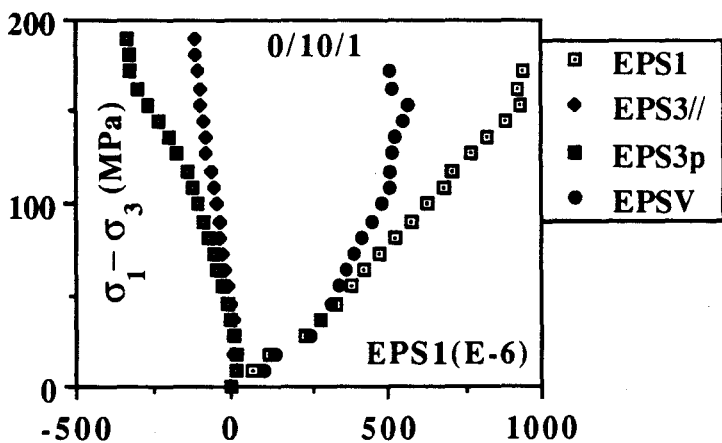
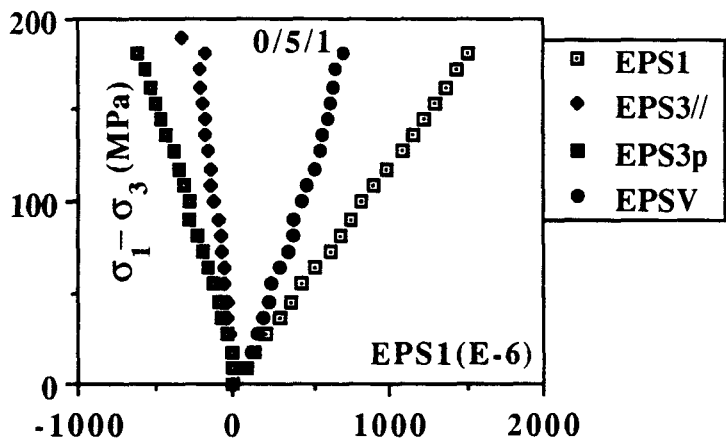
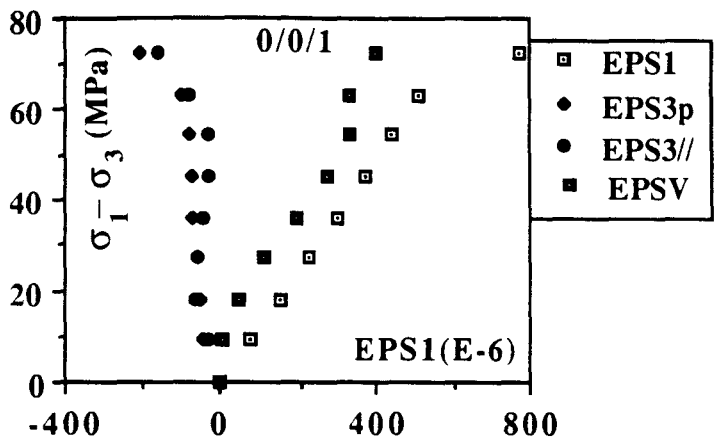


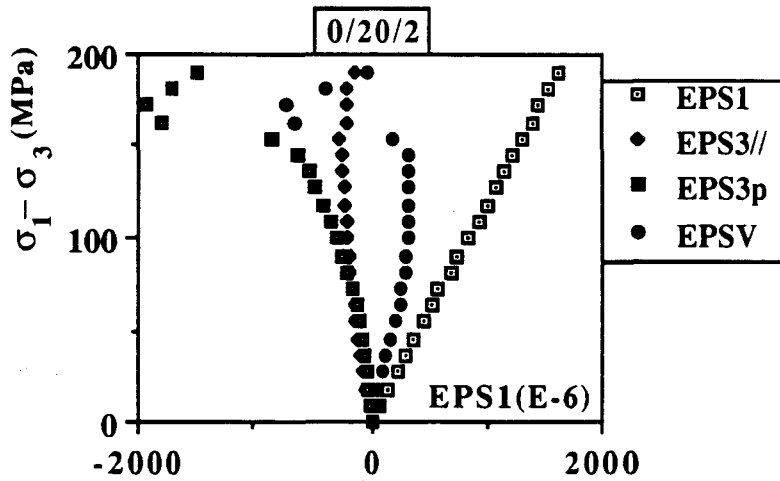
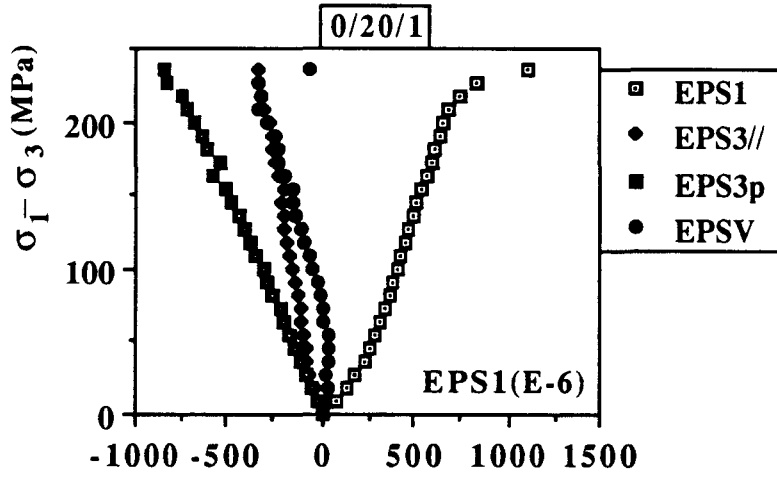
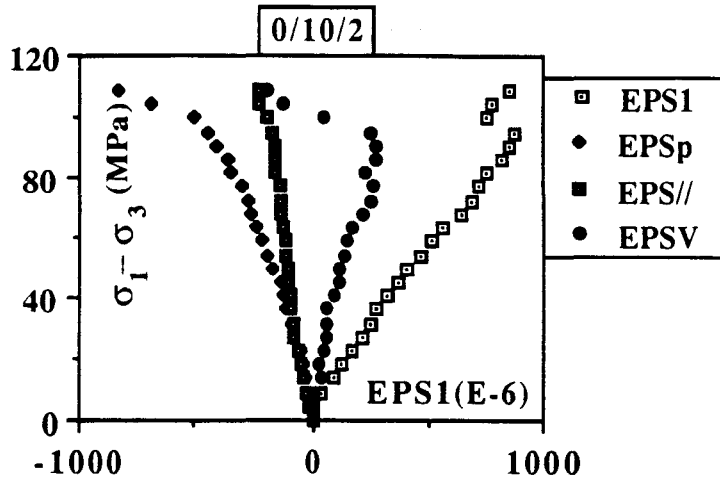


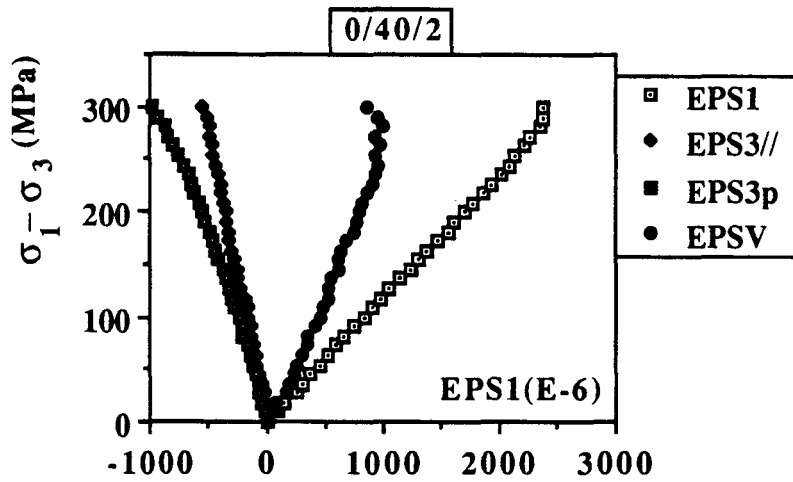
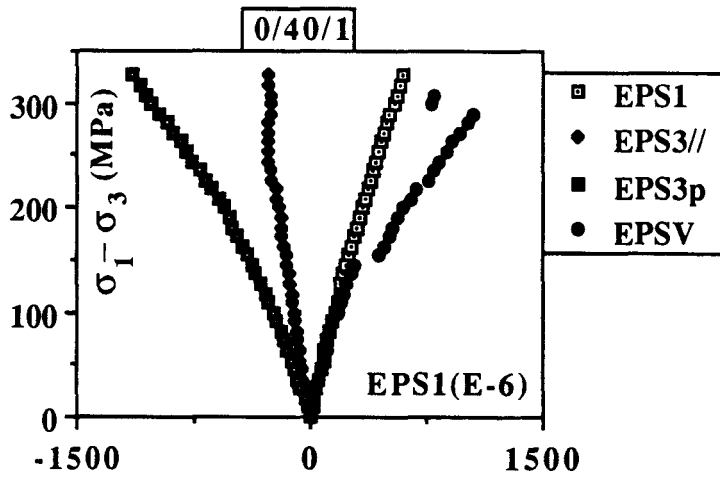
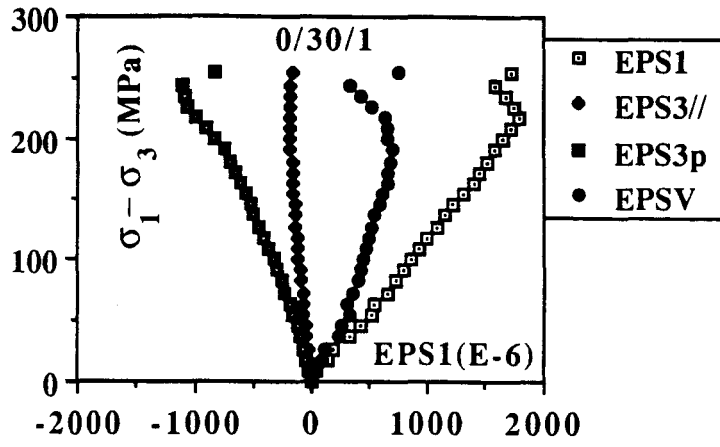
ANNEXE B

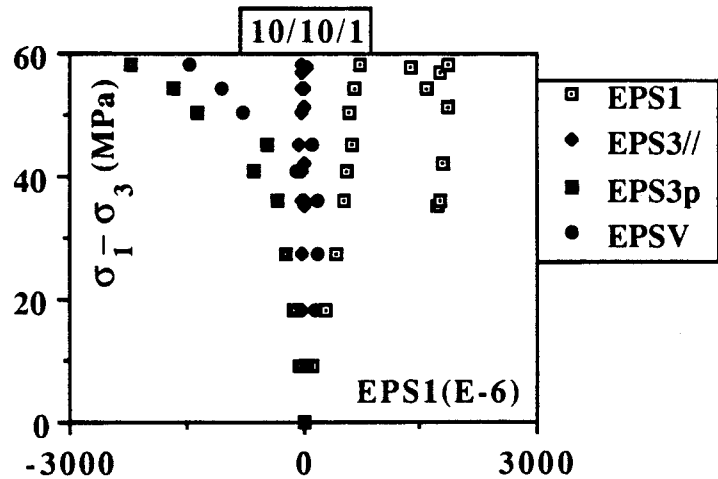
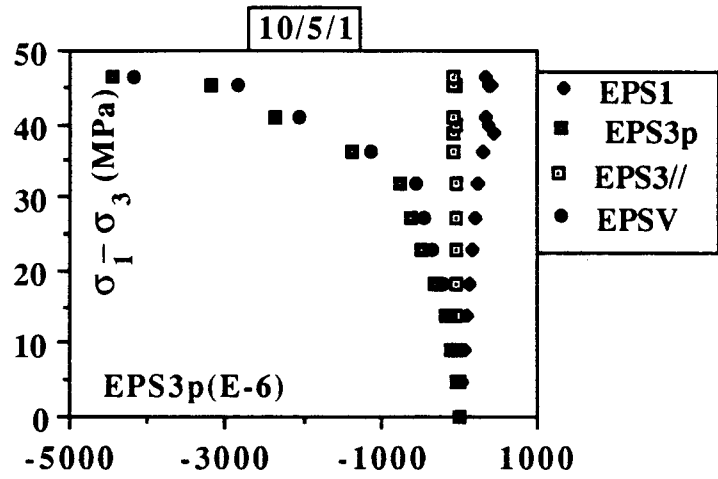
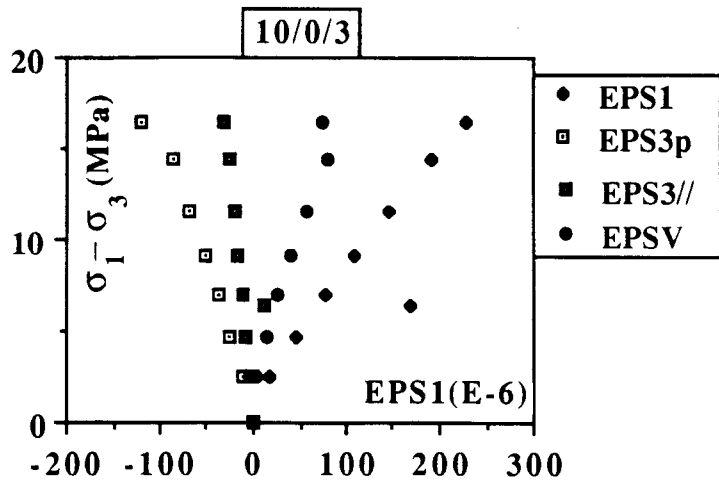
Résultats expérimentaux des essais triaxiaux

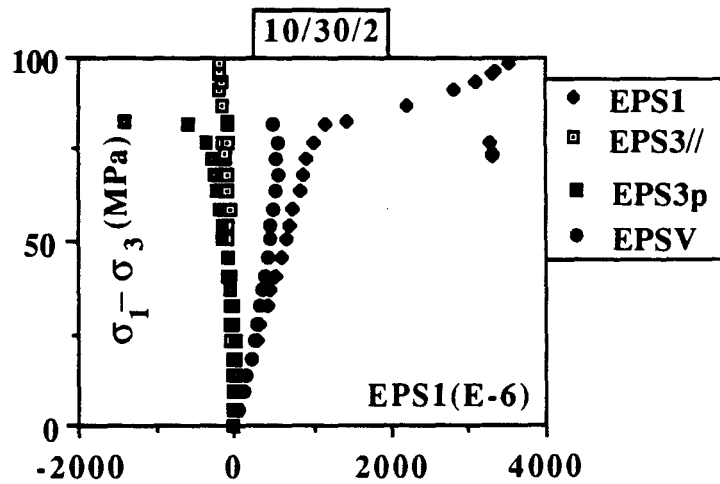
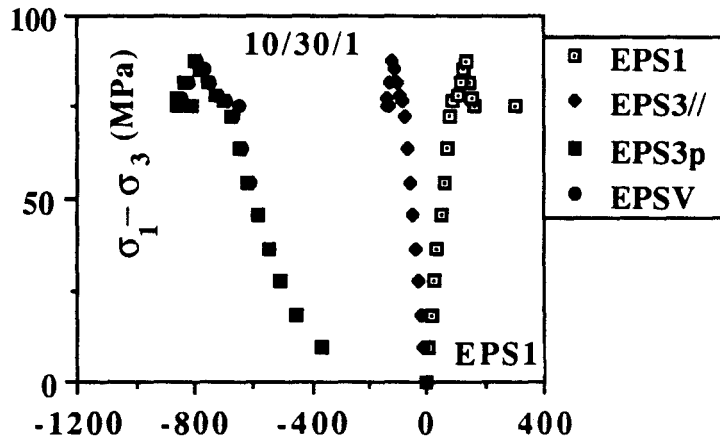
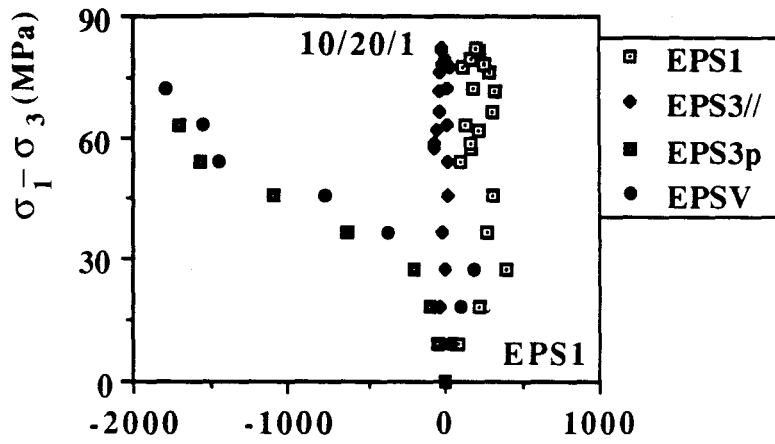
Les essais sont classés par orientation,et ensuite par pression

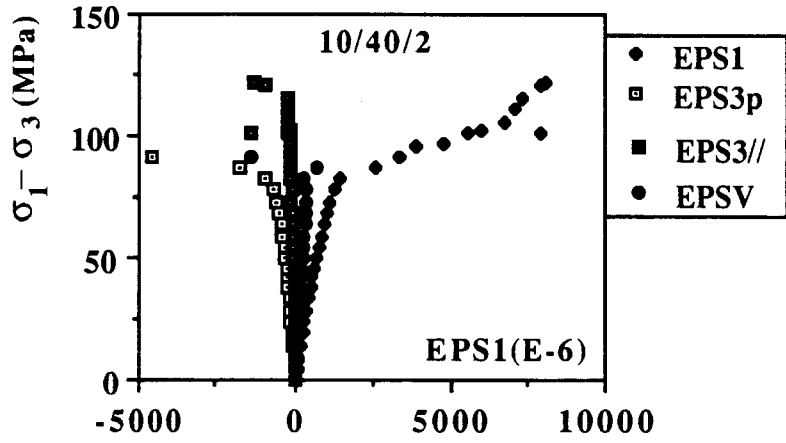
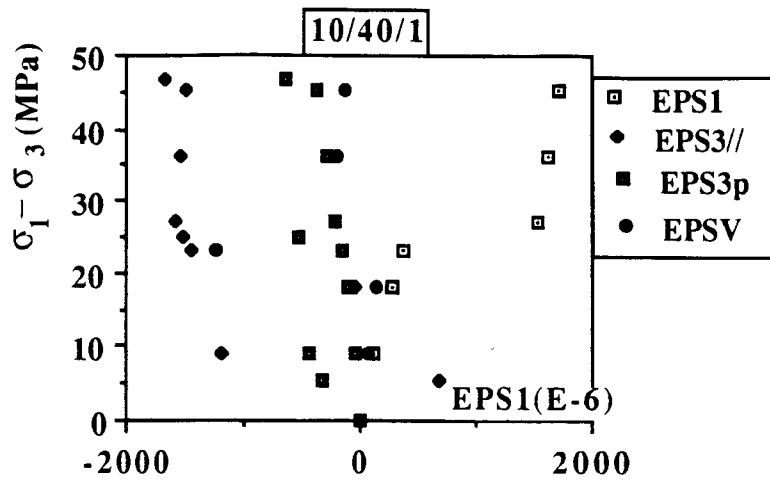


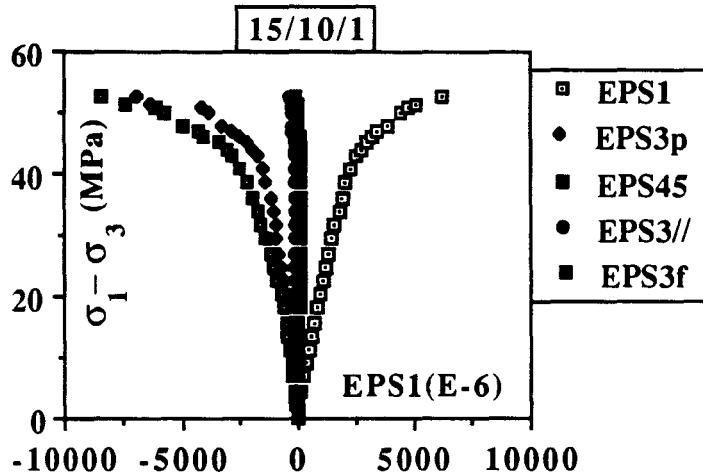
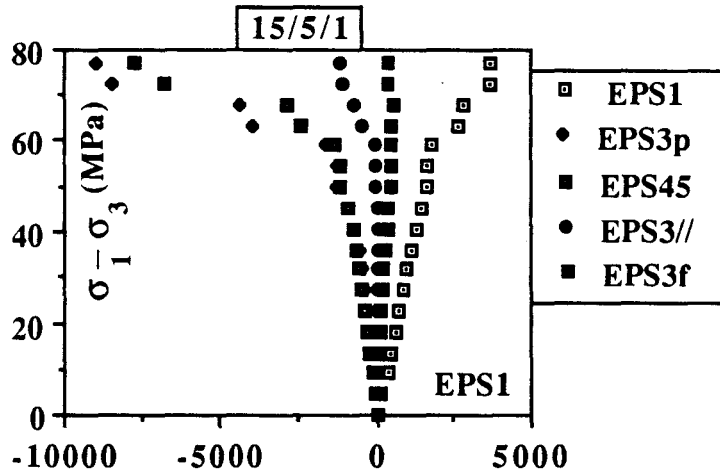
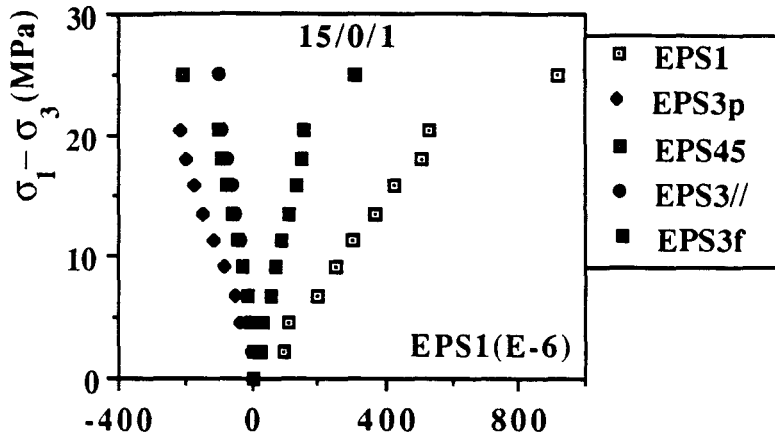


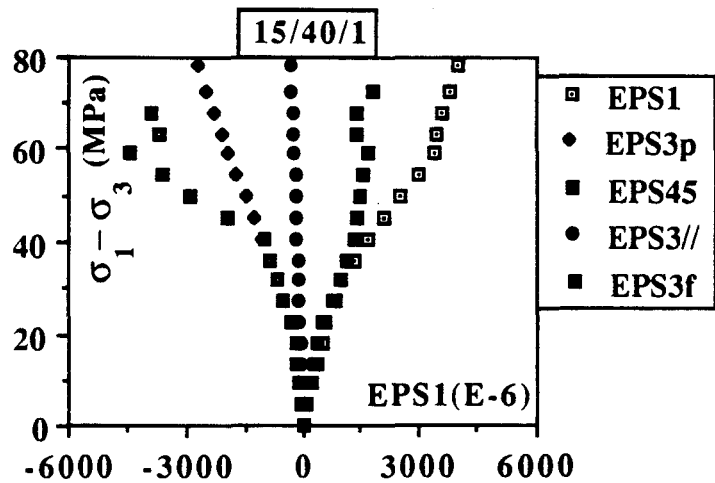
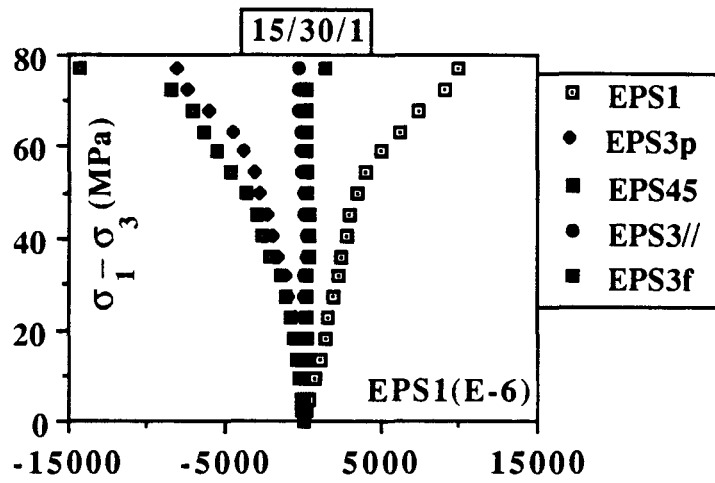
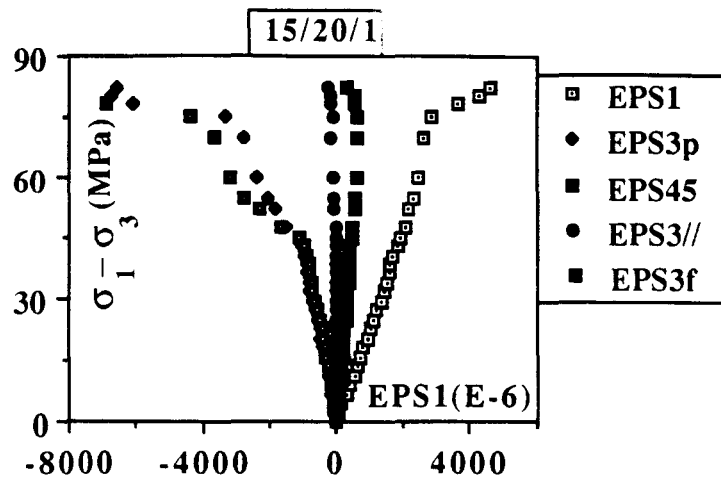


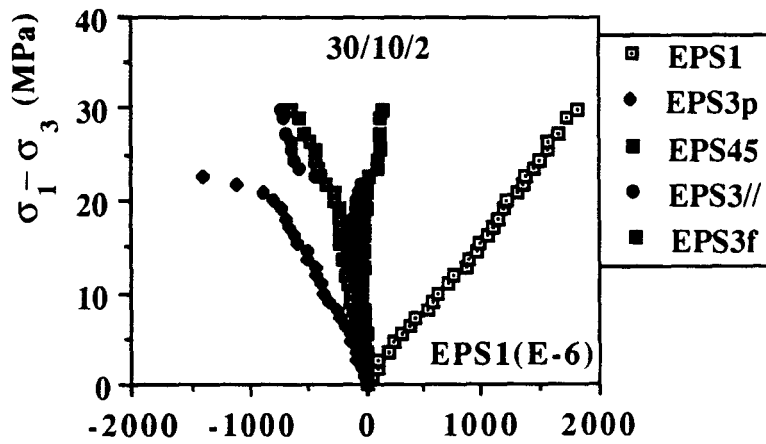
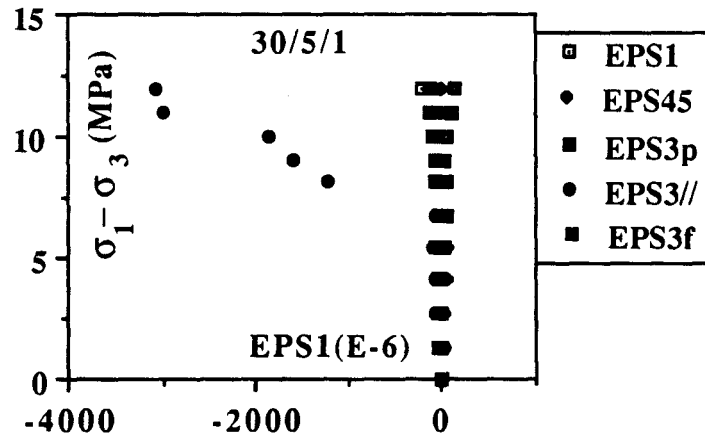
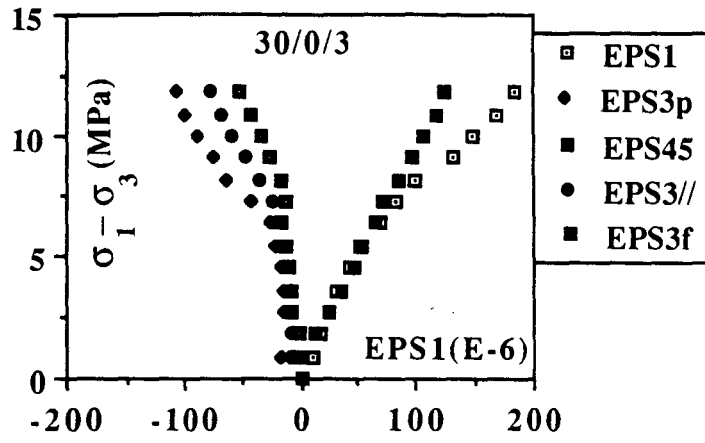


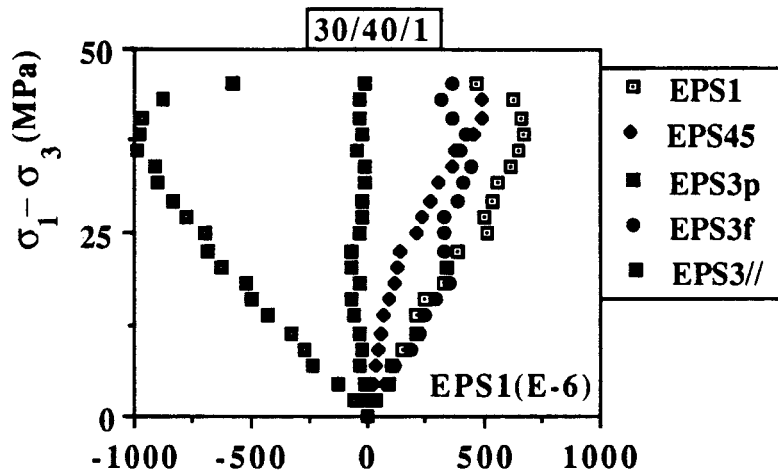
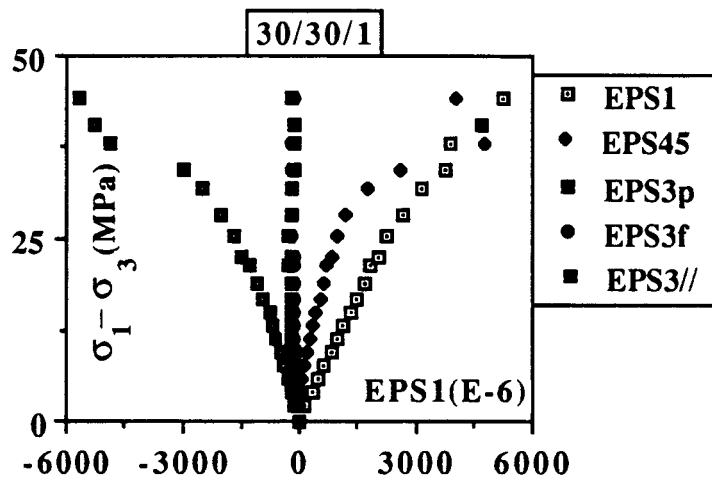
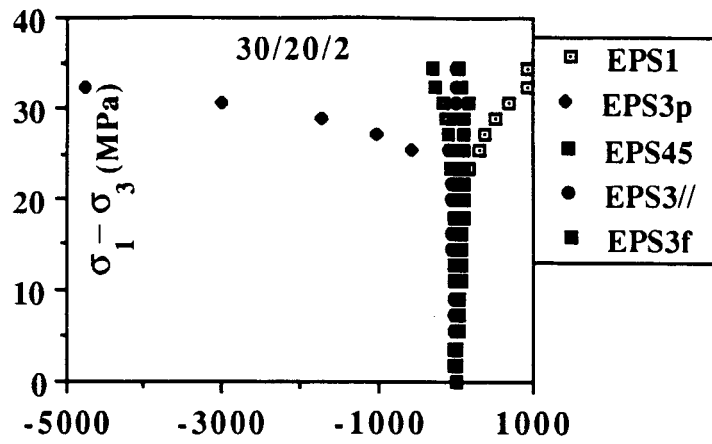


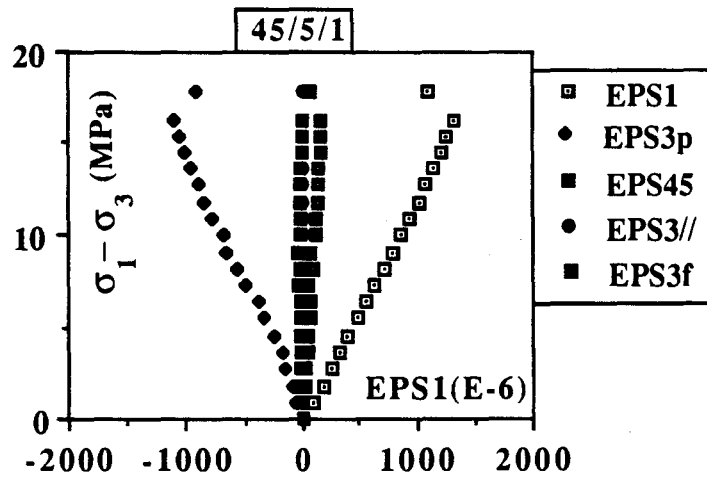
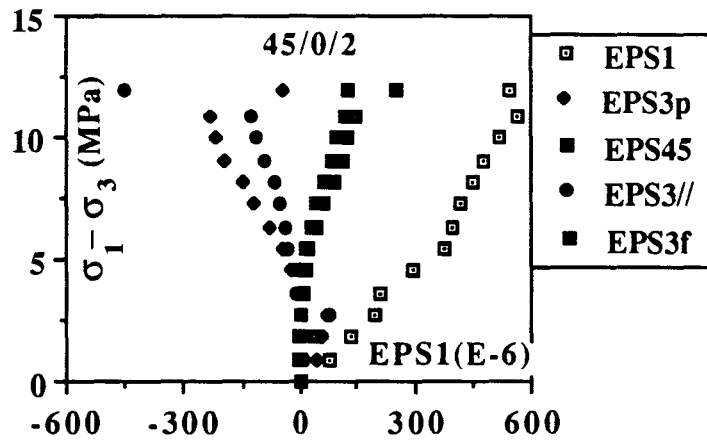
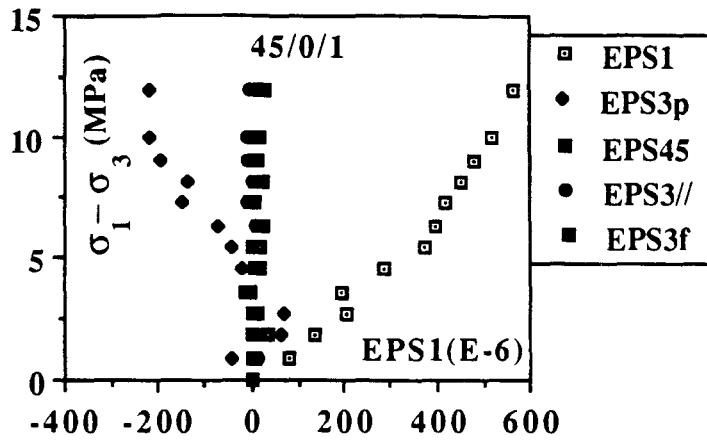


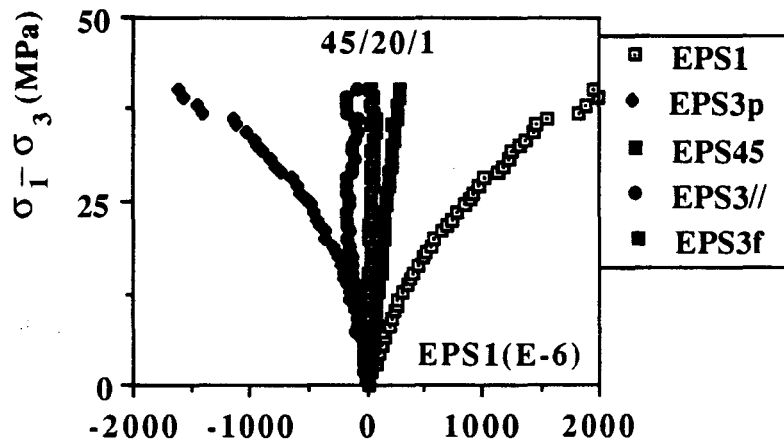
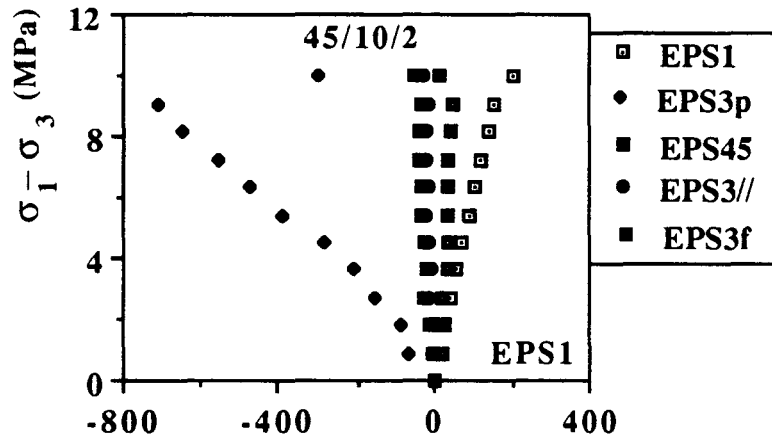
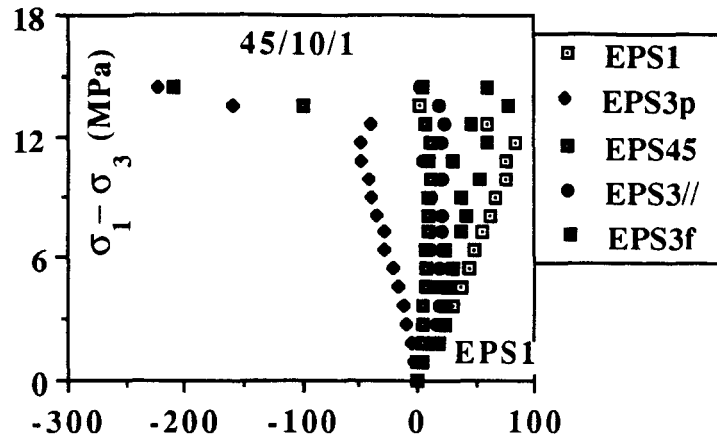


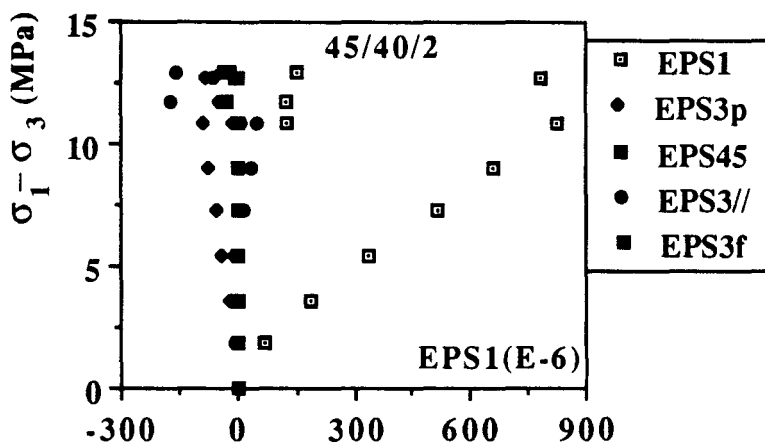
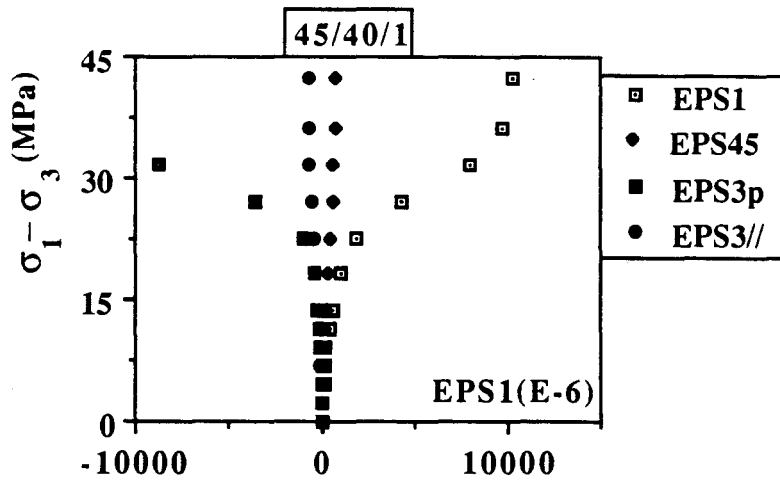
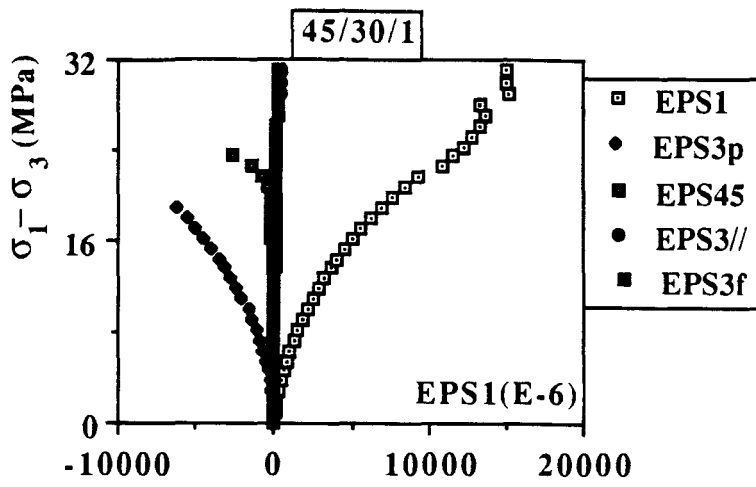


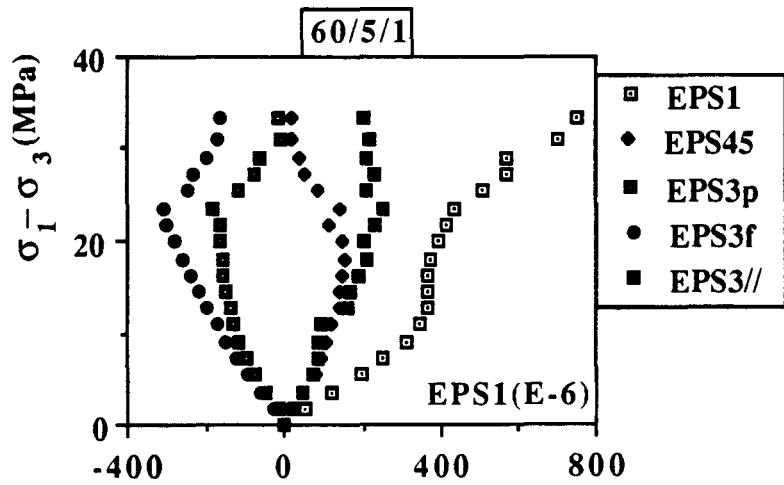
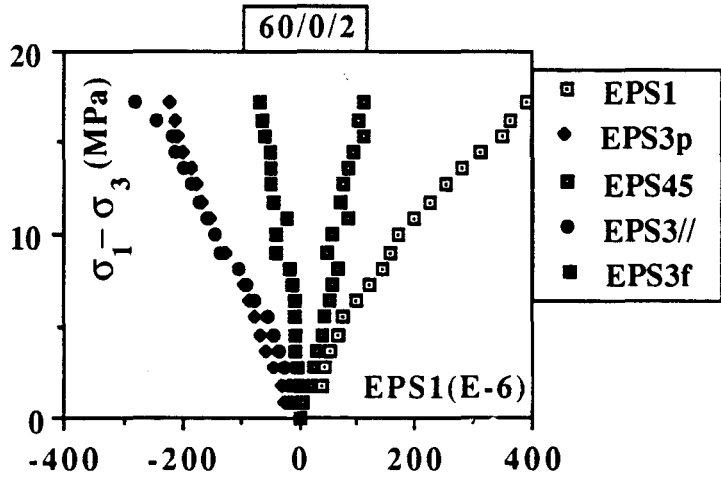
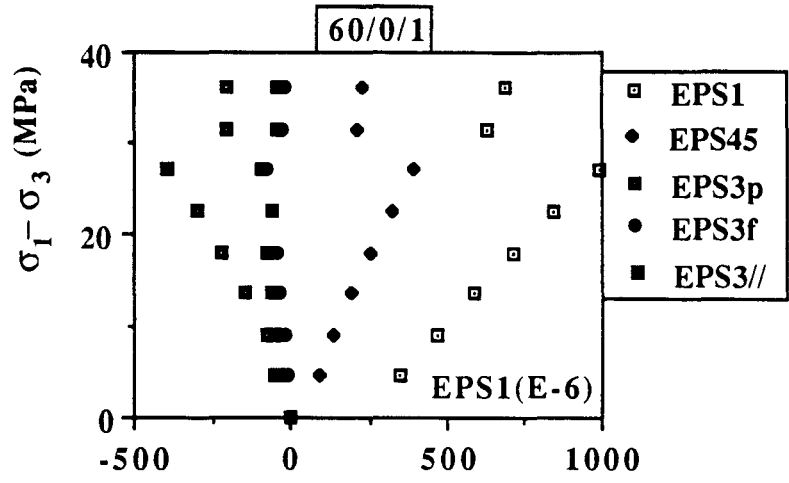


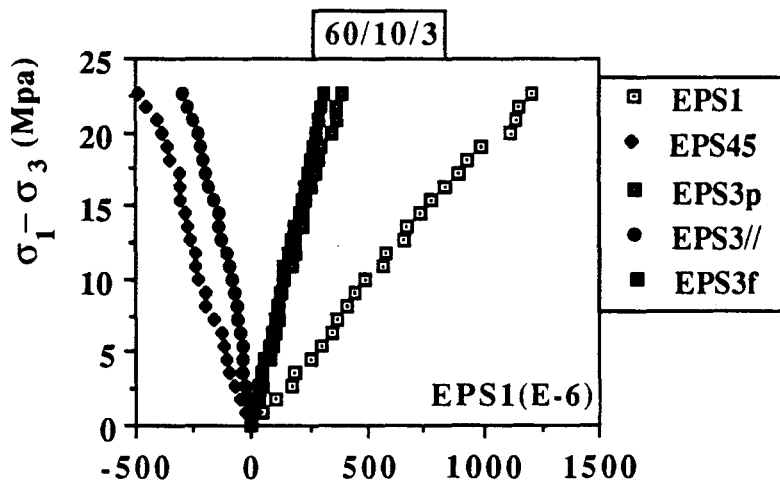
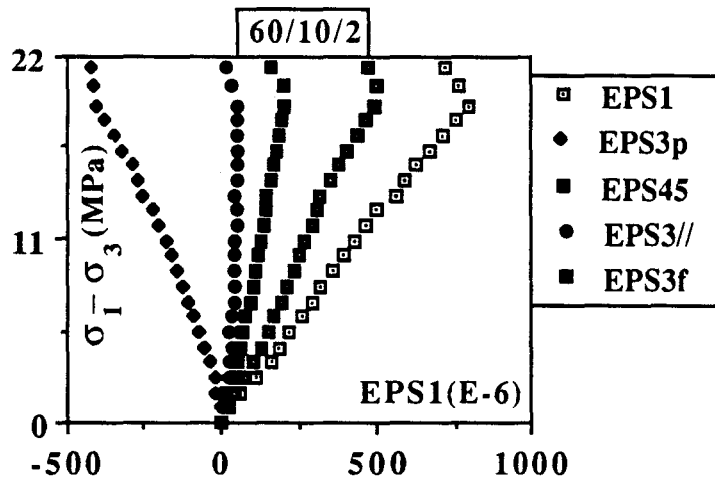
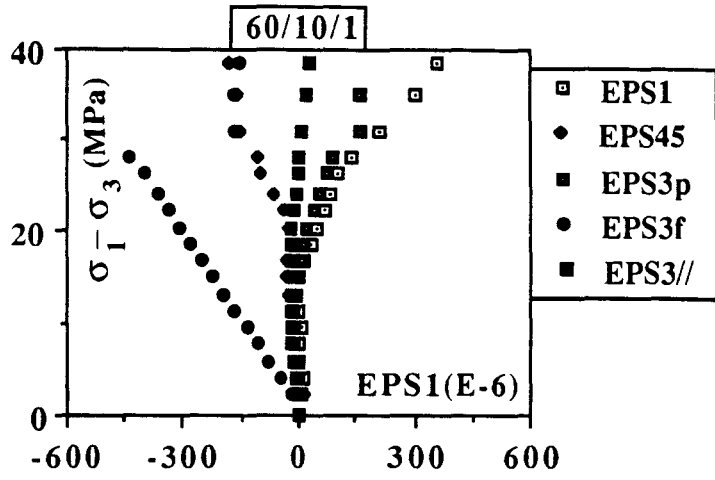


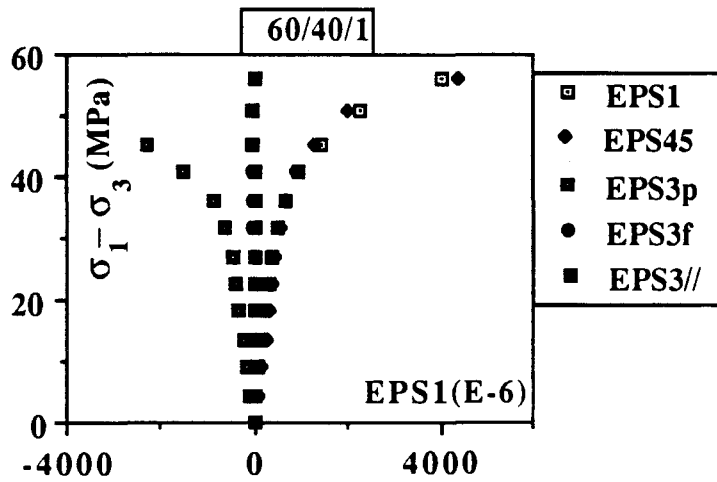
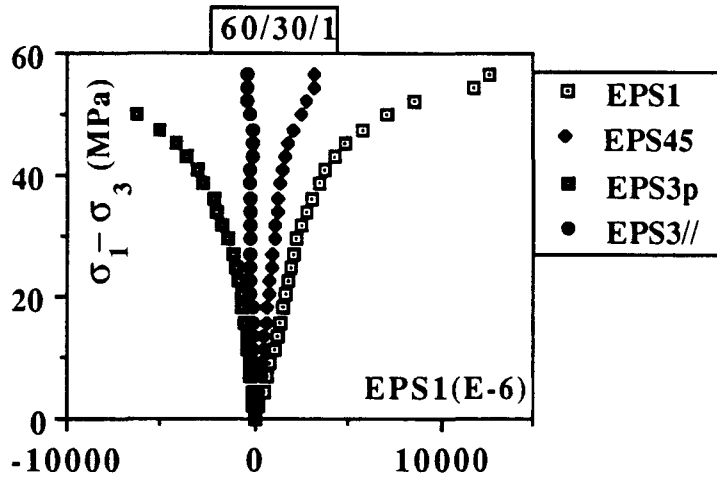
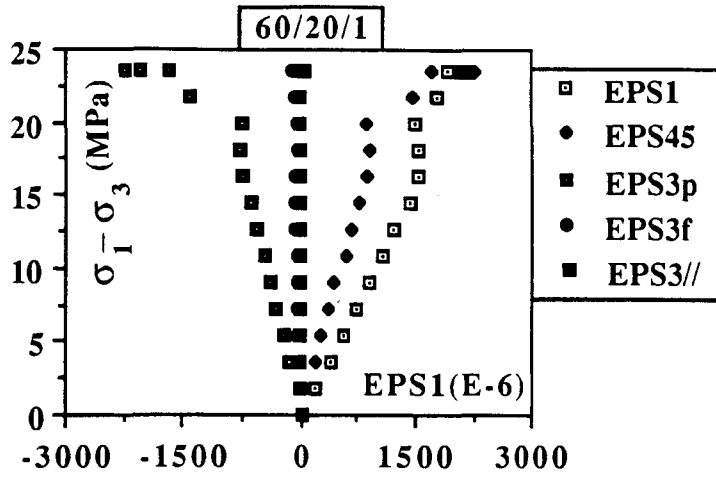


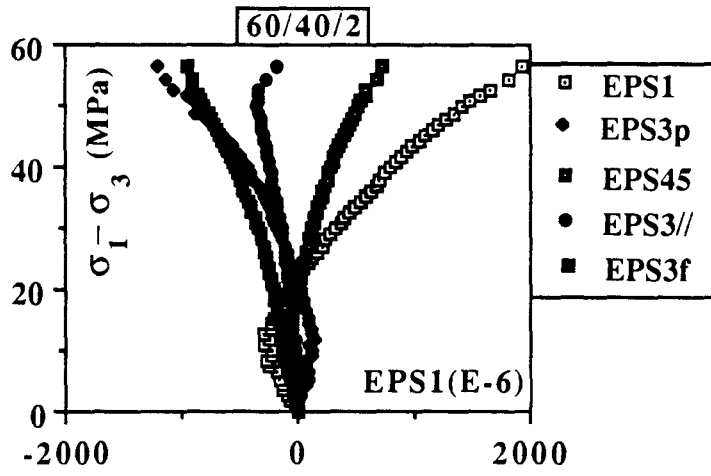


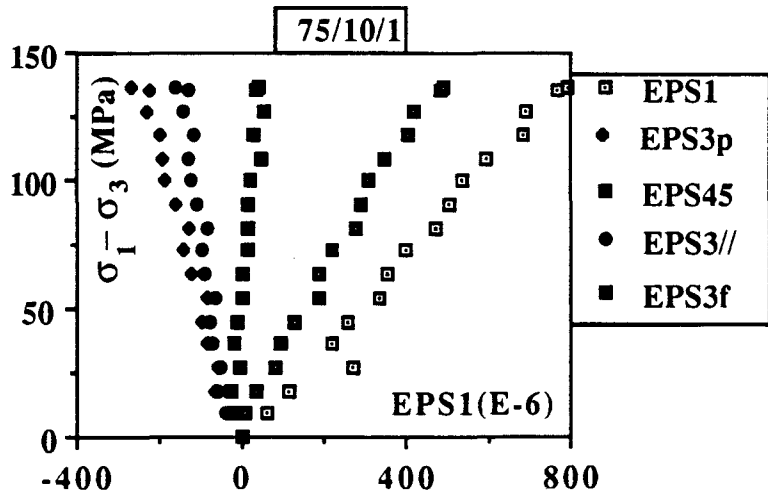
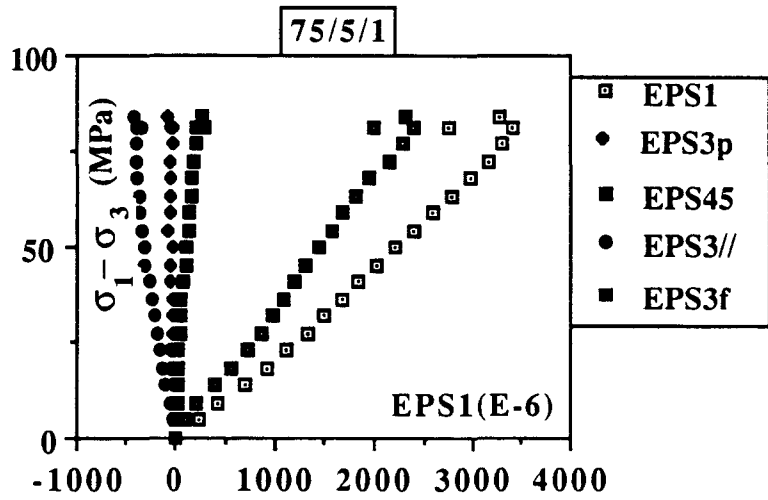
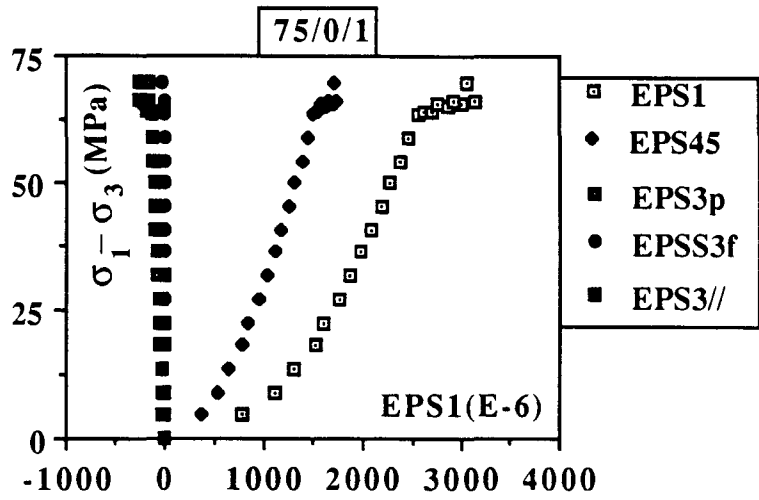


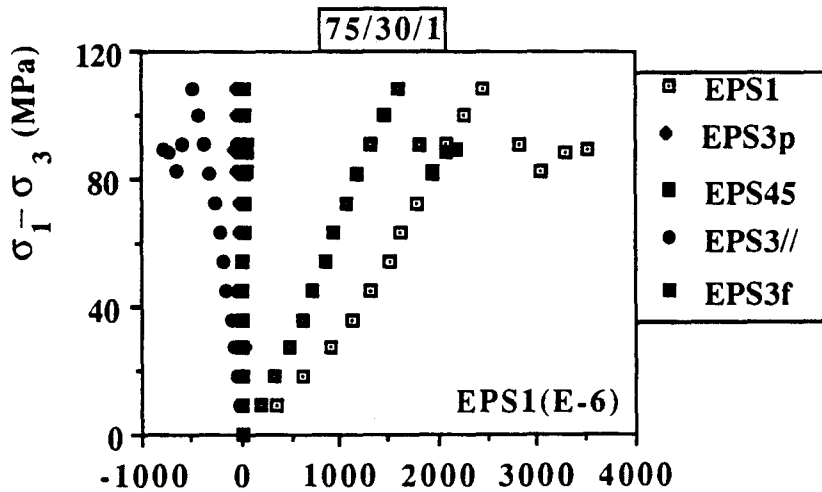
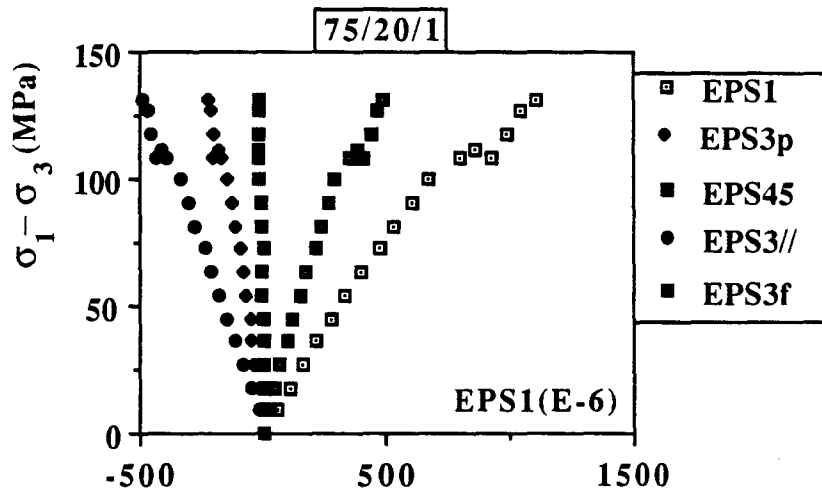
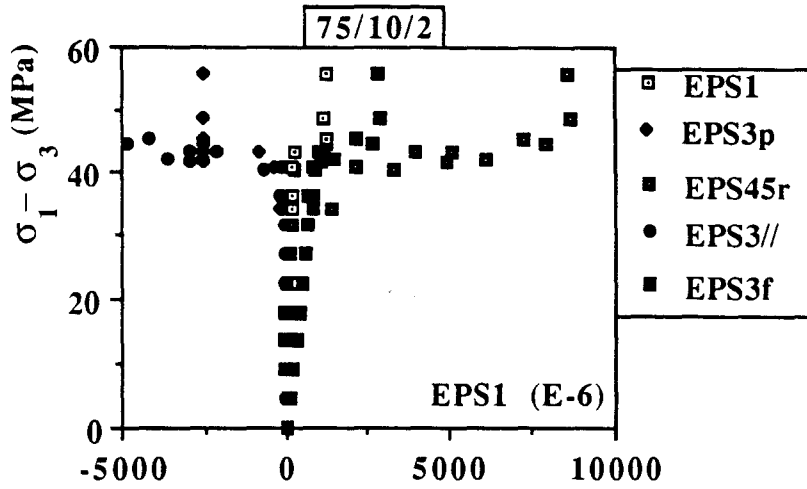


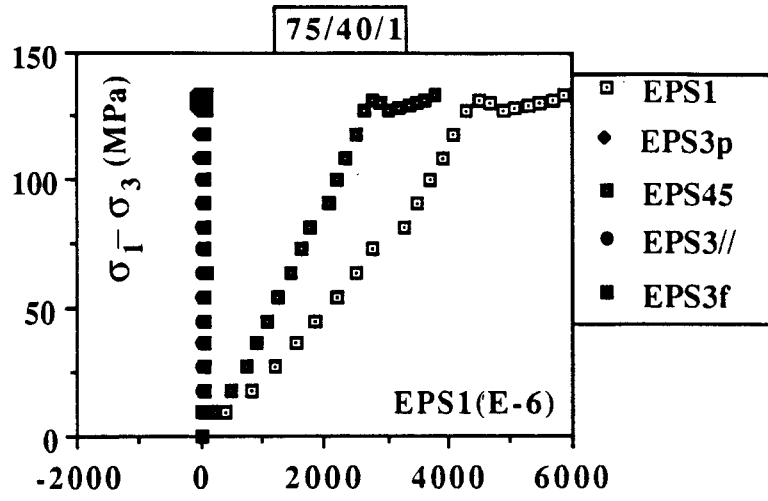


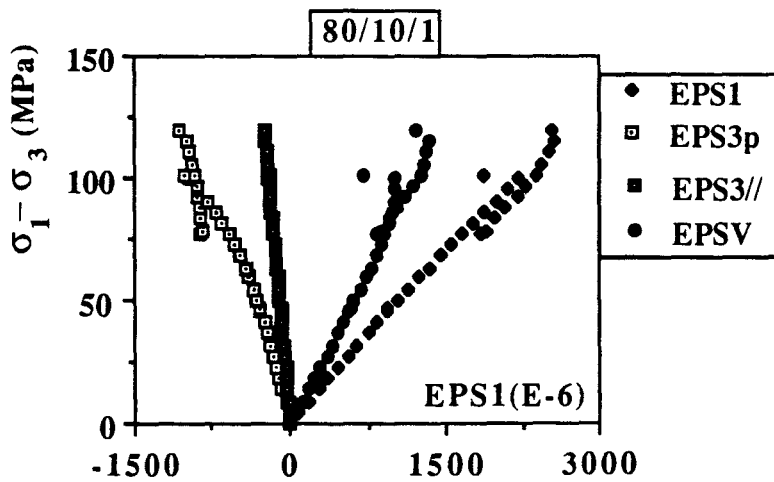
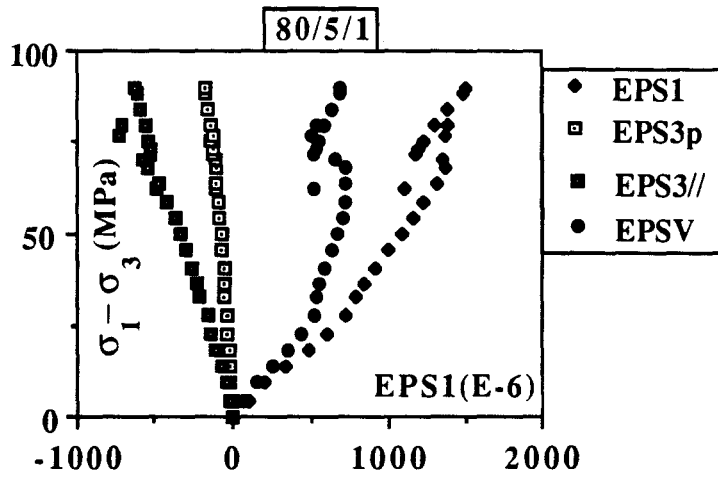
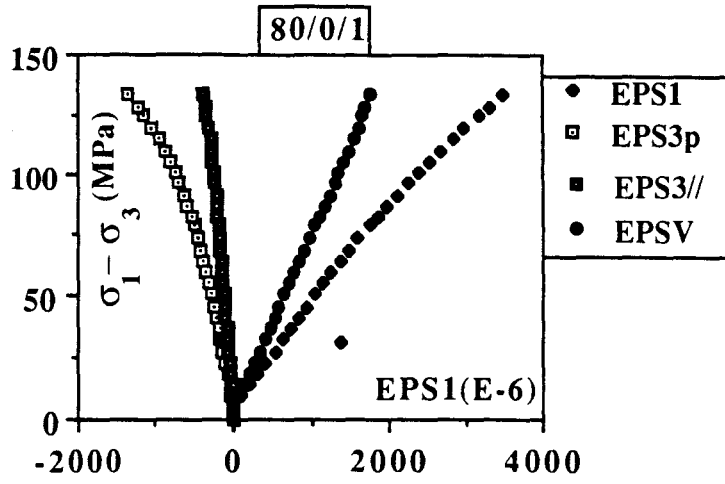


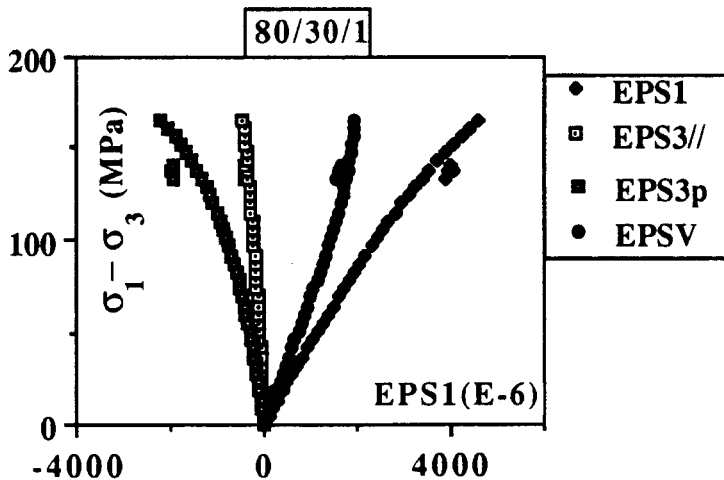
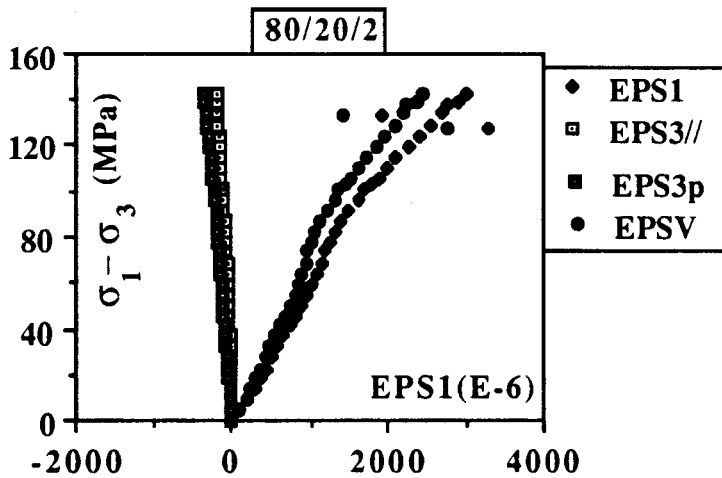
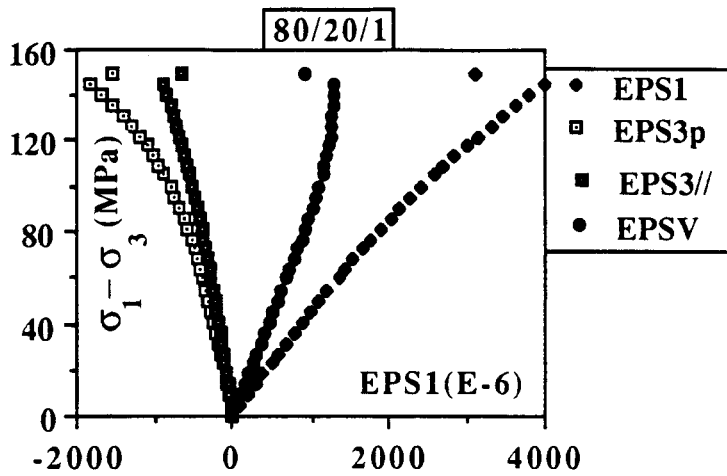


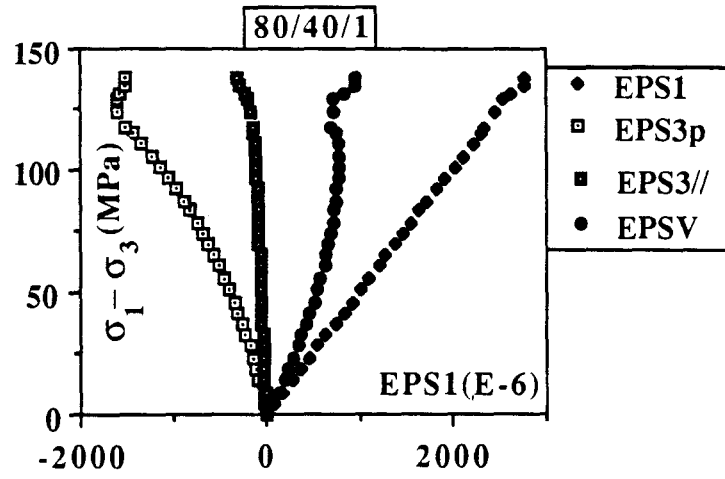


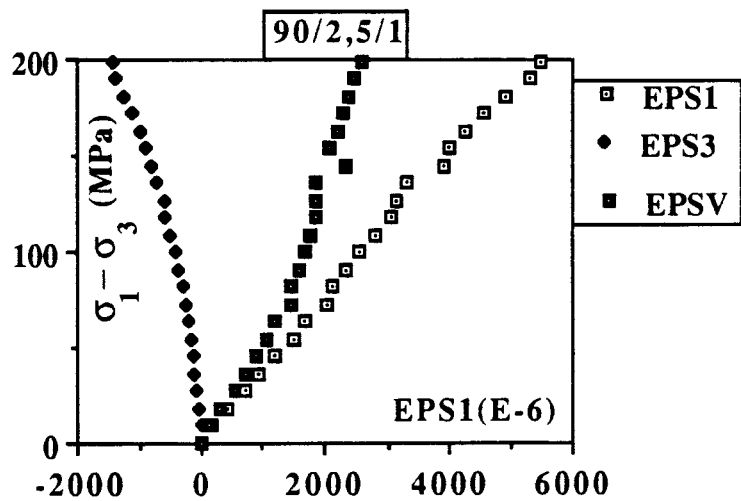
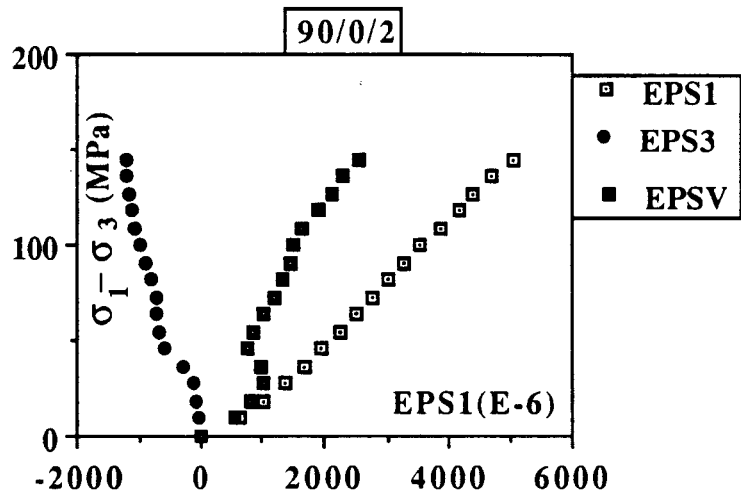
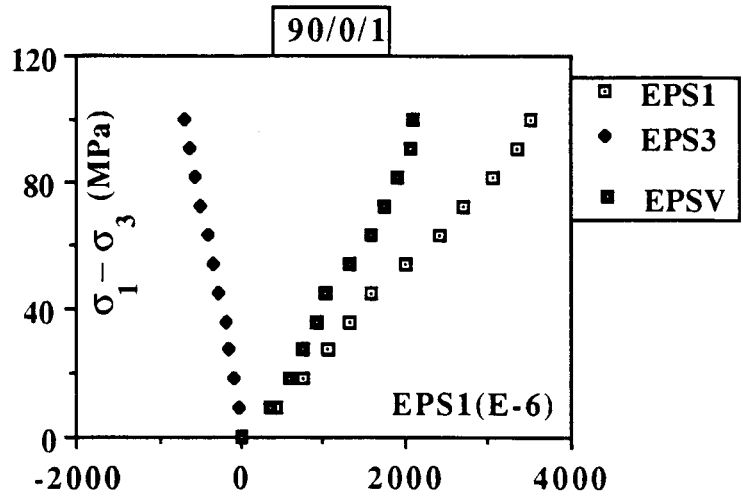


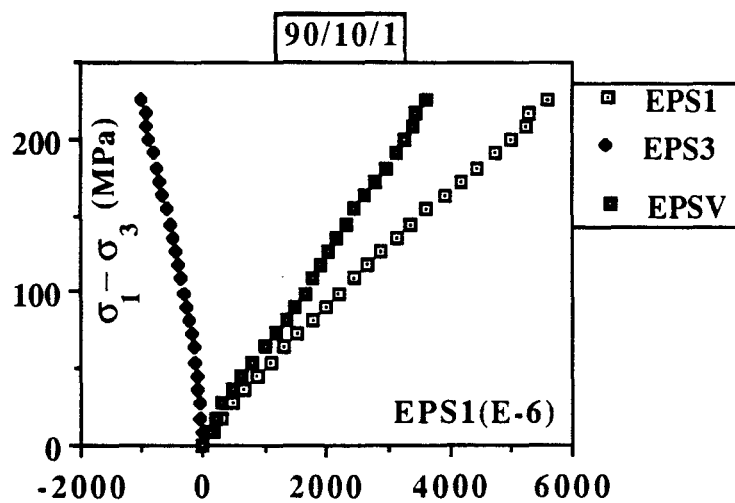
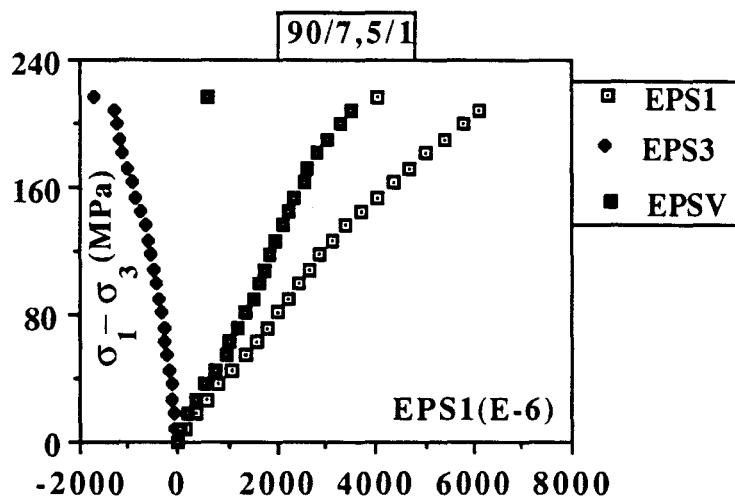
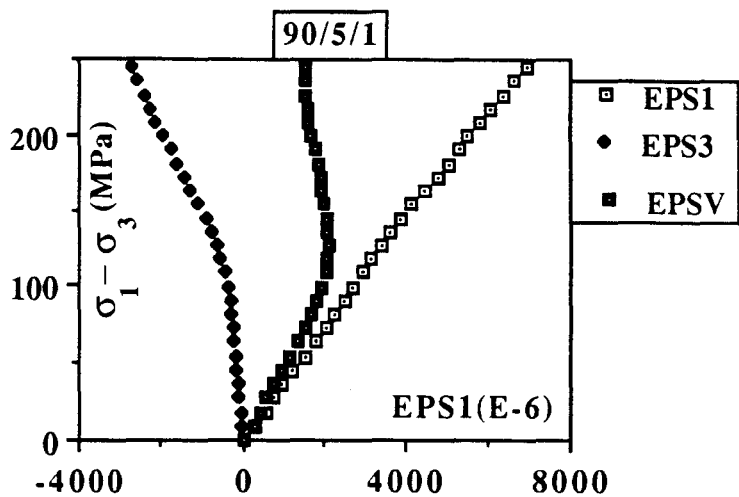


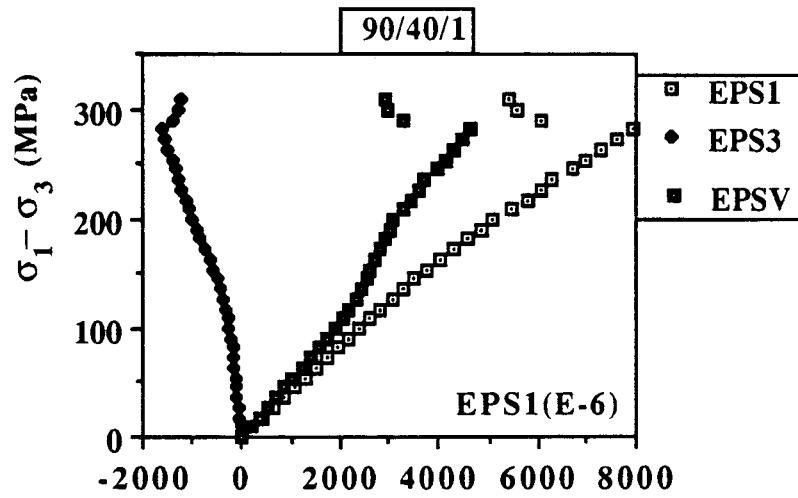
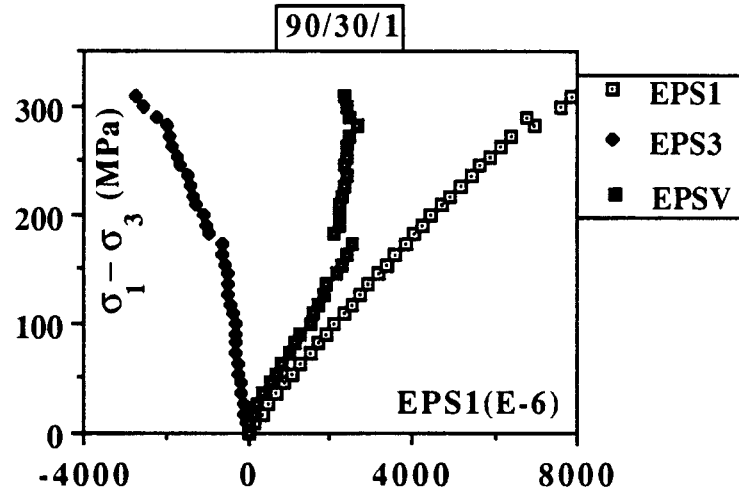
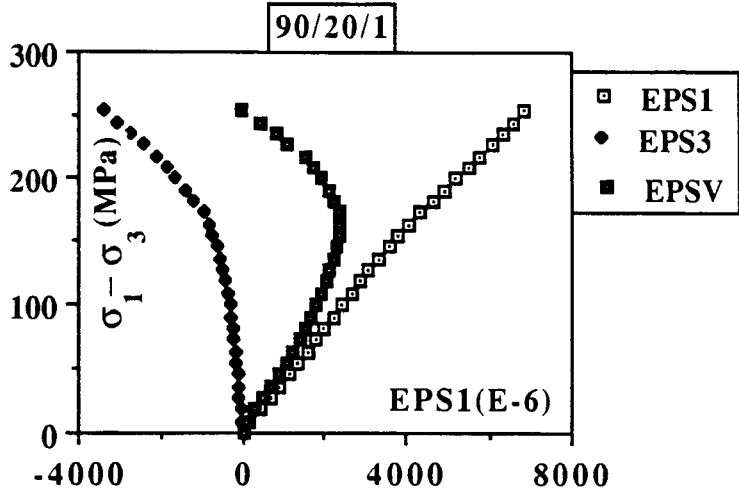


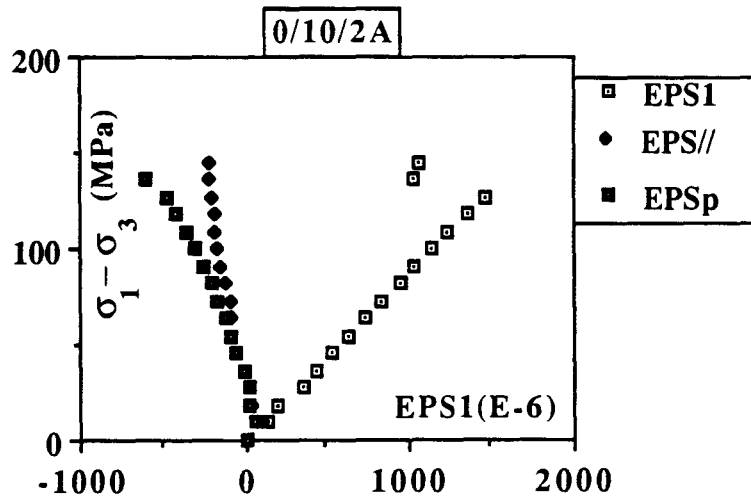
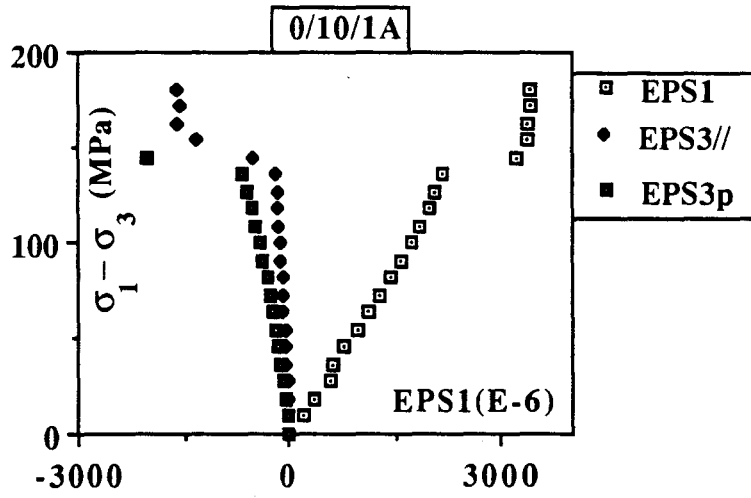
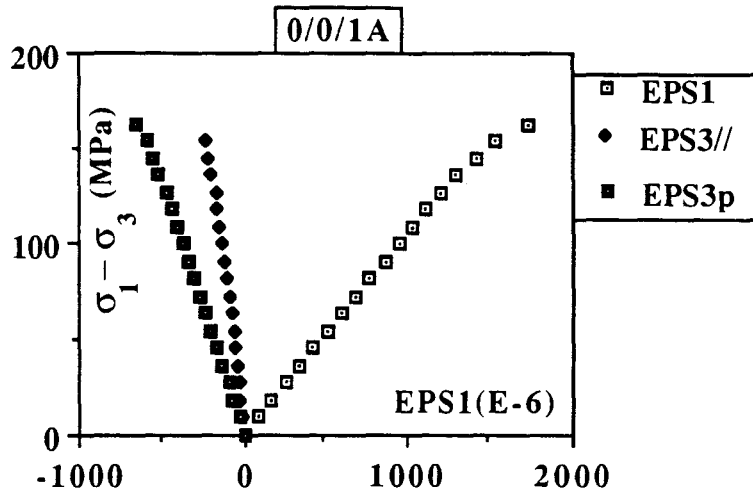


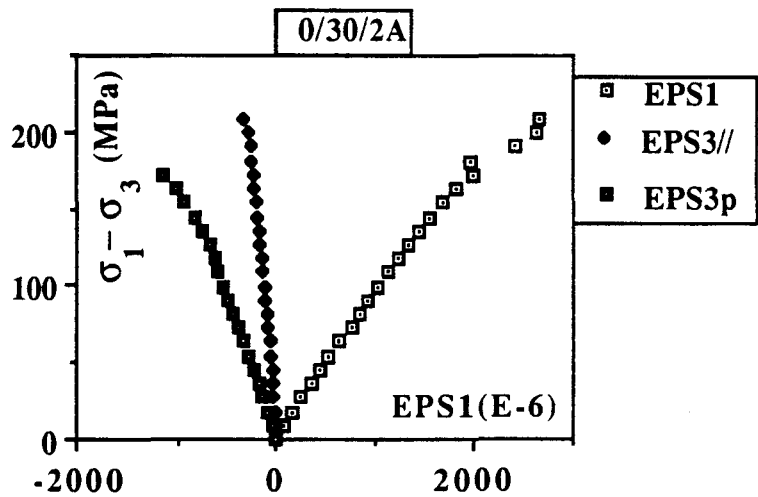
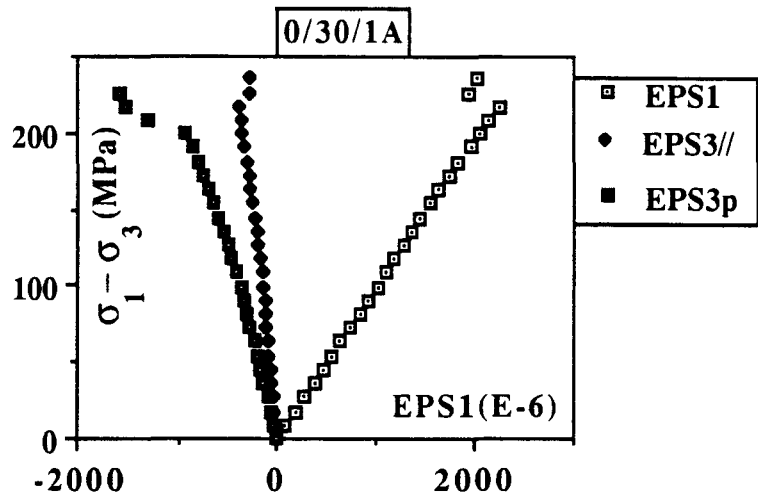
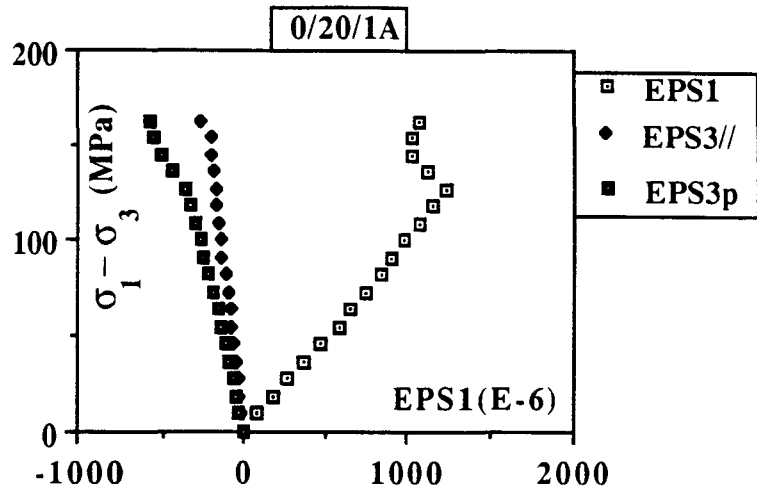


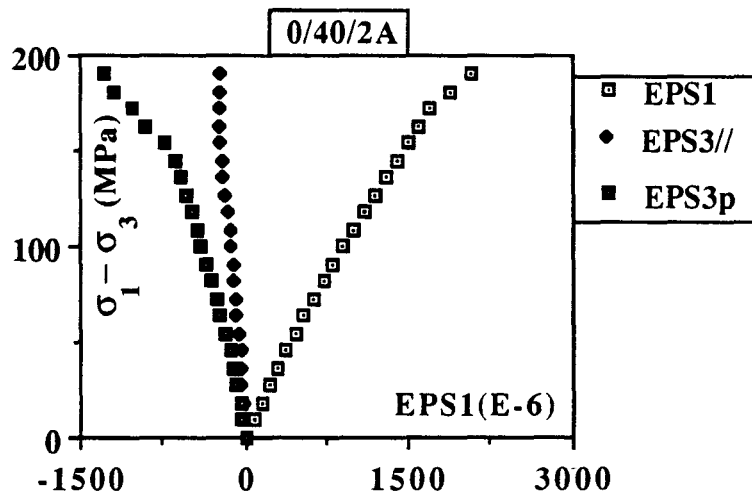
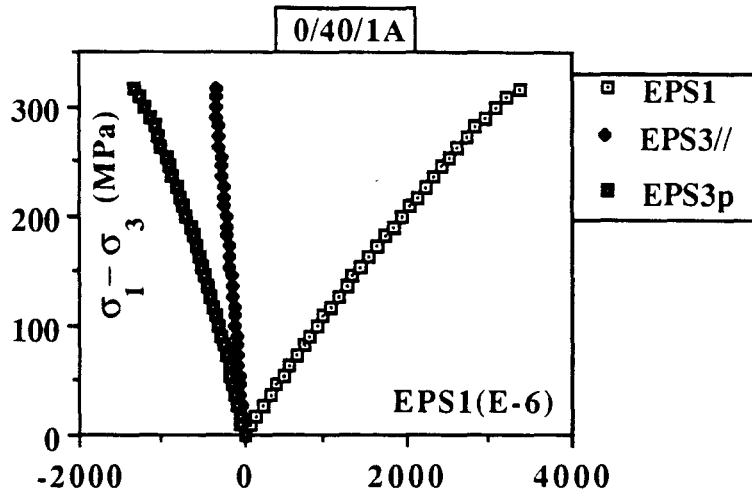


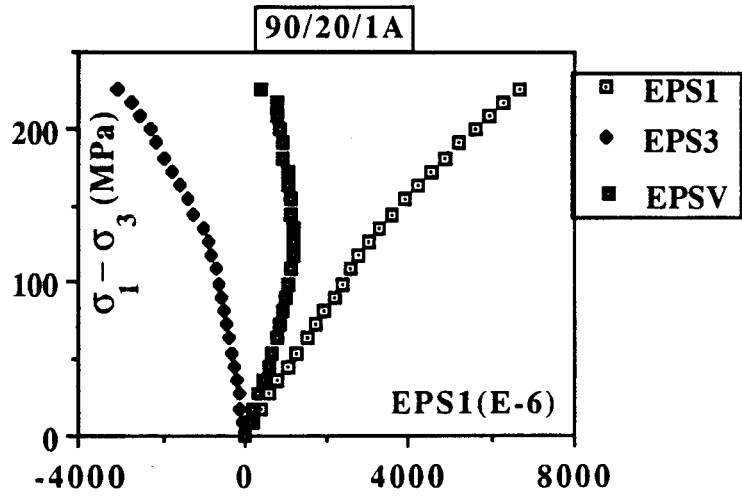
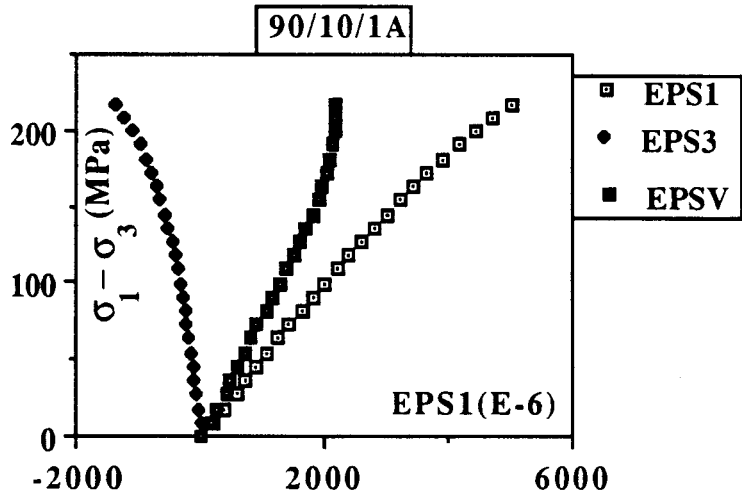
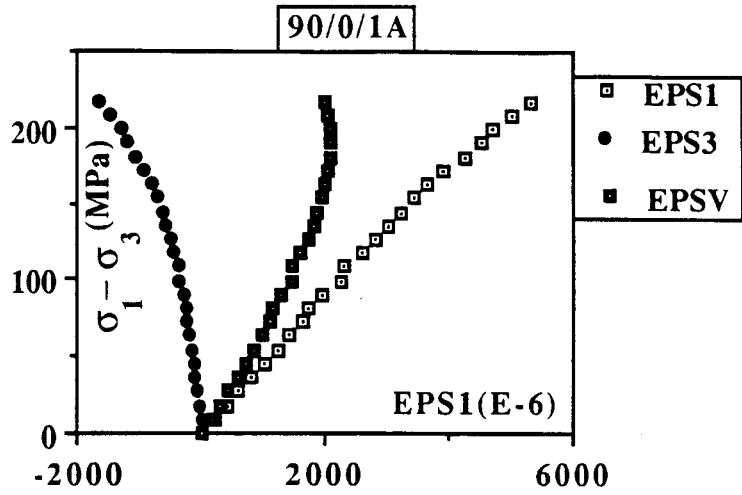


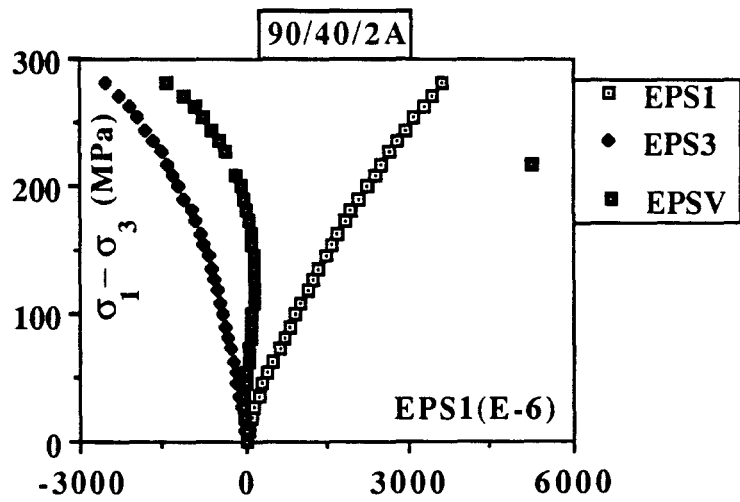
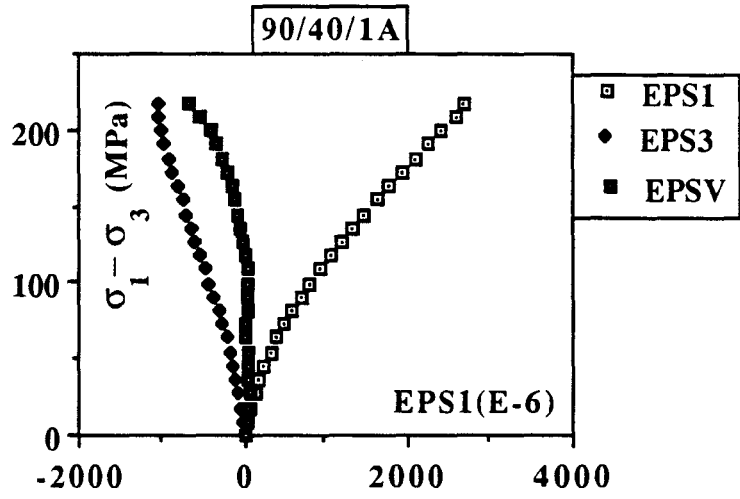
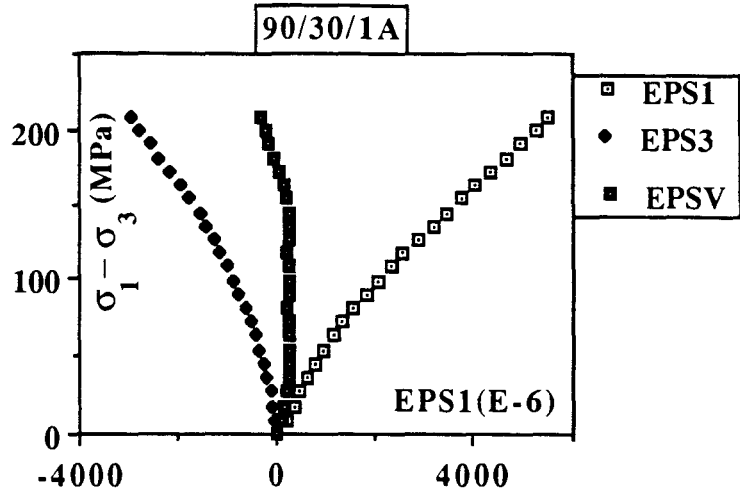








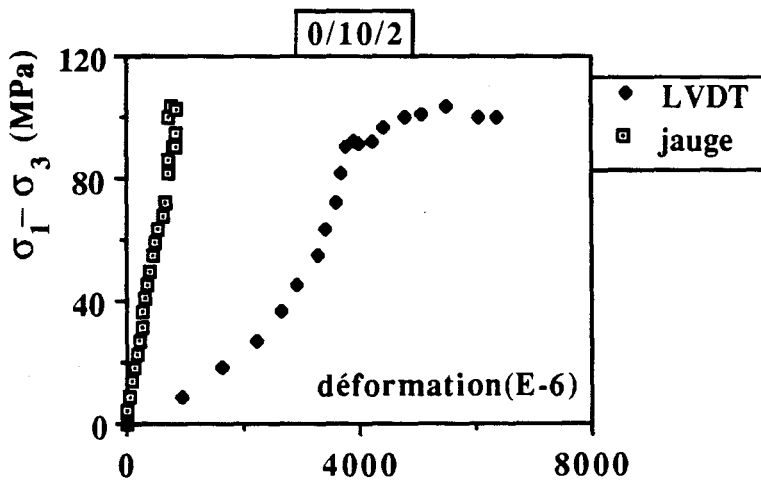
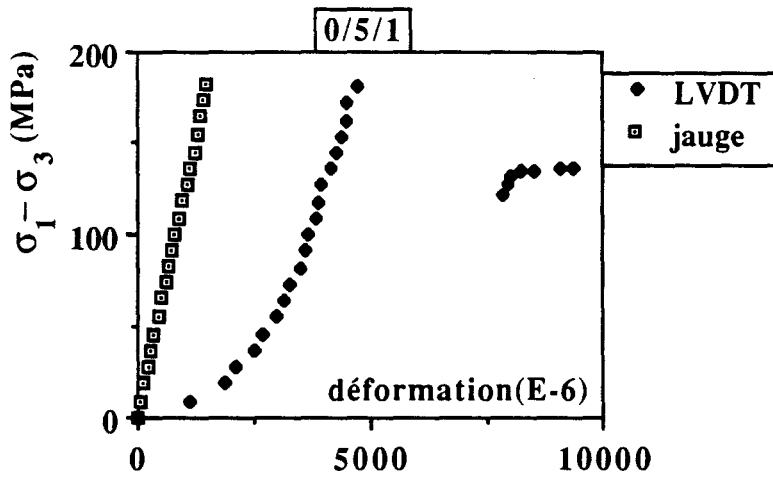
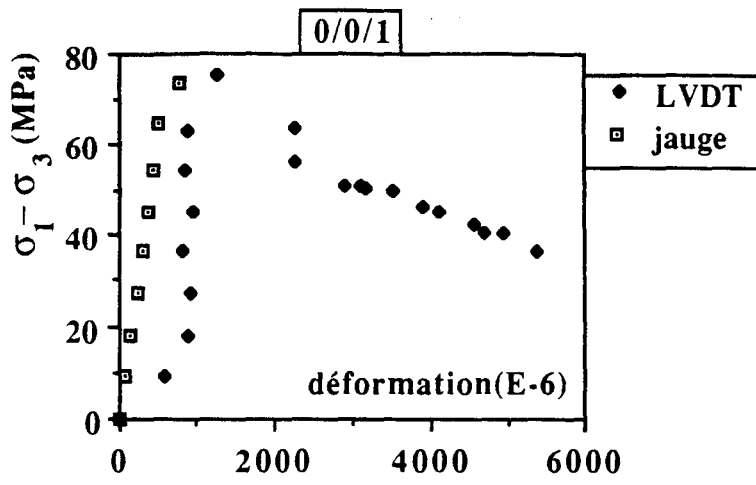


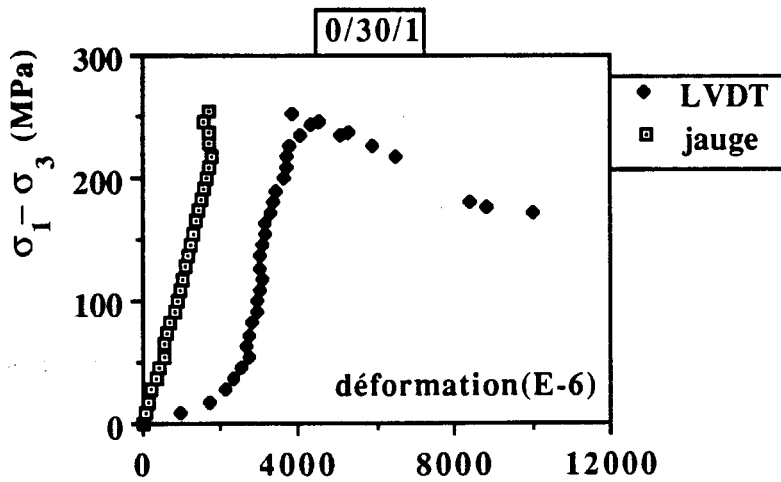
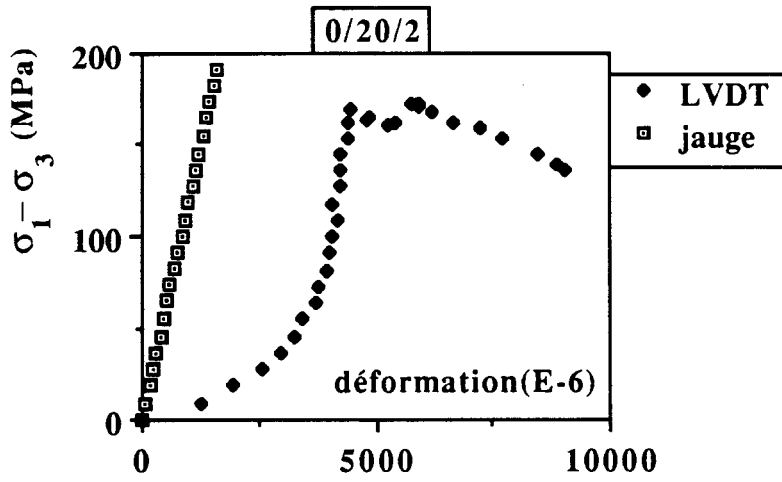
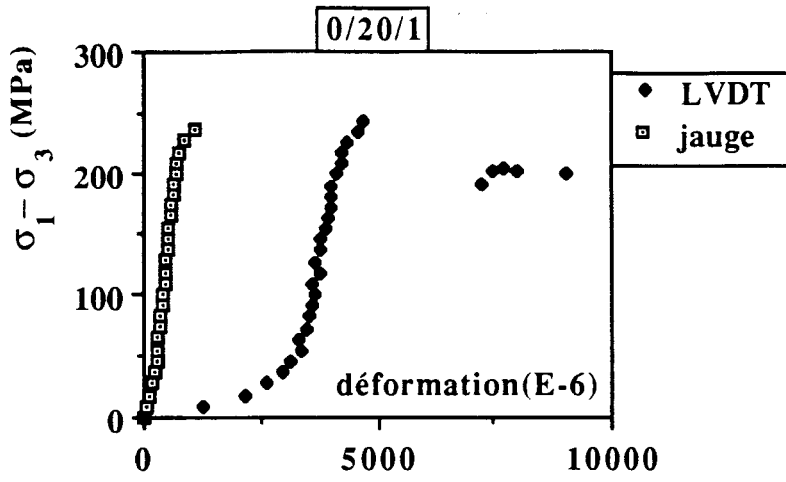


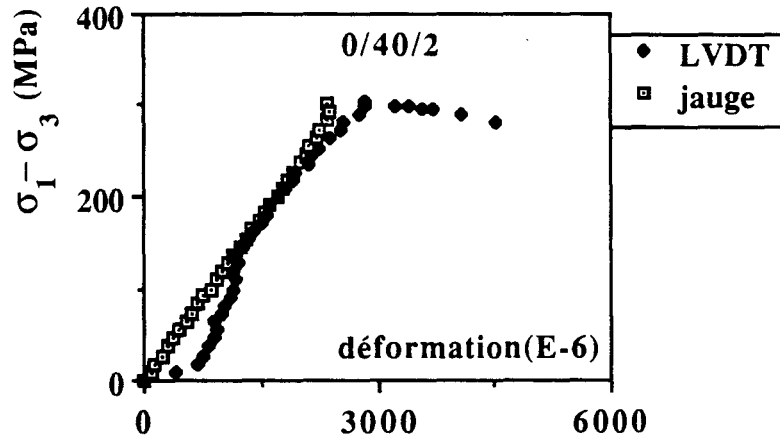
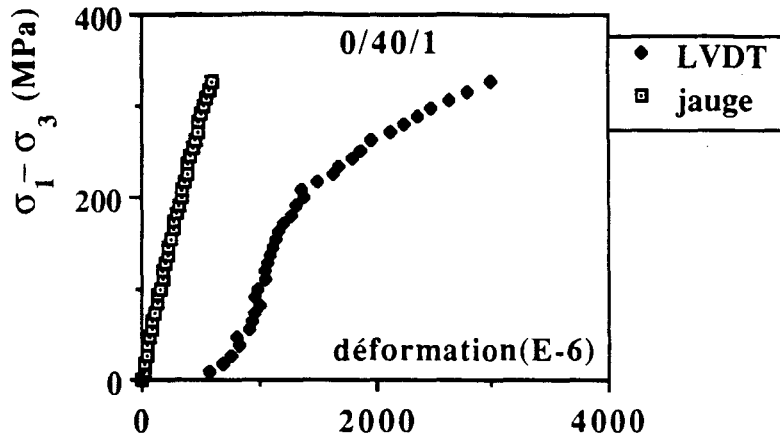
ANNEXE C

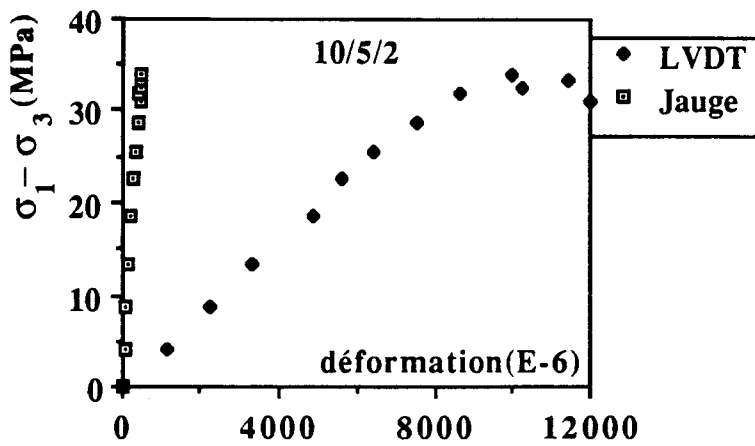
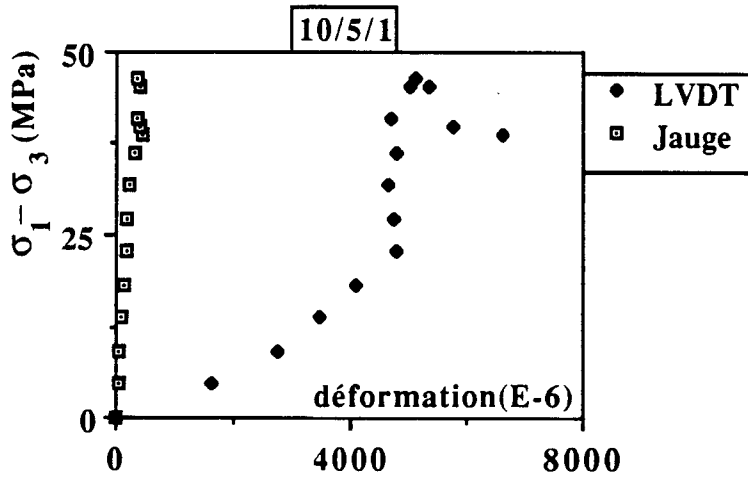
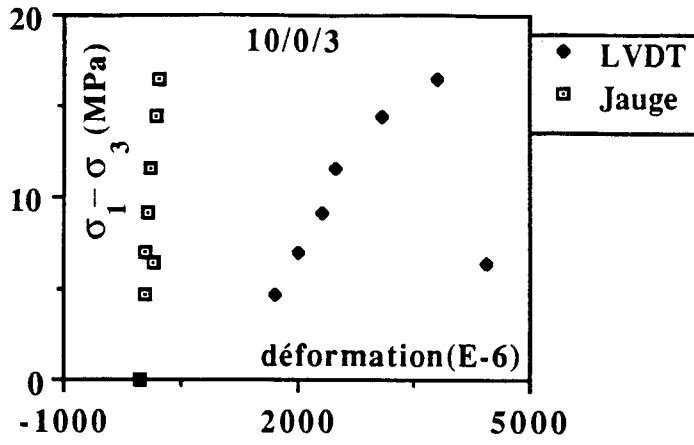
Résultats obtenus à partir des courbes L.V.D.T.

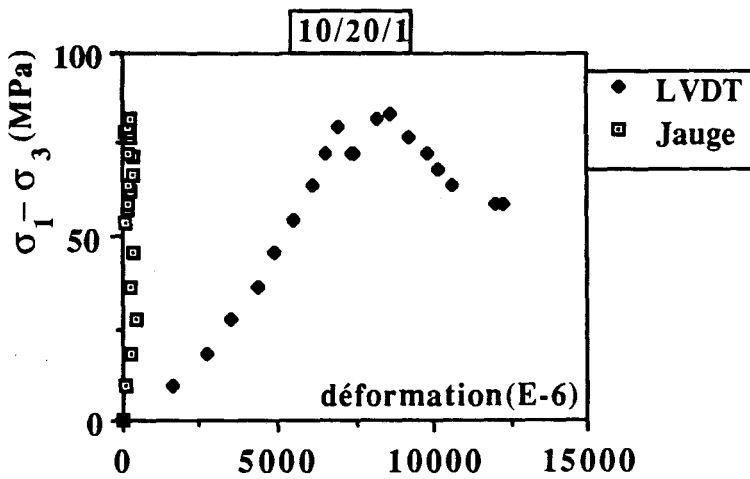
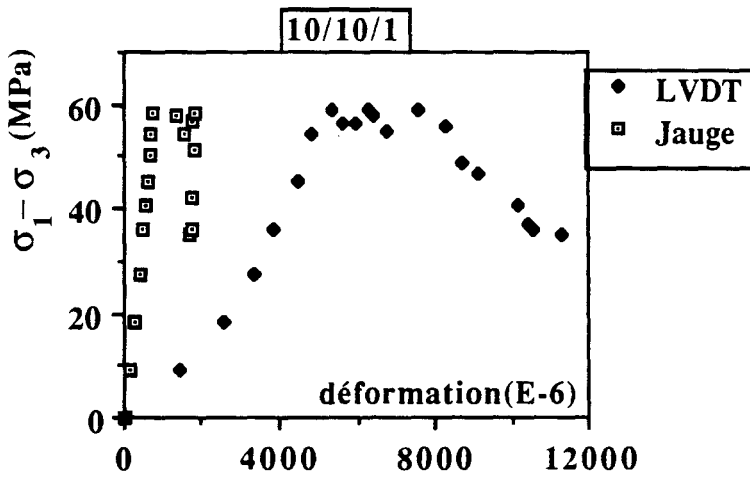
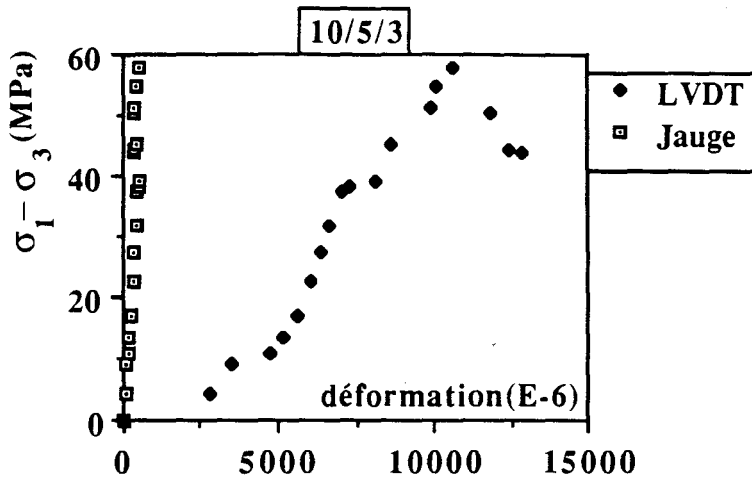
Les essais sont classés par orientation, et ensuite par pression

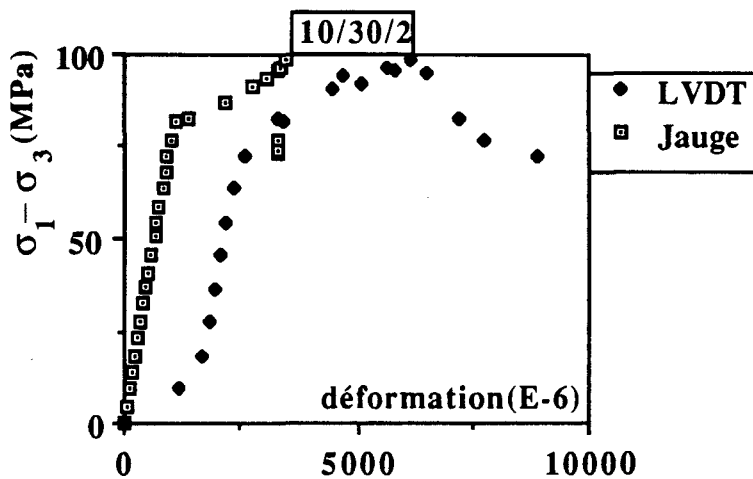
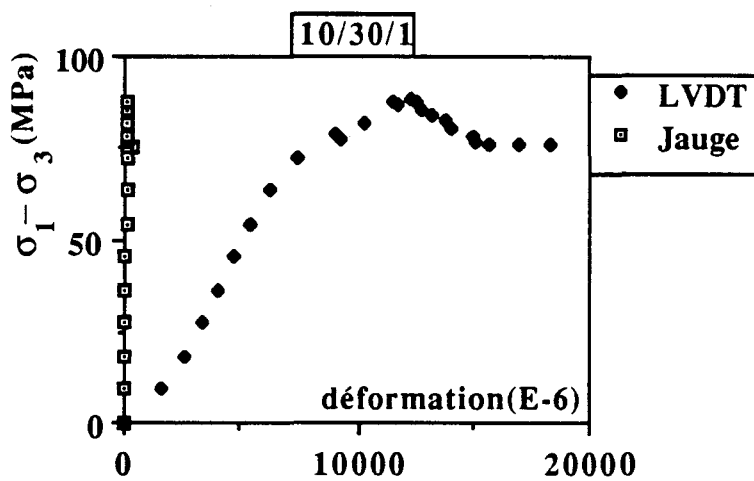
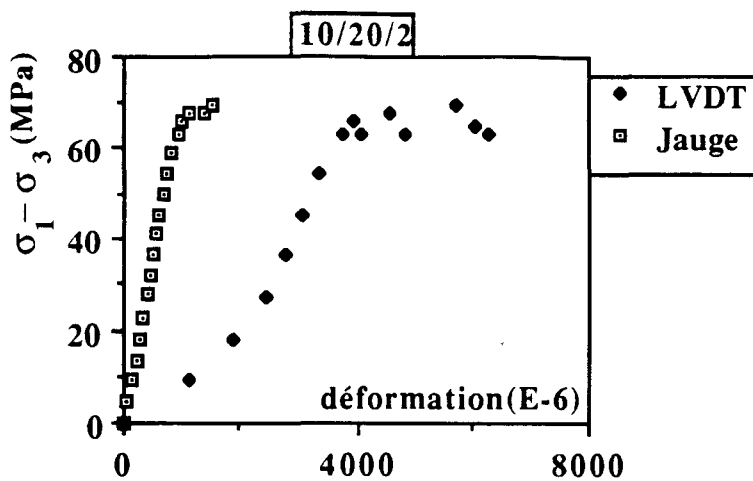


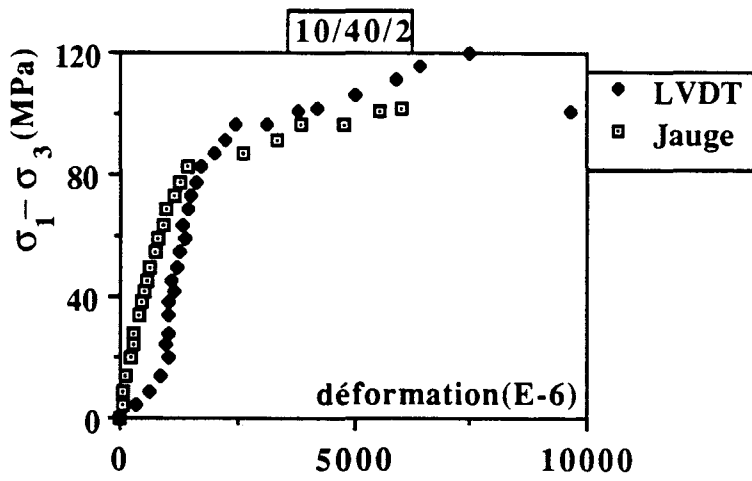
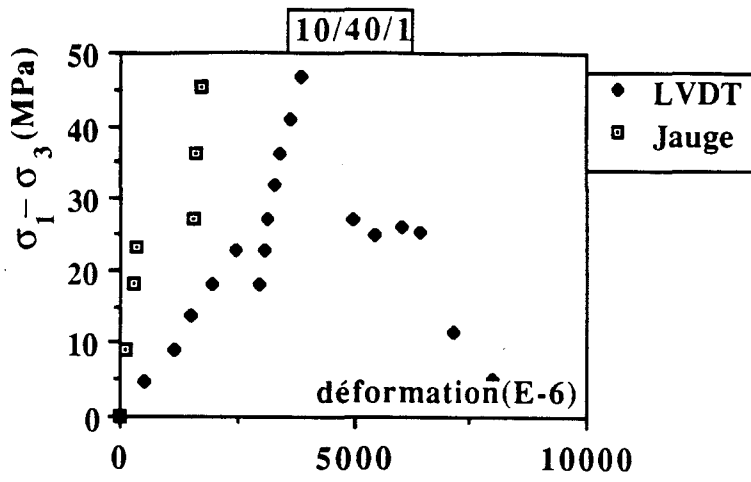


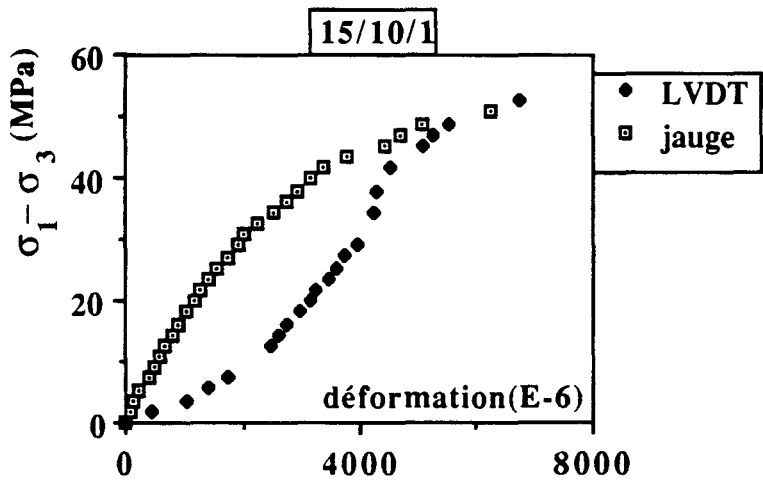
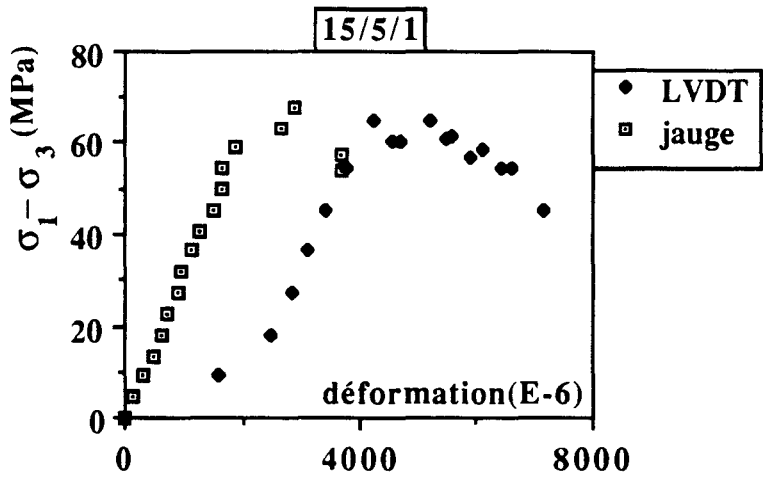
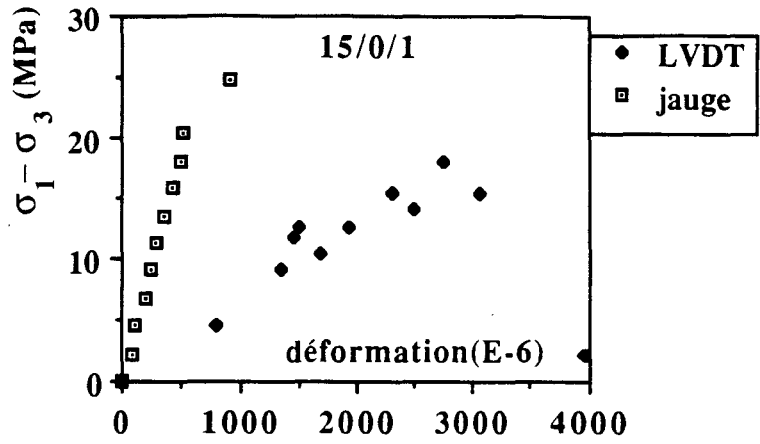


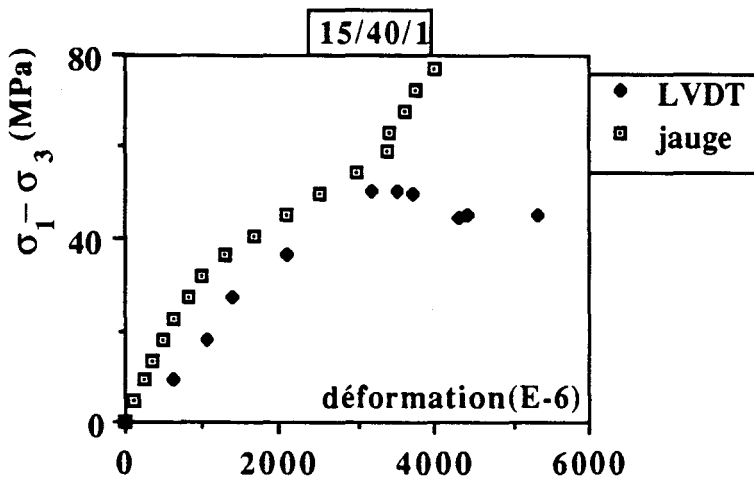
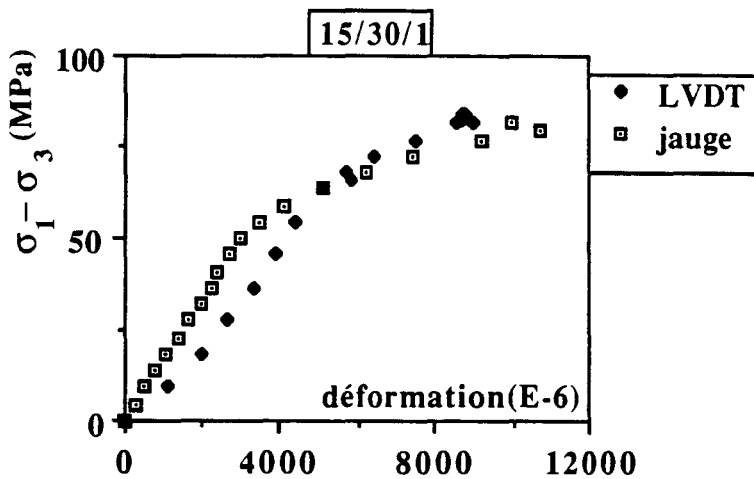
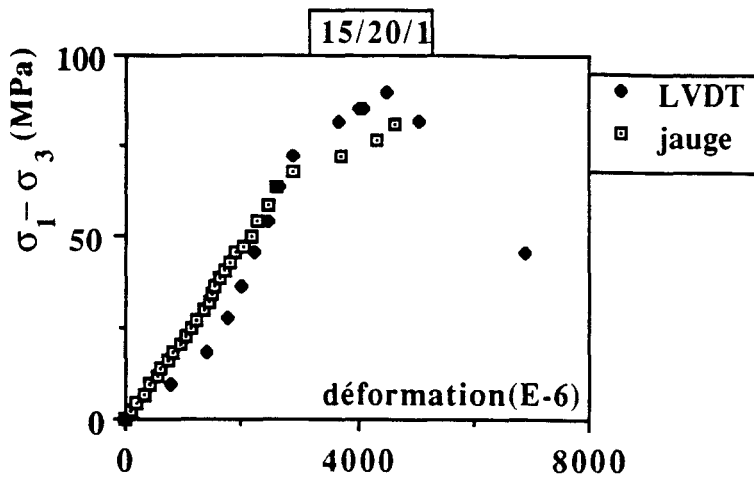


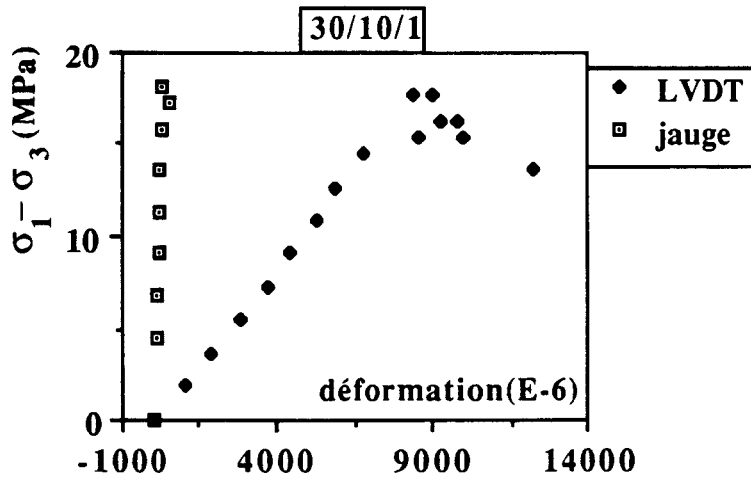
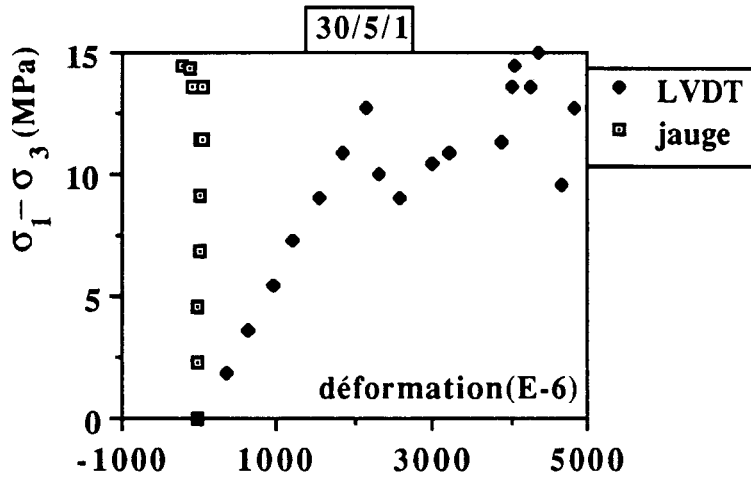
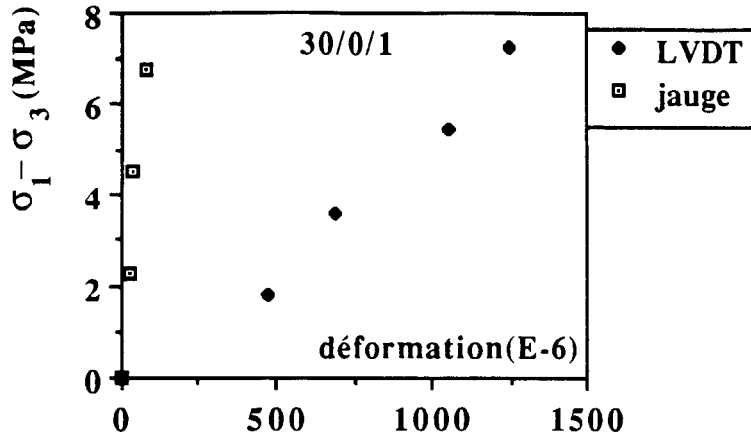


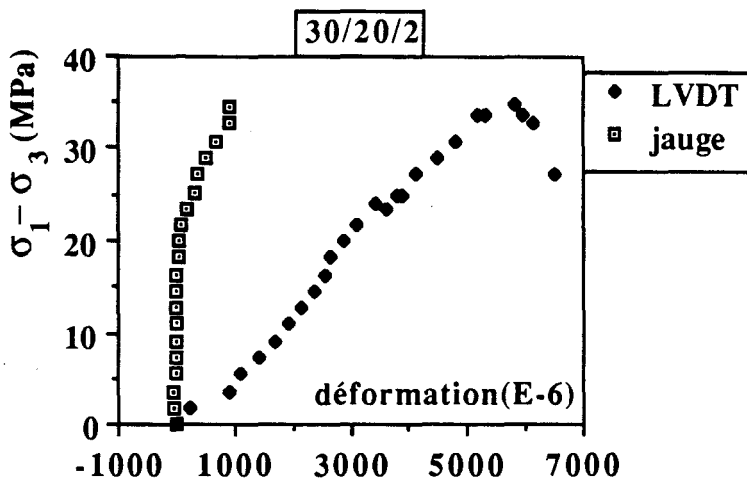
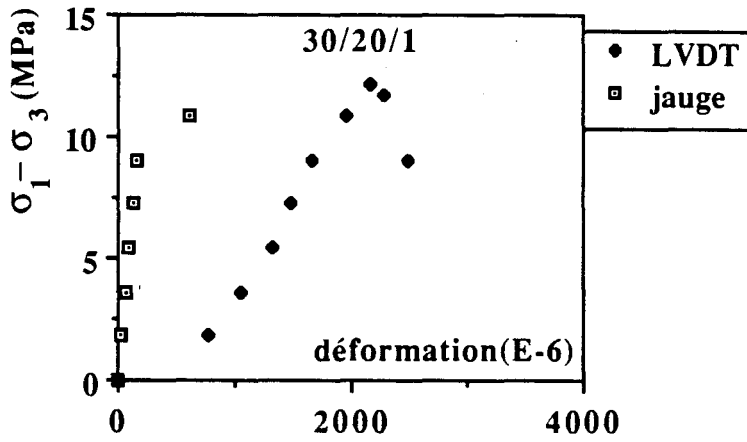
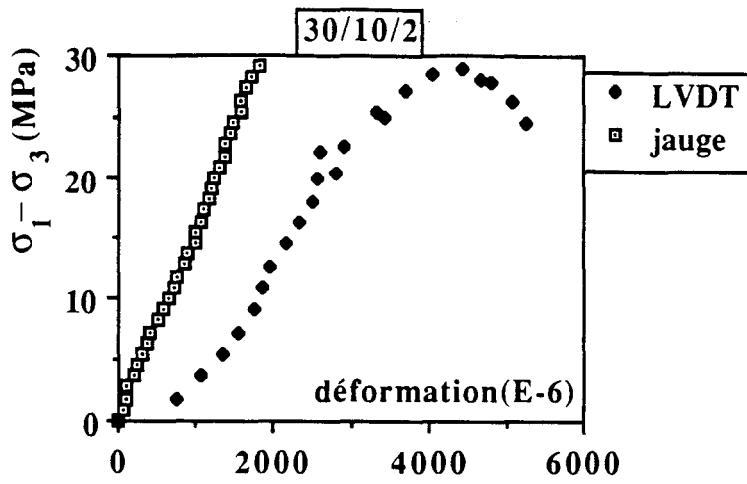


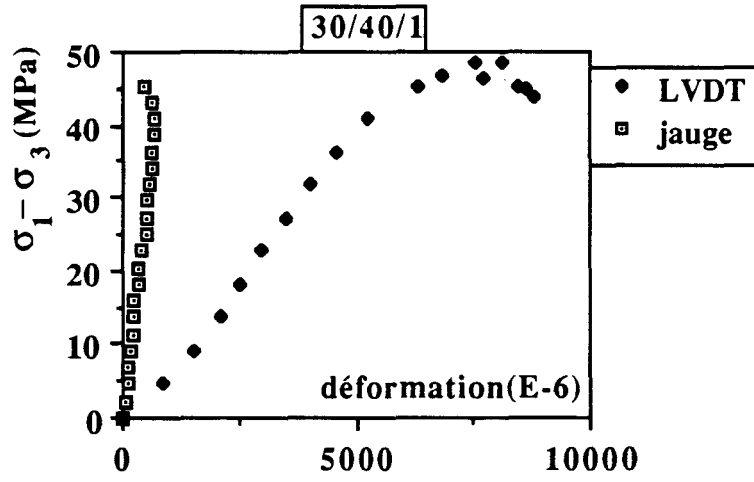
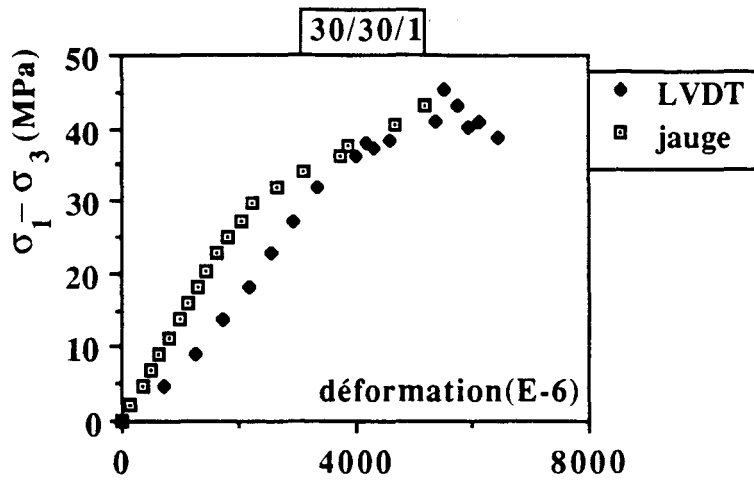


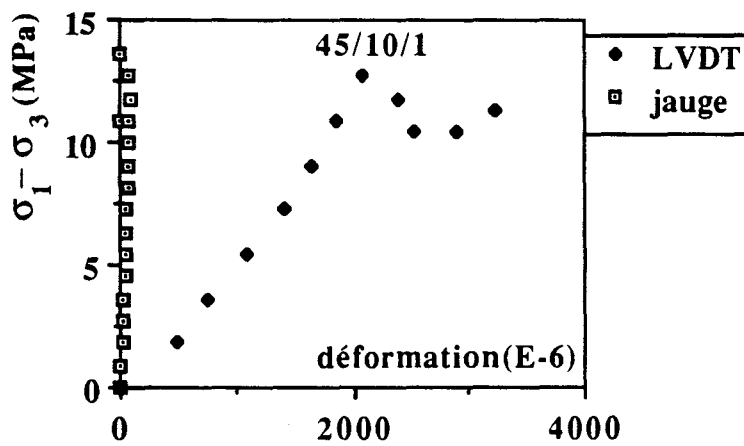
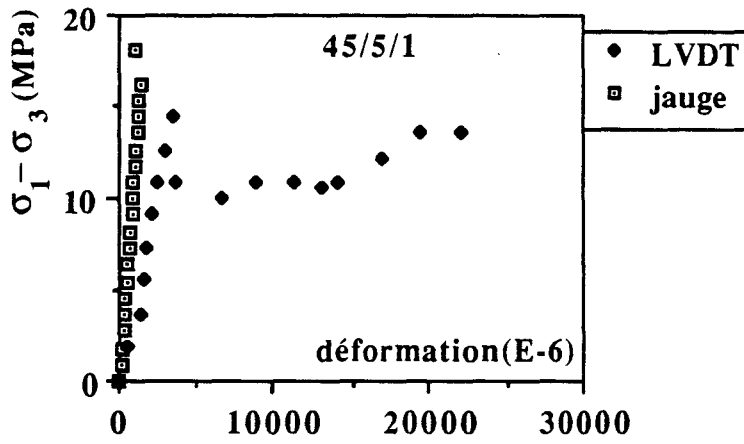
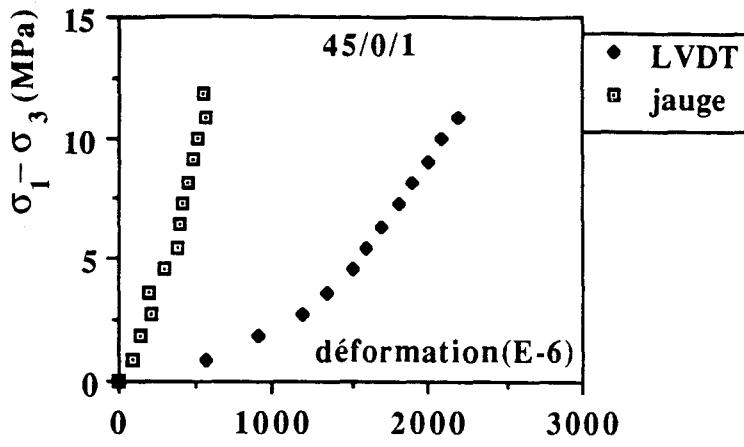


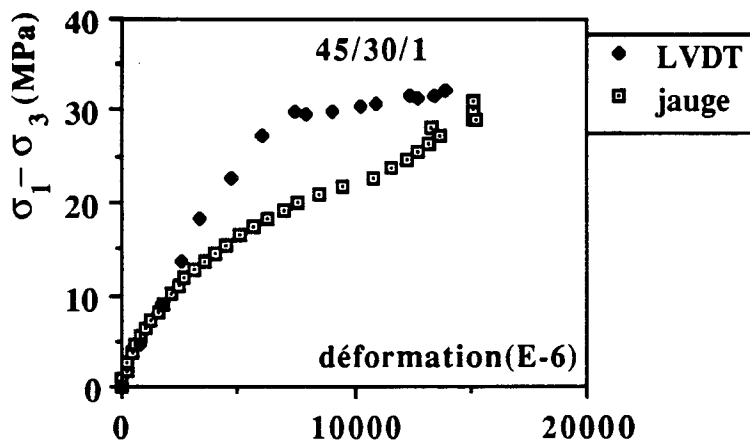
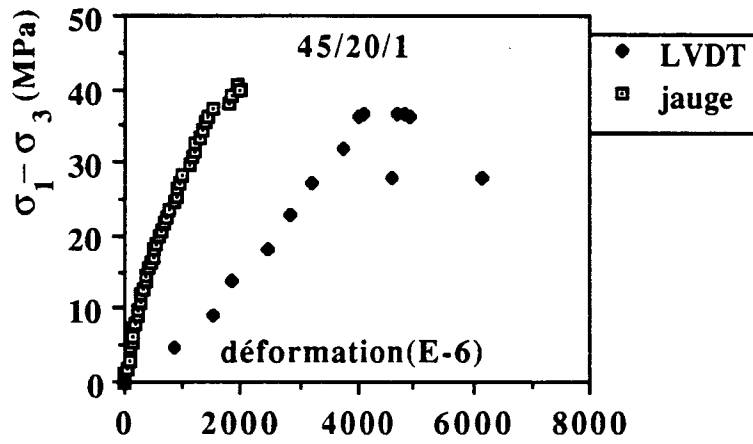
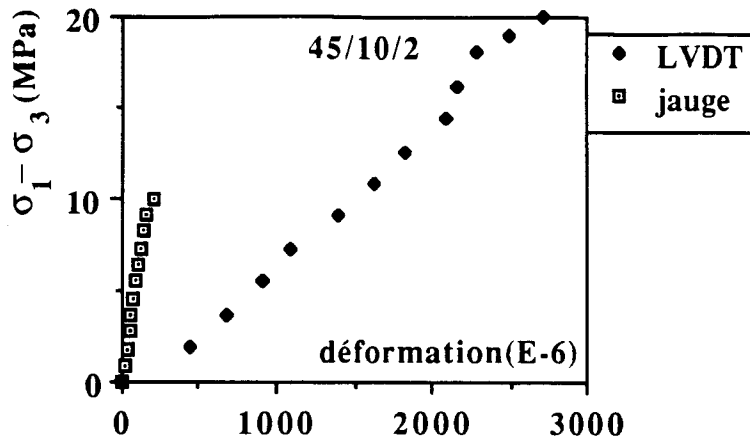


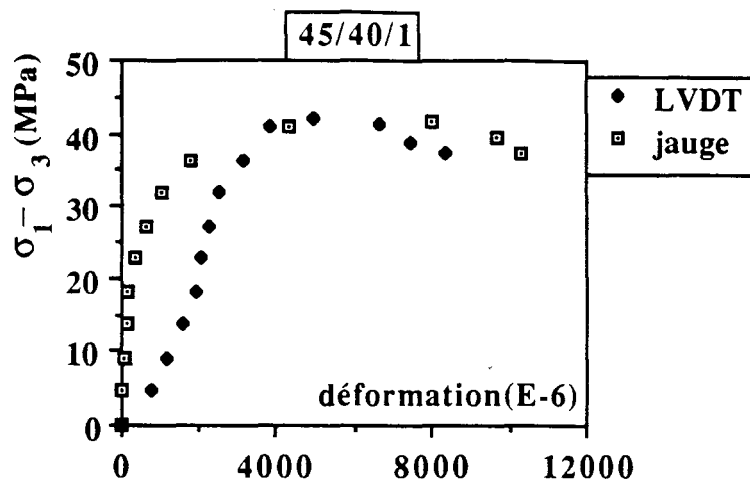


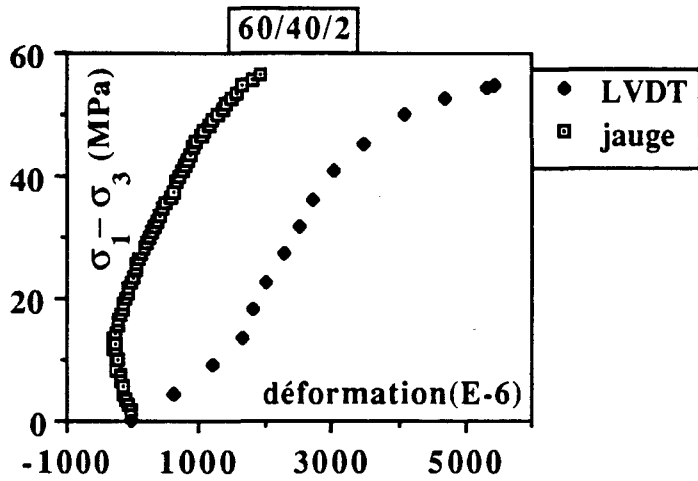
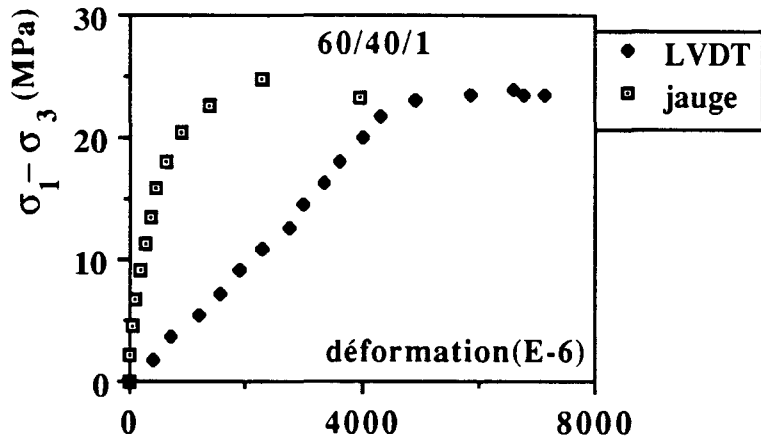
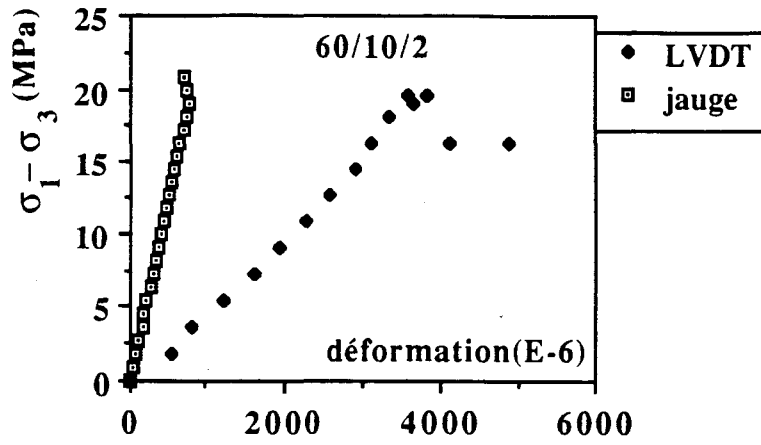


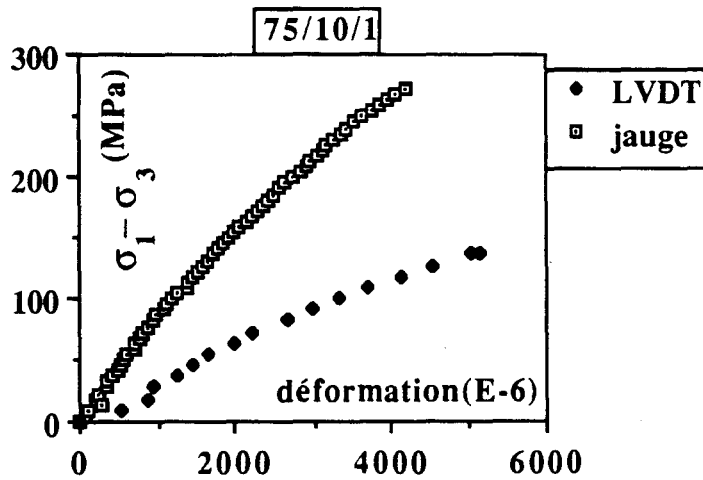
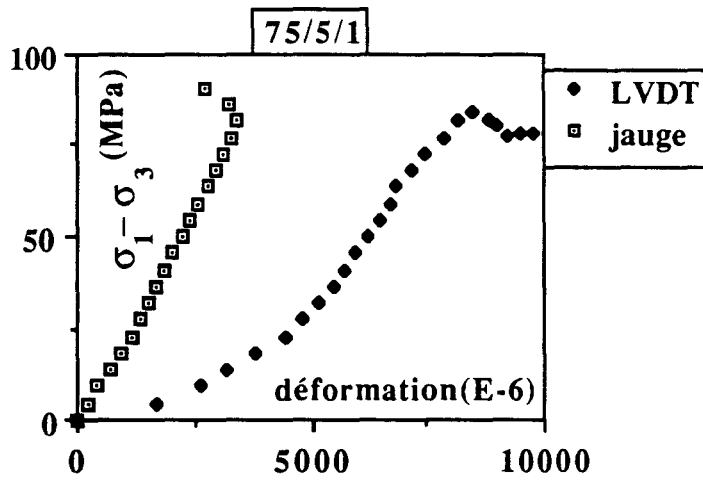
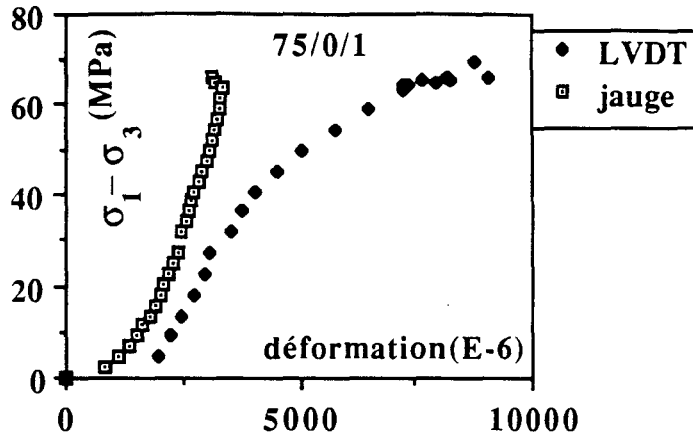


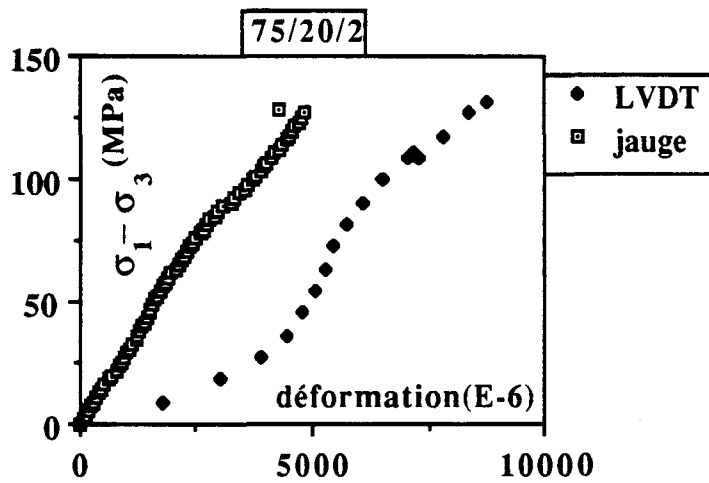
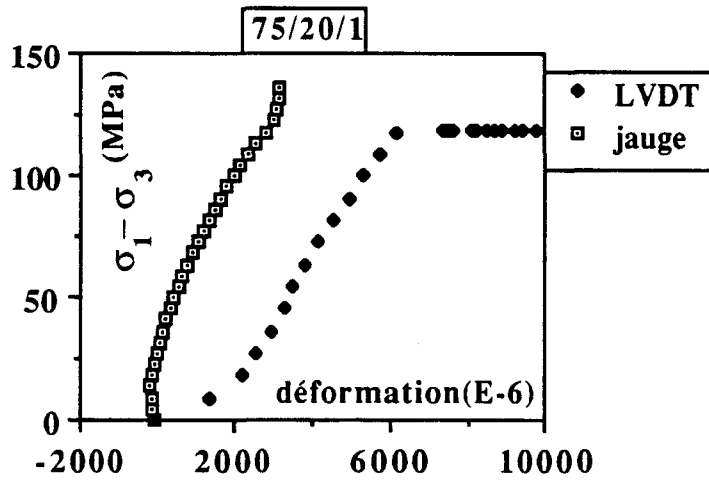
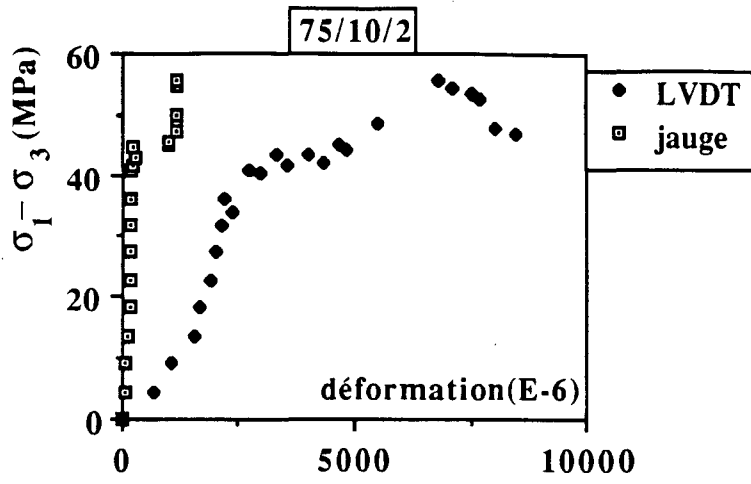


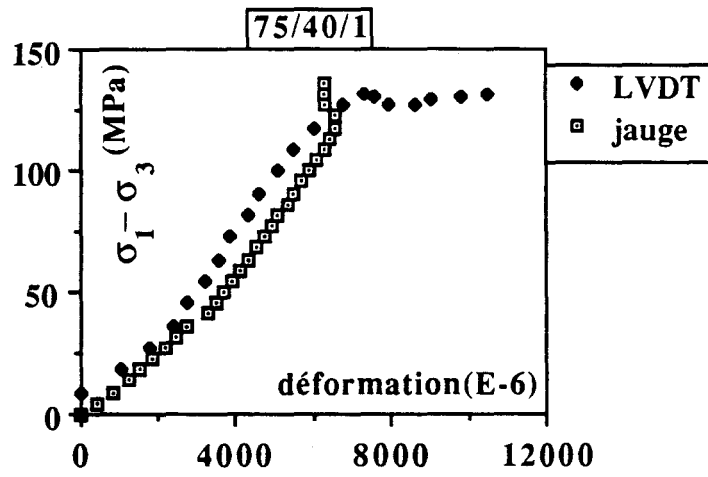
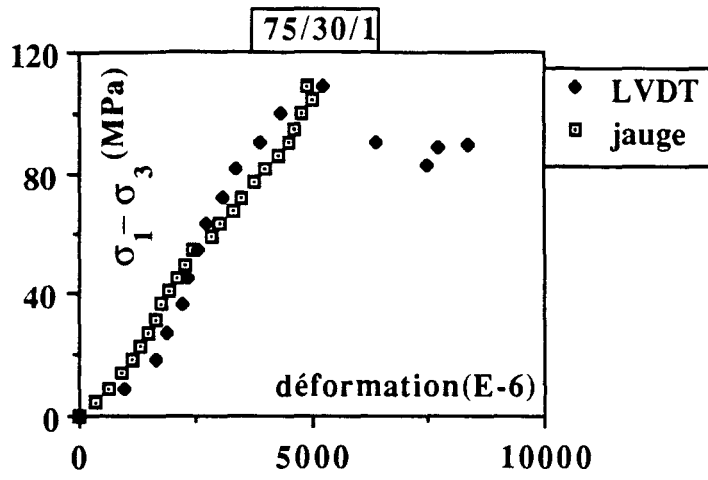


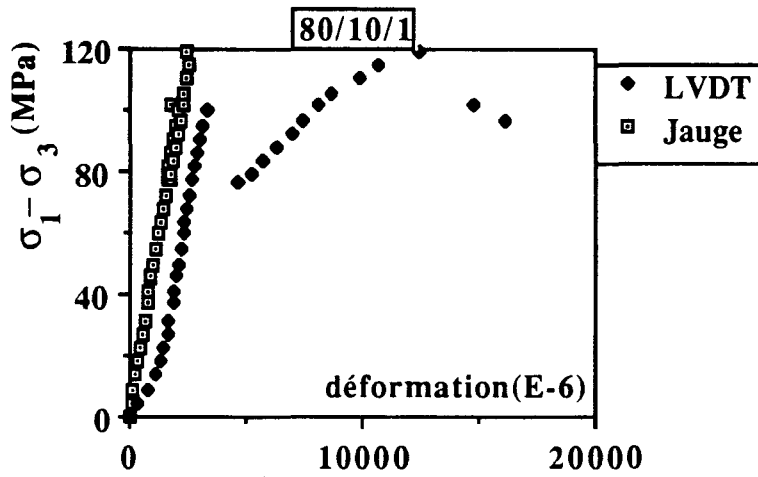
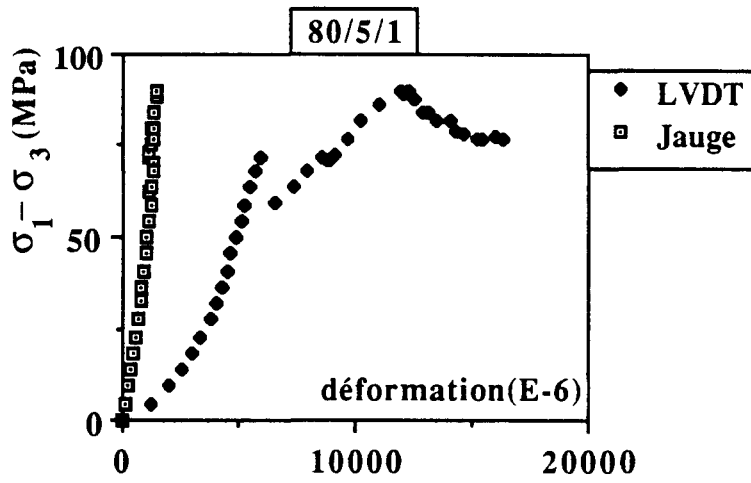
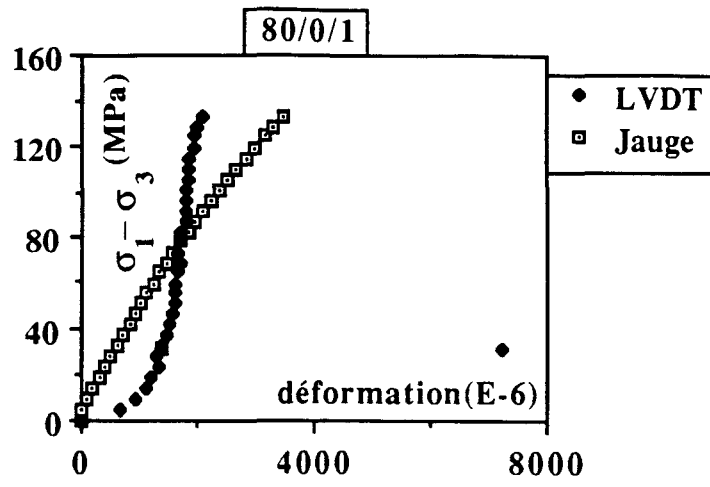


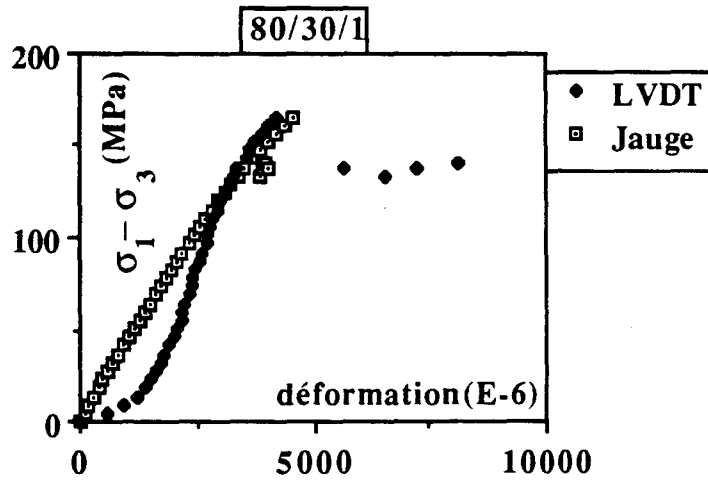
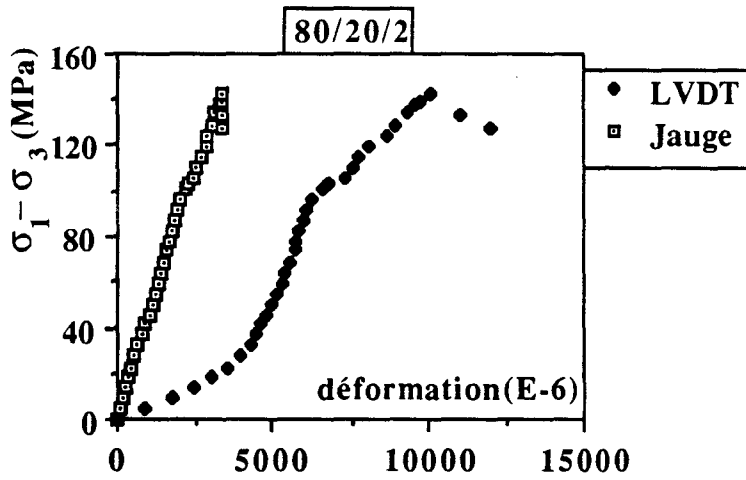
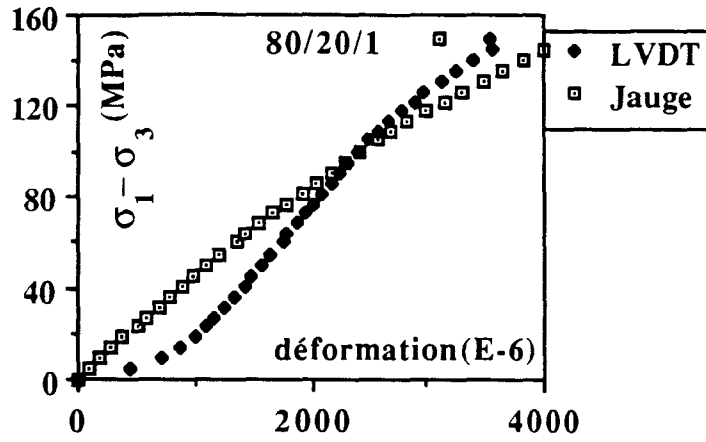


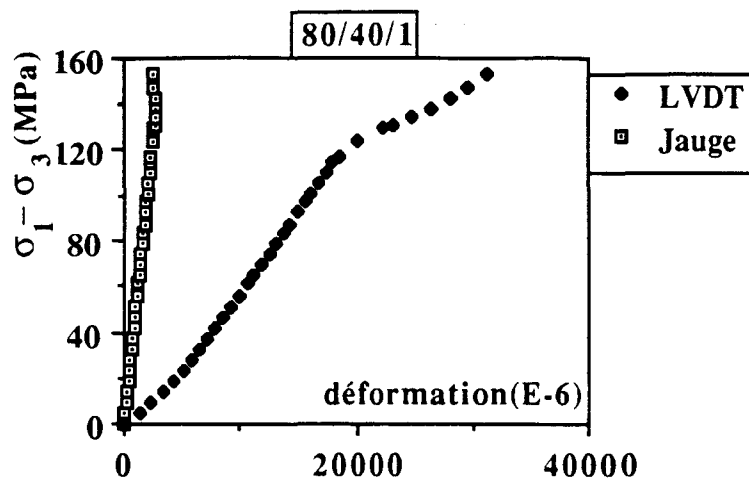


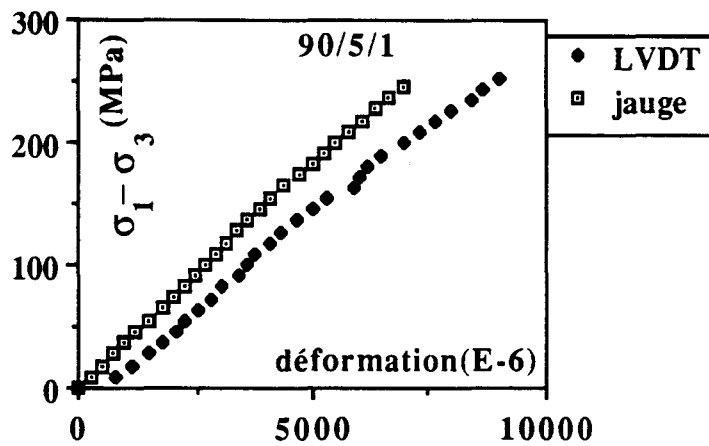
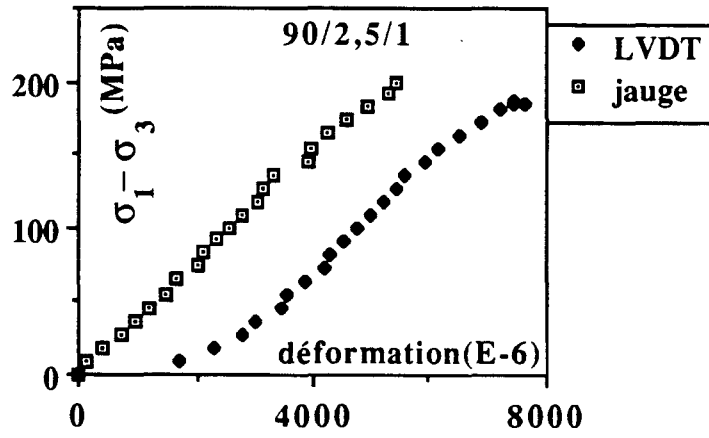
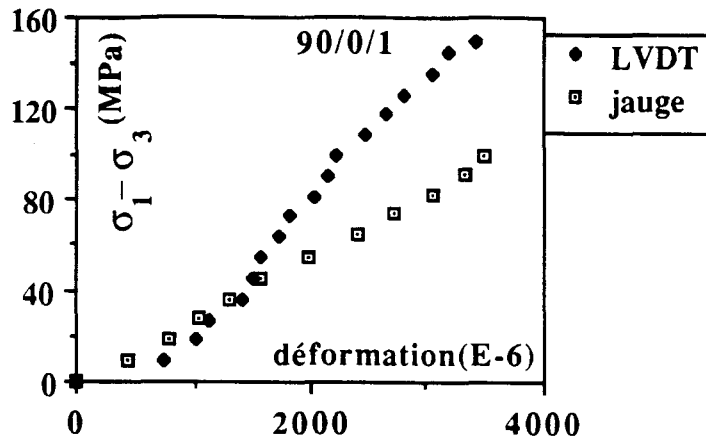


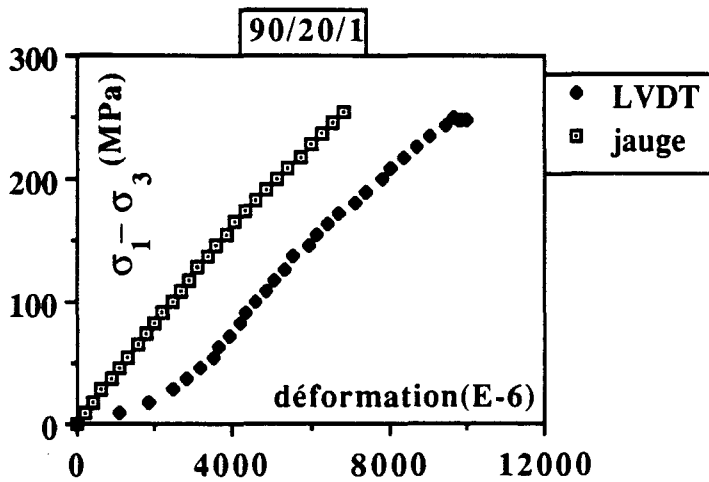
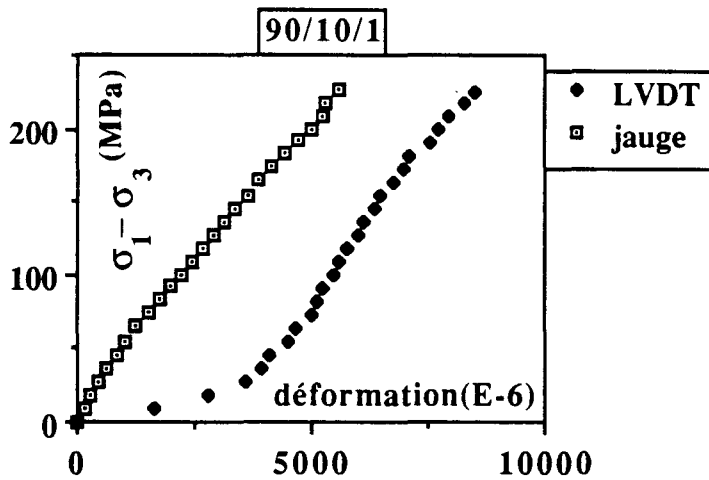
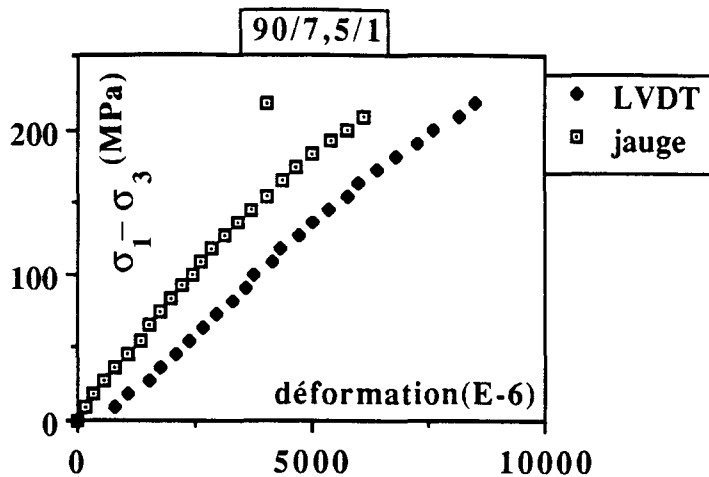


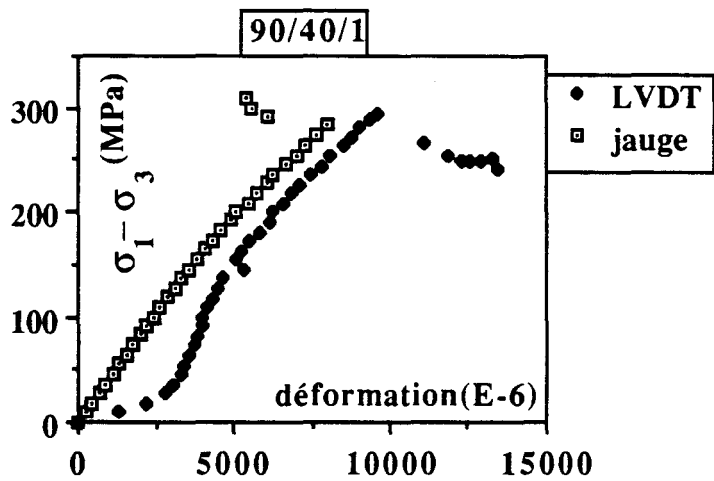
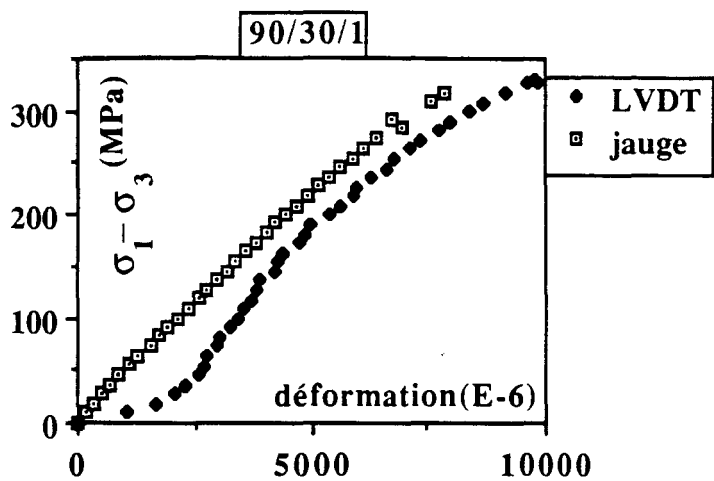






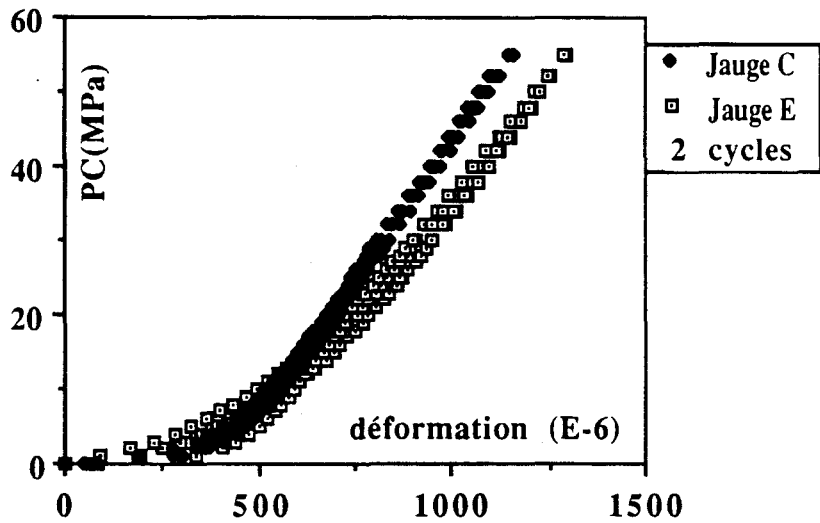
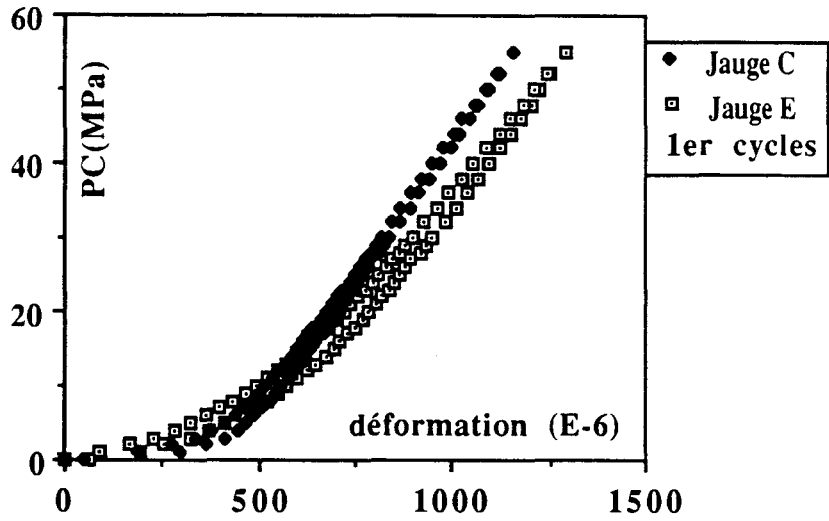
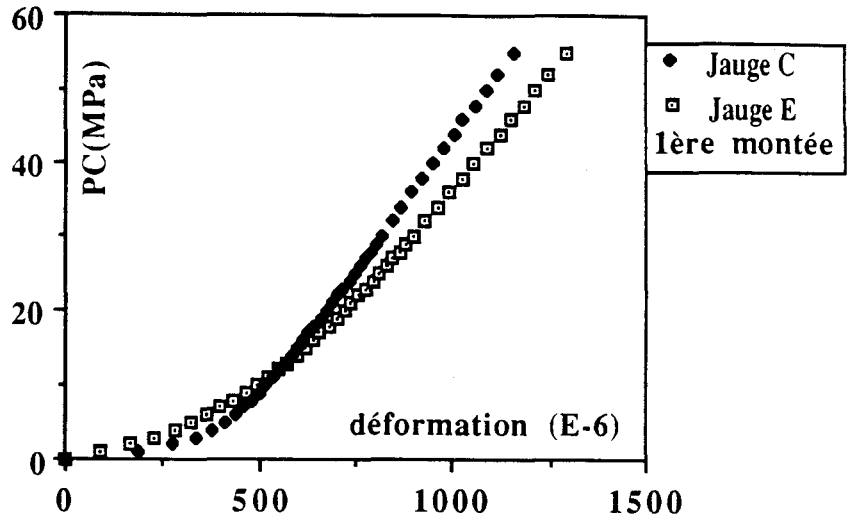


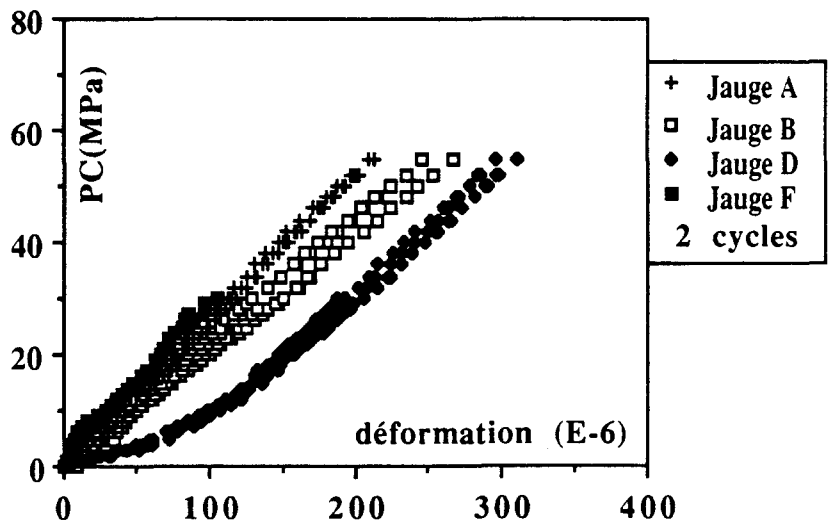
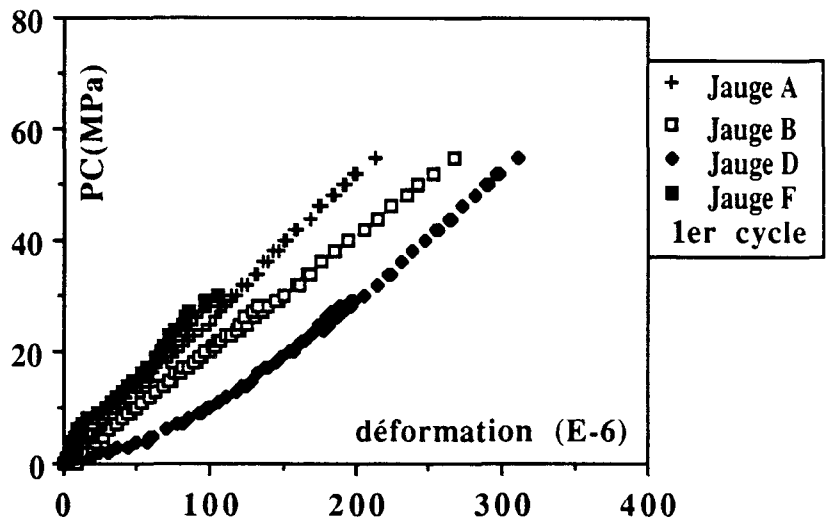
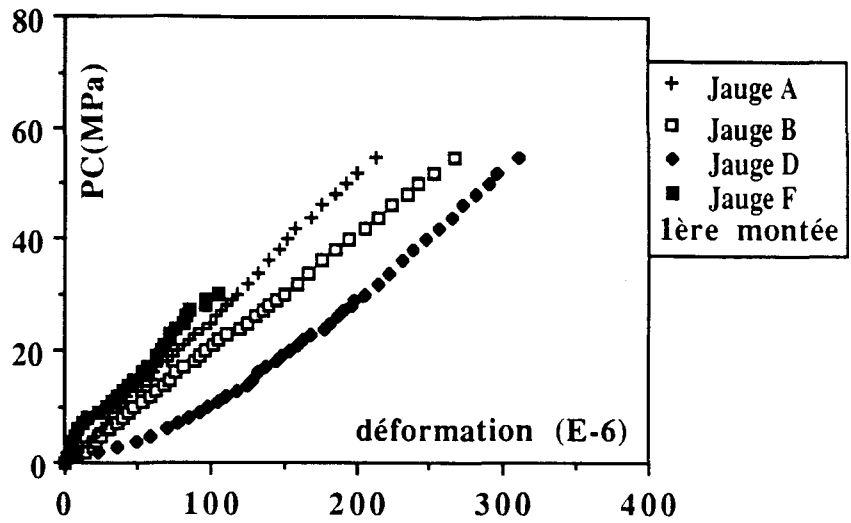


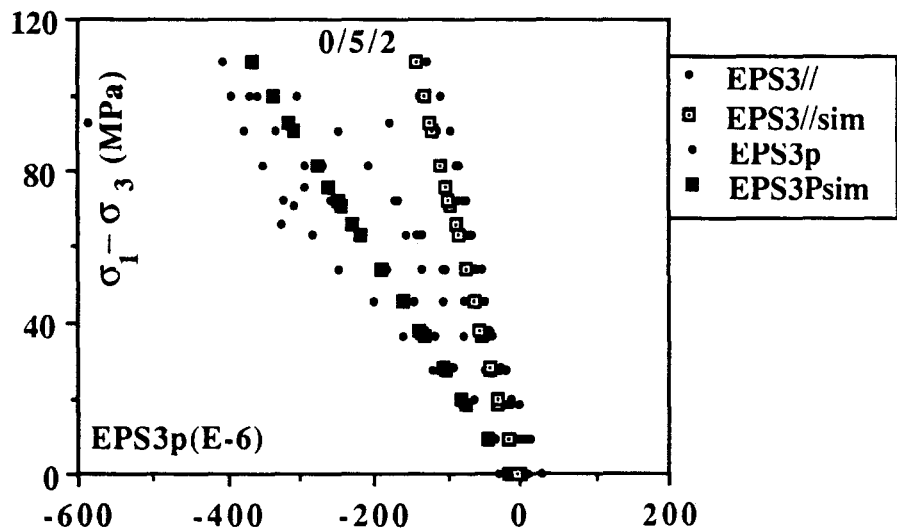
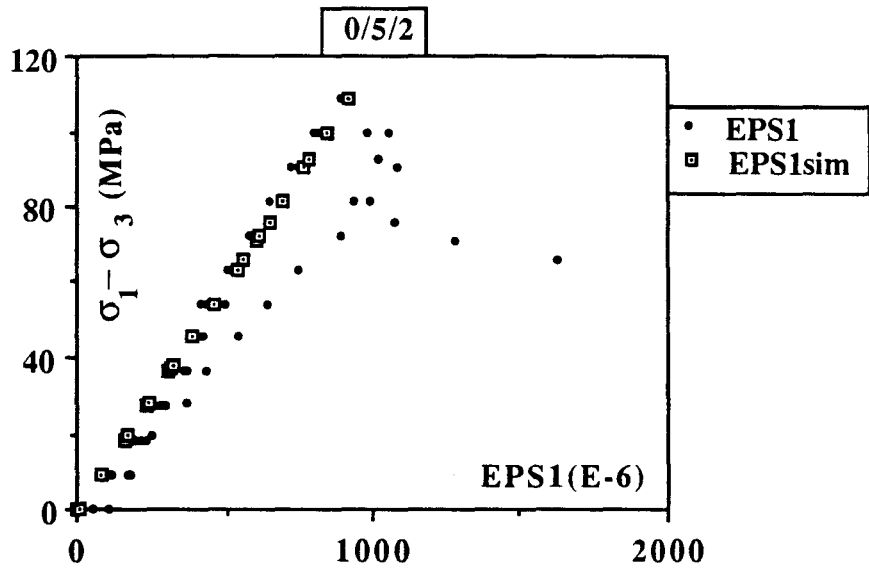
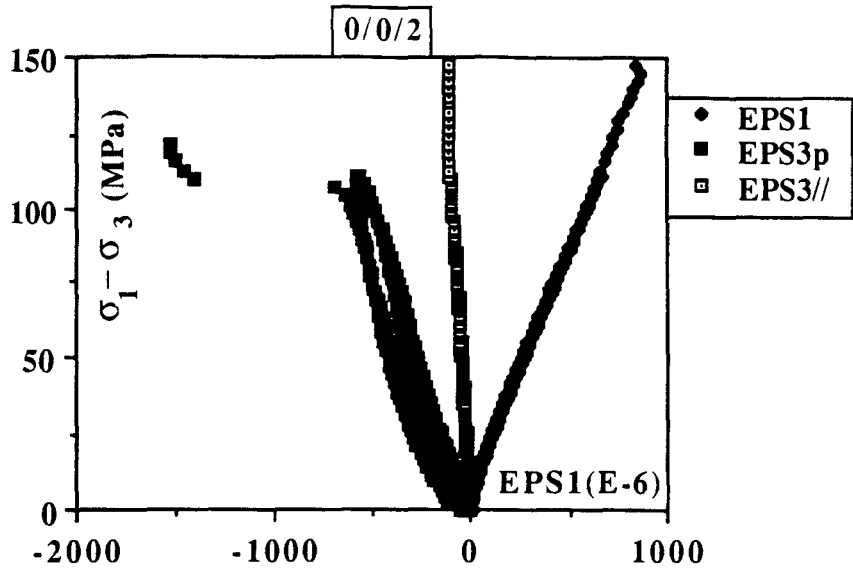


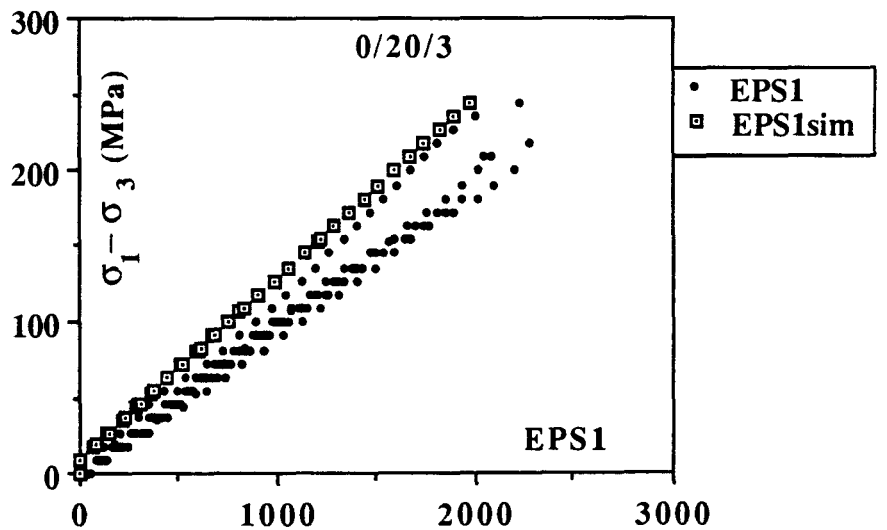
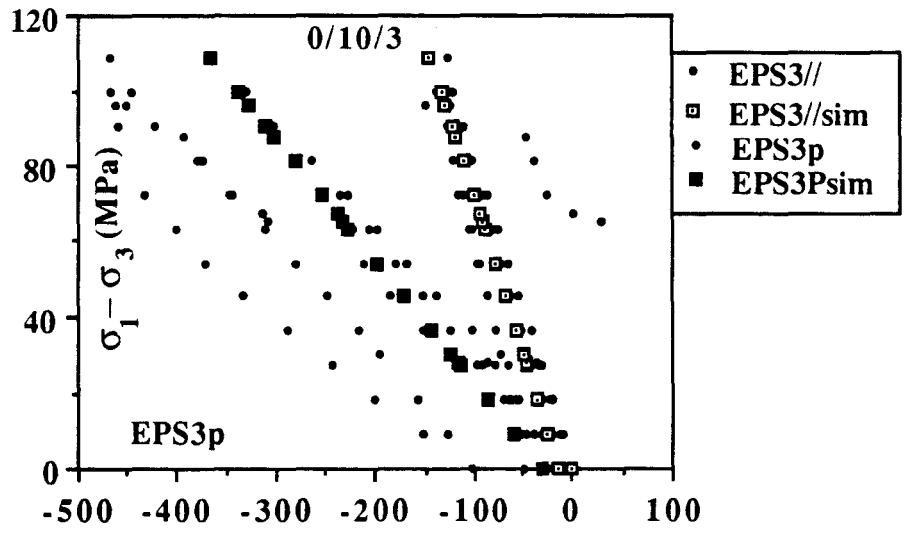
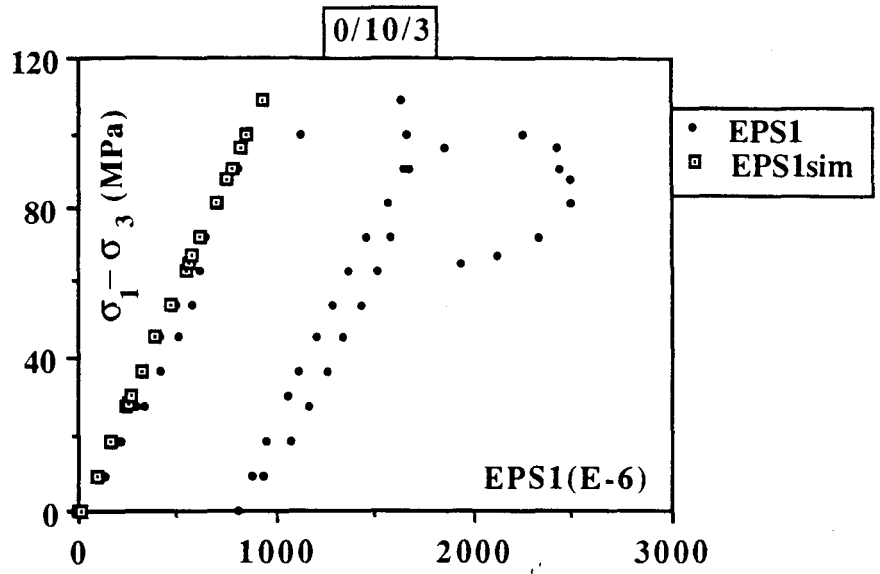
ANNEXE D

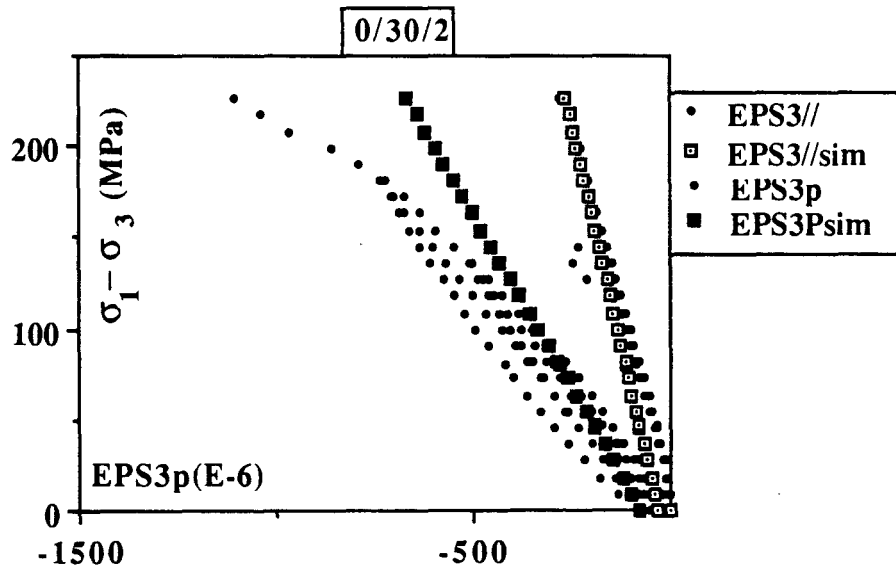
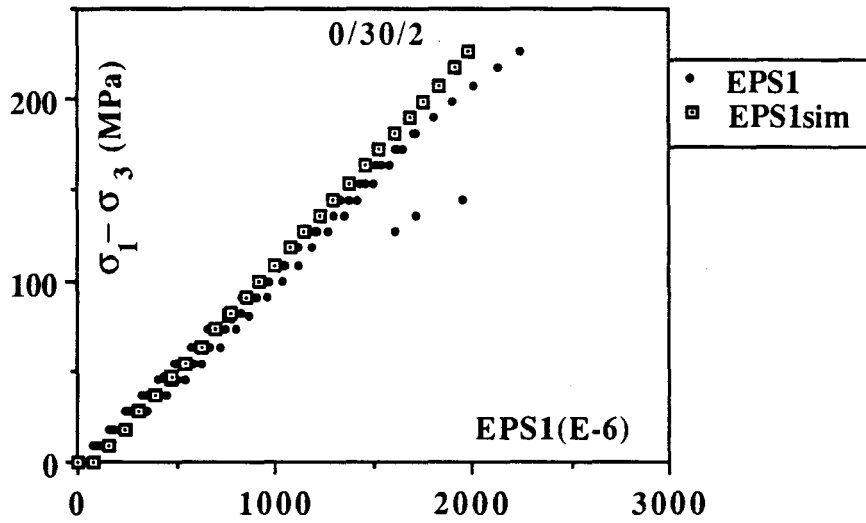
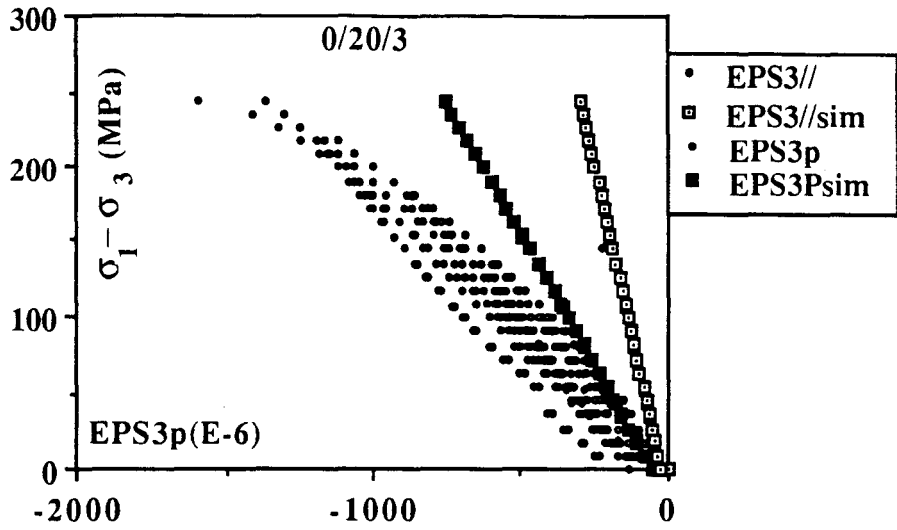
**Résultats des simulations des essais cycliques,et les résultats
de l'essai de compressibilité**

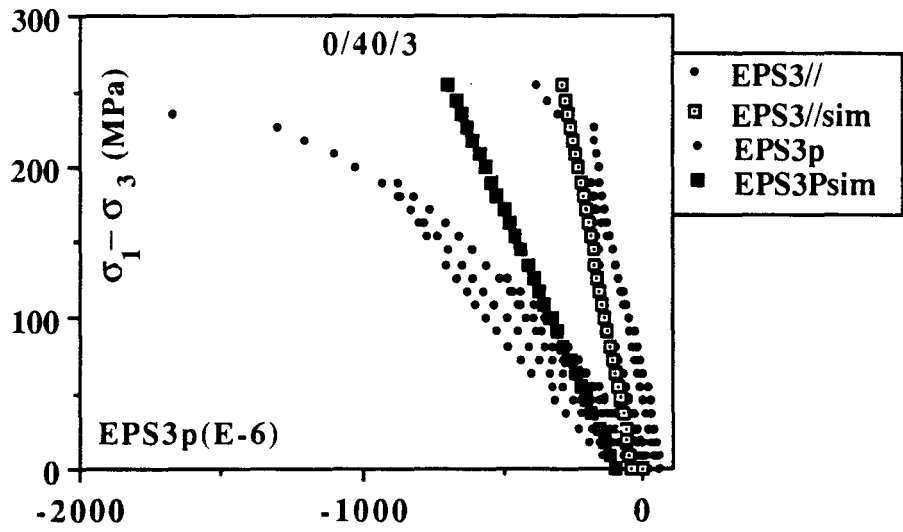
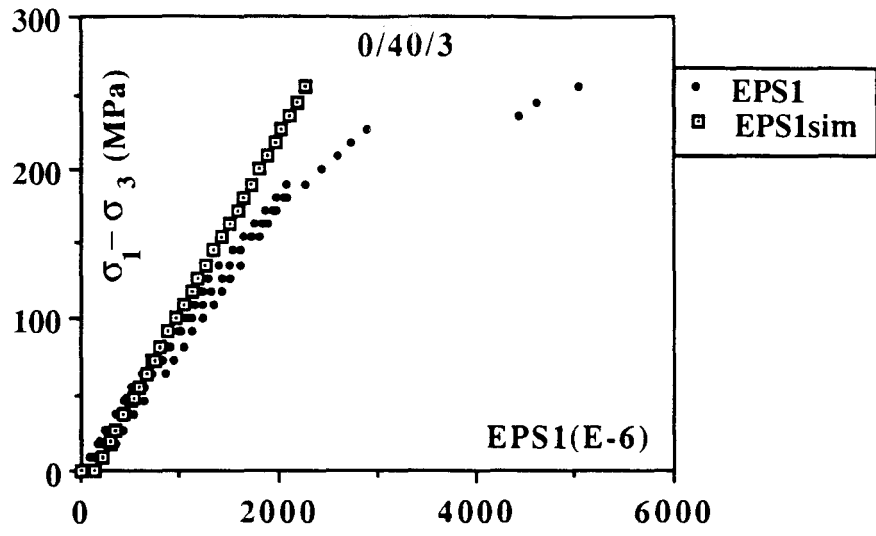


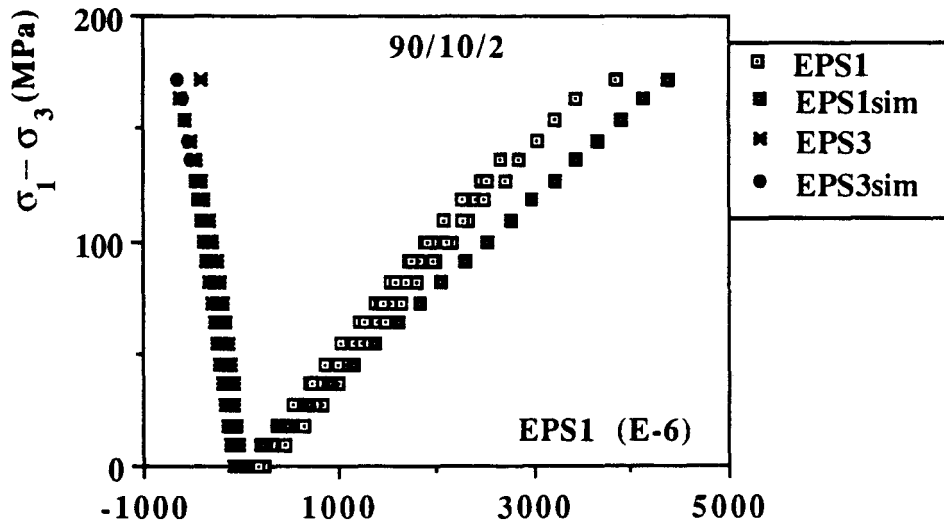
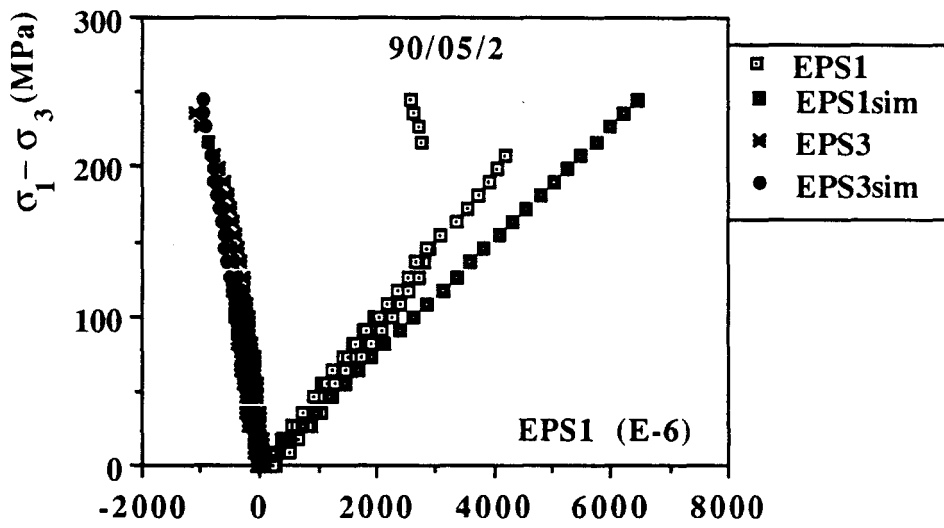
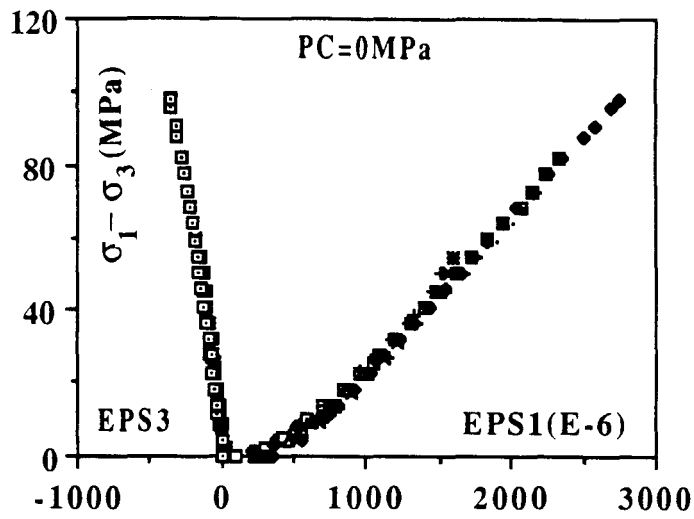


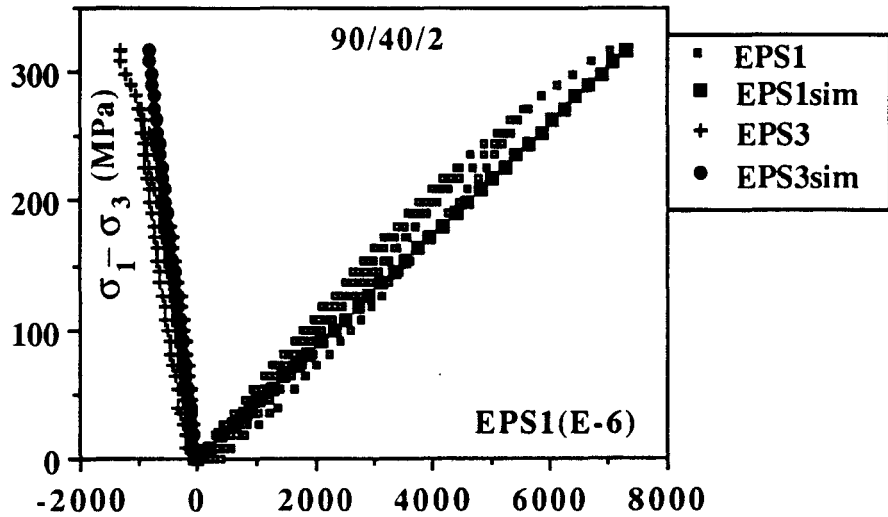
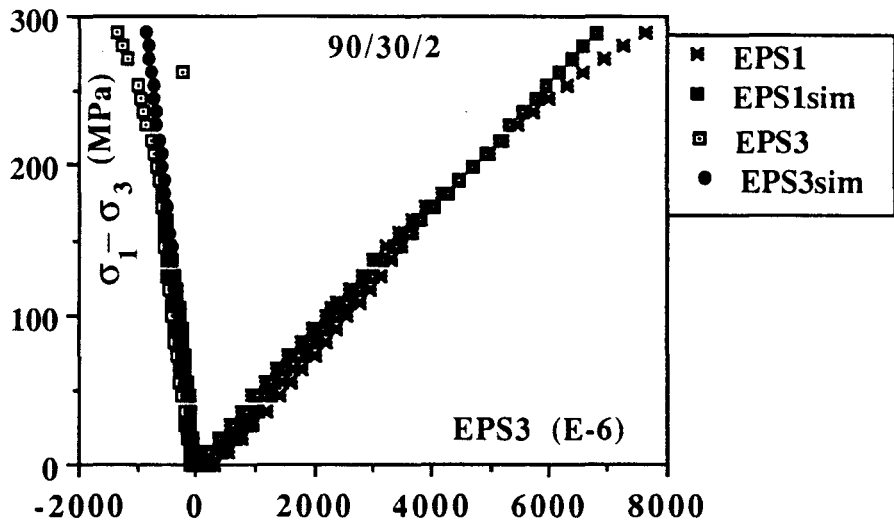
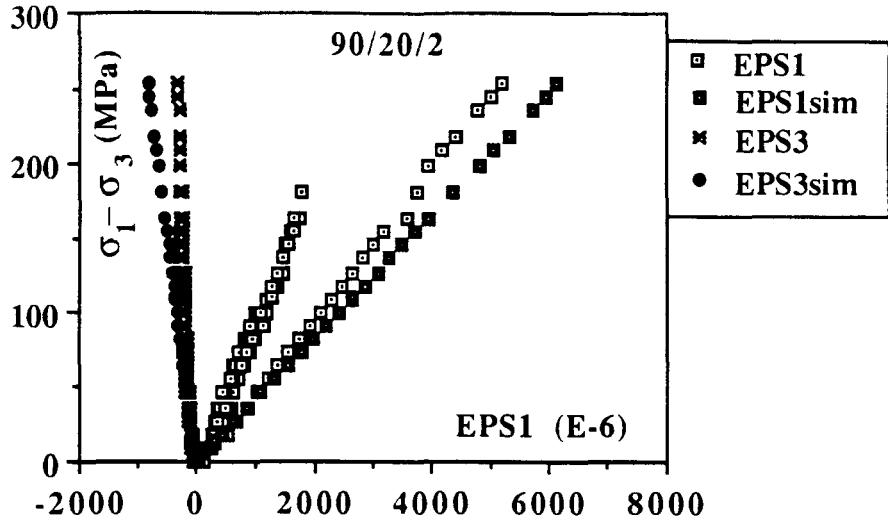


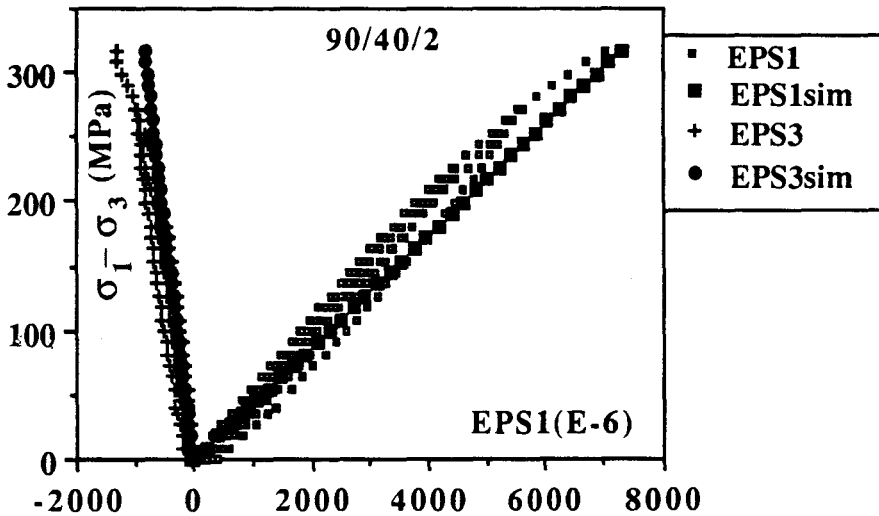
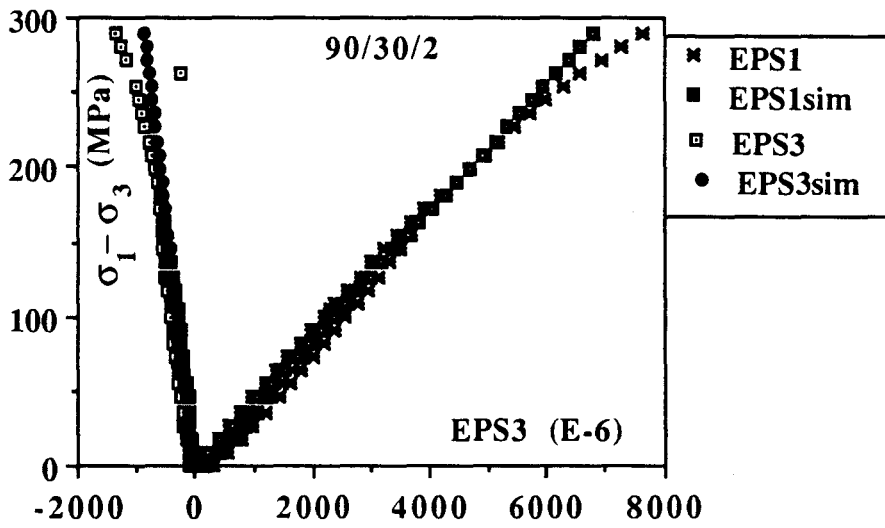
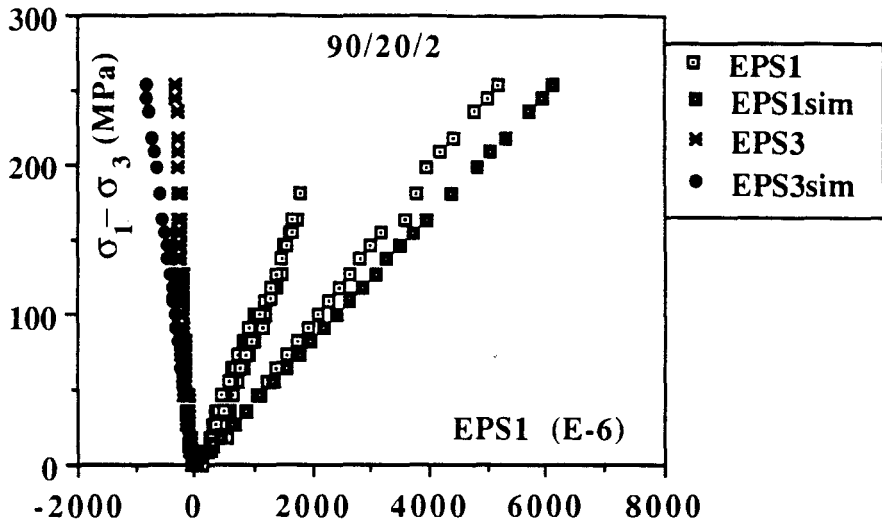






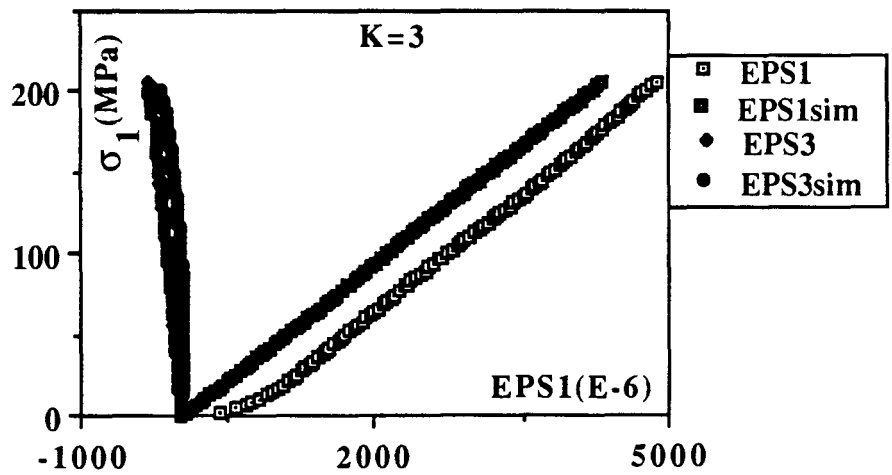
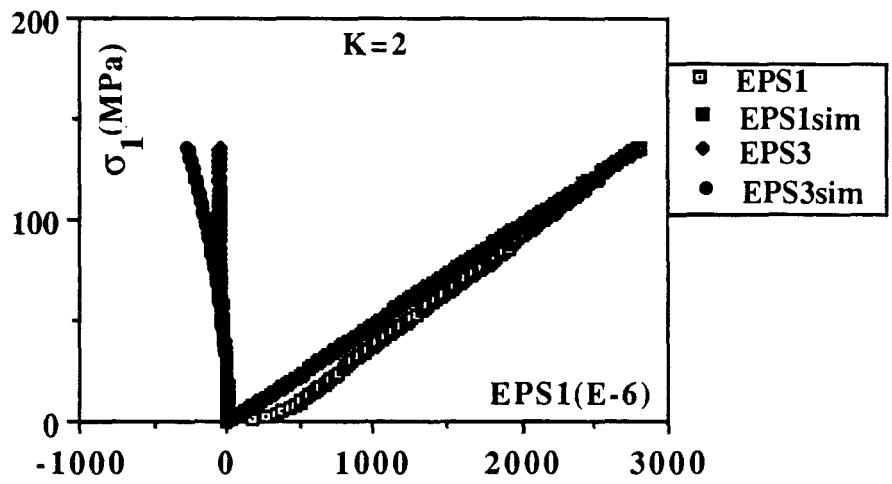
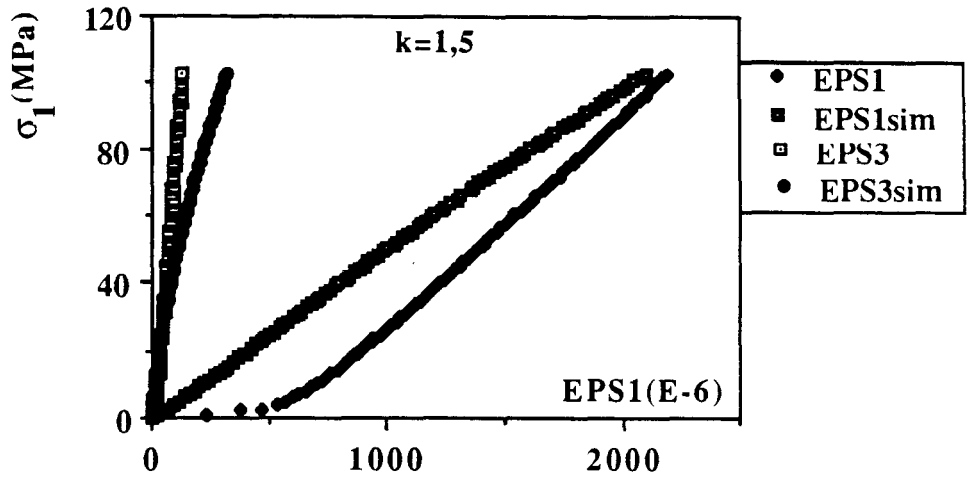


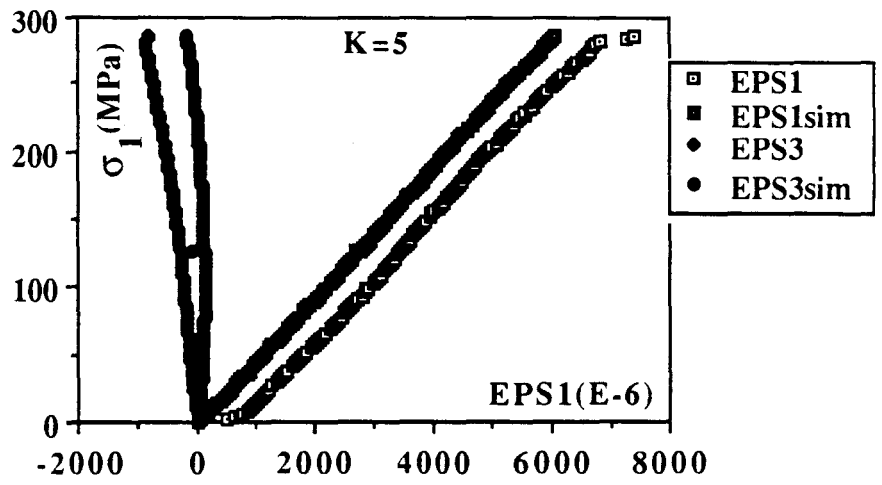


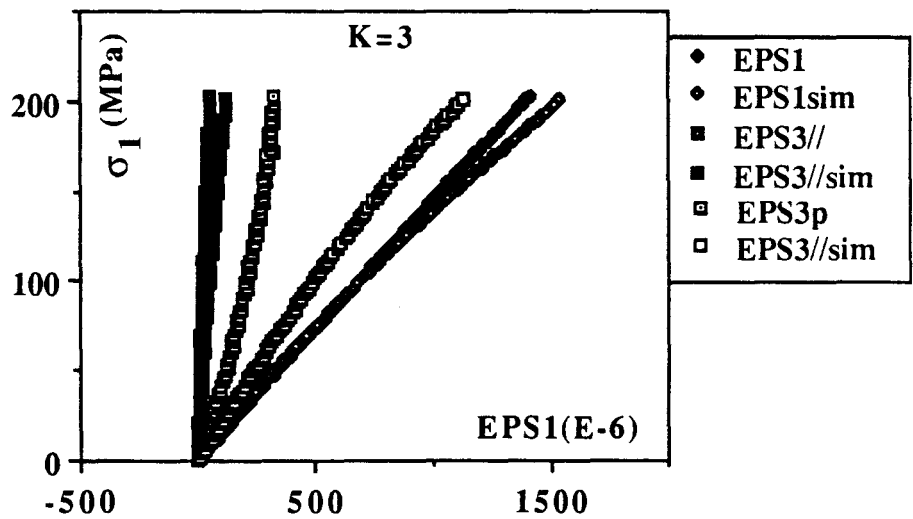
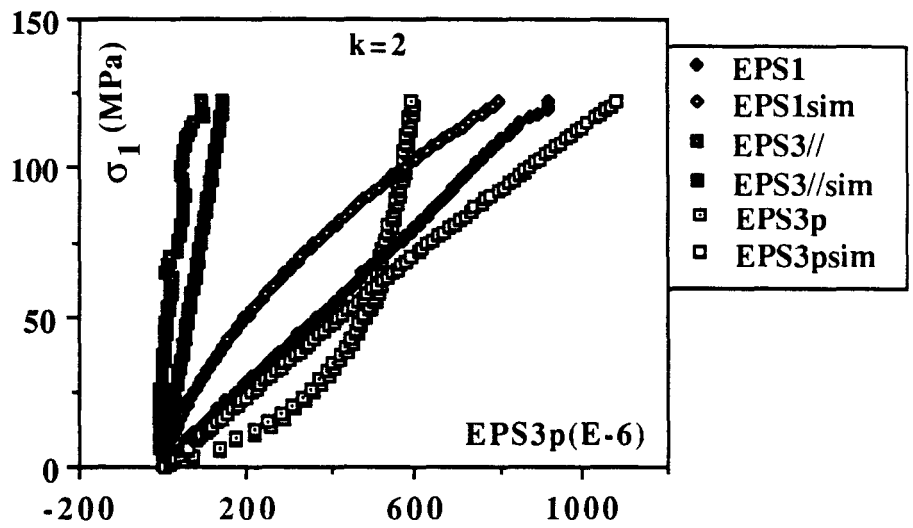
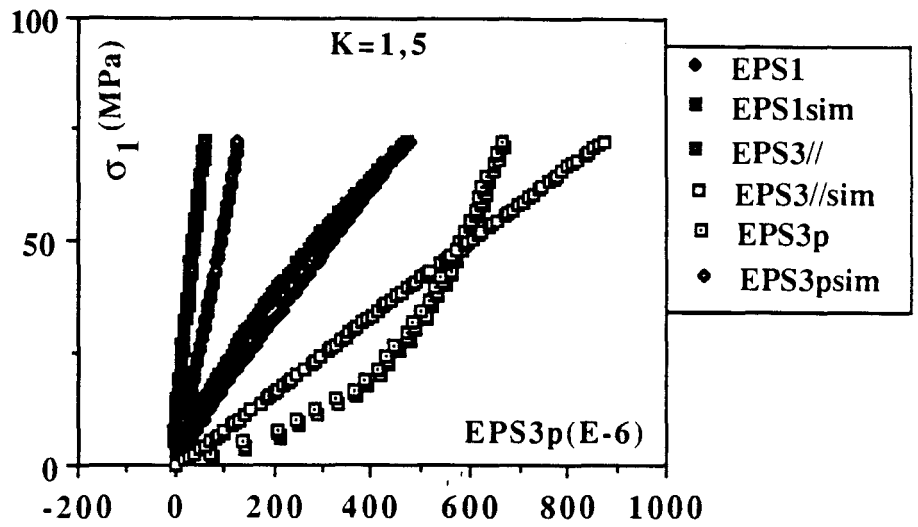


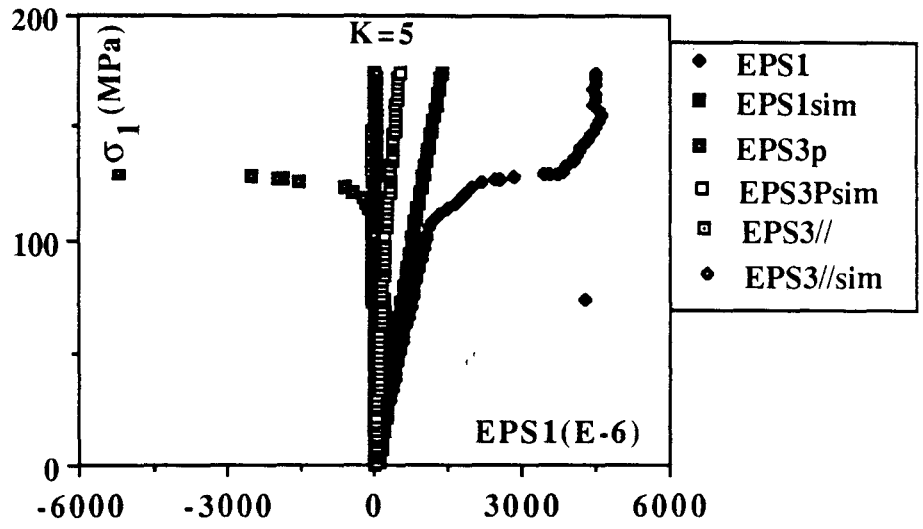
ANNEXE E

**Résultats des simulations des essais proportionnels
pour ($\theta = 0^\circ$ et 90°)**









ANNEXE F

**Résultats expérimentaux des essais en déchargement latérale
pour ($\theta = 0^\circ$ et 90°)**

