

50376
1988
255



N° d'ordre : 264

50376
1988
255

THESE
DE DOCTORAT

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET
TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES-ARTOIS

SPECIALITE GENIE CIVIL

par

GORDO Bachir

CARACTERISATION DE LA RESISTANCE A
LA PROPAGATION DES FISSURES POUR
DEUX ROCHES CALCAIRES

INFLUENCE DE LA PRESSION DE
CONFINEMENT

Soutenue le 14 octobre 1988 devant le jury composé de :

MM. PARSY F.	USTLFA	Président
VALENTIN G.	Université de Bordeaux	Rapporteur
MESMACQUE G.	USTLFA	Rapporteur
Mme HOMAND F.	ENS Géol. Nancy	Examineur
HENRY J.P.	USTLFA	Examineur
LEBLANC A.	IDN	Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de mécanique de Lille, Département Mécanique des Matériaux Fragiles, à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille.

Monsieur le Professeur HENRY a assuré la direction de ce travail; l'aide qu'il m'a apportée, les conseils judicieux qu'il m'a prodigués m'ont été très précieux. Qu'il reçoive ici mes vifs remerciements

Je souhaite également remercier :

Monsieur le Professeur PARSY qui a bien voulu présider le jury de thèse.

Monsieur le Professeur MESMACQUE et Monsieur Valentin, rapporteurs de ce mémoire, pour leurs remarques enrichissantes et pour avoir accepté de participer au Jury.

Madame HOMAND pour avoir examiné le travail et accepté de participer au Jury.

Monsieur LEBLANC, responsable de mon D.E.A, pour avoir guidé mes premiers pas vers la recherche et accepté de participer au Jury.

J'exprime mon amitié et mes remerciements les plus sincères à Monsieur SECQ pour son aide dans la mise au point de mes essais.

Madame HENRY, a assuré la dactylographie de ce mémoire, pour son travail soigné et sa gentillesse.

Tous mes collègues et amis qui m'ont soutenu et aidé tout au long de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	p. 1
CHAPITRE I : PARAMETRES CARACTERISANT LA RESISTANCE A LA PROPAGATION DES FISSURES ET ROCHES TESTEES	p. 3
I.1 PROPAGATION EN MODE I	p. 3
I.1.1 Définition des modes de propagation	p. 3
I.1.2 Critères de propagation des discontinuités dans les roches ...	p. 4
I.1.3 Critères de branchement	p. 6
I.1.4 Stabilité de la propagation	p. 7
I.2 DETERMINATION DES PARAMETRES DE RESISTANCE : TYPES D'ESSAIS UTILISES ET METHODES DE DEPOUILLEMENT ASSOCIEES	p. 9
I.2.1 Les différents types d'essais utilisés dans le cas des roches	p.10
I.2.2 Les méthodes de dépouillement utilisées pour le calcul des paramètres de résistance	p.13
I.3 INFLUENCE DE LA PRESSION	p.20
I.4 ROCHES CALCAIRES TESTEES	p.25
CHAPITRE II - ESSAIS A PRESSION AMBIANTE - ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS.....	p.28
II.1 ESSAIS DE FLEXION ET MATERIEL UTILISE	p.28
II.1.1 Essais de flexion trois points	p.28
II.1.2 Description de l'essai et asservissement sur l'ouverture	p.29
II.2 RESULTATS	p.32
II.2.1 Courbes complètes	p.32
II.2.2 Essais à sec, valeurs des paramètres γ_i , γ_F - discussion	p.34
II.2.3 Influence de l'eau	p.39
II.2.4 Influence de la vitesse d'essais	p.41
II.3 COMPLIANCE	p.42
II.3.1 Introduction	p.42
II.3.2 Présentation d'une méthode approchée : (hypothèse $\partial c / \partial a = A$)	p.43
II.3.3 Exemple - Influence de la longueur propagée	p.45

CHAPITRE III - ESSAIS DE COMPRESSION DE PLAQUES PERCEES D'UN TROU.....	p.48
III.1 DETERMINATION DES COURBES G	p.48
III.1.1 Présentation de la méthode	p.48
III.1.2 Influence de la taille de la plaque	p.49
III.1.3 Exploitation des courbes G	p.50
III.2 TECHNIQUES DE DETECTION DE LONGUEUR DE FISSURE	p.51
III.3 ESSAIS DE COMPRESSION	p.55
III.3.1 Préparation des échantillons	p.56
III.3.2 Description du dispositif expérimental.....	p.57
III.3.3 Résultats des essais de compression à pression ambiante	p.58
III.3.4 Résultats des essais de compression sous pression	p.61
III.4 DISCUSSION	p.63
 CHAPITRE IV - INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LES TROIS PARAMETRES γ_i, γ_F ET K_{1c}	p.66
IV.1 Essais de flexion trois points sous pression	p.66
IV.1.1 Description du dispositif expérimental	p.67
IV.1.2 Description des courbes obtenues sur les trois roches	p.68
IV.2 Détermination des paramètres expérimentaux (γ_F , γ_i et K_{1c}) en fonction de la pression	p.71
IV.2.1 Etude de γ_i et de γ_F en fonction de la pression	p.71
IV.2.2 Etude du K_{1c} et comparaison avec les études antérieures	p.75
IV.2.3 Discussion	p.78
 CHAPITRE V - ESSAIS TRIAXIAUX	p.81
V.1 Essais triaxiaux	p.81
V.1.1 Préparation des échantillons	p.81
V.1.2 Description de l'essai	p.81
V.2 Résultats	p.82
V.2.1 Description des courbes obtenues sur les deux roches étudiées ...	p.82
V.2.2 Détermination des caractéristiques mécaniques	p.86

V.3 Calcul de l'énergie G_c à partir des essais triaxiaux	p.89
V.3.1 Principe du calcul	p.89
V.3.2 Comparaison des énergies G_c des essais triaxiaux et de flexion trois points	p.91
CONCLUSION	p.94
BIBLIOGRAPHIE	p.95

INTRODUCTION

Le mécanisme principal de déformation des roches sous confinement faible ou modéré est un mécanisme lié à la fissuration qui fait apparaître d'une part une phase de dilatance, et d'autre part, un radoucissement par naissance de bandes de cisaillement. Pour connaître le comportement de ce matériau, il importe donc de connaître les conditions de propagation de ces défauts et de l'interaction entre microfissuration naturelle et microfissuration induite, et l'influence de la pression de confinement sur ces propriétés. Deux paramètres sont ici étudiés dans le cadre de la théorie de GRIFFITH. Il s'agit de l'énergie d'initiation d'une fissure macroscopique γ_i (ou G_c énergie critique de propagation, ou K_{Ic} facteur d'intensité de contrainte critique) et de l'énergie totale dépensée dans le processus de propagation γ_F .

La présente étude a pour objet de mettre en évidence l'influence de la microstructure de la roche sur ces paramètres en mode d'ouverture et sur leur valeur en fonction de la longueur propagée et de la pression de confinement.

Dans le premier chapitre, un bref rappel de la mécanique linéaire de la rupture est présenté, ainsi qu'une étude bibliographique sur l'influence de la pression sur ces paramètres en mode I. Une description des deux roches calcaires étudiées est ensuite présentée : un calcaire fin micritique à microfissuration naturelle quasi-inexistante et un marbre avec une microfissuration à distribution anisotrope.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'influence de la microstructure de la roche et de l'environnement sur les paramètres de résistance à la propagation en utilisant un essai classique, l'essai de flexion trois points, qui a été mené dans une machine d'essai asservie en ouverture afin d'obtenir un maximum de renseignements sur les comportements.

Au troisième chapitre, nous présenterons l'évolution des paramètres de résistance en fonction de la longueur de fissure propagée à partir d'un essai de compression de plaque percée d'un trou, mis au point au Laboratoire. L'avantage de cet essai est de propager la fissure de façon contrôlée avec des machines d'essais simples.

Le quatrième chapitre comprend l'étude de l'influence de la pression de confinement sur les paramètres de résistance à la propagation des deux roches testées à partir des essais de flexion trois points et la comparaison avec les études antérieures réalisées sur d'autres roches en mode d'ouverture.

Enfin le cinquième chapitre consiste à effectuer les essais triaxiaux conventionnels et à comparer les énergies G_c obtenues par les essais de flexion trois points, et les énergies G_c des essais triaxiaux calculées à partir d'un modèle avec une fissure inclinée frottante.

Le phénomène de rupture dans les roches est lié principalement à la fissuration. La détermination des paramètres caractérisant la propagation des fissures est établie selon des critères tenant compte des défauts préexistants dans la roche et leur évolution. Dans ce qui suit, nous présentons les principaux critères en mécanique des roches ainsi que les différentes techniques permettant l'évaluation des paramètres en question pour les deux roches étudiées.

I.1 PROPAGATION EN MODE I

I.1.1 DEFINITION DES MODES DE PROPAGATION

En général, toute rupture (18) peut se décomposer en trois modes principaux de sollicitations définies par rapport au plan et au front de la fissure (figure 1.1) :

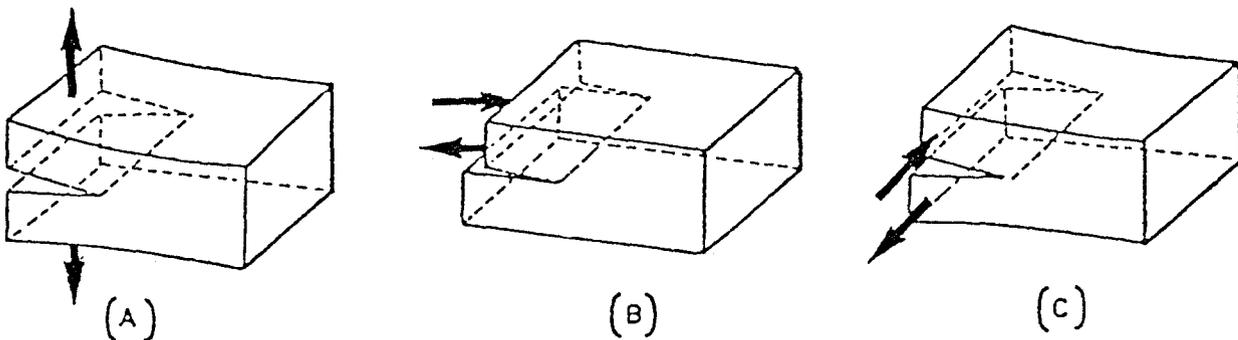


Figure 1.1 :

Définition des trois modes fondamentaux de rupture

- a) Mode I ou mode d'ouverture : Ce mode est défini par une sollicitation de traction perpendiculaire au plan de la fissure.
- b) Mode II ou mode de cisaillement : caractérisé par une sollicitation de cisaillement dans le plan de la fissure et dont l'action est perpendiculaire au front de la fissure.
- c) Mode III ou de torsion : défini par une sollicitation de cisaillement parallèle au plan de la fissure et dont l'action est parallèle au front de la fissure.

Nous notons la possibilité de présence simultanée de deux modes ou trois, ce qui est appelé le mode mixte.

Dans la suite du travail, les paramètres de propagation seront uniquement déterminés en mode I. Des études ont été menées en mode II sur les roches (21) et ont montré une différence appréciable dans la valeur des paramètres de propagation.

I.1.2 CRITERES DE PROPAGATION DE DISCONTINUITES DANS LES ROCHES :

La formulation des critères de propagation des discontinuités est élaborée généralement selon deux principales méthodes (5) :

- la première, liée au facteur d'intensité de contrainte, est basée sur l'analyse du champ de contraintes en tête de fissure,
- la deuxième repose sur un bilan énergétique.

a) Facteur d'intensité de contrainte :

Prenons en un point M de la tête de fissure, le repère orthonormé $M(x, y, z)$ (figure 1.2) tel que l'axe x soit dans le prolongement de la fissure et l'axe y perpendiculaire au plan de la fissure. Pour tout point du plan xy repéré par ses coordonnées polaires (r, θ) , les composantes du champ de contrainte sont déterminées dans le cadre de l'élasticité linéaire (18) sous la forme suivante :

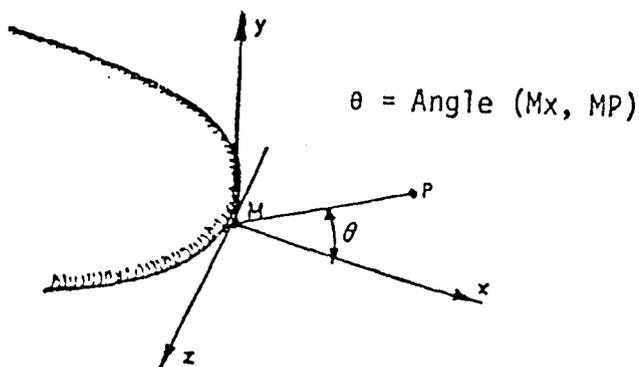


Figure 1.2 :
Repérage du point P

$$\sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_2}{\sqrt{2\pi r}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \right] + 0(r)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_2}{\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + 0(r) \quad (1.1)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_2}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + 0(r)$$

$$\sigma_{xz} = \frac{K_3}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad \sigma_{yz} = \frac{K_3}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

avec K_1, K_2, K_3 facteur d'intensité respectivement en mode 1, 2 et 3 et $0(r)$ une fonction qui tend vers une constante lorsque r tend vers 0. Les facteurs d'intensité de contraintes K_i rendent compte de la singularité en fond de la fissure et dépendent de la géométrie de l'éprouvette, de la longueur de la fissure et des sollicitations extérieures.

En mode I, nous notons que la propagation de la fissure n'aura lieu qu'à partir d'un seuil critique appelé K_{1c} qui est postulée être une caractéristique intrinsèque du matériau. Le critère du facteur d'intensité de contrainte est un critère d'initiation, il ne permet pas de prévoir la façon dont la fissure évoluera.

b) Critère énergétique de Griffith (12) :

Griffith a étudié le problème de la propagation des fissures d'un point de vue énergétique et émet l'hypothèse que le processus de séparation, à partir du milieu continu absorbe une énergie proportionnelle à l'aire créée $dW_S = 2\gamma dA$ où γ est l'énergie superficielle considérée comme caractéristique du matériau. Elle est comparable à l'énergie de surface des fluides.

Considérons un solide élastique avec une fissure d'aire A . Lors d'une propagation de fissure dA , l'équation de la conservation de l'énergie totale s'écrit sous la forme suivante :

$$dw_{\text{tot}} = dw_{\text{elast}} + dw_{\text{ext}} + dw_s + dw_{\text{cin}} = 0 \quad (1.2)$$

- où dw_{elast} : - variation de l'énergie élastique.
 dw_{ext} : - variation du travail des forces extérieures.
 dw_s : - énergie dissipée dans la séparation = $2\gamma dA$.
 dw_{cin} : - variation de l'énergie cinétique.

Le système étant en état d'équilibre avec des sollicitations extérieures constantes. Au moment de l'amorçage de la fissure, l'énergie cinétique est nulle. L'énergie nécessaire pour propager la fissure est égale à :

$$G = - \frac{\partial}{\partial A} (w_{\text{elast}} + w_{\text{ext}}) = - \frac{\partial V}{\partial A} \geq G_c = 2\gamma \quad (1.3)$$

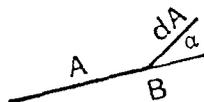
d'où la définition du critère de propagation de Griffith.

Le paramètre G est appelé le taux de restitution d'énergie et G_c taux de restitution d'énergie critique, caractéristique du matériau, V représentant l'énergie potentielle du système. Lors d'une propagation de fissure, l'excès d'énergie $(G-2\gamma)$ se transforme en énergie cinétique s'il n'existe pas d'autres facteurs de dissipation.

1.1.3 CRITERE DE BRANCHEMENT

La fissure selon le chargement peut changer d'orientation. Ce phénomène sera appelé branchement et non bifurcation qui a une signification mécanique précise.

a - Critère de Griffith



Supposons qu'à un instant la fissure ait atteint le point B. Calculons la valeur de $G(\alpha)$ pour un accroissement dA dans une orientation α par rapport à la fissure actuelle (fig. 1.3). Le principe du minimum de l'énergie potentielle permet de dire que l'angle de branchement sera défini par $G(\alpha)$ maximum ou encore $\partial G / \partial \alpha = 0$.

Figure 1.3 :

Branchement de la fissure

b - Critère de Sih (30) :

Le principe de ce critère est que la propagation se fait dans la direction de la densité d'énergie potentielle maximale ou encore dans la densité minimale d'énergie de déformation S :

$$S = r \frac{dW}{dv} \quad (1.4)$$

avec r : distance au front de fissure supposée petite devant la longueur de fissure

dv : l'élément de volume.

La valeur critique de cette fonction gouverne la propagation de la fissure $\left(\frac{\partial S}{\partial \alpha}\right)_{\alpha=\alpha_0} = 0$. CORNET (6) a comparé par des méthodes numériques, les critères liés à G et à S : Le critère de Griffith conduit à des résultats en bon accord avec l'expérience dans le cas des roches alors que le critère de SIH donne des résultats très éloignés de la réalité sauf en certains cas. Pour cette raison, le critère de l'énergie de surface sera le seul utilisé pour analyser les problèmes de propagation de fissure.

1.1.4 STABILITE DE LA PROPAGATION

La condition nécessaire de l'amorçage de propagation d'une fissure selon le critère de Griffith s'écrit :

$$G = - \frac{\partial V}{\partial A} \geq 2\gamma \quad (1.5)$$

L'évolution ou l'arrêt de propagation de fissure dépend de la variation de G , c'est à dire de $\frac{\partial G}{\partial A}$. Soit P_C la valeur de la sollicitation pour laquelle $G = 2\gamma$. Si l'on maintient le chargement P constant, à partir de ce moment deux cas peuvent se présenter :

a) ou bien $\frac{\partial G}{\partial A} = - \frac{\partial^2 V}{\partial A^2} < 0$ et le critère de Griffith n'est plus satisfait

dès que la fissure aura progressé d'une quantité infinitésimale ($G(P_C, A + dA) < 2\gamma$).

Dans ce cas, la propagation n'est possible que par une nouvelle augmentation de charge (figure 1.4). Ceci est appelé propagation stable ou contrôlée.

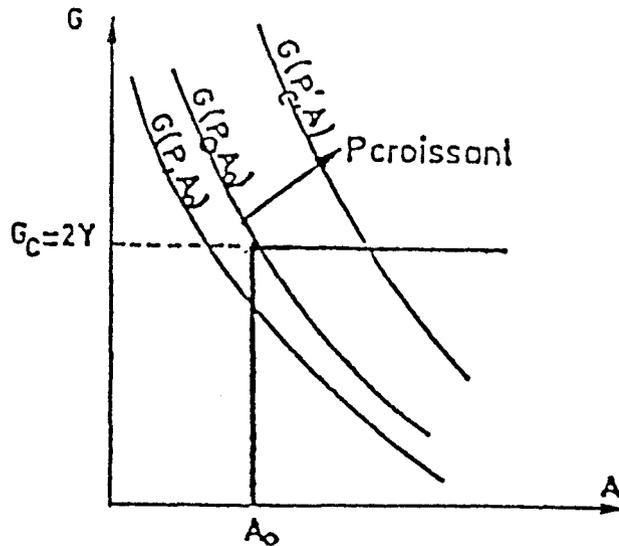


Figure 1.4 :

Discussion de la stabilité de la fracture selon la forme de G .
Cas de propagation stable

- b) ou bien $\frac{\partial G}{\partial A} = -\frac{\partial^2 V}{\partial A^2} > 0$ et le critère est encore satisfait pour une propagation virtuelle dA . Dans ce cas, la propagation aura lieu sans augmentation de la charge $G(P_c, A + dA) > 2\gamma$. Ceci correspond à la propagation instable (figure 1.5). L'excès d'énergie à P constant sera transformée en énergie cinétique. La fissure se propagera à des vitesses de plus en plus élevées qui peuvent atteindre l'ordre de 1 000 m/s.

En conséquence, le phénomène de rupture (stabilité, instabilité) n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau puisque son éventualité dépend du potentiel total du système, de sa géométrie et des conditions aux limites.

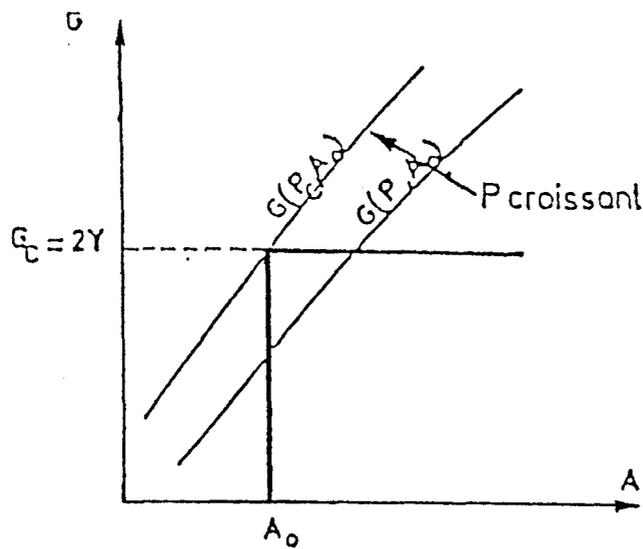


Figure 1.5 :

*Discussion de la fracture selon l'énergie disponible :
Propagation instable*

1.2 DETERMINATION DES PARAMETRES DE RESISTANCE : TYPES D'ESSAIS UTILISES ET METHODES DE DEPOUILLEMENT ASSOCIEES.

Les paramètres de résistance à la propagation peuvent être déterminés selon les deux procédures suivantes :

- soit à l'aide des méthodes définissant la résistance à la propagation en terme de K_1 .
- soit à l'aide des méthodes énergétiques (Intégrale ou le taux de restitution de l'énergie G). Nous notons que l'intégrale J est utilisable pour les matériaux à comportement linéaire ou non linéaire alors que l'énergie G ne concerne que les matériaux à comportement linéaire.

L'inexistence d'essais normalisés pour les roches suggère de vérifier la validité des normes ASTM (E 399) définies pour les métaux en utilisant pour des raisons de

facilité de réalisation des échantillons de forme simple et de dimensions différentes.

I.2.1 LES DIFFERENTS TYPES D'ESSAIS UTILISES DANS LE CAS DES ROCHES

Les critères de résistance à la propagation des fissures découlent de l'élasticité linéaire. La validité de ces critères nécessite la vérification des normes ASTM permettant de limiter l'influence des proportions dimensionnelles des échantillons, la zone plastique ou la zone microfissurée en tête de fissure, et enfin de compte avoir des valeurs acceptables de K_{1c} .

Les recommandations ASTM E 399 s'appliquent aux échantillons préfissurés de sections rectangulaires. Elles concernent les points suivants :

* Les dimensions :

- L'épaisseur : $B > 2,5 \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_y} \right)^2$
- La longueur de la fissure : $a > 2,5 \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_y} \right)^2$

* La préfissuration en fatigue de l'échantillon

- K_{max} en fatigue $< 0,6 K_{1c}$
- $0,45 H < \text{Longueur de fissure finale} < 0,55 H$

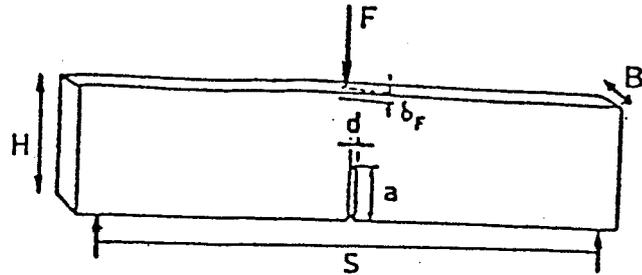
avec

σ_y : la limite élastique du matériau

H : hauteur de l'échantillon.

Dans ce qui suit, nous présentons les différents types d'éprouvettes utilisées dans le cas des roches qui vérifient les normes ASTM E 399 (2)

1) Eprouvette flexion trois points (figure 1.6)



$$\frac{S}{H} = 4$$

- S : distance entre les deux appuis
 H : hauteur de l'échantillon
 B : l'épaisseur de l'échantillon

Figure 1.6 :
 Eprouvette de flexion trois points

2) Eprouvette CT (figure 1.7)

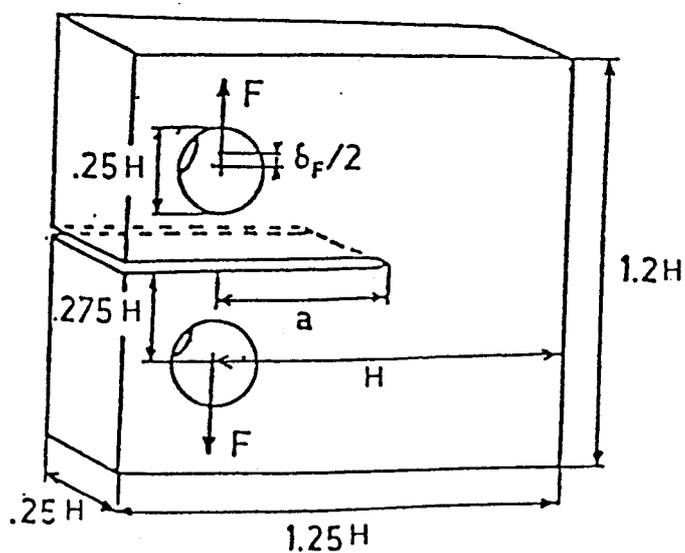


Figure 1.7 :
 Eprouvette CT avec les dimensions

3) Autres éprouvettes utilisées :

- * Eprouvette de traction à entaille latérale (S.E.N.B.) (figure 1.8)
- * Double torsion (figure 1.9)
- * Eprouvette cylindrique préentaillée soumise à la flexion trois points SECRBB (figure 1.10)

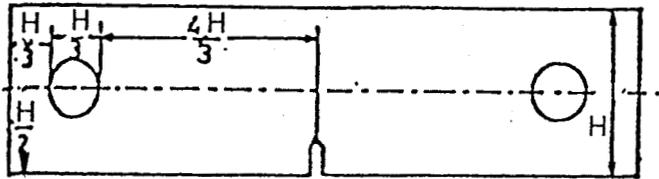


Figure 1.8 :
Eprouvette de traction à entaille latérale (S.E.N.B.)

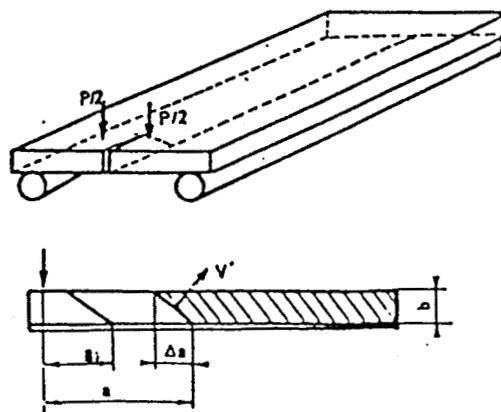


Figure 1.9 : Double torsion

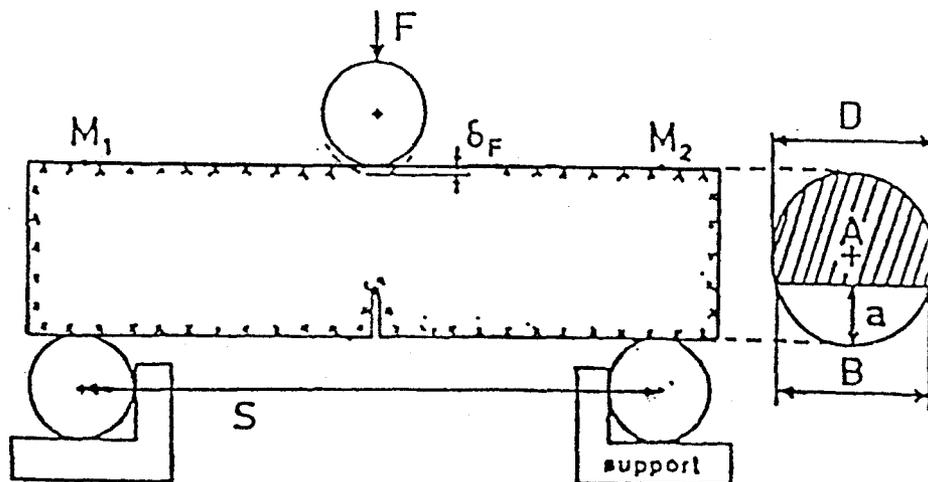


Figure 1.10 :
Eprouvette cylindrique préentaillée soumise
à la flexion trois points (SECRBB)

I-2.2 LES METHODES DE DEPOUILLEMENT UTILISEES POUR LE CALCUL DES PARAMETRES DE RESISTANCE :

Dans ce paragraphe, nous présentons les différentes techniques de dépouillement utilisées pour la détermination des paramètres de résistance à la propagation. Le facteur d'intensité de contrainte K_{1c} , l'énergie d'initiation γ_i et l'énergie de fracture γ_F .

1 - Méthode analytique :

Le facteur d'intensité de contrainte K_{1c} : est déterminé numériquement à partir de la théorie de l'élasticité linéaire en fonction du chargement et de la géométrie de l'éprouvette $K_{1c} = K(F, a)$. En ce qui concerne les essais de flexion trois points, le facteur d'intensité de contrainte s'écrit sous la forme (22)

$$K_1\left(\frac{a}{H}\right) = \frac{F_{95\%}}{BH^{1/2}} \left[11,58 \left(\frac{a}{H}\right)^{1/2} - 18,42 \left(\frac{a}{H}\right)^{3/2} + 87,18 \left(\frac{a}{H}\right)^{5/2} - 150,66 \left(\frac{a}{H}\right)^{7/2} + 154,3 \left(\frac{a}{H}\right)^{9/2} \right] \quad (1.6)$$

avec H : hauteur de l'éprouvette
 B : largeur de l'éprouvette

La charge $F_{95\%}$ est obtenue par l'intersection de la courbe charge-flèche avec la sécante à 5 % de la pente initiale (figure 1.12) en respectant la condition $\frac{F_{\max}}{F_{95\%}} < 1.1$. Ce point d'intersection correspond à un accroissement de fissure de l'ordre de 2 %.

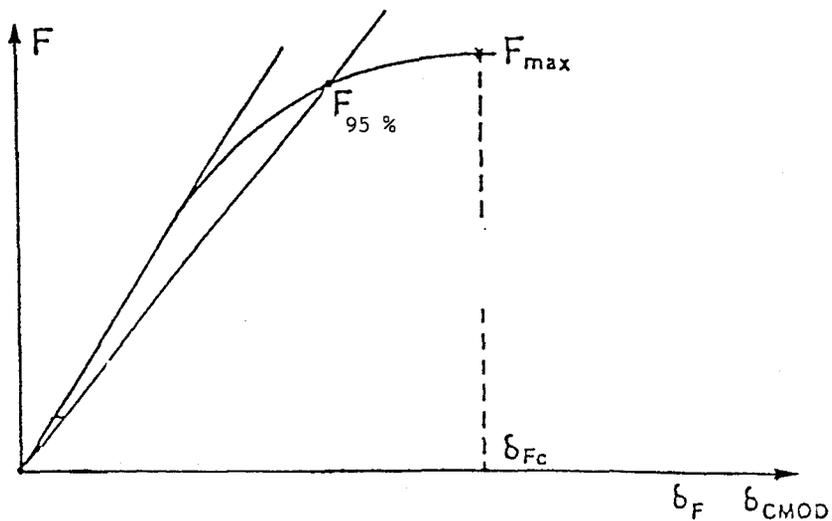


Figure 1.11 :
 Courbe charge-flèche pour déterminer $F_{95\%}$

- L'énergie d'initiation γ_i

L'énergie de départ γ_i est définie par l'énergie nécessaire pour l'amorçage de la propagation de la fissure. En mode 1, l'énergie γ_i est liée au facteur d'intensité de contrainte par la relation suivante (1.7)

$$G = 2\gamma_i = \alpha \frac{K_1^2}{E} \quad (\text{J.m}^{-2}) \quad \alpha = 1 \quad \text{en contrainte plane} \quad (1.7)$$

$$\alpha = 1 - \nu^2 \quad \text{en déformation plane}$$

2 - Méthode expérimentale par le calcul de l'aire courbe charge-flèche

L'énergie de fracturation γ_F est définie par l'énergie nécessaire pour propager la fissure sur des grandes longueurs. Elle est déterminée lors d'une propagation contrôlée, en remplaçant l'observation ponctuelle de la position de la fissure par une mesure globale, après rupture totale, de l'aire fissurée A . Elle est donnée par la relation suivante :

$$G_c = 2\gamma_F = \frac{W_e}{A} \quad (\text{J.m}^{-2}) \quad (1.8)$$

Dans le cas de flexion trois points, l'énergie W_e dissipée lors de la fracturation est égale à l'aire sous la courbe charge-flèche déterminée par planimétrie. A est la section fracturée (figure 1.12)

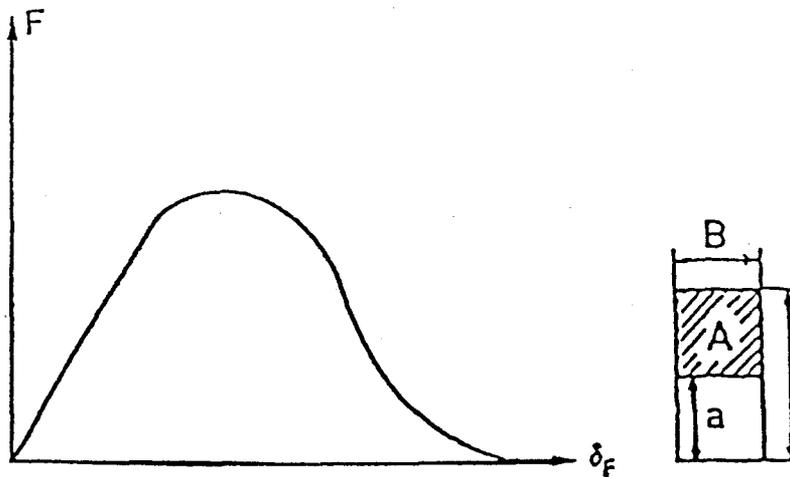


Figure 1.12 :
Courbe charge-flèche

3 - Méthode de compliance

L'étude de la variation des paramètres de ténacité en fonction de la longueur propagée nécessite la connaissance de la longueur de fissure au cours de la

propagation. La mesure de cette longueur est réalisable suivant diverses techniques :

- par détection physique au moyen d'une instrumentation appropriée : jauges d'extensométrie, fils de carbone ...
- par la mesure de compliance $C(a)$ à partir des courbes charge-flèche ou charge-ouverture de fissures.

Nous notons que l'énergie G est liée à la compliance par la relation (10) (22) :

$$G = \frac{F^2}{2B} \frac{dC(a)}{da}$$

a - détermination de la compliance par méthode expérimentale

La compliance $C(a)$ est définie par le rapport de la flèche sur la charge $C(a) = \frac{\delta_F}{F}$. Ceci correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe charge-flèche. La compliance varie en fonction de la longueur d'entaille a , $C = C(a)$ (figure 1.14). Cette fonction est approximée à partir d'essais réalisés sur des éprouvettes à longueur d'entaille différentes (figure 1.13).

Le terme $\frac{dC(a)}{da}$ est obtenu en mesurant la pente à la courbe $C(a)$ correspondant à une longueur d'entaille donnée. La variation de $\frac{dC(a)}{da}$ en fonction de a est représentée à la figure 1.15

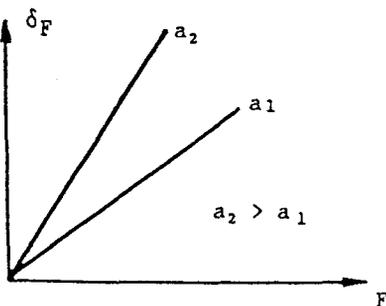


Figure 1.13

Détermination de la compliance

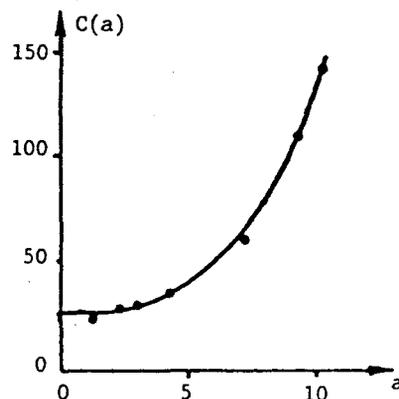


Figure 1.14

Variation de $C(a)$ en fonction de la longueur de fissure a

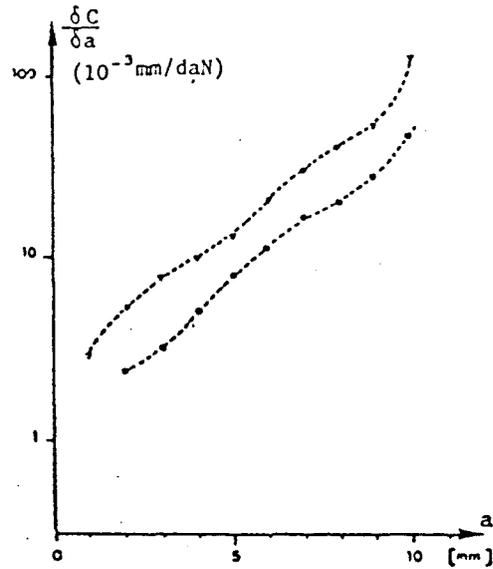


Figure 1.15
Variation de $\frac{\partial C}{\partial a}$ en fonction de a

b - Détermination de la compliance à partir d'une méthode semi-analytique (26)

L'étude analytique, basée sur l'élasticité linéaire permet de définir une fonction de compliance g à partir des paramètres géométriques et mécaniques de l'échantillon sollicité en flexion trois points

$$g = g(C(a)) \quad (1.9)$$

Cette fonction peut être exprimée d'une autre manière en fonction du paramètre $\alpha = \frac{a}{L}$ et du coefficient de poisson ν

$$g = g\left(\alpha = \frac{a}{L}, \nu\right) \quad (1.10)$$

L = Dimension de la section sollicitée de l'échantillon.

Dans ce qui suit, nous présentons un exemple de cette méthode concernant un échantillon cylindrique soumis à la flexion trois points (SECRBB) : Single Edge Crack Round Bar in Bending (figure 1.10). Lors d'un essai de flexion trois points avec des cycles de chargement-déchargement (figure 1.17), les paramètres de longueur de fissure sont donnés par la figure 1.16 .

fissure initiale

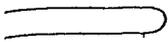
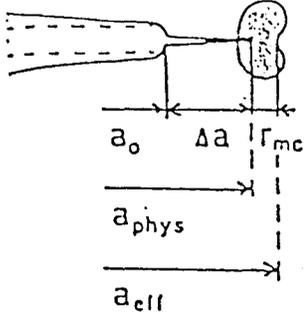
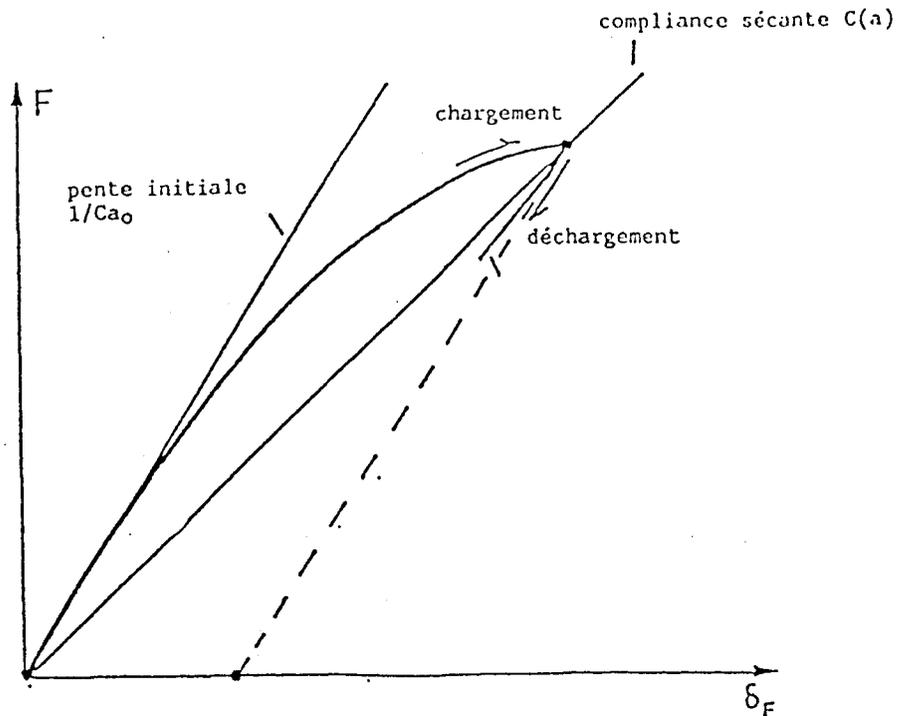
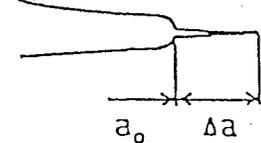
Etat de la fissure
durant le chargementEtat de la fissure.
après le 1er déchargement

Figure 1.16

Définition des paramètres de longueur de fissure et l'illustration
de la méthode de compliance

où a_0 : longueur initiale de la fissure

a_{phys} : $a_0 + \Delta a$ = longueur initiale de la fissure + propagation Δa du front de la fissure

r_{mc} : rayon de la zone microfissurée.

L'application des normes ASTM minimise la zone endommagée en tête de fissure. Ceci nous conduit à l'étude d'un matériau à comportement élastofragile parfait. En conséquence a_{eff} est déterminée à partir de la compliance sécante (figure 1.16).

Dans le cas de l'essai SECRBB, les deux fonctions de compliance (1.9, 1.10) sont données par :

$$g(C(a) = C(a) \text{ E.D.} \quad (1.11)$$

$$g\left(\alpha = \frac{a}{D}, \nu\right) = 15,6719 \{1 + 0,1372 (1+\nu) + 11,5073 (1-\nu^2)\alpha^{2,5} \cdot [1+7,0165 \alpha^{4,5}]^2 \} \quad (1.12)$$

avec $\alpha = \frac{a}{D}$ $0 < \alpha < 0,6$

E, ν et $C(a)$ étant connus, cette dernière est égale à la compliance sécante. A partir des deux équations (1.11) et (1.12), on peut déduire la valeur de la longueur de fissure a qui sera injectée dans la formule suivante afin de calculer le K_{1c} , et par la suite, l'énergie G .

$$K_1 = 0,25 \left(\frac{S}{D}\right) \cdot Y' \cdot \frac{F}{D^{1/5}} \quad (1.13)$$

avec le facteur de forme $Y'(\alpha) = 12,7527 \alpha^{0,5} / (1-\alpha)^{0,25}$

$$G = \frac{K_1^2}{E}$$

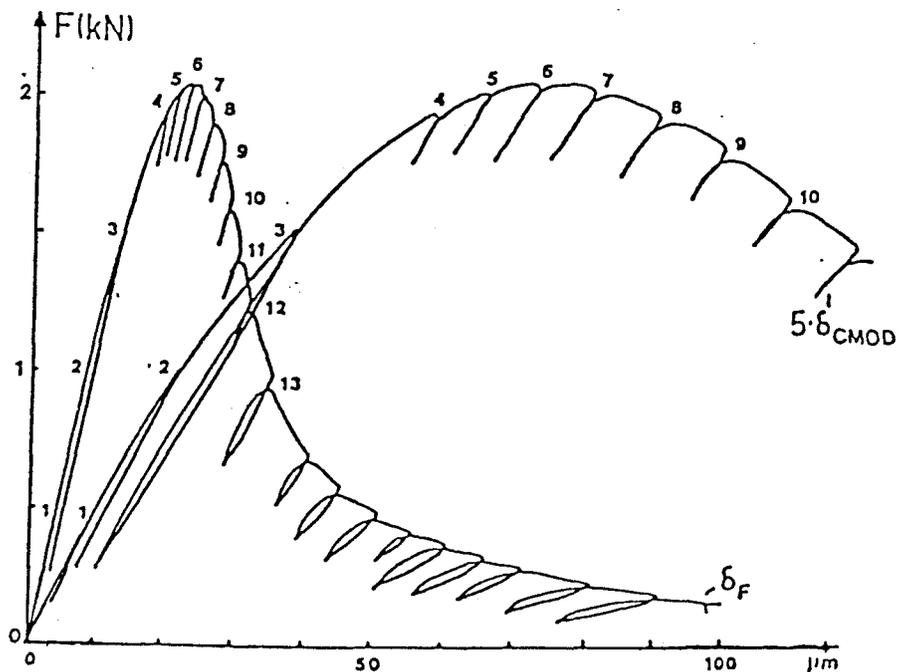


Figure 1.17

Courbe charge-flèche et charge-ouverture avec des cycles de chargement-déchargement

1.3 INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT

Les paramètres de résistance à la propagation sont considérés comme des caractéristiques intrinsèques du matériau. De nombreuses études ont permis de montrer que le milieu environnant (13) (27) (24) peut avoir une influence notable sur ces paramètres : Effectivement, la fissure peut se propager dans un milieu environnant donné avant d'atteindre la valeur d'énergie critique $G = G_c = 2\gamma$. Ceci est dû essentiellement aux contraintes très élevées en tête de fissure qui activent les réactions chimiques (chapitre II).

En même temps, ces paramètres (K_{1c} , G_{1c}) peuvent augmenter considérablement, par exemple en fonction de la pression de confinement. Dans ce qui suit, nous présentons d'une façon succincte les études précédentes réalisées dans ce domaine.

Dans le cas des roches, très peu d'études ont été effectuées sous pression de confinement (3) (28) (32). Nous citons l'étude de SCHMIDT et HUDDLE (28) faite sur une roche calcaire du type micritique (Indiana limestone) de 10 à 15 % de porosité. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de traction à entaille latérale, (figure 1.18) dont la préfissuration par fatigue est obtenue par essai de flexion trois points en appliquant des charges cycliques dont le maximum est à 85 % de la charge de rupture, (figure 1.18).

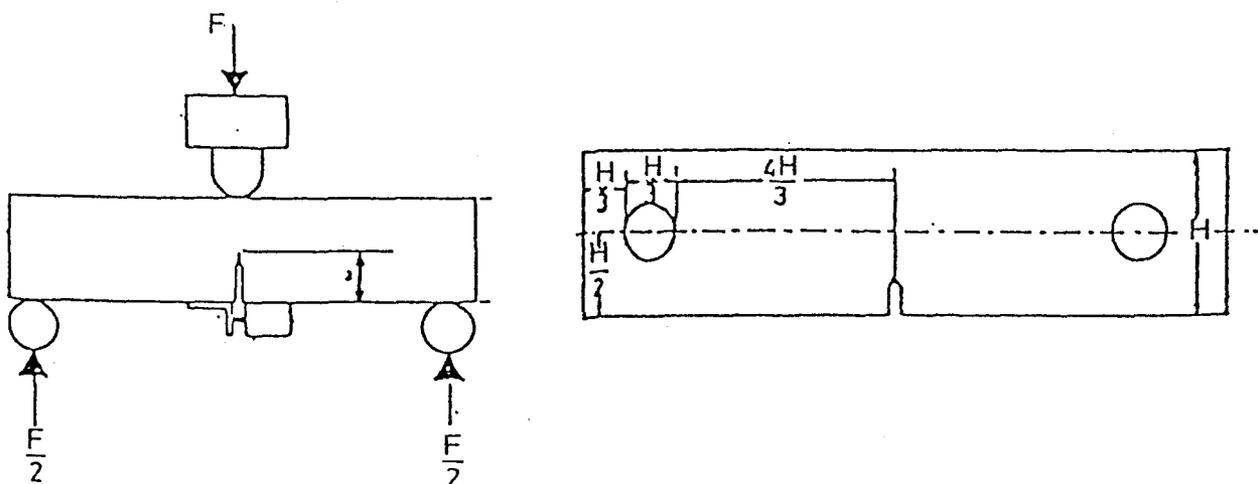


Figure 1.18 (a et b) :

a) fatigue de préfissuration
en flexion trois points

b) éprouvette de traction à entaille
latérale S.E.N.

ensuite deux trous sont percés sur l'échantillon pour obtenir une éprouvette de traction du type S.E.N. Les résultats du facteur d'intensité de contrainte K_{1c} en fonction de la pression sont donnés par la figure 1.19 : K_{1c} augmente nettement avec la pression de confinement (K_{1c} augmente de 6 % à 7 MPa et de 34 % à 62 MPa, par rapport à la pression ambiante).

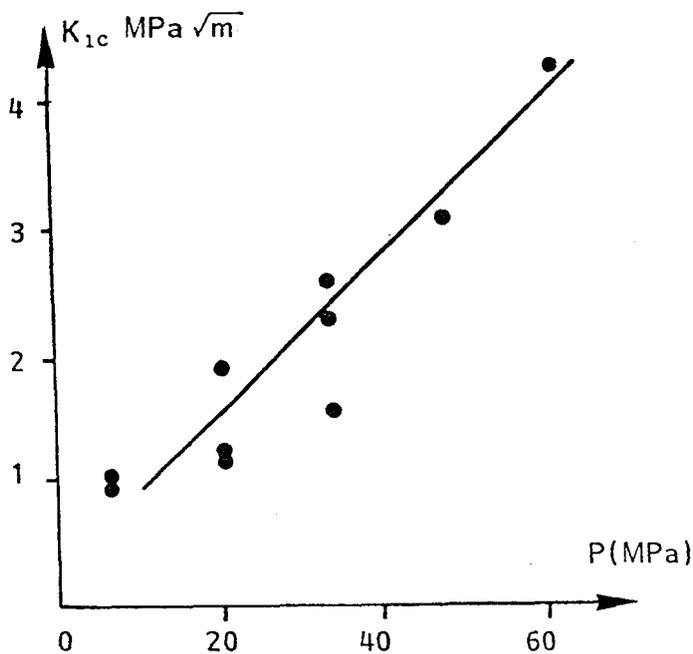


Figure 1.19 :

*Facteur d'intensité de contrainte du calcaire
d'Indiana en fonction de la pression (28)*

Une autre étude a été menée par TERRIEN et al (32) sur du grès arkosique caractérisé par son orthotropie. Des essais de flexion trois points ont été effectués suivant les trois directions. Les résultats du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la pression sont portés sur la figure 1.20.

TERRIEN a remarqué que les valeurs du facteur d'intensité de contraintes, à pression ambiante, pour les éprouvettes dont le plan de stratification est perpendiculaire à l'entaille direction (1 et 3) sont deux fois supérieures à celles

caractérisées par une stratification parallèle à l'entaille (direction 2). Par contre, pour les essais sous pression les valeurs de K_{1C} dont les directions 2 et 3 sont très proches et nettement supérieures à celles de la direction 1.

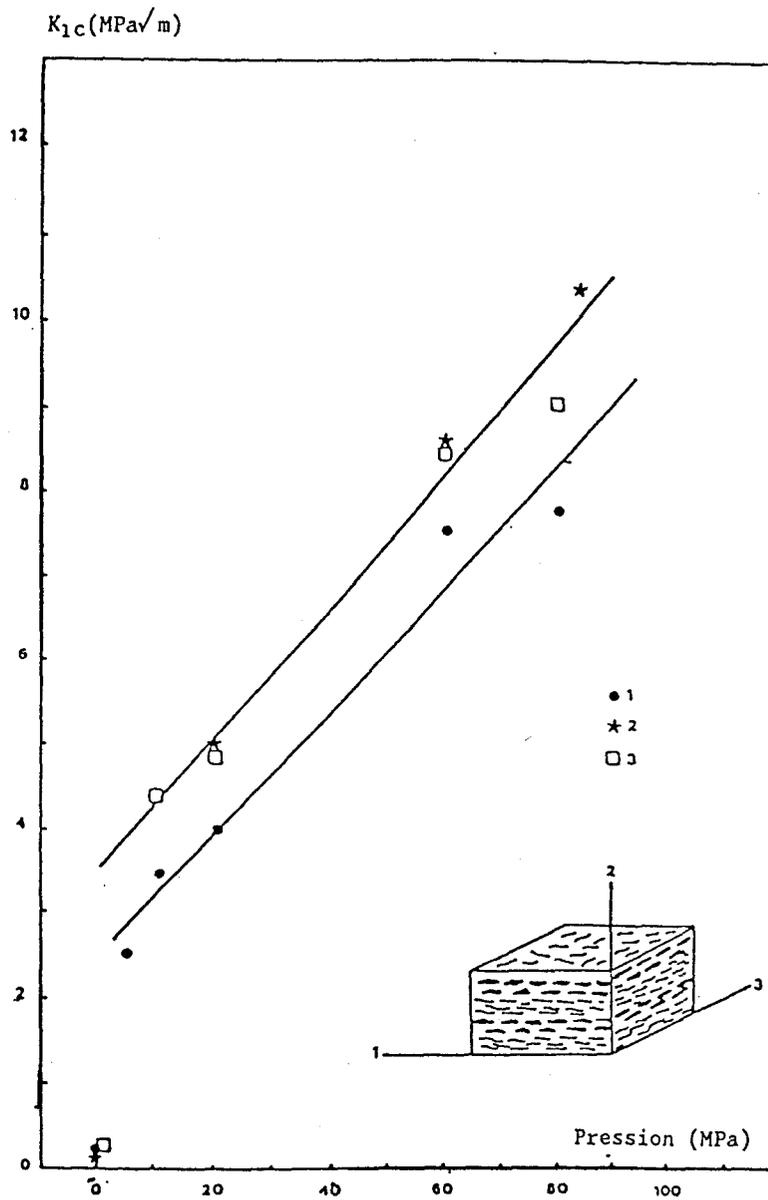


Figure 1.20 :

K_{1C} du grès arkosique en fonction de la pression (32)

De même BIRET (3) a étudié l'influence de la pression sur une roche calcaire du

Comblanchien. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques à entaille circonférentielle à mi-hauteur, (figure 1.21). L'échantillon est placé dans une cellule de type triaxiale, et, est soumis à une pression hydrostatique après l'obtention du contact piston-échantillon. Ensuite, la contrainte axiale diminue progressivement jusqu'à la rupture. La conduite de cet essai est semblable à un essai de traction sous pression de confinement.

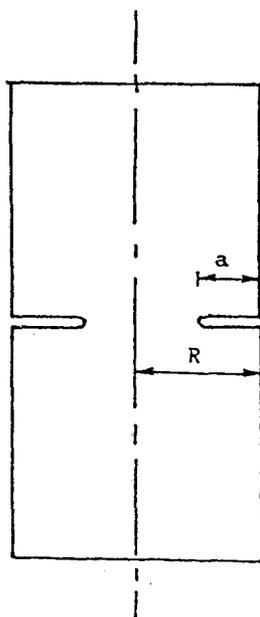


Figure 1.21 :
Epreuve cylindrique entaillée

Le facteur d'intensité de contraintes K_{Ic} est calculé en fonction de la force de traction, le rayon de l'éprouvette (R) et le facteur de forme $Y = f ()$

$$K = \quad (1.14)$$

L'intégrale J est donnée par l'aire sous la courbe charge-flèche divisée par la section fracturée

$$J = \quad (1.15)$$

Les résultats expérimentaux des deux paramètres J_{Ic} et K_{Ic} sont donnés en fonction de la pression (figures 1.22, 1.23). La première courbe est une parabole :

$$(\sigma \cdot m^2) J_{1c} = 0,02 P^2 + 4,03 P + 1,35 \quad (\text{MPa})$$

La deuxième courbe est une fonction linéaire sous la forme :

$$(\text{MPa} \sqrt{m}) K_{1c} = 0,077P + 0,60$$

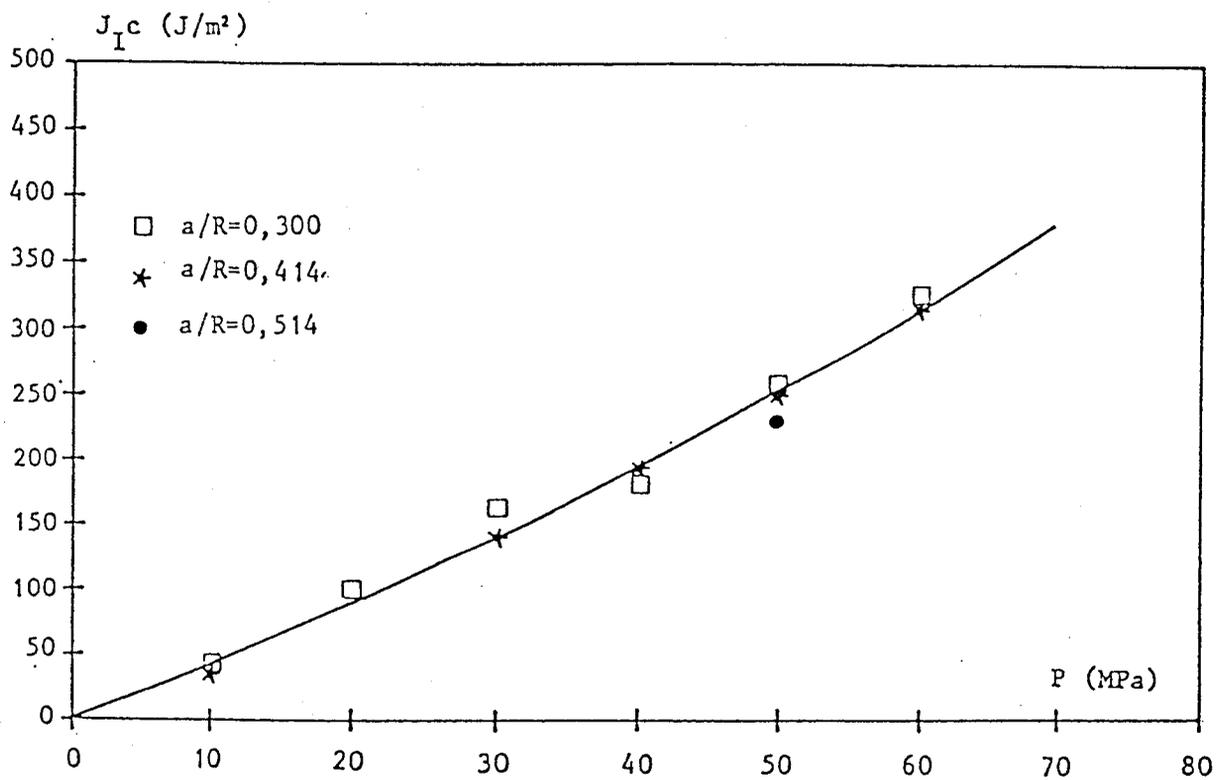


Figure 1.22 :

J_{1c} du calcaire Comblanchien en fonction de la pression (3)

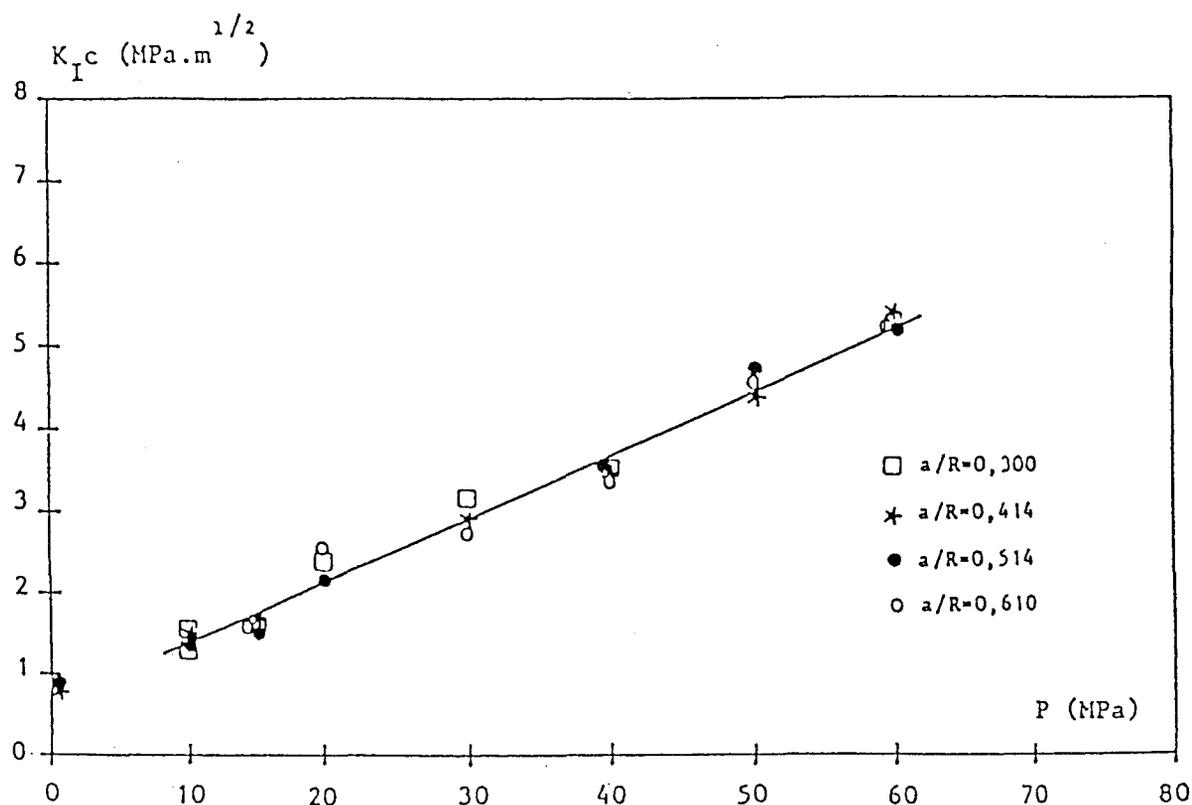


Figure 1.23 :

K_{Ic} du calcaire Comblanchien en fonction de la pression (3)

1.4 ROCHES CALCAIRES TESTEES

L'étude expérimentale a été faite sur deux types de roches calcaires (micrite des Gorges de la Vis (Hérault), marbre de St Pons) caractérisés par une structure homogène et une haute teneur en carbonate de calcium.

a) Micrite :

La micrite testée est une roche calcaire lithographique du Séquanien dont la taille du grain est de l'ordre du micron. Elle est de couleur gris foncé, et présente deux pôles de distribution de taille de grain, l'un aux environs de $0,6 \mu\text{m}$, et l'autre entre $1,5$ et $3,5 \mu\text{m}$. Cette roche est caractérisée par l'inexistence de débris de fossiles et de microfissures centimétriques, par une teneur de 96 % de CaCO_3 et quelques impuretés en Si, Fe, Al, Mg mises en évidence par le tableau 1.1.

Micrite Gorges de la vis	CO ₂	Ca CO ₃	Si O ₂	P ₂ O ₅	Mg O	Fe	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ti O ₂
%	42,34	96,29	1,30	0,05	0,95	0,24	0,49	0,06	0,14	0,02

Tableau 1.1
Composition chimique de la micrite

La porosité totale est d'environ 2,2 %. La porosité ouverte, contribuant à la perméabilité de la roche, mesurée par porosimétrie au mercure est nulle. La microfissuration naturelle est quasi-inexistante.

b) Marbre de St Pons

Marbre du Gothlandien, il est caractérisé par une teneur de 98 % de Ca CO₃, une porosité de 2,5 %, et une granulométrie assez homogène de l'ordre de 250 µm. Les grains sont intensément maclés, et présentent des bandes de glissements. La plus grande partie de la porosité est intergranulaire à cause du mauvais contact entre les grains. Il présente également une anisotropie de fissures (14) vérifiée par l'essai de compressibilité.

Cet essai est pratiqué sur un cube de marbre sur les faces duquel sont collées des jauges dans les trois directions principales par rapport au plan de foliation. Lors d'une compression hydrostatique, on enregistre, en fonction de la pression, les déformations mesurées par les trois jauges (figure 1.24).

Ces courbes montrent que :

- les parties linéaires ont la même pente de valeur $\frac{E}{1-2\nu}$ dans les trois directions.
- les parties curvilignes représentatives de la fermeture de fissures sont différentes mettant en évidence une anisotropie de répartition de fissures. La déformation est plus importante dans la direction de la jauge I, ce qui indique que le

plan moyen de fissures est proche du plan de foliation. Les jauges II et III ayant les mêmes réponses impliquent que la direction perpendiculaire au plan de foliation est une direction d'anisotropie (orthotropie transversale).

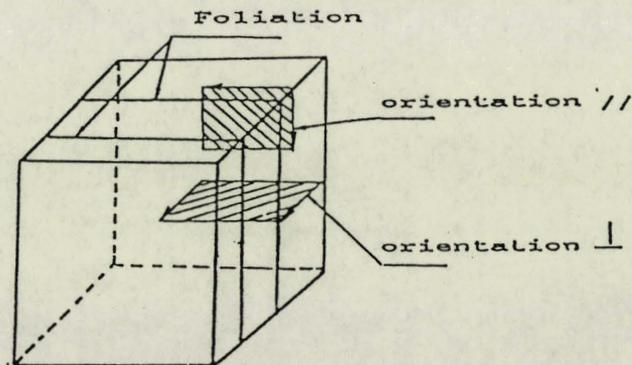
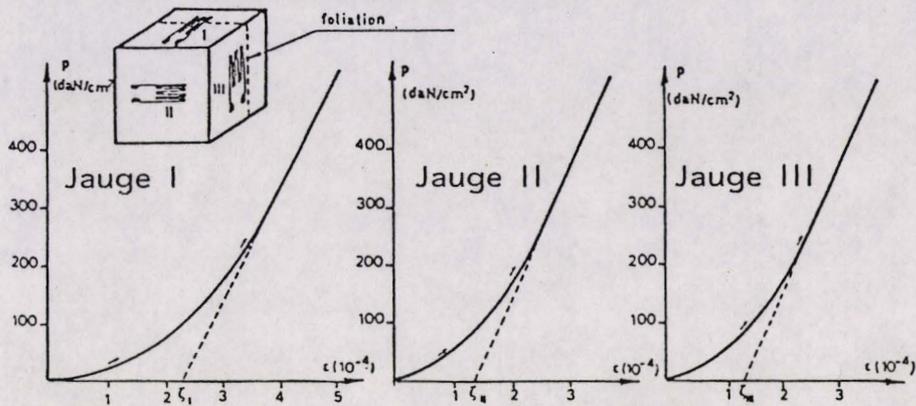


Figure 1.24 :
Essais de compressibilité : Déformation en fonction
de l'orientation de la jauge par rapport au plan de foliation (14)

Dans ce chapitre, nous nous sommes donné comme objectif, la détermination de l'énergie d'initiation γ_i et l'énergie de fracturation γ_F des deux roches étudiées (le marbre et la micrite) par des essais de flexion trois points. Le choix de ce type d'essai réside dans sa facilité de mise en oeuvre devant le nombre important d'essais à réaliser et la possibilité qu'il offre de mesurer correctement les deux paramètres. Pour en arriver là, il a été nécessaire d'asservir la machine d'essai sur l'ouverture de la fissure afin d'en contrôler la propagation. Dans les précédentes études (13) (14), les courbes charge-flèche complètes n'avaient pu être correctement déterminées et le calcul de l'énergie de fracturation γ_F était imprécis.

II.1 ESSAIS DE FLEXION ET MATERIEL UTILISE

II.1.1 ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS

Les échantillons testés ont été réalisés à partir d'un seul bloc afin d'assurer des conditions d'essai homogènes. Les éprouvettes utilisées ont pour côtes de référence (figure 2.1) $H = 15\text{mm}$, $B = 10\text{mm}$, $L = 70\text{mm}$.

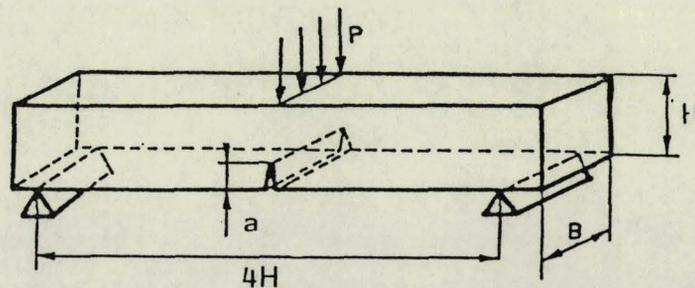


Figure 2.1 :

Eprouvette de flexion trois points

Elles sont réalisées par sciage, puis polies au papier abrasif. Les entailles sont obtenues par sciage manuel sur guide : une première entaille est faite à l'aide d'une scie de 0,4 mm d'épaisseur, le fond d'entaille est affiné par une scie de 0,1 mm. La longueur

d'entaille est déterminée par visée optique après rupture. Notons que certains auteurs (26) (31) (29) utilisent la technique de préfissuration par fatigue en appliquant des charges cycliques à 85 % de la charge de rupture. La longueur de la fissure propagée est calculée par la méthode de compliance $C = \frac{Y}{a} = f(a)$. Nous discuterons plus tard des difficultés de la méthode de compliance. Pour décrire l'influence de l'environnement, deux séries d'essais ont été réalisées pour les deux roches : la première sur des échantillons saturés à l'eau, la deuxième sur des échantillons à sec.

II.1.2 DESCRIPTION DE L'ESSAI ET ASSERVISSEMENT SUR L'OUVERTURE

L'asservissement en force conduit toujours à une propagation instable de la fissure. L'asservissement sur la flèche conduit dans certains cas également à une propagation instable, ce qui ne permet pas non plus d'atteindre le paramètre γ_F .

Le contrôle d'essai a été effectué par un capteur de déplacement LVDT (B) de course 1,5 mm, placé symétriquement par rapport à l'entaille comme représenté à la figure 2.2.

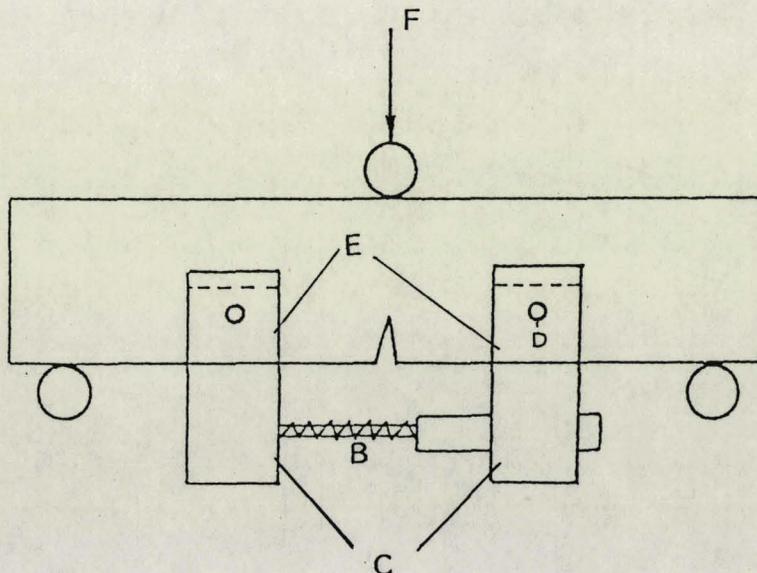


Figure 2.2 :
Montage Eprouvette-Capteur d'ouverture d'entaille

Le noyau du capteur de déplacement est appliquée par un ressort B sur l'étrier C afin d'éviter les coincements dus à la rotation relative des étriers C. Les supports du capteur, constitués d'étrier (C) sont fixés à l'éprouvette au moyen de serrage latéral (D) sur des cales (E) afin de répartir les efforts de serrage sur l'échantillon.

Les capteurs d'ouverture à lame (figure 2.3) avaient été précédemment testés. Cependant, ils se sont avérés totalement inutilisables pour des essais de flexion trois points sur les matériaux fragiles. Ces capteurs, par leur rigidité, créent une force de traction du même ordre que celle nécessaire à la propagation.

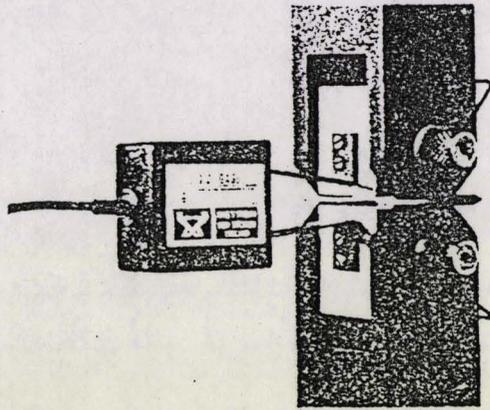


Figure 2.3 :
Capteur à lames

En ce qui concerne l'asservissement de l'essai, le capteur d'ouverture est relié à la machine en donnant un signal de tension $V_1(t)$ qui sera comparé à la consigne $V_2(t)$. L'erreur corrige la position du vérin (G). Dans la connection, il est important de faire attention à la polarité des signaux. Classiquement, les machines électro-asservies en déplacement en essai de traction par exemple (contrainte positive) le sont lorsque le capteur longitudinal donne un signal positif (sortie du noyau par rapport au zéro central). Dans le cas d'un essai de compression asservi par le capteur de déplacement longitudinal, la contrainte est négative et le signal du capteur négatif (rentrée du noyau).

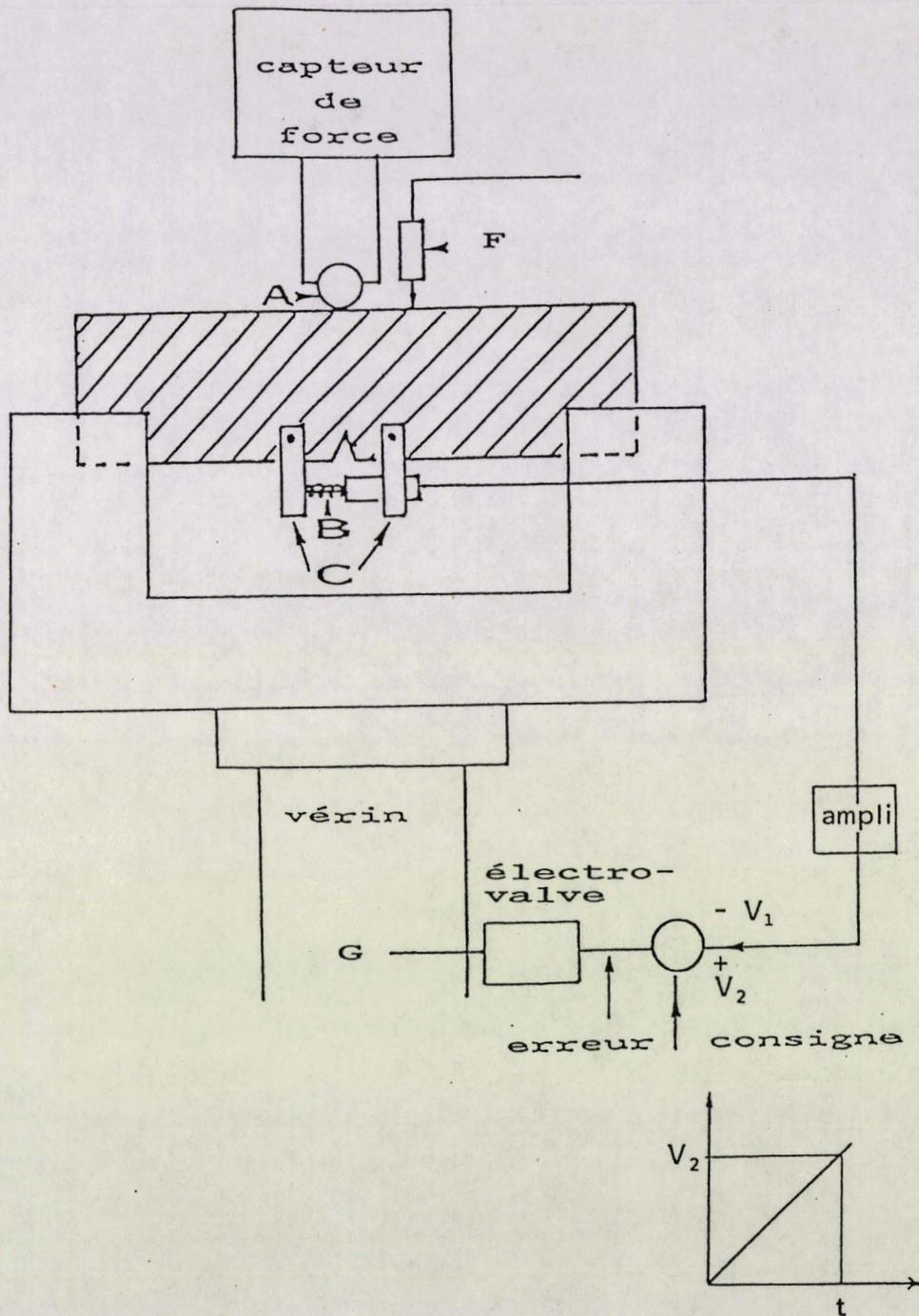


Figure 2.4 :

Asservissement de la machine et montage de l'essai

Dans le présent essai, nous avons une compression (contrainte négative) alors que le noyau du capteur sort (signal positif). Pour obtenir l'asservissement et non l'instabilité, il faut obtenir un signal négatif lorsque le noyau du capteur sort.

Les essais du présent chapitre sont réalisés sur une machine M.T.S. de charge statique admissible de 20 KN. La charge est appliquée par un cylindre de contact (A) (figure 2.4). La vitesse d'essai a été de $0,015 \mu\text{m/s}$. Le déplacement vertical est mesuré par un autre capteur LVDT(F) placé entre les deux plateaux. Les courbes force-flèche sont données directement sur une table traçante X-Y. L'ouverture de la fissure et la flèche sont également tracées en fonction du temps.

II.2 RESULTATS

II.2.1 COURBES COMPLETES

Une première série d'essais a été effectuée sur des échantillons secs avec une vitesse d'ouverture de l'ordre de $0,015 \mu\text{m/s}$. L'allure générale des courbes charge-flèche est donnée par la figure 2.5.

Pour la micrite (figure 2.5.a), la pente correspondant au chargement est linéaire jusqu'au pic de résistance, ensuite nous observons un retour en arrière de la flèche, retour indétectable sans l'asservissement utilisé.

En ce qui concerne le marbre (figure 2.5.b, c), nous observons une perte de linéarité aux environs de 85 % du pic de résistance. Ensuite, le comportement est moins "fragile" que pour la micrite ; l'essai en direction \perp apparaît d'ailleurs plus "stable" que pour l'essai en direction $//$.

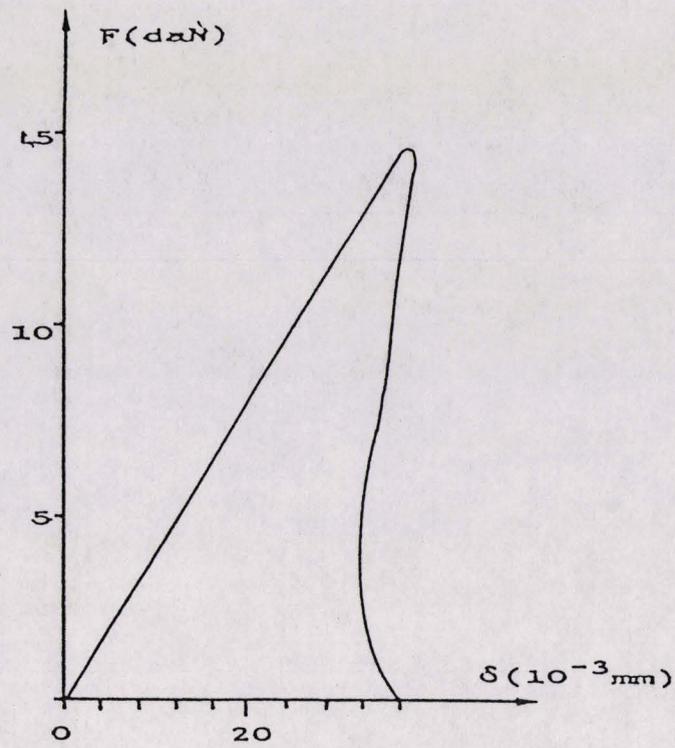


Figure 2.5 (a) :

Courbe charge-flèche de la micrite (11)

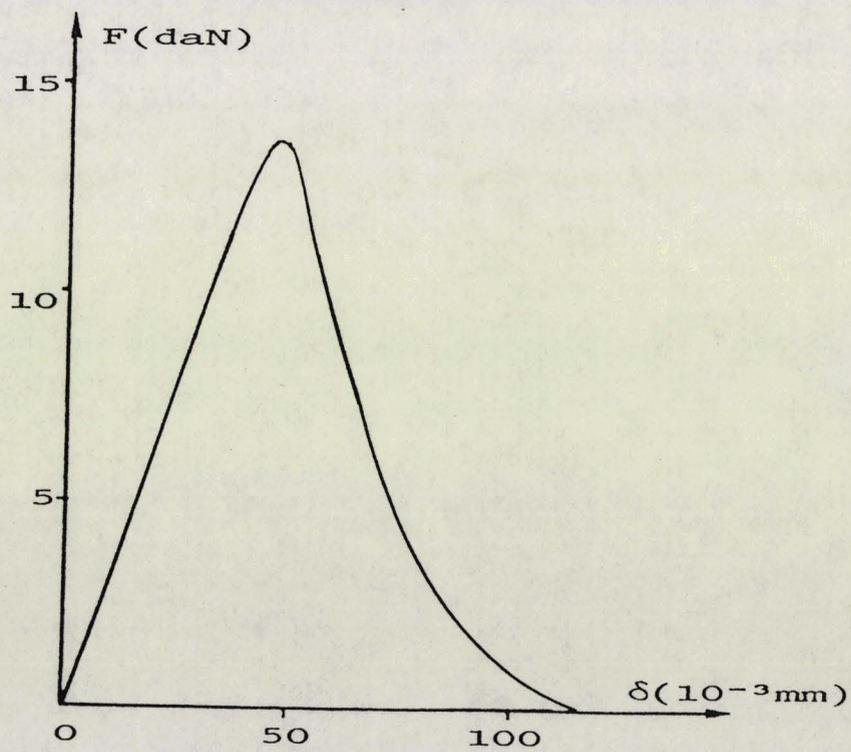


Figure 2.5 (b) :

Courbe charge-flèche marbre // (11)

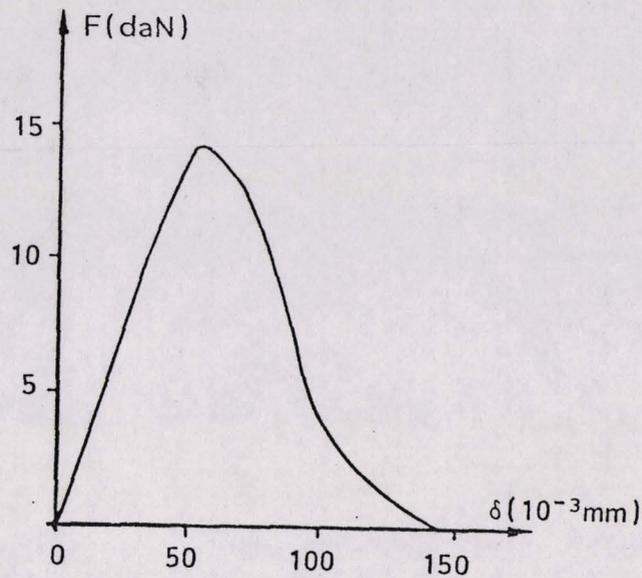


Figure 2.5 (c) :

Courbe charge-flèche marbre I (11)

II.2.2 ESSAIS A SEC, VALEURS DES PARAMETRES γ_i , γ_F . DISCUSSION

Le facteur d'intensité de contraintes k_{1c} et l'énergie d'initiation γ_i ont été déterminés par la méthode analytique décrite dans le paragraphe I.2.2. L'énergie de fracturation γ_F a été déterminée par planimétrie, méthode décrite dans le même paragraphe . Les résultats des trois paramètres calculés pour chaque essai sont portés respectivement dans les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3.

Echantillon	largeur B (mm)	entaille a	K_{1c} MPa \sqrt{m}	γ_i (J.m $^{-2}$)	γ_F (J.m $^{-2}$)
		Hauteur H			
1	9,9	0,273	0,54	3,44	
2	10,1	0,260	0,64	4,91	47,1
3	10,2	0,283	0,61	4,4	31,8
4	10	0,305	0,53	3,32	36,8
5	10,1	0,261	0,55	3,60	24,7

Tableau 2.1 :

Résultats des essais sur le marbre // à sec

Echantillon	largeur B(mm)	entaille a		K_{1c} MPa \sqrt{m}	γ_i (J.m $^{-2}$)	γ_F (J.M $^{-2}$)
		Hauteur H				
1	10,2	0,276		1,09	14,2	86,80
2	10,1	0,288		0,62	4,6	44,5
3	10,0	0,299		0,46	2,5	31,5
4	10,0	0,298		0,64	4,86	37,4
5	10,1	0,267		0,70	5,81	
6	10,1	0,280		0,45	2,44	33,7

Tableau 2.2 :
Résultats des essais sur le marbre à sec

Echantillon	largeur B(mm)	entaille a		K_{1c} MPa \sqrt{m}	γ_i (J.m $^{-2}$)	γ_F (J.M $^{-2}$)
		Hauteur H				
1	10,1	0,286		0,6	2,16	14,01
2	10	0,320		0,63	2,39	7,84
3	10,1	0,295		0,70	3,03	10,87
4	10,0	0,311		0,66	2,64	17,55
5	10,5	0,284		0,86	4,51	12,58
6	10,2	0,29		0,68	2,8	10,46

Tableau 2.3 :
Résultats des essais sur la micrite à sec

Les valeurs moyennes de l'énergie d'initiation γ_i , du facteur d'intensité de contraintes k_{1c} et de l'énergie de fracturation γ_F sont données par le tableau 2.4.

Nous notons que les conditions d'initiation de la propagation K_{1c} et γ_i sont inférieures à celles trouvées précédemment (14) où la vitesse d'essai était nettement plus importante (10^3 fois plus grande). Ceci montre clairement l'influence de la vitesse d'essai sur les résultats, point qui sera discuté dans le paragraphe II.2.4.

	K_I (MPa \sqrt{m})	γ_i (J.m $^{-2}$)	E (MPa)	γ_F (J.m $^{-2}$)	γ_F/γ_i
Micrite	0,69	2,92	82 000	12,2	4,2
Marbre //	0,57	3,93	42 000	35	8,9 \cong 9
Marbre \perp	0,66	5,70	42 000	46,8	8,2

Tableau 2.4 :

Résultats des essais sur échantillons secs

Essayons maintenant d'interpréter la différence entre les valeurs de γ_i et γ_F :

a) dans le cas du marbre, la différence entre l'énergie de démarrage de la propagation de fissure γ_i et l'énergie de fracturation totale γ_F est importante, supérieure à 31 Jm $^{-2}$. Ceci met clairement en évidence le rôle joué par la microfissuration naturelle qui induit une consommation d'énergie par propagation de défauts naturels proches de la fissure principale (17). L'étude récente menée par NOLEN-HOEKSMA et GORDON (25) sur le marbre dolomitique de Stockbridge confirme cette interprétation. Ces deux auteurs montrent l'évolution de la fissuration de l'éprouvette et sa densité, à chaque niveau de chargement (tableau 2.5). Le premier développement de la fissuration est enregistré à 60 % de la charge maximale (figure 2.6). Au début, la longueur totale des fissures existantes au pic est de 4 à 5 fois plus grande que la longueur de la fissure principale. La figure 2.7 donne l'évolution de la densité de fissuration en fonction de la charge.

% Maximum load	Crack Increment	Total crack length	Crack density	% of crack on pre-existing cracks
38	0 mm	0 mm	0	0
64	9.2	9.2	1.2	55
82	30.5	39.7	5.2	49
93	35.8	75.5	9.9	41
96	30.7	106.2	14.0	32
99	48.9	155.1	20.4	39

Tableau 2.5 :

Résultats de l'essai correspondant aux niveaux de chargement (25)

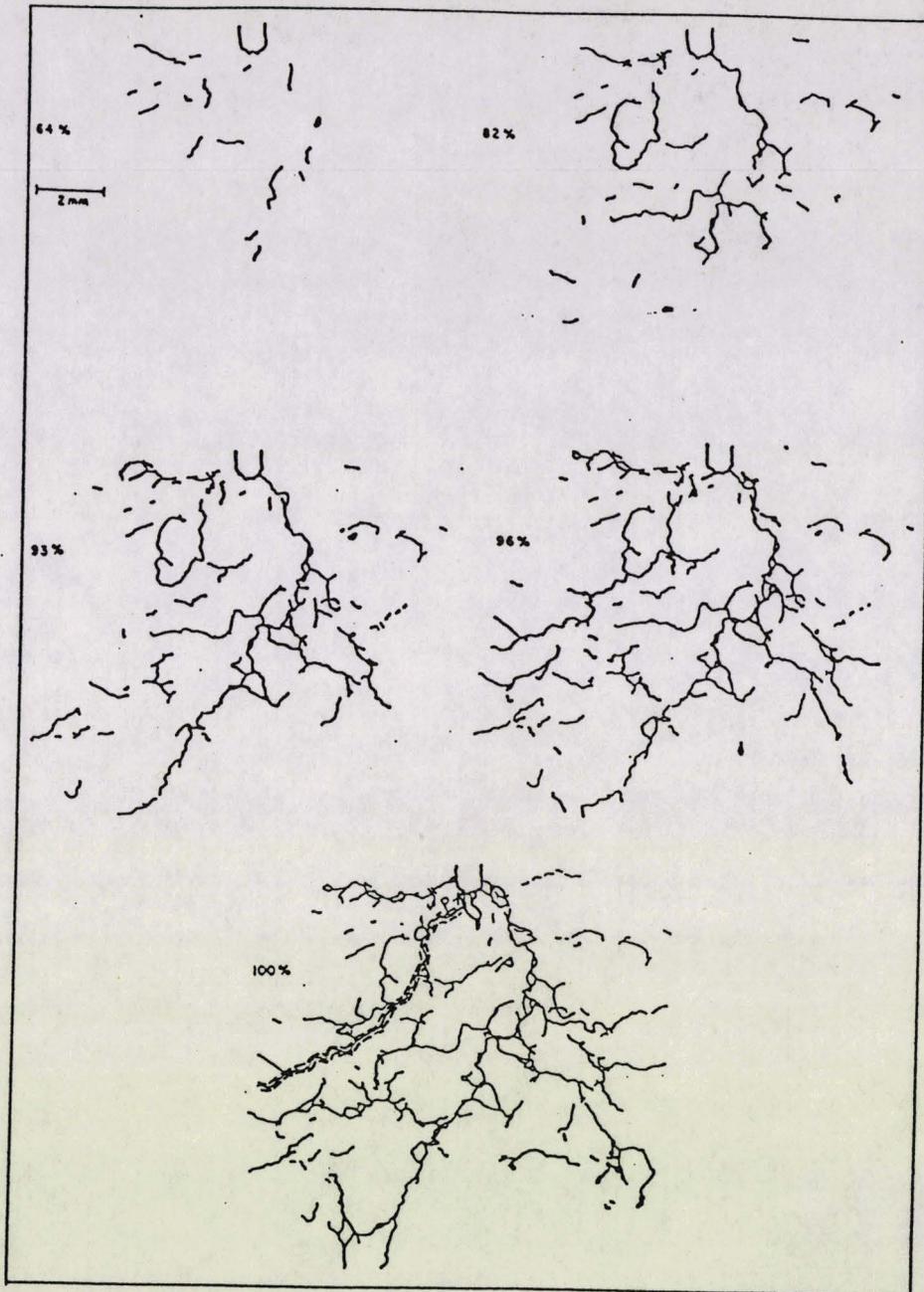


Figure 2.6 :
 Les différents stades du développement de la fissuration
 de l'éprouvette de marbre de Stockbridge au cours d'un essai CB (25)

N.B. : Les traits fins représentent les fissures formées pendant le chargement précédent

Au travers de l'étude de NOLEN et al, on s'aperçoit donc que la microfissuration naturelle a tendance à freiner la fissure principale par le fait d'une dissipation

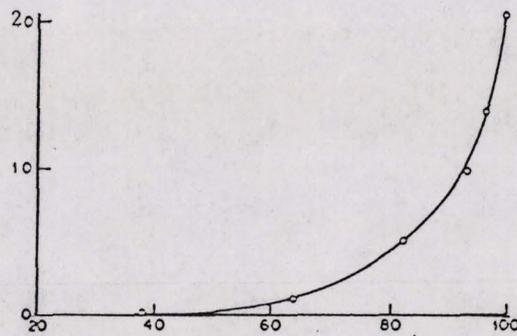


Figure 2.7 :

Densité de fissuration en fonction de la charge (25)

importante d'énergie dans de la microfissuration qui naît à partir de la microfissuration naturelle. Ceci est d'autant plus important que l'on propage la fissure dans des orientations perpendiculaires aux microfissures naturelles (14), ce qui nécessite une énergie supplémentaire pour franchir cette barrière :

$$\gamma_{F\perp} - \gamma_{i\perp} = 41 \text{ J.m}^{-2} > \gamma_{F//} - \gamma_{i//} = 31 \text{ Jm}^{-2}$$

Ce dernier résultat permet d'interpréter le sommet plus aplati de la courbe charge-flèche pour le marbre dans la direction \perp que dans la direction $//$.

b) Dans le cas de la micrite, la différence entre les deux paramètres γ_i et γ_F reste faible de l'ordre de 9 J.m^{-2} , contrairement au marbre. Cependant γ_i n'est pas égal à γ_F ceci peut être expliqué par la raison suivante :

La valeur d'énergie de fracturation est surestimée du fait que la section réelle fracturée est nettement plus importante que l'aire apparente, car la fissure se propage d'une façon intergranulaire et contourne par conséquent les grains microscopiques. NOLEN et al (25) ont montré que le rapport de la longueur réelle de la fissure sur la longueur nominale est de 1,2 dans le cas du marbre dolomitique.

	face avant	face derrière
longueur nominale de la surface de rupture	42,2 mm	44,8 mm
longueur réelle de la fissure		
côté droit	50,8	52,6
côté gauche	50,8	53,8
Rapport <u>longueur réelle de la fissure</u> longueur nominale de la fissure	1,2	1,2

Tableau 2.6 :

Mesures de longueur de la fissure après la rupture (25)

Remarquons que la linéarité de la pente ascendante jusqu'au sommet de la courbe charge-flèche traduit bien l'égalité des deux paramètres (14) : la plus grande partie de l'énergie donnée à l'éprouvette sert à propager la fissure principale car la micrite est caractérisée par l'absence de microfissures naturelles.

II.2.3 INFLUENCE DE L'EAU

Une deuxième série d'essais a été effectuée sur des échantillons saturés en eau. Les résultats pour chaque essai sont portés dans les tableaux 2.8, 2.9 et 2.10.

Echantillon	largeur B (mm)	entaille a	K_{Ic} MPa \sqrt{m}	γ_i (J.m ⁻²)	γ_F (J.m ⁻²)
		Hauteur H			
1	10,1	0,366	0,636	4,81	27,6
2	10,1	0,265	0,55	3,64	42,2
3	9,9	0,308	0,49	2,84	14,6
4	9,9	0,306	0,37	1,61	30,16
5	10	0,283	0,45	2,47	

Tableau 2.7 :
Résultats des essais sur le marbre // saturés en eau

Echantillon	largeur B (mm)	entaille a	K_{Ic} MPa \sqrt{m}	γ_i (J.m ⁻²)	γ_F (J.m ⁻²)
		Hauteur H			
1	10	0,267	0,59	4,17	45,7
2	10	0,267	0,74	6,6	17,45
3	10	0,293	0,75	6,7	27,6
4	10,1	0,32	0,67	5,36	15,7
5	10,2	0,3	0,63	4,75	

Tableau 2.8 :
Résultats des essais sur le Marbre saturé

Echantillon	largeur B (mm)	entaille a		K_{1c} MPa \sqrt{m}	γ_i (J.m $^{-2}$)	γ_F (J.m $^{-2}$)
		Hauteur	H			
1	10,2	0,285		0,68	2,79	11,8
2	10	0,313		0,54	1,77	11,8
3	10,2	0,285		0,58	2,04	
4	9,9	0,295		0,42	1,08	
5	10,1	0,293		0,63	2,37	
6	10,1	0,333		0,61	1,92	
7	9,9	0,327		0,48	1,39	

Tableau 2.9 :
Résultats des essais sur la micrite saturée

L'énergie γ_F n'a pu être déterminée pour tous les essais car des cycles chargement-déchargement ont été effectués pour étudier la compliance (paragraphe 2.3).

Les valeurs moyennes de l'énergie γ_i , le facteur d'intensité de contraintes K_{1c} et l'énergie de fracturation γ_F des trois roches étudiées sont données par le tableau 2.10.

	K_{1c} MPa \sqrt{m}	(J.m)	(J.m)
Micrite	0,56	1,91	11,8
Marbre //	0,50	3,07	28,6
Marbre	0,68	5,5	26,6

Tableau 2.10 :
Résultats de γ_i , γ_F et K_{1c} pour les roches étudiées.
(échantillons saturés en eau)

Nous constatons encore une fois, la même différence enregistrée pour les essais à sec entre les 2 paramètres γ_i et γ_F . Malgré la dispersion de quelques résultats dus au nombre limité d'essais réalisés, on peut avancer la remarque suivante :

Les valeurs des énergies γ_i et γ_F obtenues sur échantillons saturés sont inférieures à celles obtenues sur échantillons secs sauf pour la micrite où le nombre de résultats reste insuffisant et le γ_i du marbre où cette différence est légère.

D'après les courbes vitesse de fissuration - facteur d'intensité de contraintes, (figure 2.8), issues d'essais de relaxation (13) (14), la vitesse de fissuration qui correspond aux conditions de chargement des essais de flexion trois points des trois roches calcaires étudiées, est nettement supérieure dans l'eau que dans l'air à K_1 donné. Cette différence permet d'expliquer la diminution des paramètres "apparents" de propagation de fissure car il y a concurrence entre la vitesse de chargement et la vitesse d'évolution intrinsèque des fissures pour un environnement donné : pour un K_1 fixé, la vitesse de propagation est plus grande dans l'eau ce qui diminue les résistances (figure 2.8).

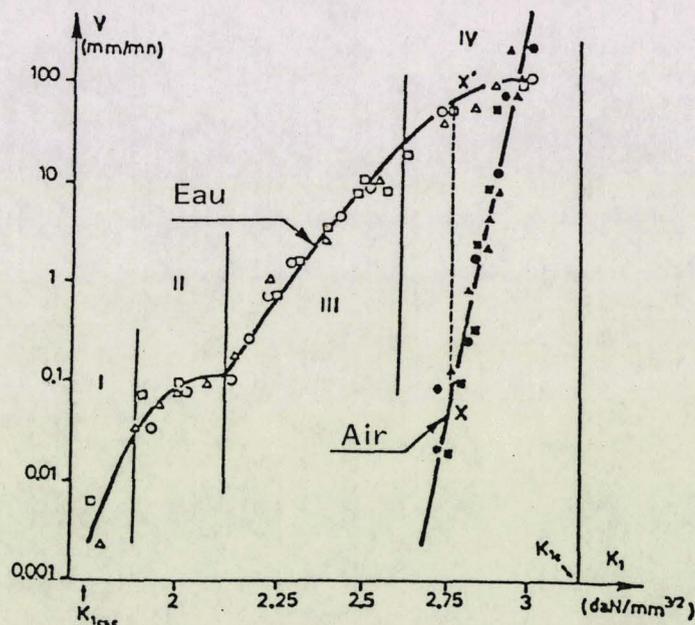


Figure 2.8 :

Courbe $V = V(K_1)$ pour les trois roches, air eau (13)

II.2.4 INFLUENCE DE LA VITESSE D'ESSAIS

Les courbes contrainte de traction-vitesse de déformation, (figure 2.9) (14) montrent clairement l'influence de la vitesse d'essai. On note un abaissement de l'ordre de 30 % de la résistance à la traction entre des vitesses de déformation de 10^{-3} S^{-1} à 10^{-8} S^{-1} .

Selon la relation $K = f(\sigma, a) = Y\sigma\sqrt{a}$, lors d'un essai réalisé à une vitesse importante, la contrainte augmente rapidement et par suite le K_I sans que les défauts naturels évoluent en taille. Par contre, pour un essai effectué à une vitesse faible, les fissures naturelles évoluent selon la loi $V = V(K_I)$ sans une influence appréciable du chargement.

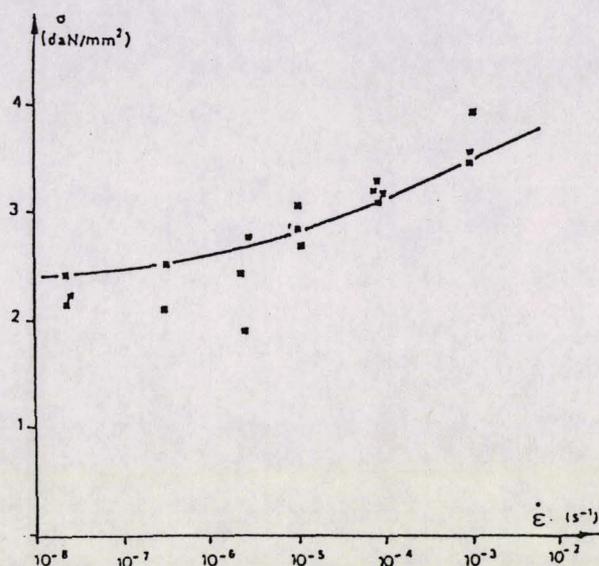


Figure 2.9 :

Contrainte de traction - Vitesse de déformation (14)

II.3 COMPLIANCE - INFLUENCE DE LA LONGUEUR PROPAGÉE

II.3.1 INTRODUCTION

La méthode de compliance est une technique de dépouillement des deux paramètres de l'énergie : l'énergie d'initiation γ_i et l'énergie de fracturation γ_F . Cette méthode a été décrite dans le paragraphe 1.2.2. L'inconvénient majeur de cette technique est la dispersion des résultats de compliance en fonction de la longueur d'entaille, tableaux (2.11, 2.12, 2.13). Nous avons noté des compliances différentes dans les roches testées pour les mêmes entailles. Tout cela nécessite la réalisation d'un nombre important d'essai afin de pouvoir tracer la courbe compliance - longueur d'entaille représentative du matériau.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C = y / \left(\frac{P}{B}\right)$ $\times 10^{-3} \text{ mm/daN/mm}$	32,3	20,1	22,85	25,1	32,6	42,8	46,7	36,3	63	38
$a = \text{long. d'ent. (mm)}$	0,287	0,284	0,293	0,295	0,285	0,285	0,295	0,293	0,333	0,327
$H = \text{Haut. (mm)}$										

Tableau 2.11:
Résultat sur la micrite

	1	2	3	4	5	6	7	8
$C = y / \left(\frac{P}{B}\right)$ $\times 10^{-3} \text{ mm/daN/mm}$	47	35	33,3	68,7	59	70	58,5	119,3
$a = \text{long. d'ent. (mm)}$	0,299	0,298	0,288	0,280	0,267	0,267	0,293	0,3
$H = \text{Haut. (mm)}$								

Tableau 2.12:
Résultat du marbre

	1	2	3	4
$C = y / \left(\frac{P}{B}\right)$ $\times 10^{-3} \text{ mm/daN/mm}$	42,8	34,3	41,2	34,5
$a = \text{long. d'ent. (mm)}$	0,260	0,261	0,309	0,306
$H = \text{Haut. (mm)}$				

Tableau 2.13 :
Résultat du marbre //

Cette dispersion de compliance semble due essentiellement à l'état de fissuration des éprouvettes testées.

II.3.2 PRESENTATION D'UNE METHODE APPROCHEE : (HYPOTHESE $\frac{\partial C}{\partial a} = A$)

D'après les courbes $\text{Log } \frac{\partial C}{\partial a} = A$ en fonction de la longueur d'entaille (a) obtenues par HENRY (14), nous avons remarqué que ces courbes sont des droites de pente A sensiblement constante pour les deux roches calcaires étudiées (figure 2.10)

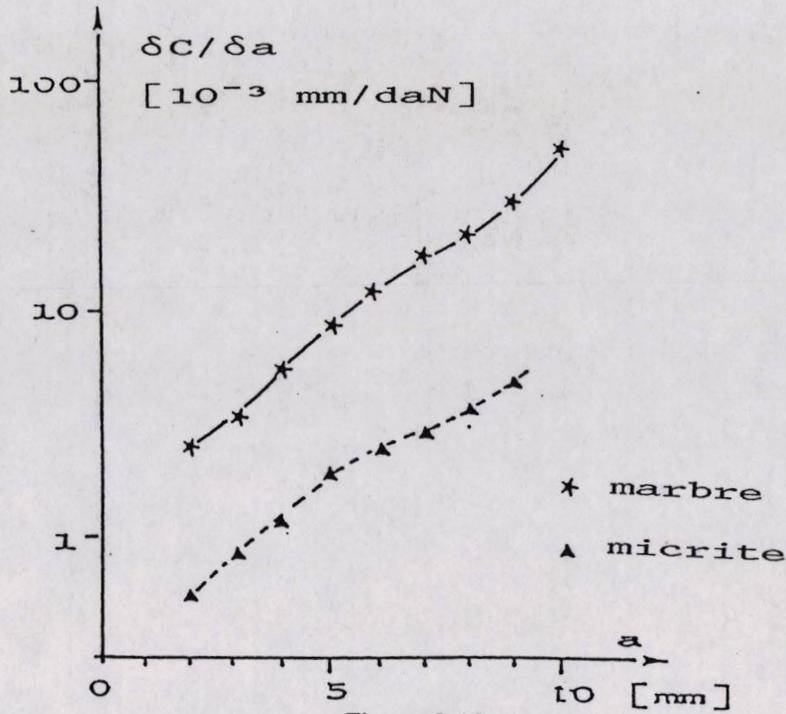


Figure 2.10 :
Variation de $\frac{\delta C}{\delta a}$ en fonction de a

Cette hypothèse étant faite, la relation de la variation de $\frac{\partial C}{\partial a}$ en fonction de la longueur d'entaille peut s'écrire de la façon suivante :

$$\ln \frac{\partial C}{\partial a} = Aa + B \quad (2.1)$$

Le calcul de B peut être effectué en remarquant que lors de l'initiation de la propagation, a est connu ainsi que $\frac{\partial C}{\partial a}$ qui sera recalculé par :

$$G_c = 2\gamma_i = \frac{1}{2} \frac{F_c^2}{B^2} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (2.2)$$

γ_i étant calculé par la méthode analytique.

La compliance $C(a_i)$ est obtenue par intégration de l'équation (2.1) :

$$C(a) = \frac{1}{A} \exp(Aa + B) + D \quad (2.3)$$

la compliance $C(a)$ étant connue, expérimentalement la constante D peut être alors déterminée.

II.3.3 EXEMPLE - INFLUENCE DE LA LONGUEUR PROPAGÉE

Cet exemple représente le dépouillement d'un essai de flexion trois points avec chargement-déchargement effectué sur une éprouvette de marbre (Ma \perp .6), (figure 2.11). Deux cycles de chargement-déchargement ont été effectués.

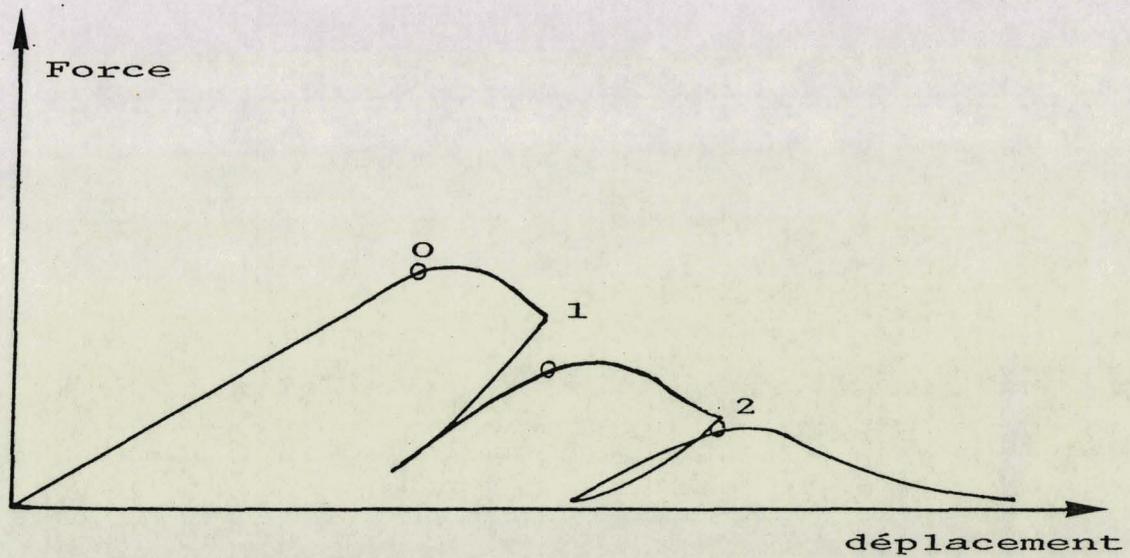


Figure 2.11 :

Courbe charge-flèche pour le marbre \perp n° 6

Les constantes A,D étant calculées sur le point d'initiation, il est alors possible de recalculer la valeur de la fissure propagée au moment des deux déchargements (points 1 et 2) et d'en déduire par la relation 2.1 la valeur de $\frac{\partial C}{\partial a}$. Le calcul de γ_i s'en déduit par :

$$\gamma_i = \frac{1}{4} \frac{F^2}{B^2} \frac{\partial C}{\partial a}$$

L'ensemble des résultats est reporté dans le tableau 2.14. En ce qui concerne l'énergie γ_F , celle-ci a été déterminée par intégration entre deux cycles.

	longueur de fissure (a) mm	C x 10 ⁻³ mm/daN/mm	$\partial c/\partial a \times 10^{-3}$ mm/daN	γ_F (J.m ⁻²)	γ_i (J.m ⁻²)	K _{1c} MPa√m
le pt 0 (a ₀)	4,2	68,7	1,058	41,1	2,97	0,50
le pt 1 (a ₁)	9,73	88,9	8,7	41,5	9	0,87
le pt 2 (a ₂)	10,53	97	11,8	138,4	3,75	0,56

Tableau 2.14 :

Résultats du dépouillement du marbre \perp n° 6

Ce tableau, quoique sommaire, semble indiquer nettement que les conditions de propagation de fissures sont indépendantes de la longueur propagée. Notons que l'augmentation considérable de l'énergie de fracturation γ_F au cours du dernier chargement correspond à des longueurs de fissures proches de la hauteur de l'échantillon. L'effet de bord joue alors un rôle prépondérant.

Nous avons cependant abandonné cette méthode, non devant les complexités expérimentales et de dépouillement, mais essentiellement par l'arbitraire dans la détermination de la compliance : les boucles chargement-déchargement sont largement ouvertes et il est très difficile de trouver "une droite".

La méthode de compliance semble mal adaptée au cas des roches à fissuration naturelle importante.

Les inconvénients reprochés à cette méthode sont dus essentiellement à l'imprécision des courbes compliance-longueur d'entaille car l'état de fissuration d'une éprouvette vierge avec une longueur d'entaille usinée n'est pas le même que celui d'une éprouvette avec la même longueur de fissure propagée. Ceci est dû à la présence des microfissures naturelles préexistantes qui se propagent sous chargement et en conséquence contribuent au développement du réseau de fissuration de l'échantillon.

Afin de remédier à ces deux difficultés, nous proposons d'agrandir les dimensions des éprouvettes afin d'éviter l'effet du bord, et d'utiliser une technique permettant de détecter la progression de la longueur de fissure au cours de l'essai. Cette technique est traitée dans le chapitre III.

L'objectif de ce chapitre est la mise en évidence de l'évolution des paramètres de résistance avec la longueur de fissure propagée. Pour cette étude, nous avons utilisé un essai mis au point au laboratoire. Son avantage réside dans le contrôle de la propagation des fissures avec des machines d'essais simples. Cet essai consiste en une compression d'une plaque parallélépipédique avec un trou au centre. Pendant l'essai, deux fissures de traction apparaissent au bord du trou dans l'axe de compression. Le calcul de l'énergie de propagation en fonction des dimensions de la plaque et de la longueur de fissure propagée a été effectué par la méthode de discontinuité de déplacement (15). Une technique de détection de la longueur de fissures par jauges d'extensométrie a été utilisée (23) (15). Cette technique nous permet de connaître la position de la fissure à tout instant pendant l'essai et par conséquent le calcul de l'énergie G_c .

III.1 DETERMINATION DES COURBES G

III.1.1 PRESENTATION DE LA METHODE

A l'aide d'une méthode numérique (méthode par intégrale de frontière dite de discontinuité de déplacement (7)), Henry (16) a déterminé l'énergie d'avancement de fissure G en fonction de la contrainte de compression et la longueur de fissure $G = f(\sigma, a)$. Cette méthode est basée sur l'utilisation des fonctions d'influence pour construire un système d'équations dépendant des conditions imposées sur le contour. Le principe de superposition a été appliquée pour les conditions aux limites en contraintes. L'état de contraintes qui s'établit dans la plaque infinie percée d'un trou avec deux fissures suivant l'axe de compression est soumise à un champ de contraintes uniforme est égale à la superposition : (figure 3.1)

- d'un état b ; champ solution dans la plaque sans trou ni fissure
- d'un état c ; champ solution avec contrainte nulle à l'infini et dans lequel on soumet le trou et la fissure à une contrainte telle que la somme des contraintes sur le trou et la fissure des états "b" et "c" soit nulle.

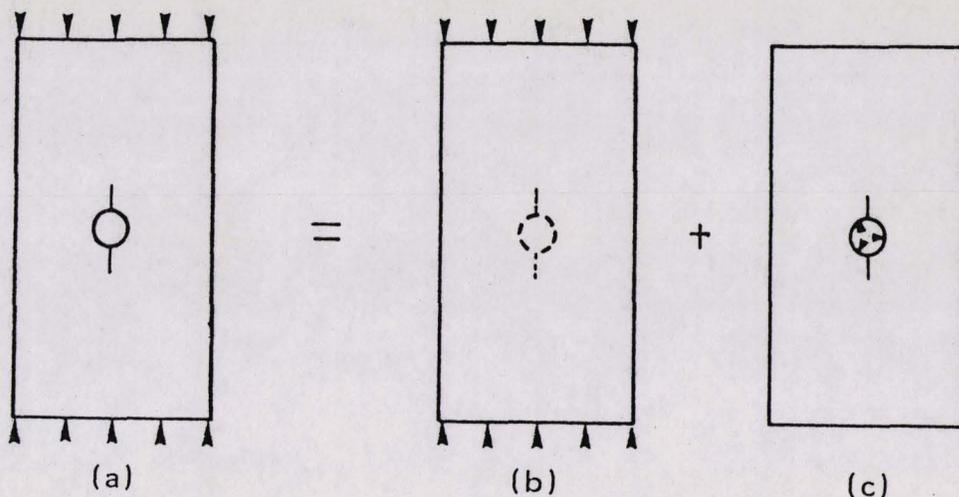


Figure 3.1 :

Calcul des contraintes sur le cercle

Les conditions aux limites sont exprimées sur les segments de discrétisation du trou. Le problème est étudié en simple symétrie. Les contraintes moyennes sont uniformément appliquées sur chaque segment de discrétisation du contour dont la localisation est repérée par son centre.

III.1.2 Influence de la taille de la plaque

La méthode de discontinuités de déplacement a été utilisée (7) pour déterminer l'influence de la taille de la plaque sur l'énergie G en prenant différents rapports H/R , L/R (figure 3.2).

R : Rayon du trou

H : Hauteur (dimension parallèle à l'axe de compression)

L : Largeur (dimension perpendiculaire à l'axe de compression)

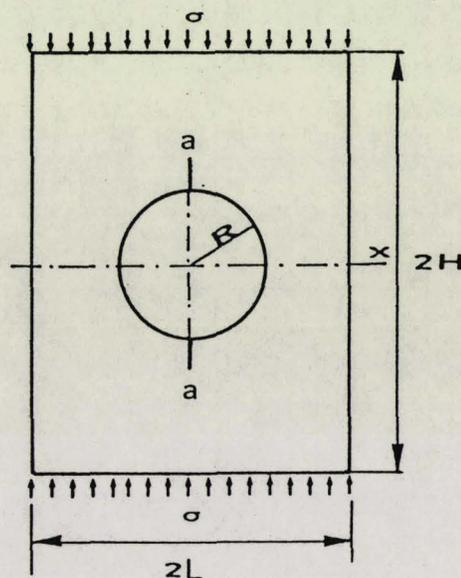


Figure 3.2 :

Plaque percée d'un trou

La figure 3.3 porte les principaux résultats de la variation du paramètre adimensionné $\frac{G E}{\pi \sigma^2 R}$ en fonction de la longueur de fissure pour différents rapports H/R , L/H .

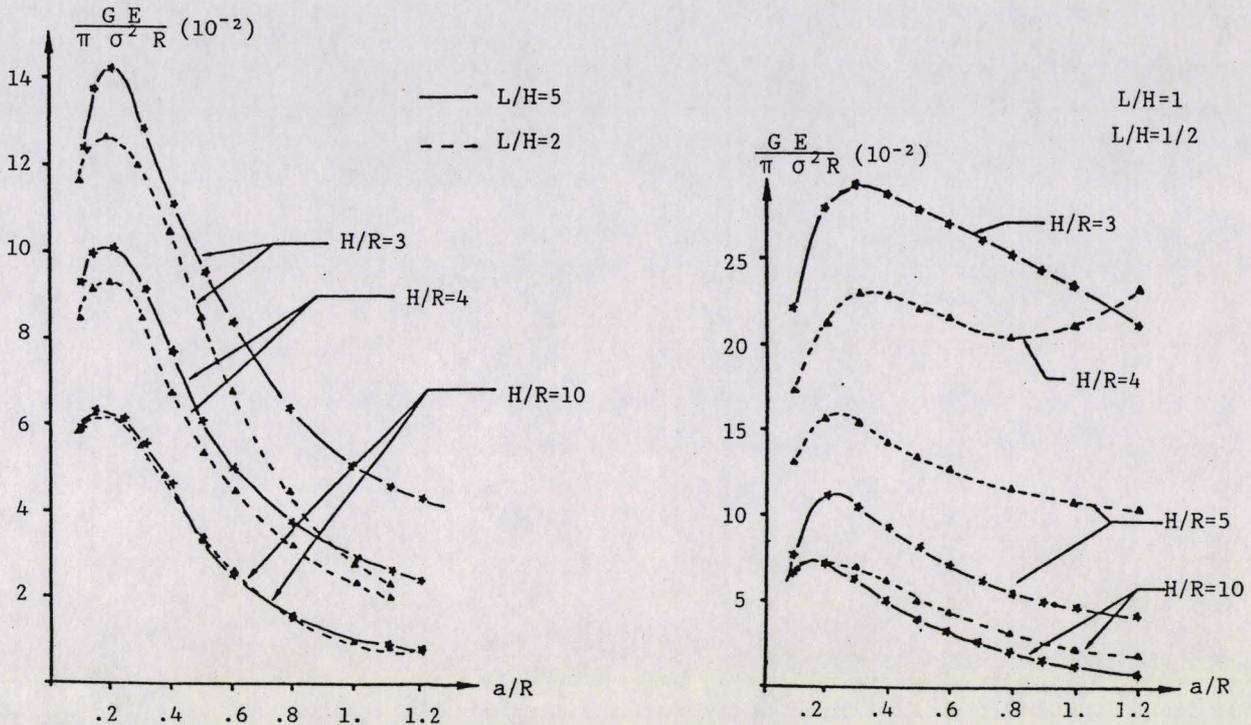


Figure 3.3 :
Influence de la taille de la plaque
sur l'énergie d'avancement de fissure G (16)

Le fait que les différentes courbes soient pratiquement identiques dans leur partie initiale signifie que la dimension n'a pas une grande influence sur les conditions de démarrage pour de courtes fissures. Par contre, pour des longueurs de fissures $a/R > 0,05$, nous constatons l'influence de la taille et la forme de la plaque sur les résultats.

III.1.3 Exploitation des courbes G

Les courbes de variation du paramètre $\frac{G E}{\sigma^2 \pi R}$ en fonction du rapport a/R établies par HENRY (15) nous ont permis la détermination de l'énergie à partir de la connaissance de la contrainte σ et la longueur de fissure a , (figure 3.4).

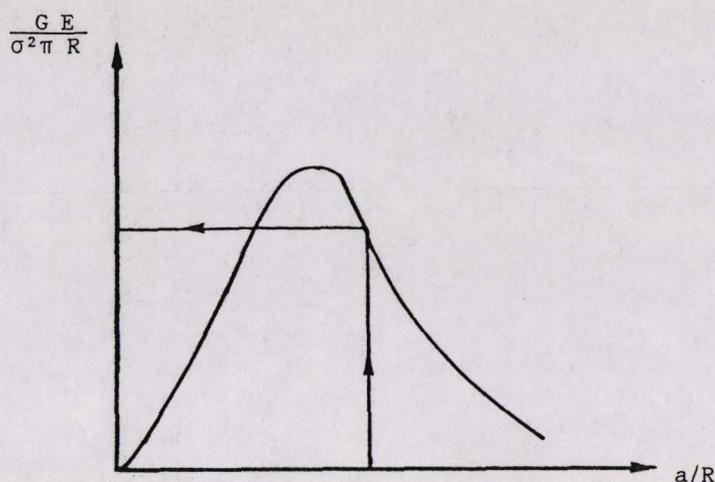


Figure 3.4 :

Courbe de l'énergie G en fonction de la contrainte σ et la longueur de fissure a

La contrainte σ est déterminée à l'aide d'une technique de dépouillement de la courbe contrainte $\sigma = f(\epsilon_i)$, tracée pour la jauge "i", dont la position parfaitement définie permet de connaître la longueur de fissure "a".

III.2 TECHNIQUE DE DETECTION DE LONGUEUR DE FISSURE :

L'étude de l'évolution de l'énergie G en fonction de la longueur de fissure propagée, nécessite la connaissance de la longueur de fissure à un instant donné. A cet effet, nous présentons les principales méthodes utilisées.

Méthode optique :

On place un cathétomètre d'axe de visée perpendiculaire à la plaque. La tête de fissure étant repérée, sa position en tout point est mesurée à l'aide d'une vis micrométrique.

Méthode optique et visualisation par vernis craquelant :

La surface de l'échantillon est recouverte d'un vernis craquelant qui a la propriété de se rompre pour un allongement relativement constant.

Méthode des jauges à fils cassants :

La jauge est composée de brins résistifs accouplés en parallèle, on la colle à l'enduit perpendiculairement à la fissure ; à mesure que celle-ci progresse, les brins successifs sont détruits.

Les méthodes citées ci-dessus sont inutilisables pour la détection des fissures dans le cas des roches car ces fissures sont très fines et peu ouvertes.

D'autres techniques tenant compte de la finesse des fissures ont été mises au point (15) (23) . La première technique par jauges d'extensométrie et la deuxième par dépôt de fils de carbone.

Technique par jauges d'extensométrie (15)

Cette méthode consiste à interpréter la réponse d'une jauge d'extensométrie placée perpendiculairement à la fissure. Un dépouillement des jauges en fonction de l'état de contrainte évoluant avec l'avancement de la fissure.

On suppose que la jauge est réduite en un seul fil. A l'approche de la fissure, l'état de contrainte est défini par (figure 3.5) :

$$\sigma_{xx} = K_1 / \sqrt{2\pi r}$$

$$\sigma_{yy} = (K_1 / \sqrt{2\pi r}) - \sigma$$

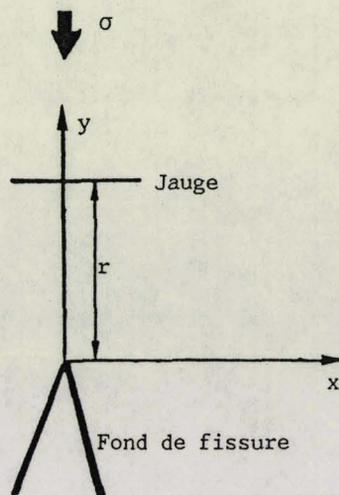


Figure 3.5

Description de l'état de contrainte

La réponse de la jauge sera :

$$E \varepsilon = (K_1 (1-\nu)/2 \pi R) \quad + \nu \sigma$$

où E : module d'Young

ν : coefficient de Poisson

K_1 : facteur d'intensité de contrainte

Si la fissure se propage, la jauge enregistre deux réponses : une déformation élastique linéaire de la matière due à la charge σ et une déformation non linéaire due à l'avancement de la fissure. En l'absence de la fissure, la réponse sera $E \varepsilon = \nu \sigma$, ($E \varepsilon / \nu \sigma = 1$), par contre le défaut de linéarité $E \varepsilon / \nu \sigma > 1$ dans le cas de présence de fissure.

Pour les roches calcaires ($K_{1c} = 1,01 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\nu = 0,3$), le défaut de linéarité est très important pour $r < 1 \text{ mm}$, et il est de l'ordre de 1,5 pour des distances supérieures à 1 mm du front de fissure pour des contraintes $\sigma > 30 \text{ MPa}$ (figure 3.6).

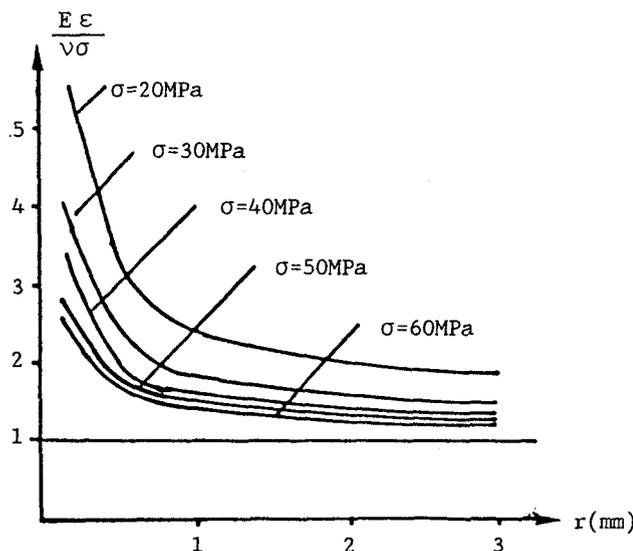


Figure 3.6 :

Variation du rapport $E \varepsilon / \nu \sigma$ en fonction de r (16)

Sur une courbe contrainte-déformation de jauge (figure 3.7), nous constatons une partie linéaire (OA) et une partie non linéaire (AB) représentant l'approche et le passage de la fissure au droit de la jauge. Au passage de la fissure sur le premier brin

de la jauge, la valeur moyenne du rapport $E \varepsilon / \nu \sigma = 1,5$ ou $\nu \sigma / E \varepsilon = 0,7$. Ceci nous permet de déterminer un point expérimental (B) représentant le point de passage de la fissure tel que la pente de la droite tracée $OB = 0,7$ fois la pente élastique.

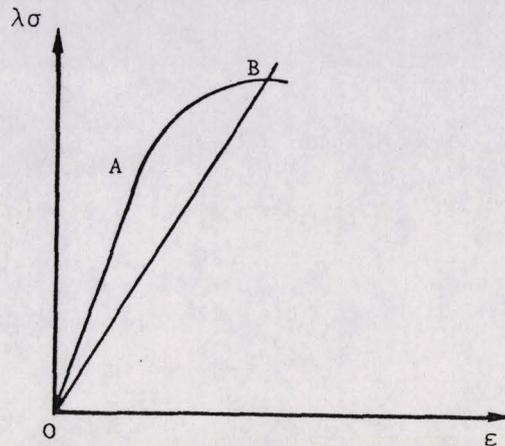


Figure 3.7 :
Détermination expérimentale du
point de passage de la fissure

Technique par vaporisation de fils de carbone (23)

Pour obtenir des fils, on réalise des fentes de 1 mm de largeur dans un cache posé sur l'éprouvette. La vaporisation est faite en plusieurs fois afin d'assurer au dépôt une résistance qui permette la mesure des grandeurs électriques. Pour mesurer l'intensité traversant chaque fil, on utilise une alimentation stabilisée à 30 volts qui nous permet d'avoir la résistance de chaque fil (de l'ordre 300 MΩ).

Le carbone vaporisé étant fragile, il casse au passage de la fissure ; de ce fait, l'intensité chute brusquement. Un enregistreur est relié au nanoampèremètre permettant d'avoir la courbe Intensité-temps pour chaque fil. Afin de suivre l'évolution de la fissure au cours de l'essai, il suffit de relier l'ensemble des fils vaporisés en parallèle et de noter les variations de l'intensité (figure 3.8).

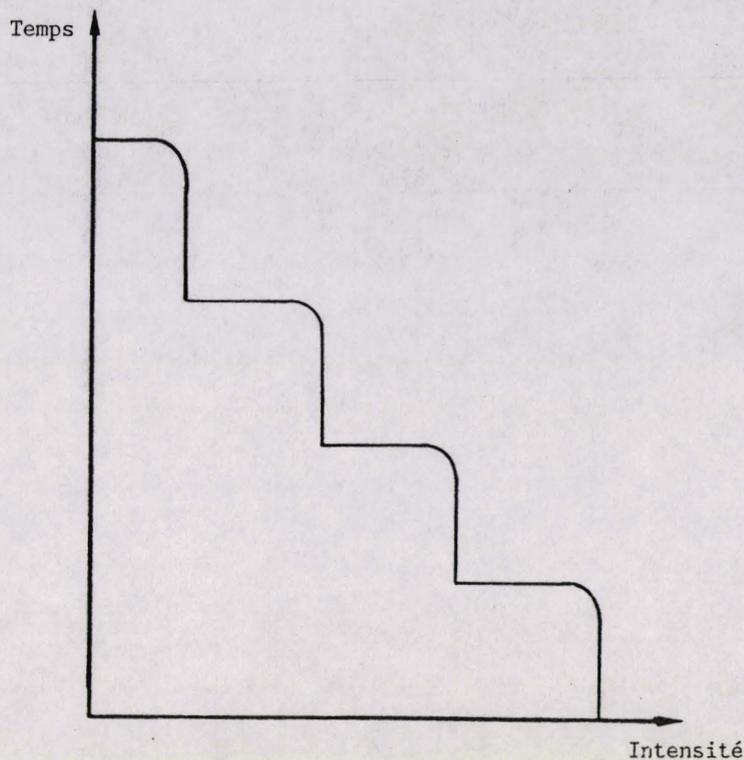


Figure 3.8 :

Allure de la courbe Intensité-temps (23)

III.3 ESSAI DE COMPRESSION

Les essais de compression à pression ambiante et sous pression ont été menés sur des plaques parallépipédiques percées d'un trou avec les dimensions suivantes (60 x 60 x 10). Ces dimensions ont été choisies pour les deux raisons suivantes :

- * Selon les conclusions de HENRY (15), la simulation d'une plaque rectangulaire infinie est obtenue dès que les dimensions de la plaque finie vérifient les deux conditions $L/H \leq 1$ et $H/R \geq 10$.
- * La cellule utilisée autorise une hauteur utile maximale de 80 mm pour l'échantillon muni de deux cales de répartition d'efforts placées en haut et en bas de ce dernier.

III.3.1 Préparation des échantillons

Les plaques utilisées ont été prédécoupées à la scie diamantée. Leur mise aux cotes est obtenue par polissage mécanique par lequel les parallélismes et perpendicularités nécessaires sont réalisés. Ensuite, l'échantillon est percé en son centre au moyen d'un carottier diamanté. Afin d'éviter l'éclatement en fin de carottage, la plaque est collée à l'aide de baume du Canada sur un support plan de même nature. Après réalisation du trou, la plaque est décollée de son support par chauffage. Le diamètre du trou est de 6 mm. Les cotes ont été relevées au pied à coulisse. Afin de détecter la propagation de la fissure, des jauges d'extensométrie sont collées sur l'échantillon perpendiculairement à l'axe de compression. Deux longueurs de jauges ont été utilisées (5 et 10 mm), les premières étant toujours placées les plus près du trou. Les jauges sont numérotées en fonction de leur position par rapport au centre (figure 3.9).

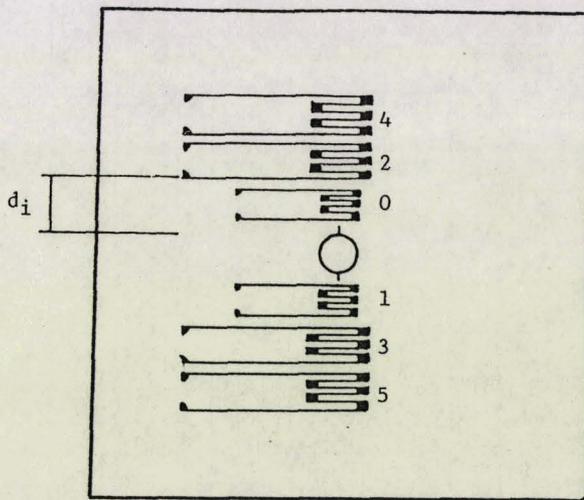


Figure 3.9 :
Disposition des jauges

Dans le cas de l'étude de l'influence de la pression, l'éprouvette est enrobée de silastène ainsi que ses embases d'appui afin d'avoir une bonne étanchéité. La procédure d'enrobage (figure 3.10) s'effectue en plusieurs étapes : (9)

Dégazage de silastène :

Le vide est établi à la fois dans la cloche à vide et dans la colonne de stockage du silastène jusqu'à l'arrêt total de l'ébullition dans le produit (pendant deux heures).

Remplissage du moule :

Après avoir cassé le vide dans la colonne, le moule est rempli sous vide d'une façon très lente par régulation du débit. A la fin de cette opération, le moule est étuvé à 100° C pendant une période de six heures.

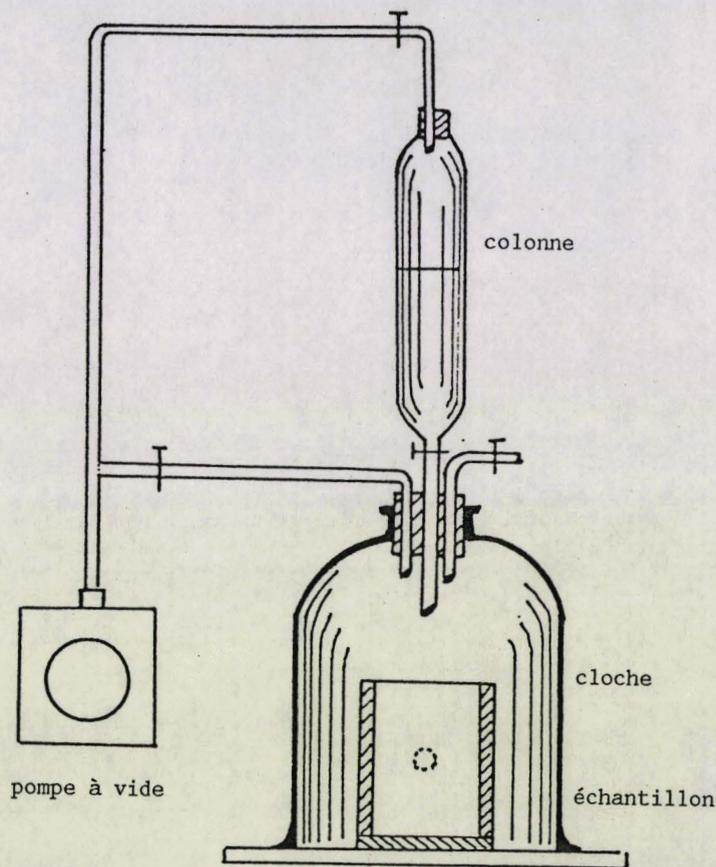


Figure 3.10 :
Schéma du montage utilisé

III.3.2 Description du dispositif expérimental

L'échantillon préparé est introduit dans une cellule munie d'un piston de mise en charge à tête sur rotule afin d'assurer un contact parfait entre l'échantillon et le piston.

Un passage de fils, étanché à l'araldite, permet d'assurer la liaison entre les jauges et l'enregistreur des déformations. La mise sous pression est effectuée par une pompe Gilson (figure 3.11). Les essais sont réalisés sur presse Instron modèle 8033, pilotée par un microprocesseur. Une rampe d'asservissement en position est programmée avec une faible vitesse ($v = 0,15 \mu\text{m/s}$). La force est enregistrée par lecture directe sur la console de pilotage et les déformations de jauges sont enregistrées à l'aide d'une chaîne de mesure automatique (Vishay 4000).

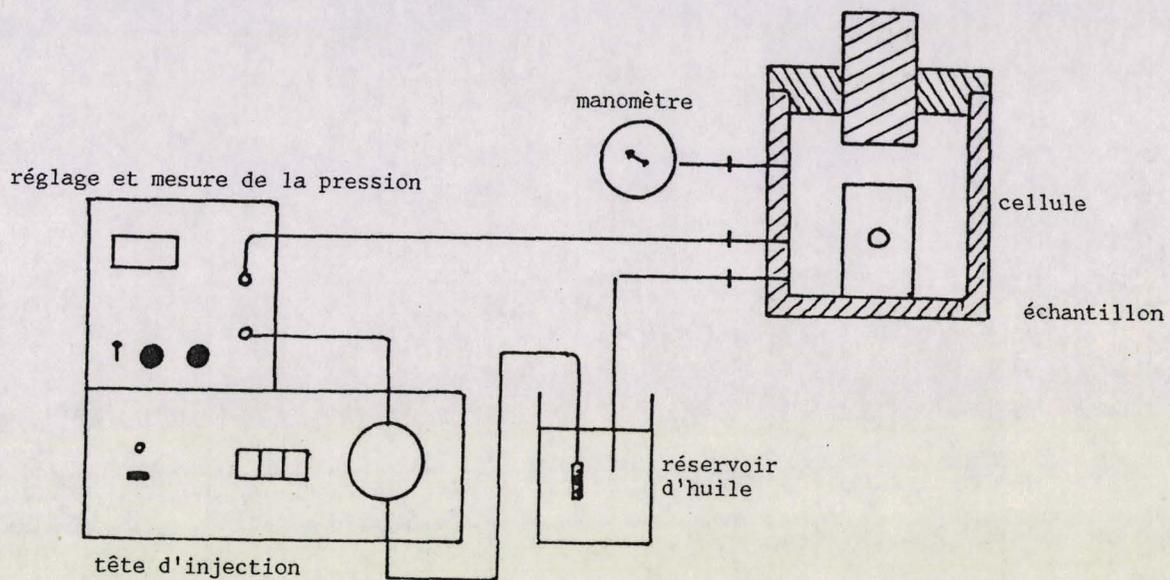
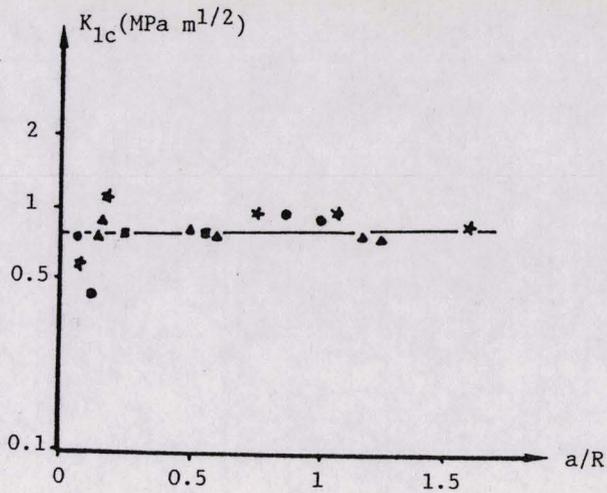


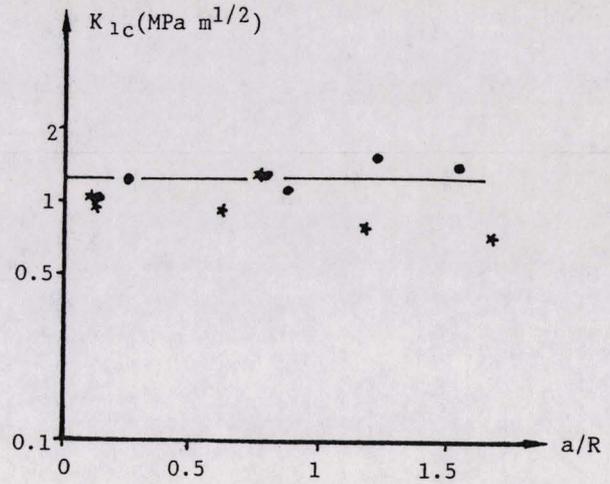
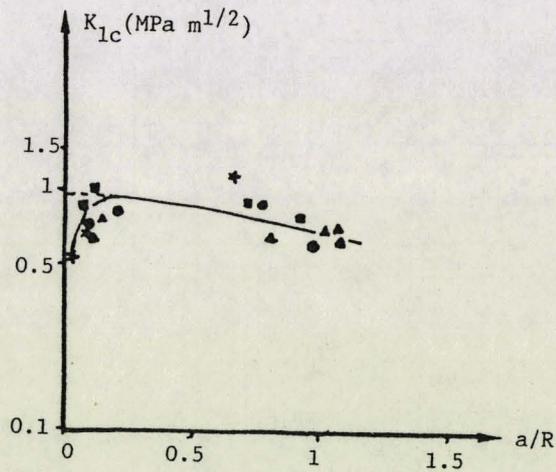
Figure 3.11 :
Schéma de montage de pression

III.3.3 Résultats des essais de compression à pression ambiante

L'exploitation des courbes contrainte-déformation des jauges selon la méthode proposée par J.Y. HENRY (15), décrite dans le paragraphe (III.2), nous a permis d'étudier l'évolution du K_{1c} en fonction de la longueur de fissure. Les résultats du facteur d'intensité de contrainte K_{1c} des deux roches étudiées en fonction de la longueur de fissure propagée sont portés par les figures (3.12 a, b, c).



a) Marbre //

b) Marbre \perp 

c) Micrite

Figure 3.12 :

Relation du K_{1c} en fonction de la longueur de fissure a/R

a) Marbre //

b) Marbre \perp

c) Micrite

Nous remarquons que ces courbes peuvent se décomposer en deux parties : une partie ascendante pour des valeurs de a/R inférieures ou égales à 0,2 et une partie légèrement descendante comme dans le cas de la micrite ou constante pour le marbre.

La première partie doit être discutée et contestée pour deux raisons :

- 1°) Dans ce type d'essai, l'énergie d'avancement de fissure G représentée schématiquement par la figure 3.13, nous montre l'instabilité de la propagation pour des valeurs a/R inférieures à 0,2. Ceci nous conduit à un mauvais dépouillement dans cette partie.

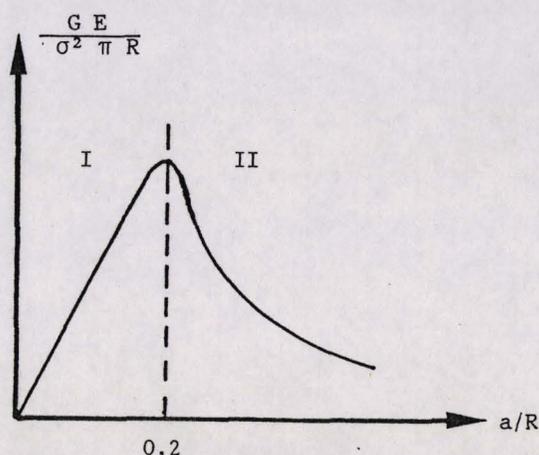


Figure 3.13 :

Représentation schématique de la courbe G
en fonction de la longueur de fissure "a".

- 2°) La mesure de longueur de fissure proposée par la technique des jauges d'extensométrie n'est pas appropriée pour des faibles longueurs de fissure. Dans ce cas, il est nécessaire de tenir compte de l'effet de concentration de contrainte dû au trou ce qui devient délicat.

Par contre, la deuxième partie traduit correctement l'évolution de la ténacité en fonction de la longueur de fissure propagée. On note que, dans le cas de la micrite, le facteur d'intensité de contrainte diminue lors de la propagation de la fissure, reste sensiblement constant pour le marbre perpendiculaire et augmente légèrement pour le marbre parallèle.

La condition de démarrage des fissures au bord du trou ont été déterminées en prolongeant la droite de la deuxième partie jusqu'à l'origine ($a/R = 0$). Les valeurs moyennes du facteur d'intensité de contrainte K_{1c} des deux roches étudiées, déduites de cette manière, sont portées dans le tableau (3.1).

	Micrite	Marbre \perp	Marbre //
K_{1c} (MPa \sqrt{m})	0,91	1,10	0,70

Tableau 3.1 :

Facteur d'intensité de contrainte des deux roches étudiées

III.3.4 Résultats des essais de compression sous pression

Des essais de compression sous pression de confinement ont été menés sur la micrite jusqu'à 20 MPa et sur le marbre jusqu'à 10 MPa. Un exemple type de courbes contrainte-déformation des jauges obtenues est donné par la figure 3.14.

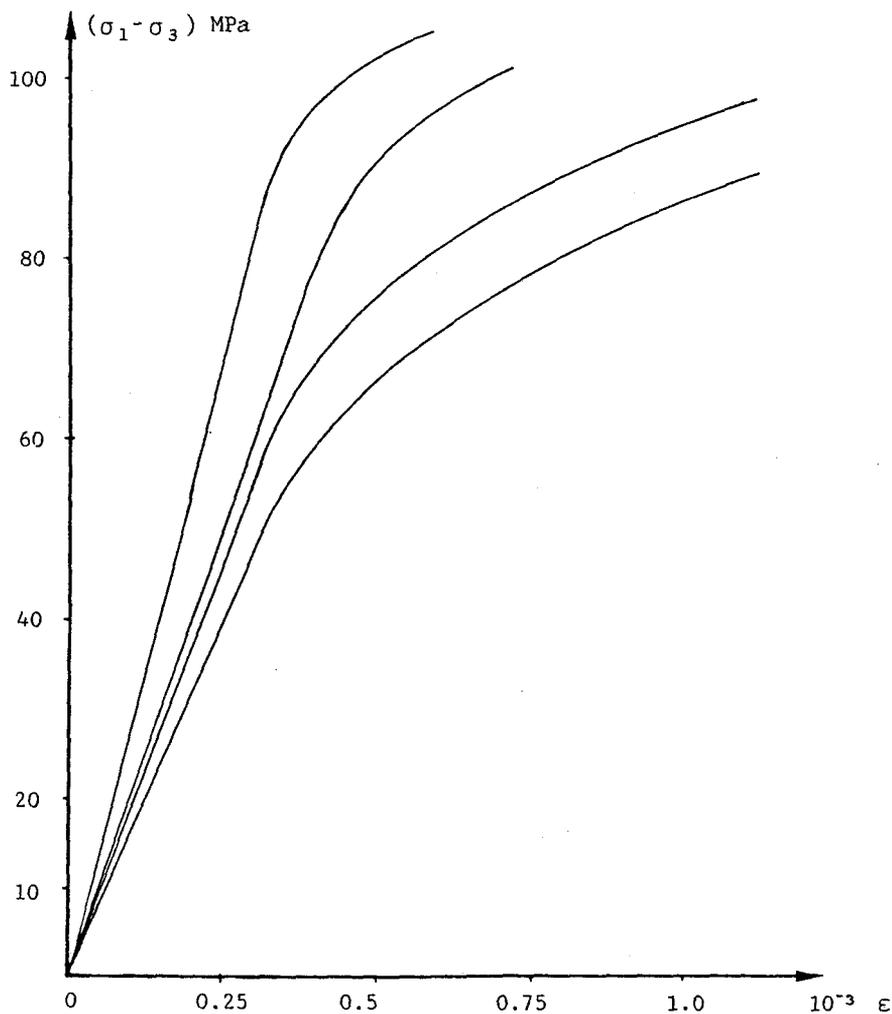


Figure 3.14 :

Exemple de courbes contrainte-déformation des jauges.

Etant donné que les conditions aux limites en tête de fissure sont inconnues. Autrement dit, est-ce que la fissure propagée est soumise à la pression ou non ? Pour cette raison, nous allons dépouiller ces essais en tenant compte des deux éventualités possibles suivantes :

- La fissure propagée est effectivement soumise à la pression. Dans ce cas, l'énergie G_c est déterminée à partir des courbes G en fonction de la longueur de fissure propagée.
- L'ouverture de la fissure dans ce type d'essai est très fine. Cela ne permet pas au silastène de rentrer dans la fissure propagée, et par conséquent, cette dernière n'est pas soumise à la pression. Dans ce cas, l'énergie G_c est calculée directement par la méthode de discontinuités de déplacement.

Les résultats pour les deux roches sont présentés par les figures 3.15, 3.16 pour des pressions n'excédant pas 15 MPa.

N.B. : ● K_{1c} d'une fissure soumise à la pression

○ K_{1c} d'une fissure non soumise à la pression

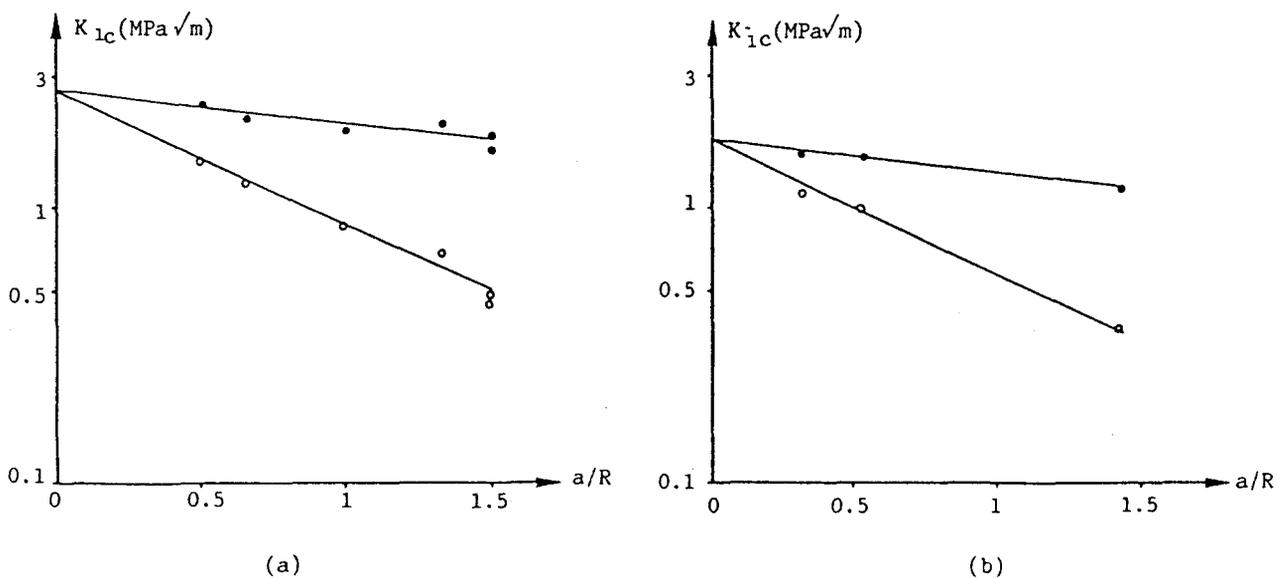


Figure 3.15 :

Résultats du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la pression (Marbre)

a) $P = 10$ MPa

b) $P = 5$ MPa

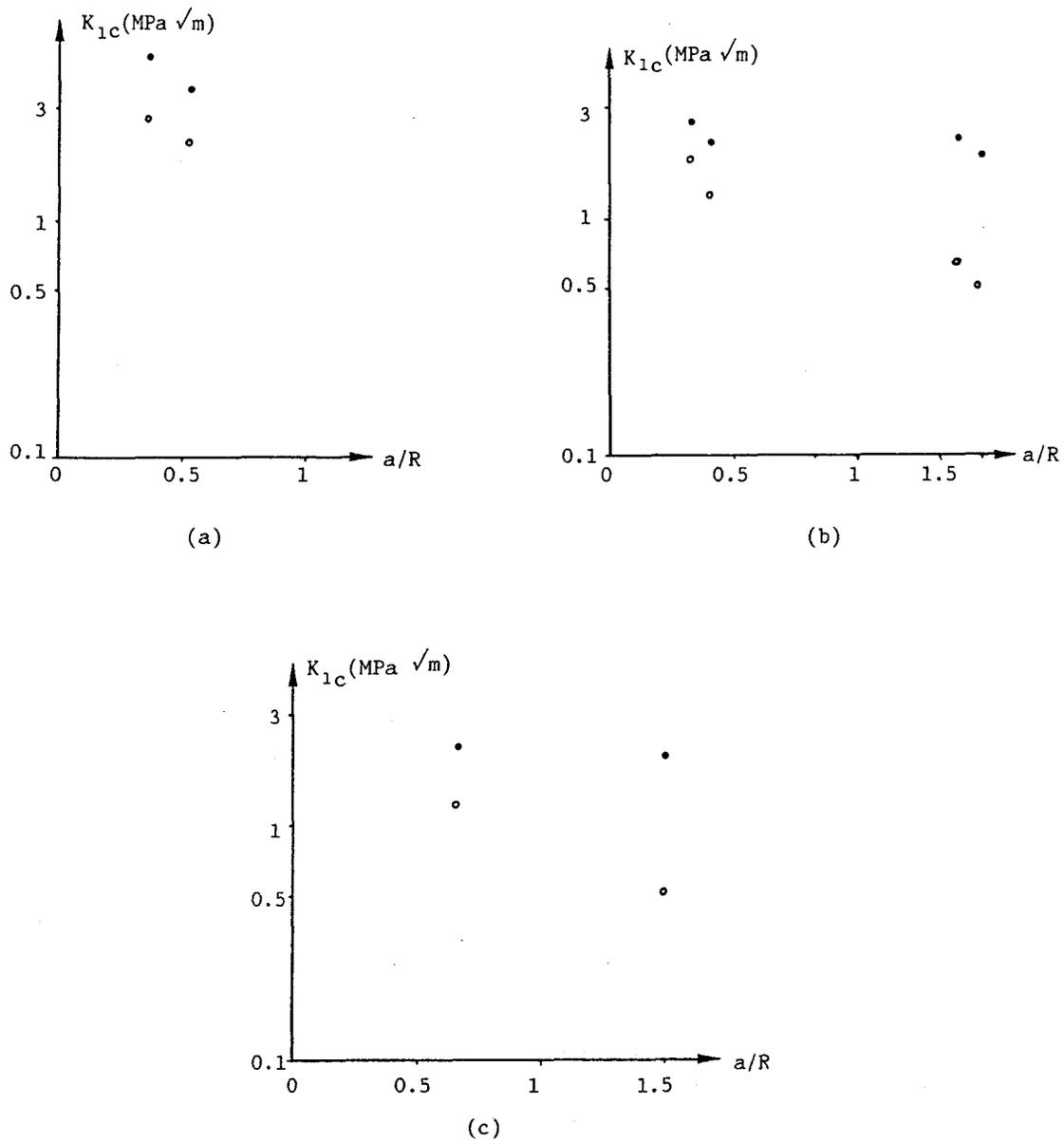


Figure 3.16 :

Résultats du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la pression (Micrite)

a) $P = 20 \text{ MPa}$

b) $P = 15 \text{ MPa}$

c) $P = 10 \text{ MPa}$

III.4 DISCUSSION

A partir des essais de compression de plaques effectuées à pression ambiante, nous remarquons :

D'une part, une faible variation du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la longueur de fissure propagée (figure 3.12 a, b, c) qui peut être considérée comme négligeable. Ceci nous permet de conclure que les conditions de propagation sont indépendantes de la longueur de fissure propagée, et d'autre part, les valeurs de K_{1c}

obtenues par l'essai de compression sont légèrement supérieures à celles trouvées précédemment par l'essai de flexion trois points (tableau 3.5). Par ailleurs, nous notons qu'elles sont proches des valeurs de K_{1c} déterminées par essais de flexion trois points avec des vitesses de chargement 10^3 fois plus élevées (14).

		Micrite	Marbre \perp	Marbre //
K_{1c} (MPa \sqrt{m})	Essai de compression de plaques percées d'un trou	0,91	1,10	0,70
	Flexion trois points	0,69	0,66	0,57

Tableau 3.5 :

Comparaison des résultats du K_{1c} déterminés par les deux types d'essais.

Il semble donc que la nature de l'essai influence légèrement les résultats surtout lorsque l'état de microfissuration naturelle est plus important. L'explication peut être donnée par l'influence des champs de contrainte au voisinage de la fissure. Dans l'essai de compression de plaque percée d'un trou, l'état de compression induit la fermeture des fissures perpendiculaires ou quasi perpendiculaires à l'axe des charges.

En conséquence, l'interaction entre fissure principale et microfissures naturelles est faible, nettement plus faible que dans le cas de l'essai de flexion trois points où l'état de traction est important. Il est donc logique de trouver un K_{1c} plus important par l'essai de compression de plaque que par l'essai de flexion trois points. Dans le cas de la micrite où la fissuration naturelle est quasi inexistante, les valeurs de K_{1c} sont très voisines.

En ce qui concerne l'étude de l'influence de la pression, le nombre d'essais réalisés est insuffisant. De plus, la méconnaissance des conditions aux limites en tête de fissure ne nous permettent pas de se prononcer sur ce point. Néanmoins, on peut avancer les remarques suivantes : d'après les courbes donnant K_{1c} en fonction

de la longueur de fissure propagée selon les deux configurations (fissure soumise à la pression et non soumise), nous constatons que les valeurs du facteur d'intensité de contrainte augmentent en fonction de la pression pour les deux cas, et que le K_{Ic} diminue légèrement en fonction de la longueur de fissure propagée dans le cas où la fissure est soumise à la pression. La vraie courbe présentant l'évolution du K_{Ic} en fonction de la longueur de fissure devrait être située entre les deux courbes tracées.

Pour résoudre le problème des conditions aux limites en tête de fissure, nous proposons de remplir l'entaille avec un produit tel que la pâte à modeler qui permet de suivre la propagation de la fissure et de mieux connaître les conditions en tête de fissure.

Nous avons dû abandonner l'essai de compression de plaque percée d'un trou, bien qu'il soit plus simple à mettre en oeuvre, car dans le cas du marbre, la fissure de traction n'apparaissait plus pour des pressions de confinement supérieures à 10 MPa. Dans le quatrième chapitre, nous étudierons l'influence de la pression à travers des essais de flexion trois points.

Après avoir déterminé, dans le deuxième chapitre, les paramètres de résistance à la propagation de fissures des deux roches étudiées (l'énergie d'initiation γ_i , l'énergie de fracturation γ_F et le facteur d'intensité de contrainte K_{1c}). Nous allons étudier dans le présent chapitre, l'influence de la pression de confinement sur ces trois paramètres par les mêmes essais de flexion trois points.

A la différence des essais menés précédemment à pression ambiante, et pour des raisons de sécurité, l'asservissement en position est retenu dans un premier temps à la place de l'asservissement en ouverture. Deux à quatre essais par pression ont été réalisés sur chaque roche testée jusqu'à la rupture donnant la courbe charge-flèche complète.

4.1 ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS SOUS PRESSION

Les dimensions des éprouvettes utilisées ainsi que leur préparation sont les mêmes que celles décrites au paragraphe 2.1.1.

L'échantillon est maintenant complètement enrobé de silastène avec ses trois appuis afin d'assurer une bonne étanchéité (figure 4.1).

La procédure d'enrobage est décrite dans le paragraphe (3.3.1).

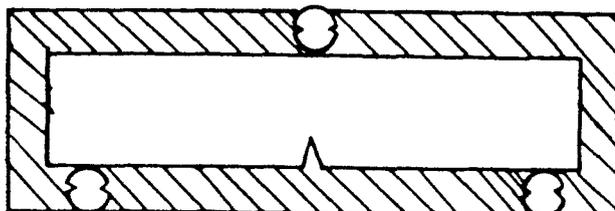


Figure 4.1 :
Echantillon enrobé de silastène

4.1.1 DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le montage des essais sous pression ressemble à celui des essais de flexion trois points effectués à pression ambiante.

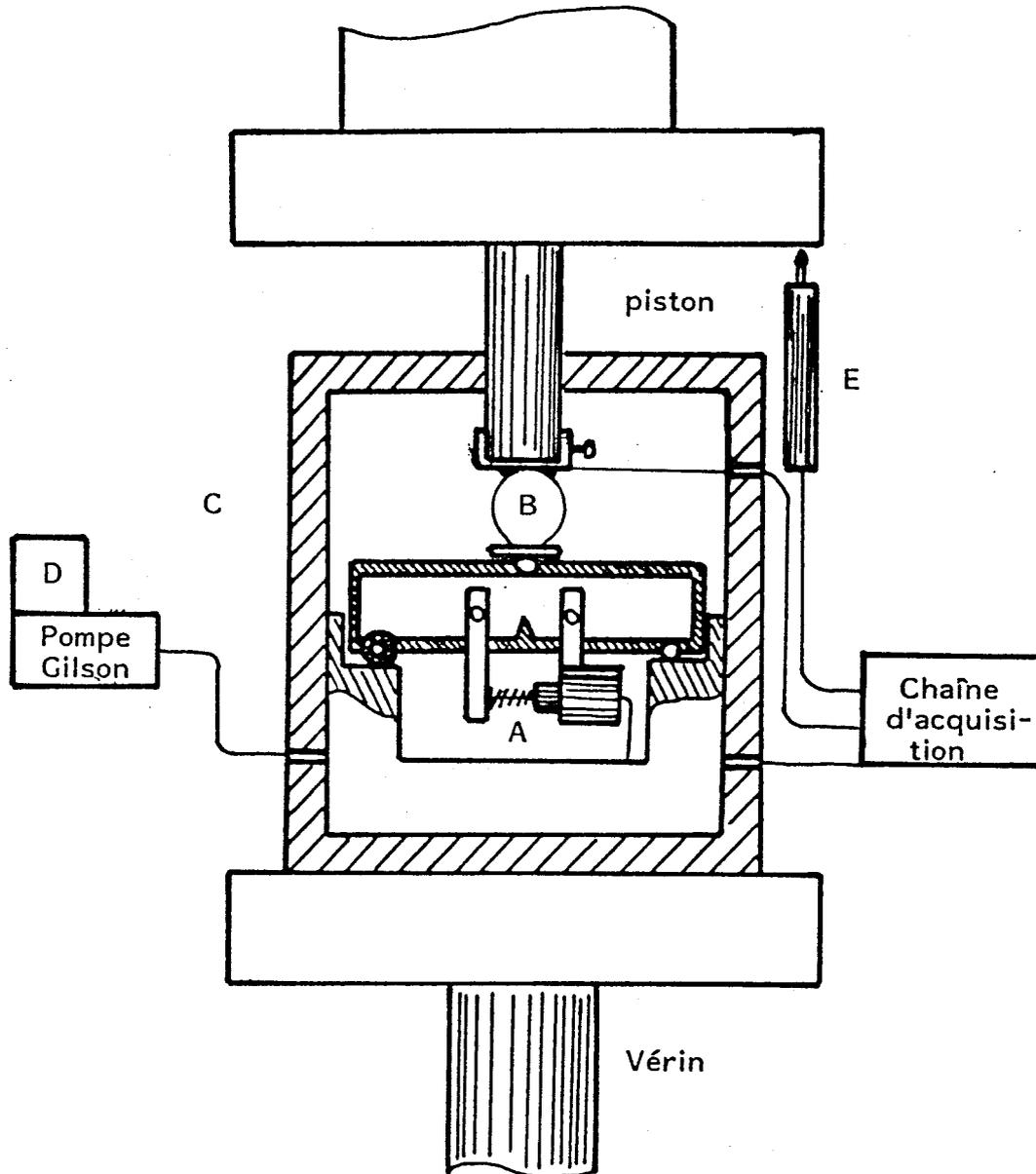


Figure 4.2 :
Montage expérimental des essais de flexion trois points
sous pression

L'échantillon gainé est muni des roulements à bille placés sur l'un de ses appuis afin d'éviter le problème de frottement. Un capteur de déplacement horizontal (A) du type LVDT (100 MHR 2060) adapté aux essais sous pression, de course 2,5 mm, est fixé à distance égale de l'entaille au moyen des câbles collés sur l'éprouvette et noyées dans le silastène. Ce capteur permet de mesurer l'ouverture de la fissure au cours de l'essai. L'échantillon est ensuite introduit dans la cellule triaxiale (C) de 100 MPa, conçue dans notre Laboratoire. Un capteur dynamométrique à anneau (B) avec mesure par jauges d'extensométrie (pont complet) permet de déterminer avec une bonne précision la force transmise directement à l'échantillon, car l'anneau est placé dans la cellule.

Les essais sont réalisés sur une machine Instron du type 8033 de 50 tonnes asservie par microprocesseur. La vitesse d'essai est fixée à 0,15 $\mu\text{m/s}$. La mise sous pression et la régulation sont assurées par une pompe Gilson (D). Un autre capteur LVDT (E) est placé entre les deux plateaux de la machine afin de mesurer le déplacement vertical.

Le capteur dynamométrique (B) ainsi que les deux capteurs LVDT (A) et (E) sont reliés à la chaîne d'acquisition Vishay 4000 par un passage de courant étanche.

4.1.2 DESCRIPTION DES COURBES OBTENUES SUR LES DEUX ROCHES

Les figures (4.3, 4.4, 4.5) donnent les courbes charge-flèche typiques des essais de flexion trois points effectués sous pression sur les deux roches étudiées.

On constate d'une façon générale que la charge maximale des courbes charge-flèche augmente nettement en fonction de la pression (12 fois plus grande à 60 MPa).

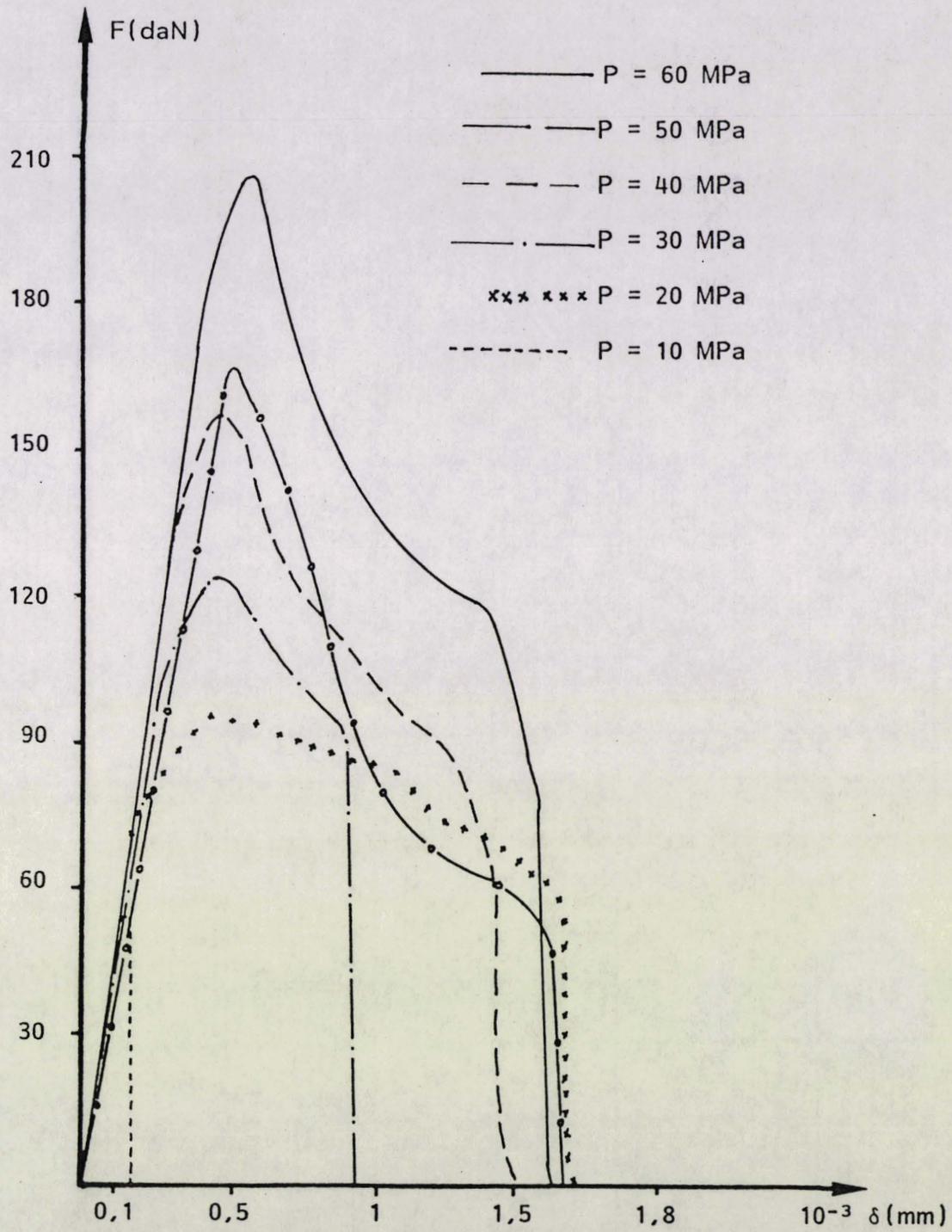


Figure 4.3 :

Courbes charge-flèche pour différentes pressions (micrite)

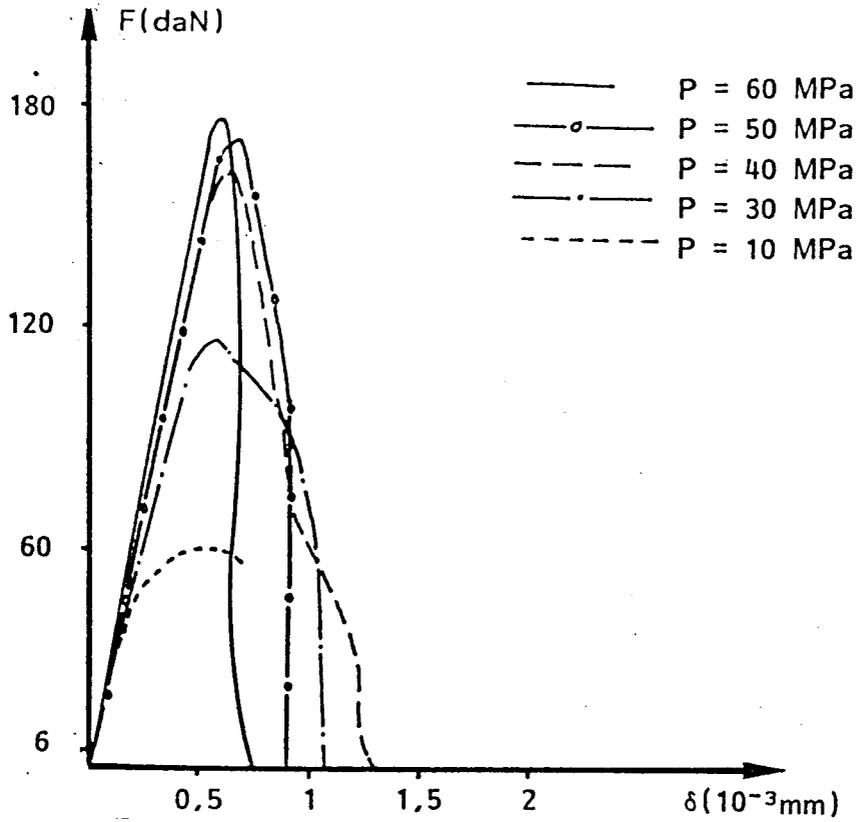


Figure 4.4:
 Courbes charge flèche pour différentes pressions (marbre //)

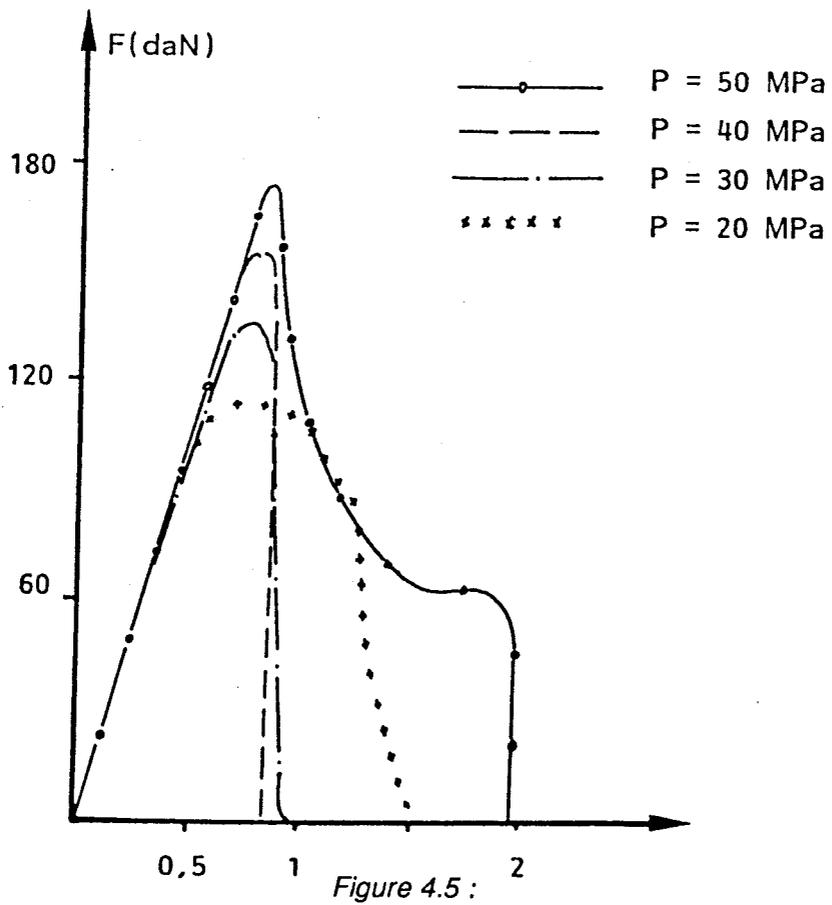


Figure 4.5 :
 Courbes charge flèche pour différentes pressions (Marbre \perp)

a) Micrite (figure 4.3) :

Pour des basses pressions (0 à 10 MPa), on note une linéarité totale des pentes de chargement jusqu'au sommet de la courbe, semblable aux essais effectués à pression ambiante, suivie d'une chute de force brutale après le pic. Ceci nous permet de conclure que le comportement de la micrite est toujours fragile à 10 MPa et que le silastène n'affecte pas les résultats.

Pour des pressions supérieures à 20 MPa, on enregistre d'une part, une perte de linéarité (à 80 % du pic à 30 MPa) qui croît ensuite progressivement pour atteindre 92 % à 60 MPa, et d'autre part, une chute de force après le pic avec une pente décroissante en fonction de la pression suivie d'une chute brutale.

b) Marbre (figure 4.4, 4.5)

On remarque une perte de linéarité aux environs de 85 % pour des pressions inférieures à 30 MPa. Cette linéarité croît pour atteindre les 96 % de la charge maximale à 60 MPa. Par ailleurs, on note la fragilité du marbre dans les deux orientations au-delà de 30 MPa.

4.2 DETERMINATION DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX (γ_F , γ_i et K_{1c}) EN FONCTION DE LA PRESSION.

Les valeurs de γ_i , γ_F et K_{1c} sont déterminées par les méthodes décrites dans le paragraphe (1.2.2).

4.2.1 ETUDE DE γ_i ET DE γ_F EN FONCTION DE LA PRESSION

Deux à trois essais ont été réalisés par pression, ce qui nous semble insuffisant à cause de la dispersion des résultats. Néanmoins, on peut constater les résultats remarquables présentés par les figures 4.6, 4.7, 4.8. Ces figures traduisent l'évolution des énergies de départ γ_i et de fracture γ_F en fonction de la pression pour la micrite et le marbre dans les deux orientations.

a) Micrite figure 4.6 :

Nous remarquons :

- Pour une pression inférieure ou égale à 10 MPa, γ_i et γ_F croissent très rapidement avec la pression de confinement ($\gamma_F/\gamma_i = 4$, $\gamma_F - \gamma_i = 9 \text{ J.m}^{-2}$ à $P = 0$, $\gamma_F/\gamma_i = 10$, $\gamma_F - \gamma_i = 400 \text{ J.m}^{-2}$ à $P = 10 \text{ MPa}$) avec une augmentation plus rapide du γ_F que γ_i .
- Entre 10 et 20 MPa, γ_F continue à augmenter plus rapidement que γ_i ($\gamma_F/\gamma_i = 25$ à $P = 20 \text{ MPa}$).
- A partir de 20 MPa, les deux paramètres continuent à augmenter avec une pente quasi identique ($\gamma_F/\gamma_i = 15$ de 20 à 60 MPa).

b) Marbre figure (4.7, 4.8) :

Nous notons :

- Pour une pression inférieure ou égale à 10 MPa, γ_i et γ_F croissent très rapidement avec la pression de confinement,
- Entre 10 et 20 MPa, γ_F augmente moins rapidement que le γ_i
- Au-delà de 20 MPa, γ_F augmente moins rapidement que γ_i qui continue à croître plus lentement pour se rapprocher de γ_F .

Ces remarques sont valables pour les deux orientations. Les résultats sont semblables.

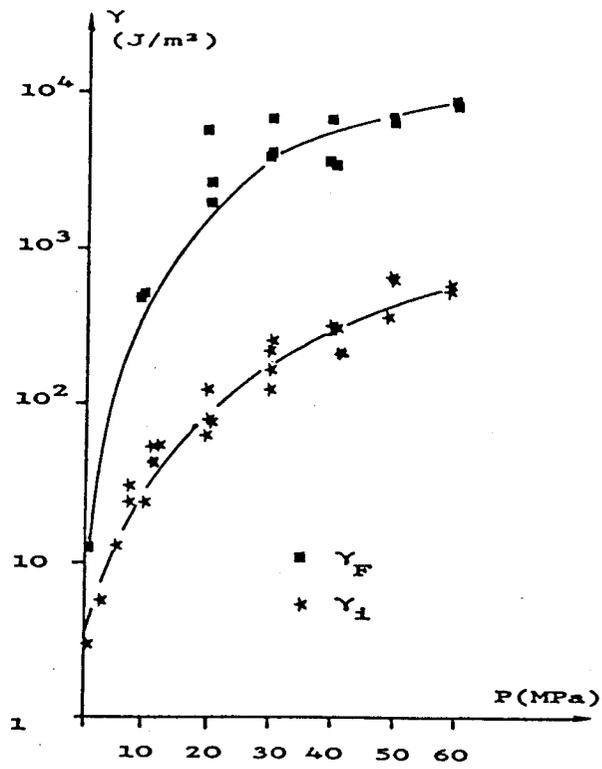


Figure 4.6 :

Les énergies γ_i et γ_F en fonction de la pression (micrite)

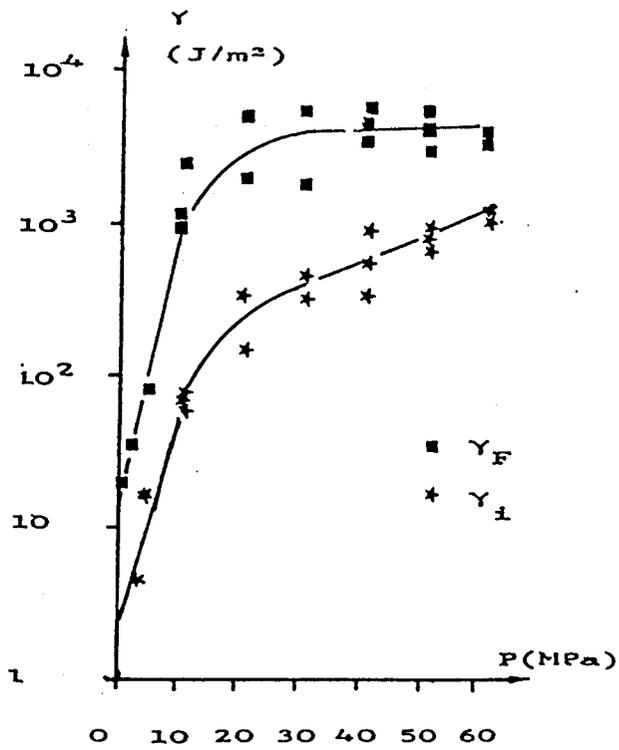


Figure 4.7 :

γ_i et γ_F en fonction de la pression marbre //

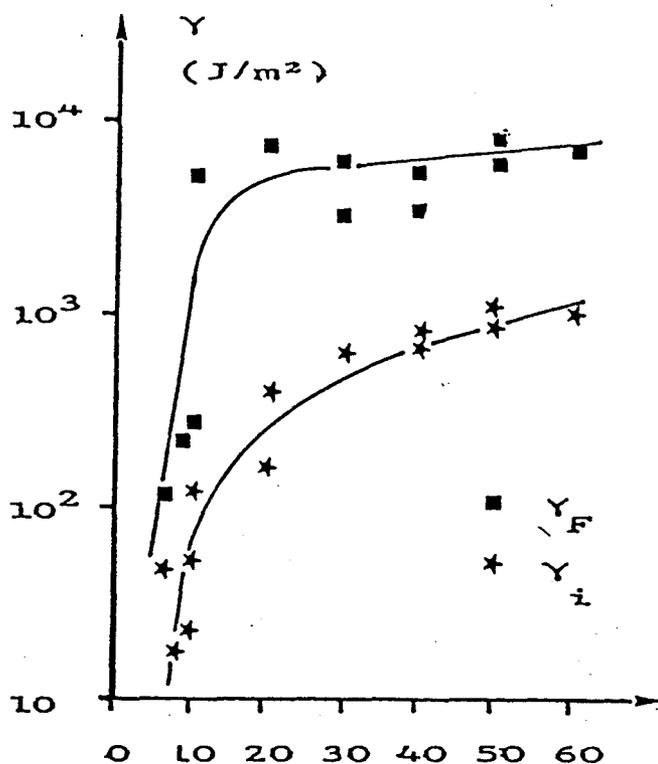


Figure 4.8 :

γ_i et γ_F en fonction de la pression marbre

Remarque

L'échelle logarithmique a été utilisée à cause de la dispersion des résultats enregistrée surtout dans le cas du marbre. Cela est dû, d'une part, à une insuffisance d'essais, et d'autre part, à la méthode du calcul du γ_i : Ce paramètre est proportionnel au carré du facteur d'intensité de contrainte K_{1c} ($\gamma_{ic} = \alpha K_{1c}^2$).

Micrite :

On constate une différence entre γ_i et γ_F à 10 MPa ($\gamma_F - \gamma_i = 400 \text{ J m}^{-2}$, $\gamma_F/\gamma_i=10$) alors que le comportement de la micrite est fragile à cette pression (figure 4.3). Ceci peut être expliqué par les deux raisons suivantes :

- L'utilisation d'un asservissement en position qui ne permet pas de suivre la propagation de la fissure. Ce contrôle peut être obtenu avec un asservissement sur l'ouverture (chapitre II). Ceci n'étant pas réalisé dans l'immédiat à cause de sa délicatesse ;

- Une sous-estimation de l'aire fracturée car la fissure se propage d'une façon intergranulaire.

La croissance des deux paramètres γ_i et γ_F à 20 MPa et la perte de linéarité (figures 4.6, 4.3) pourraient être interprétées par une zone endommagée en tête de fissure qui s'agrandit en fonction de la pression.

Marbre :

Au-delà de 30 MPa, on note une stabilité du γ_F et une continuité de croissance de γ_i pour les deux orientations.

4.2.2 ETUDE DU K_{1c} ET COMPARAISON AVEC LES ETUDES ANTERIEURES :

Micrite :

La figure 4.9 présente les résultats du facteur d'intensité de contraintes K_{1c} en fonction de la pression.

Nous notons une relation linéaire entre le facteur d'intensité de contraintes et la pression engendrée par l'équation du 1er degré

$$K_{1c} = 0,145 P + 0,75$$

en utilisant les unités suivantes : K_{1c} en MPa \sqrt{m} et P en MPa.

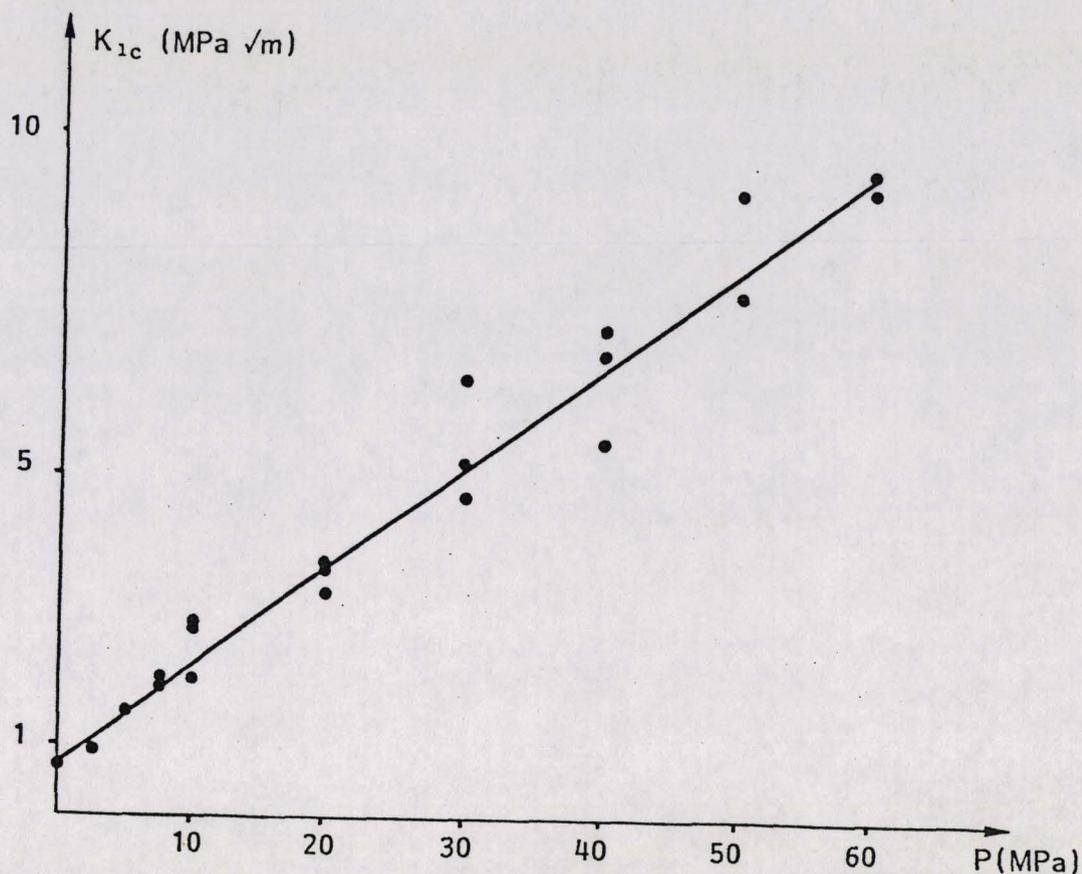


Figure 4.9 :
 Résultats du facteur d'intensité de contraintes
 en fonction de la pression (micrite)

Afin d'étudier l'influence du silastène sur le comportement des éprouvettes, un essai de flexion trois points a été conduit sur une éprouvette de silastène à différentes pressions, la force enregistrée lors de cet essai est négligeable (inférieure à 1 daN). Par ailleurs, deux éprouvettes gainées ont été testées en flexion trois points à pression ambiante, les résultats obtenus sont quasi identiques aux résultats trouvés précédemment (Essai de flexion trois points à sec Chapitre II). Ceci prouve d'une manière claire que le silastène n'affecte pas les résultats. La figure 4.10 porte les résultats du K_{1c} en fonction de la pression des trois roches micritiques (micrite, calcaire Indiana limestone (28) et le calcaire Comblanchien (3)).

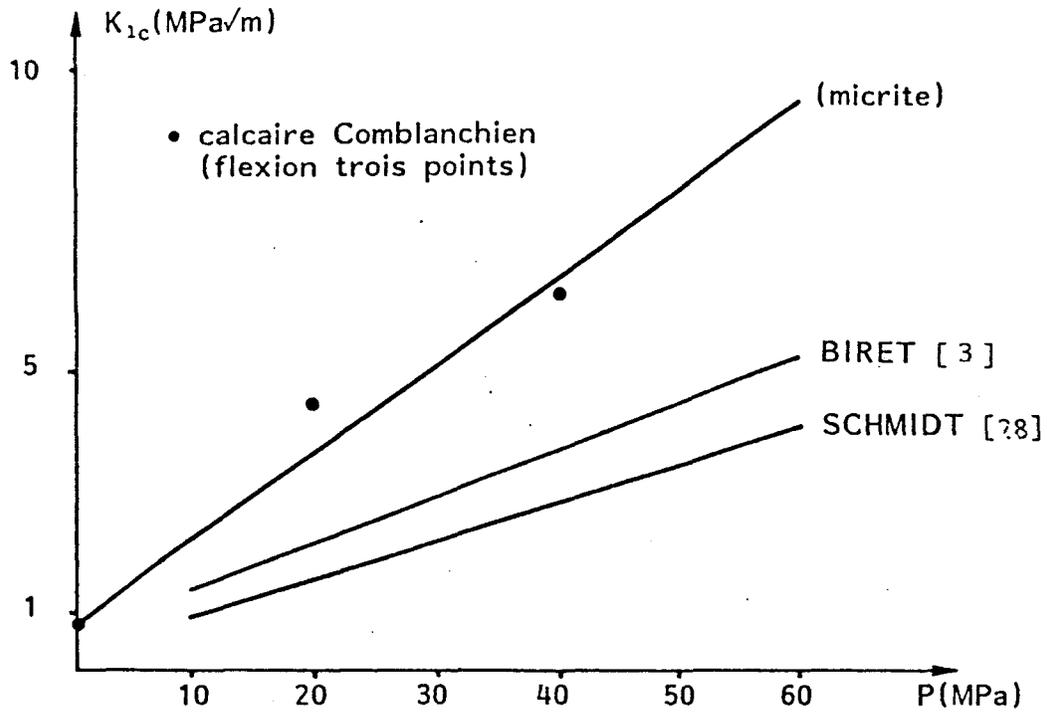


Figure 4.10 :

Comparaison du K_{1c} en fonction de la pression des trois roches micritiques

Marbre : Les figures 4.11, 4.12 portent respectivement les résultats du facteur d'intensité de contraintes K_{1c} en fonction de la pression du marbre dans les deux orientations ($//$, \perp à l'entaille).

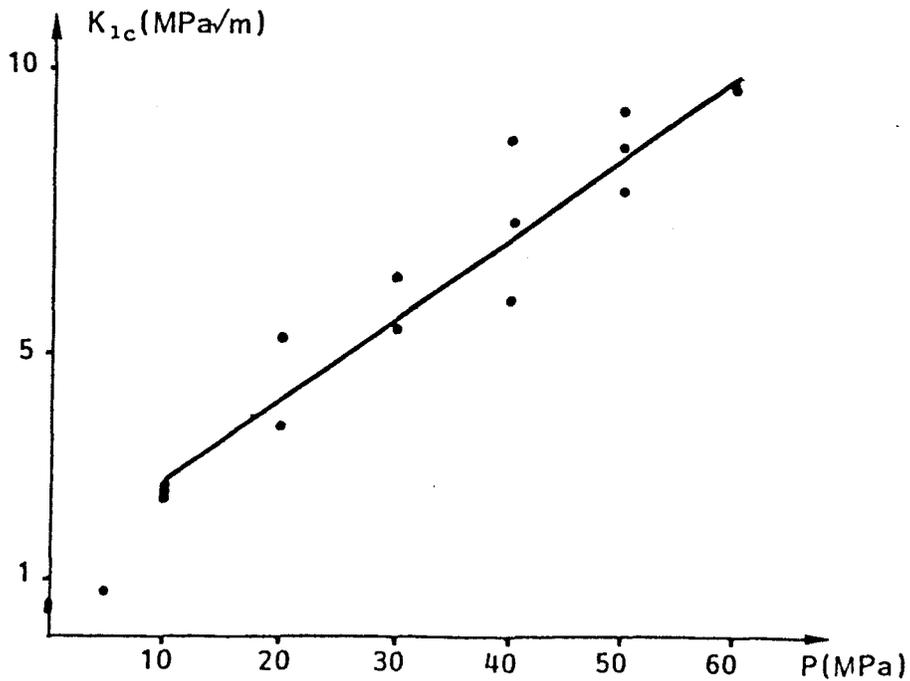


Figure 4.11 :

Résultats du K_{1c} en fonction de la pression (Marbre $//$)

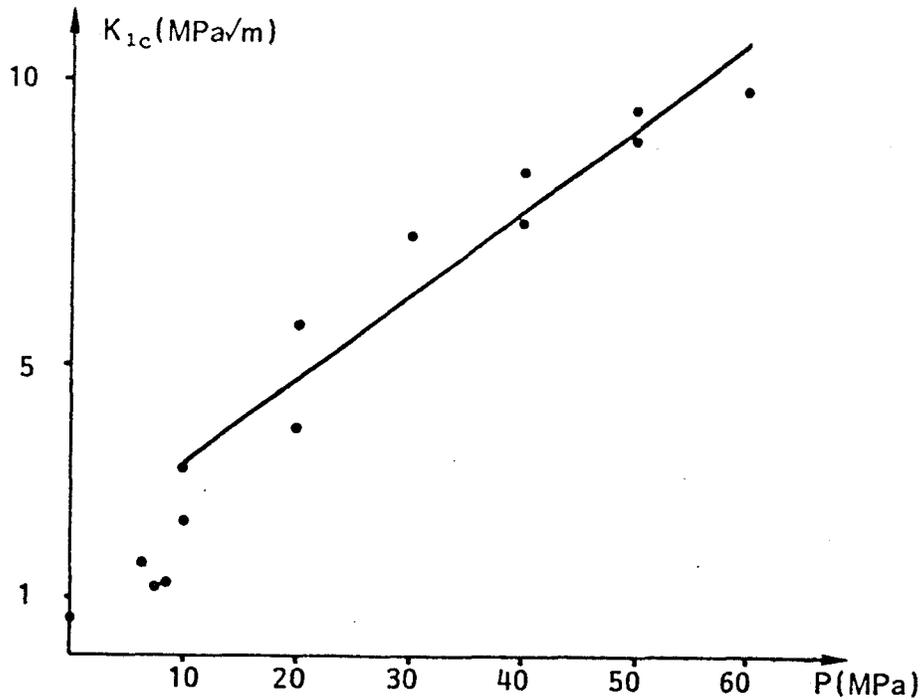


Figure 4.12 :

Résultats du K_{1c} en fonction de la pression

Marbre

On note la même évolution linéaire à partir de 10 MPa pour les deux orientations avec des pentes très voisines de l'ordre de $(14,5 \pm 0,6)\%$. Nous remarquons le même genre de courbes. Bien que les résultats sont insuffisants, nous pouvons constater un point commun avec ceux de TERRIEN (32) : on retrouve la même évolution des courbes $K_{1c} = f(P)$. Les pentes des courbes $K_{1c} = f(P)$ du marbre sont nettement supérieures à celles du grès (de l'ordre 7,6 %).

4.2.3 DISCUSSION

a) micrite

Il est important de noter la même évolution du paramètre K_{1c} en fonction de la pression pour les trois roches micritiques (figure 4.10), en notant que les valeurs de K_{1c} obtenues sur la micrite sont nettement supérieures à celles du calcaire Comblanchien (3) et du calcaire d'Indiana (28). La porosité de ces trois roches ne semble pas intervenir comme un paramètre principal dans l'interprétation de la

différence des pentes des courbes des trois roches (figure 4.10) ; la micrite a une porosité totale de 2,2 % et une porosité ouverte nulle (14), le calcaire Comblanchien une porosité très faible allant de 0,2 - 0,9 % (3), et le calcaire d'Indiana de 10 - 15%. Nous n'observons pas de relation entre la porosité et la différence des pentes des courbes de ces trois roches (figure 4.10).

Par contre, on peut attribuer cette différence au type d'essai choisi et à l'homogénéité du champ de contrainte appliqué sur l'éprouvette et au fond d'entaille.

A titre de vérification, trois essais de flexion trois points ont été réalisés sur le calcaire Comblanchien (Tableau 4.12) à trois pressions différentes ($P = 0, 20, 40$ MPa). Les résultats sont reportés dans la figure 4.10 (mentionnés par). L'essai de flexion trois points conduit à des valeurs nettement supérieures que celles obtenues par l'essai de traction sur éprouvettes cylindriques (3).

Pression (MPa)	γ_i (J.m ⁻²)	γ_F (J.m ⁻²)	K_{1c} MPa/m	$K_{1c}^{[3]}$ MPa/m
Pression nulle	5,7	30,6	0,72	0,84
P = 20	173,27	2620	4,45	2,11
P = 40	292,4	7570	6,32	3,65

Tableau 4.12 :

Résultats γ_i , γ_F et K_{1c} du calcaire Comblanchien en flexion trois points

Comparons maintenant les divers résultats en valeurs adimensionnelles. Biret propose d'utiliser le rapport de K_{1c} sur la valeur de K_{1c} à la pression ambiante. Nous avons remarqué qu'entre 0 et 10 MPa les points expérimentaux ne suivaient pas très correctement la droite de corrélation. Aussi, nous proposons d'utiliser le rapport K_{1c}/K_{1c10} , K_{1c10} étant la valeur de K_{1c} à la pression de 10 MPa.

La figure 4.13 porte les résultats du K_{1c}/K_{1c10} en fonction de la pression des trois roches micritiques ainsi que le calcaire Comblanchien et le marbre dans les deux orientations.

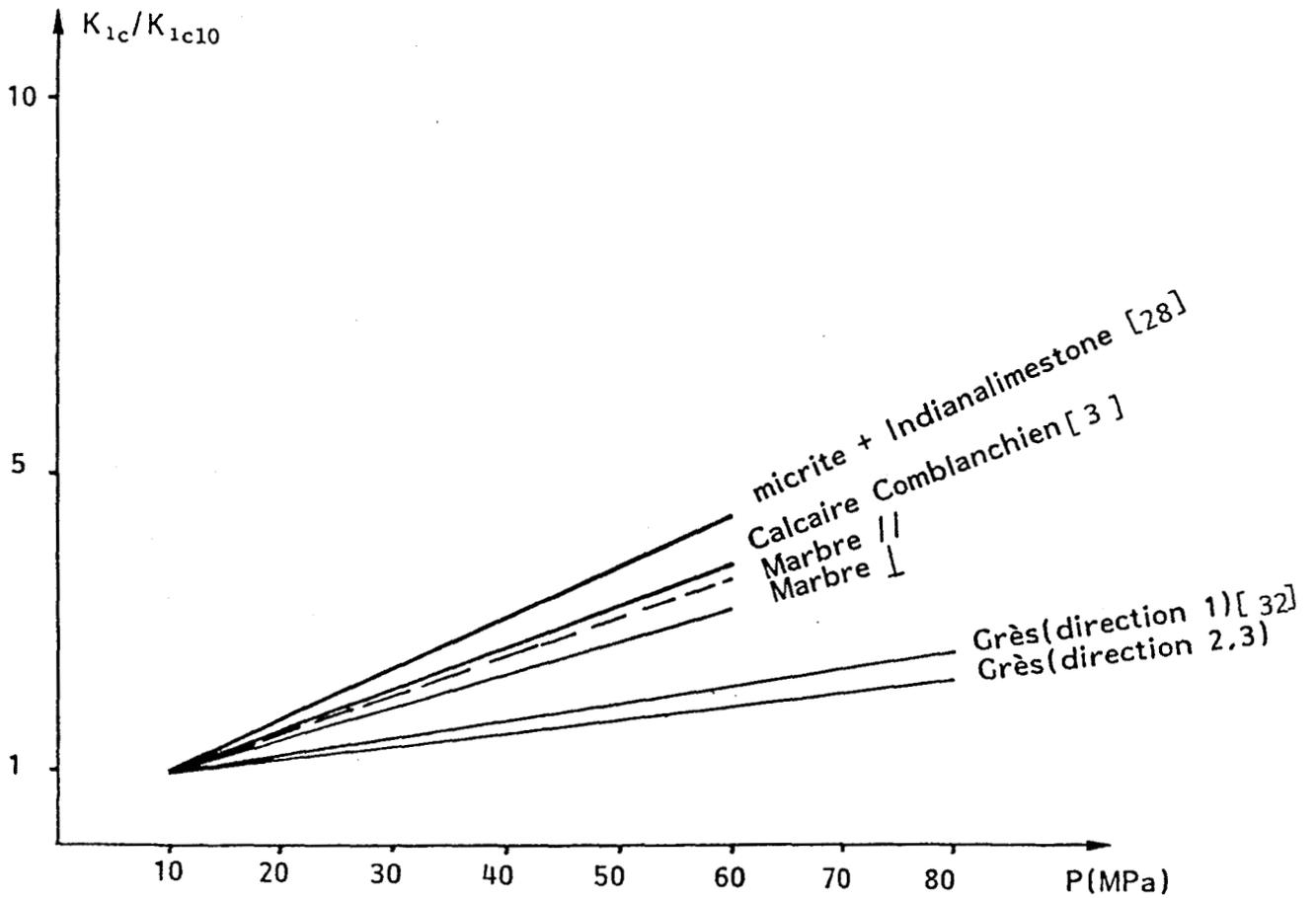


Figure 4.13 :

Comparaison des courbes K_{1c}/K_{1c10} en fonction de la pression pour les roches

On remarque alors que, pour les roches calcaires le faisceau de courbes K_{1c}/K_{1c10} est beaucoup plus resserré :

$$K_{1c}/K_{1c10} = 1 + a (P-10)$$

avec a compris entre $0,068 \text{ MPa}^{-1}$ et $0,024 \text{ MPa}^{-1}$

L'objectif de ce dernier chapitre vise la comparaison des résultats précédemment obtenus avec le comportement global en essais triaxiaux conventionnels. Pour ce faire, nous supposons que le mécanisme principal de déformation des roches est lié à la fissuration, et que cette dernière (mode 1 principal) apparaît parallèlement à la contrainte maximale appliquée. Ceci nous amène à suivre l'évolution des déformations transversales au cours de l'essai. Ainsi, nous essayons de voir la corrélation entre l'énergie d'avancement de la fissure G_c calculée précédemment (chapitre IV) à partir des essais de flexion trois points et l'énergie G_c déduite du modèle avec une fissure inclinée frottante qui donne naissance à une fissure axiale perpendiculaire à la contrainte mineure. Ce modèle proposé par plusieurs auteurs (4) (8) est supposé décrire le comportement de la roche.

5.1 ESSAIS TRIAXIAUX :

5.1.1 PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les éprouvettes cylindriques utilisées ont pour dimensions : diamètre $\phi = 30\text{mm}$, hauteur $H = 50\text{mm}$. Elles ont été découpées à l'aide d'un carotier diamanté. La rectification des deux faces a été réalisée par polissage mécanique. Afin de détecter les déformations de l'échantillon, quatre jauges à fils résistants sont collées (deux longitudinales et deux transversales). L'échantillon est ensuite gainé de silastène ainsi que ses deux embases.

5.1.2 DESCRIPTION DE L'ESSAI

L'essai triaxial est réalisé sur la presse décrite précédemment. L'asservissement est toujours en position avec une vitesse de $0,15 \mu\text{m/s}$ soit une vitesse de déformation de $3 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$. La force et le déplacement vertical sont recueillis sur un enregistreur. Les déformations des jauges sont enregistrées à l'aide d'un chaîne de mesure automatique.

5.2 RESULTATS :

5.2.1 DESCRIPTION DES COURBES OBTENUES SUR LES DEUX ROCHES ETUDIEES.

Des essais triaxiaux ont été effectués sur la micrite et le marbre à des pressions différentes allant jusqu'à 50 MPa. Un seul essai par pression a pu être réalisé pour chaque roche.

a) Courbes contraintes-déformations longitudinales.

Les figures suivantes (5.1), (5.2) donnent les courbes contraintes-déformations obtenues lors des essais triaxiaux sur le marbre et la micrite.

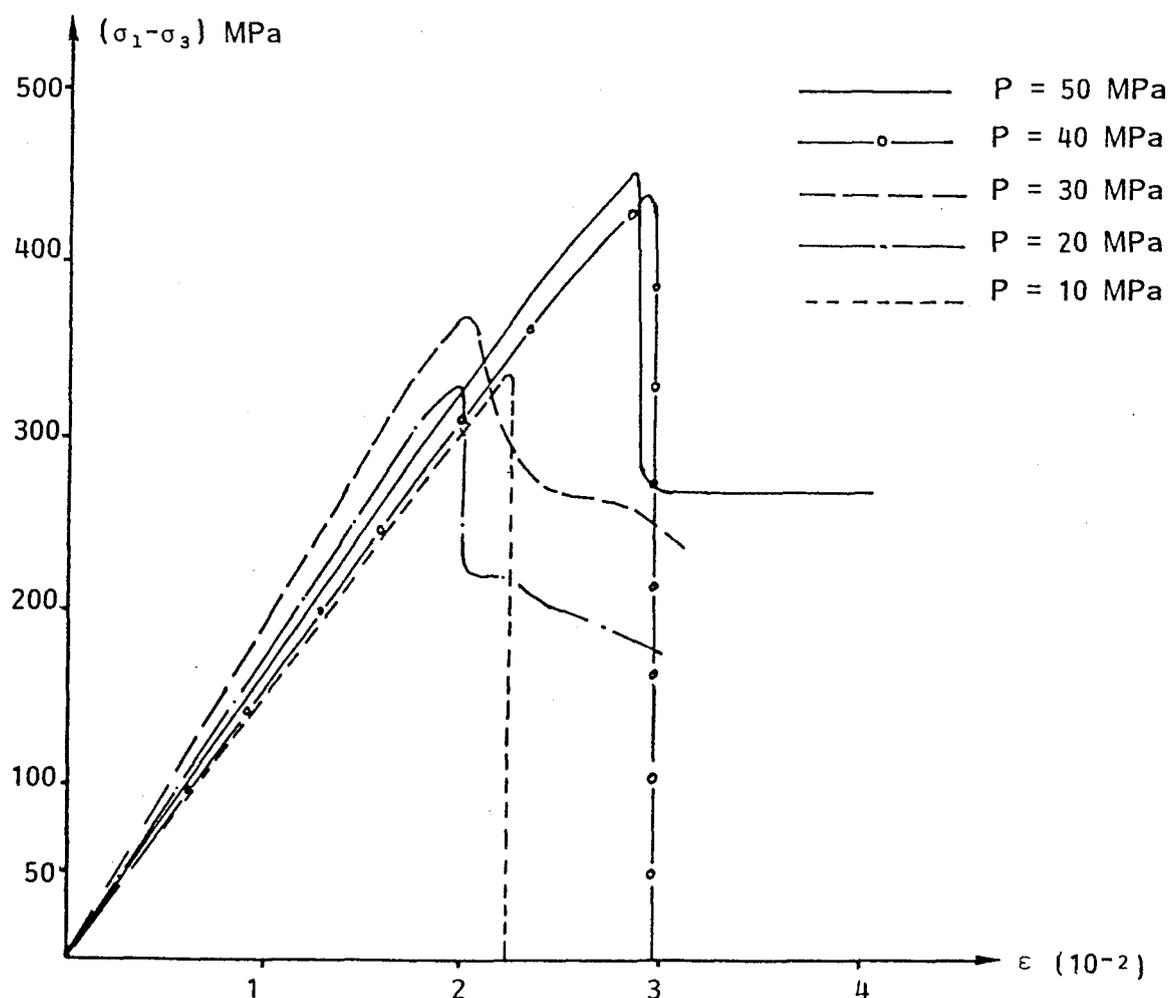


Figure 5.1 :

Courbes charge-déplacement pour différentes pressions (micrite)

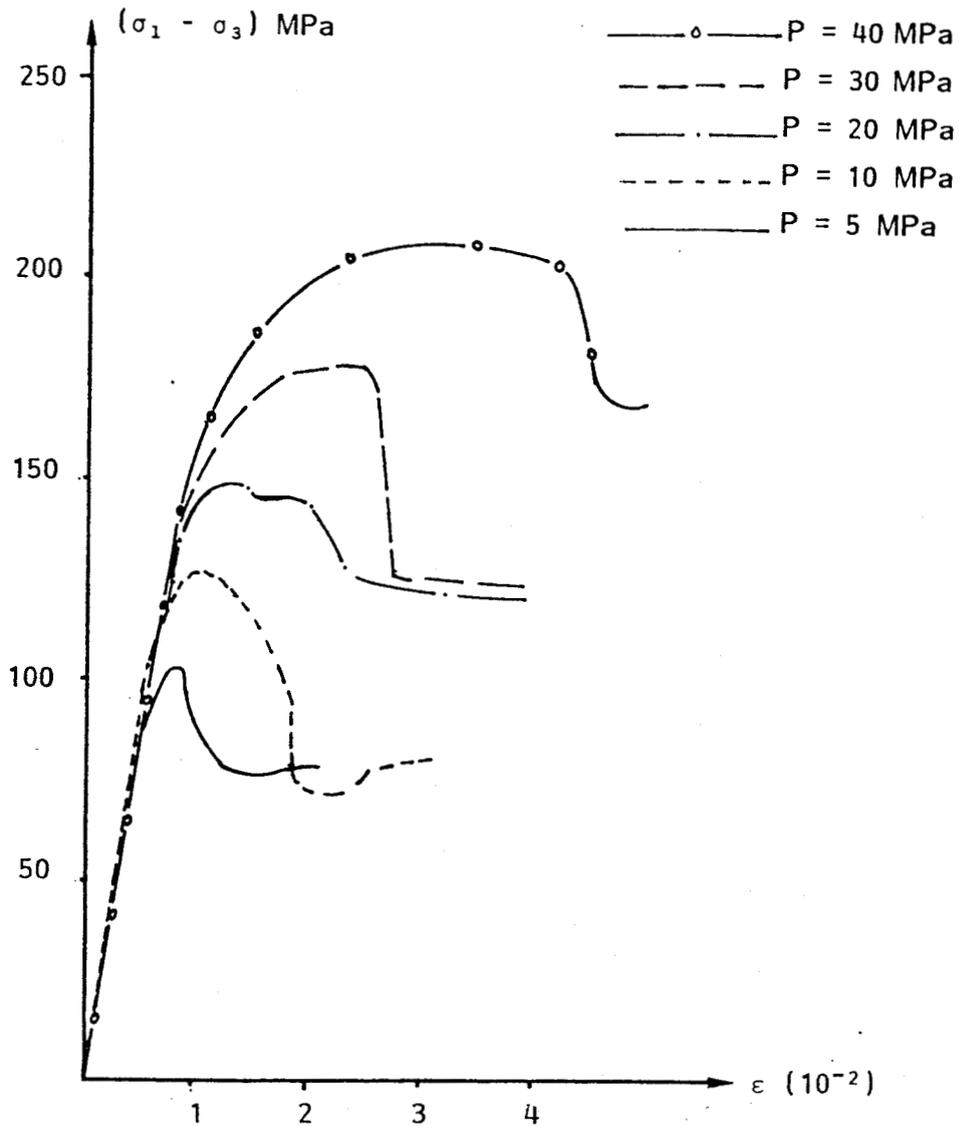


Figure 5.2 :

Courbes charge-déplacement pour différentes pressions (marbre)

- Micrite

Pour une pression $P=10$ MPa, nous notons, (figure 5.1) que la pente du chargement est totalement linéaire jusqu'au pic, et au-delà de 10MPa, une augmentation légère de la perte de linéarité en fonction de la pression (elle est de 95% de la charge maximale pour $P=30$ MPa, et aux environs de 88% du pic pour $P=50$ MPa). En même temps, on enregistre une rupture explosive tout juste après le pic qui se traduit par une chute brutale de la force à 50 MPa. Ceci nous montre le comportement à caractère très fragile de la micrite

- **Marbre**

Nous remarquons (figure 5.2) une perte de linéarité, en général constante, aux environs de 85% de la charge maximale jusqu'à $P=30\text{MPa}$. Après, elle s'accroît pour atteindre les 77% du sommet à $P=40\text{MPa}$. En outre, le comportement du marbre devient de plus en plus "stable" en fonction de la pression mais reste toujours fragile.

b - Courbes contraintes-déformations transversales

Les courbes charge-déformations transversales de l'échantillon enregistrées à l'aide des jauges sont présentées par les figures (5.3), (5.4), (5.5) :

- **Micrite**

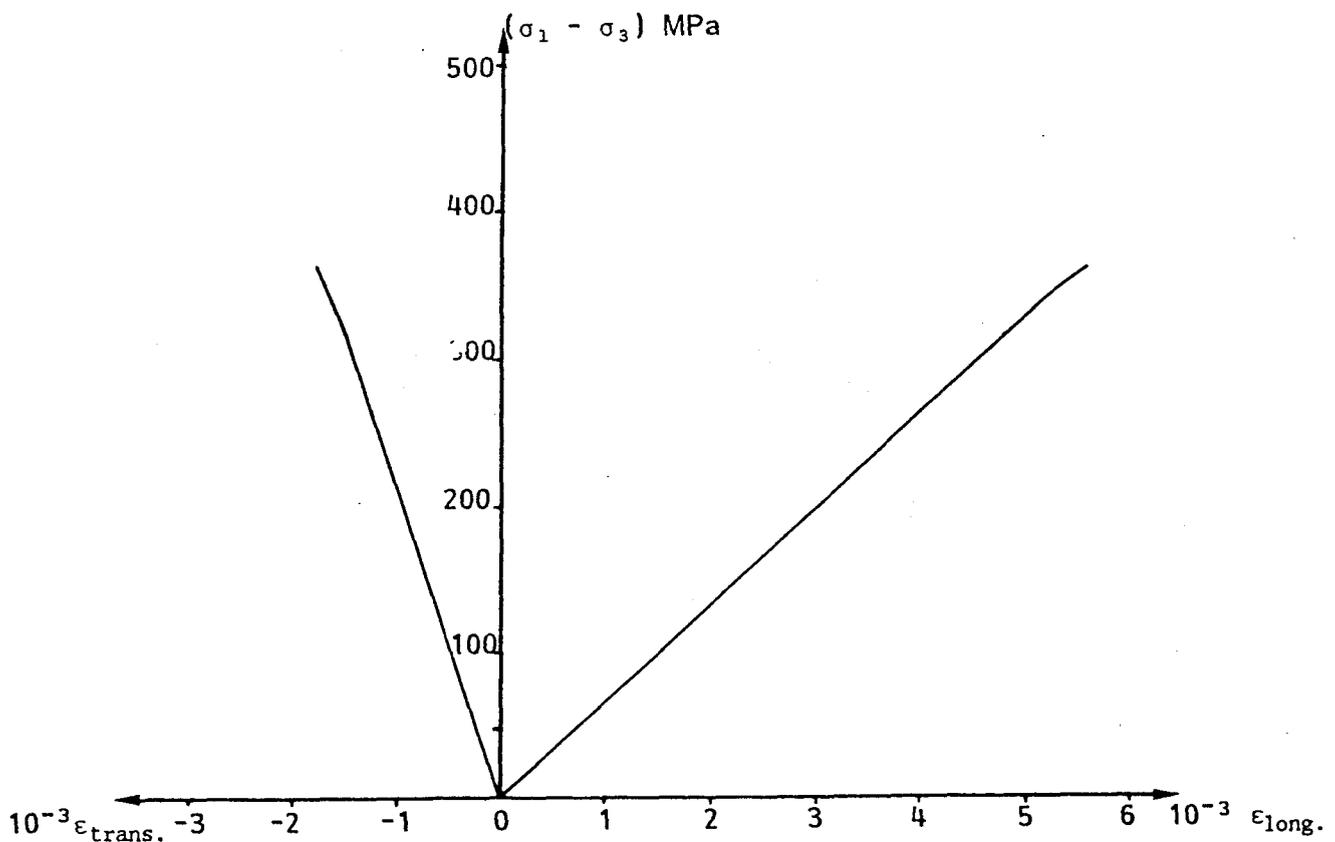


Figure 5.3 :

Courbe charge-déformation longitudinale et transversale à $P = 30\text{MPa}$

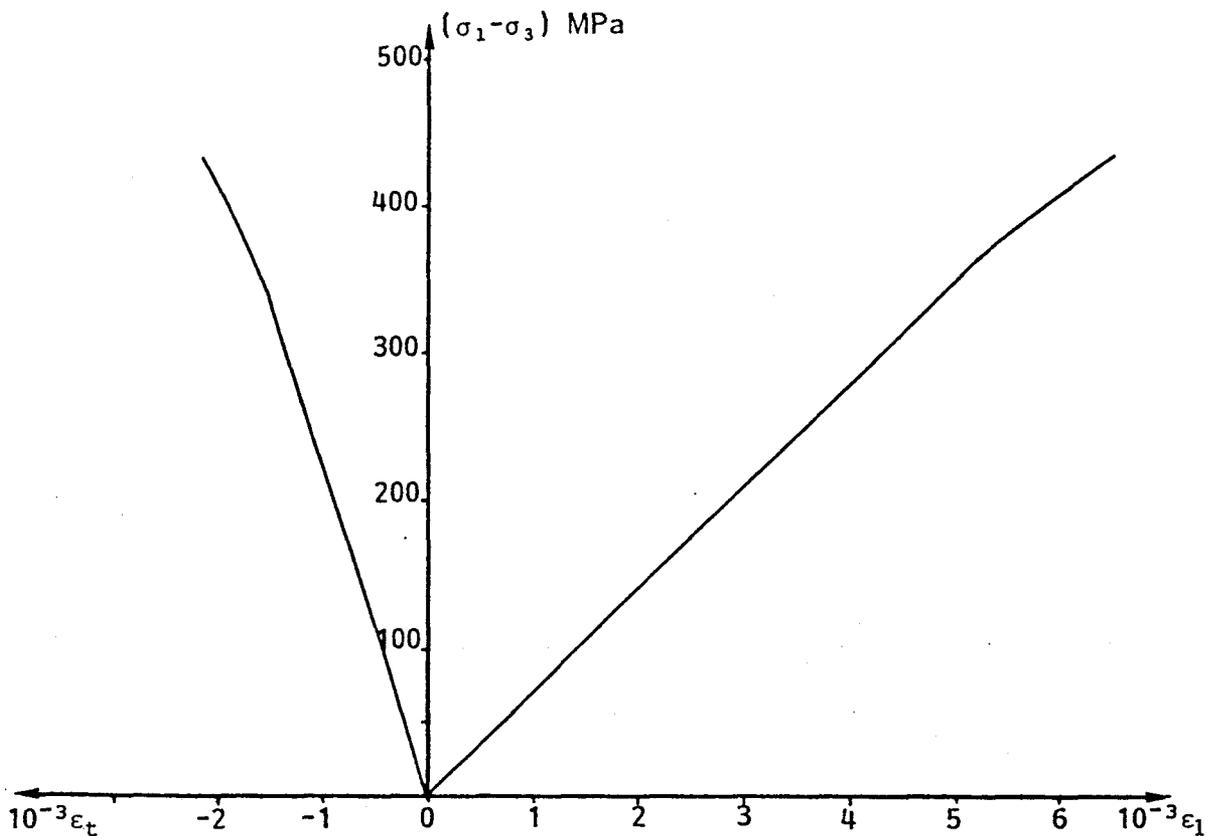


Figure 5.4 :

Courbe charge-déformation longitudinale et transversale à $P = 50$ MPa

Nous notons une perte de linéarité des déformations transversales (88% de la charge maximale à 30MPa et 80% à 50 MPa). (figures 5.3 et 5.4)

- Marbre

La figure 5.5 donne la courbe typique de la charge en fonction des déformations transversales et longitudinales pour le marbre. La linéarité des déformations longitudinales est plus faible que celle de la micrite, et en même temps, la linéarité des déformations longitudinales est plus importante que celle de la transversale. Ici encore, on retrouve l'action des microfissures naturelles. Celles-ci déclenchent une microfissuration axiale précoce dans le chargement.

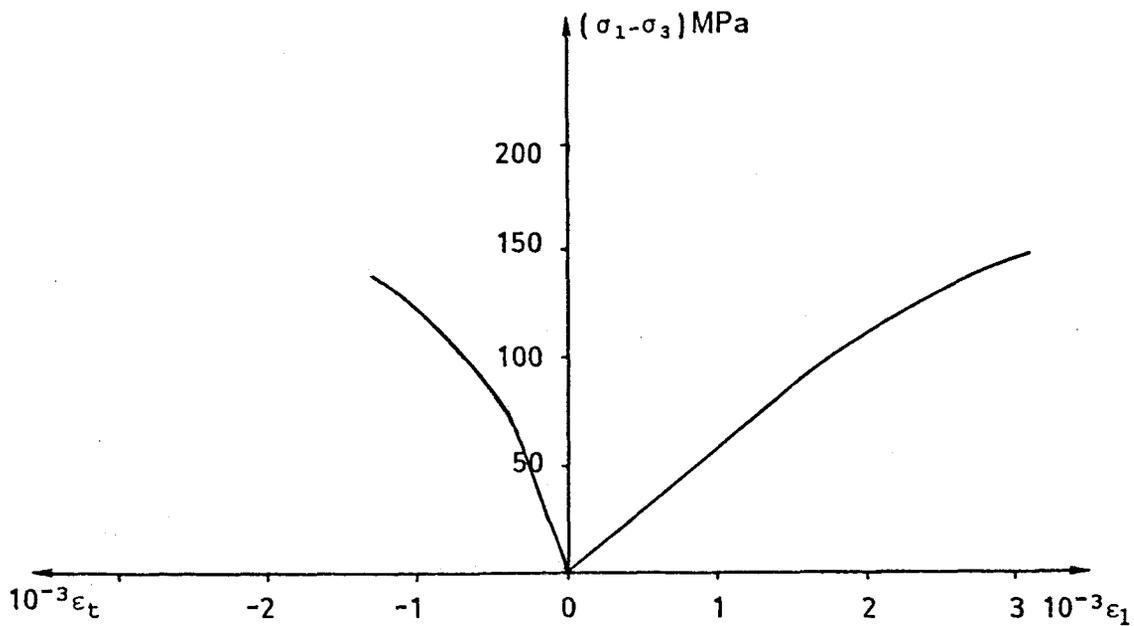


Figure 5.5 :
 Courbe charge-déformations longitudinale et transversale
 pour le marbre à $P = 20$ MPa

5.2.2 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANIKES

L'évaluation des caractéristiques mécaniques est basée sur la théorie de l'élasticité linéaire. Le module d'Young est déterminé expérimentalement à partir des pentes des parties linéaires des courbes contraintes-déformations longitudinales. De même, le coefficient de Poisson est donné par le rapport des déformations transversales sur les longitudinales. Les résultats sont donnés par les figures (5.6), (5.7) (5.8) et (5.9)

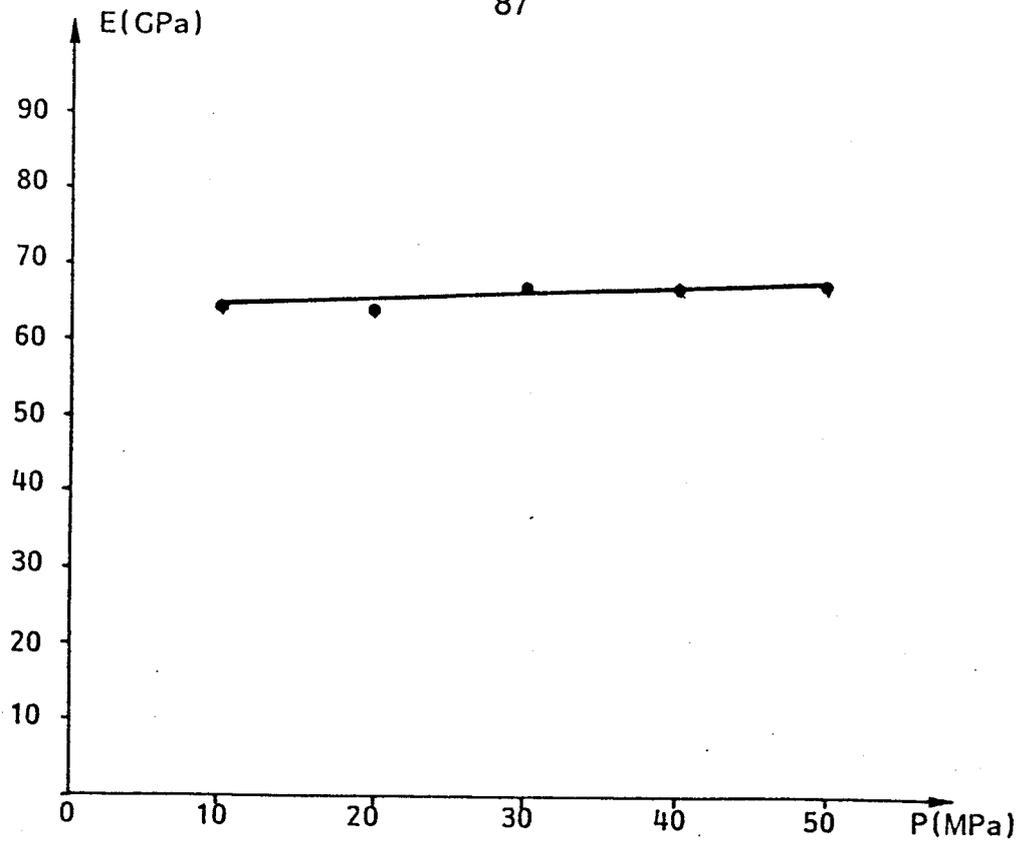


Figure 5.6 :

L'évolution du module d'Young de la micrite en fonction de la pression

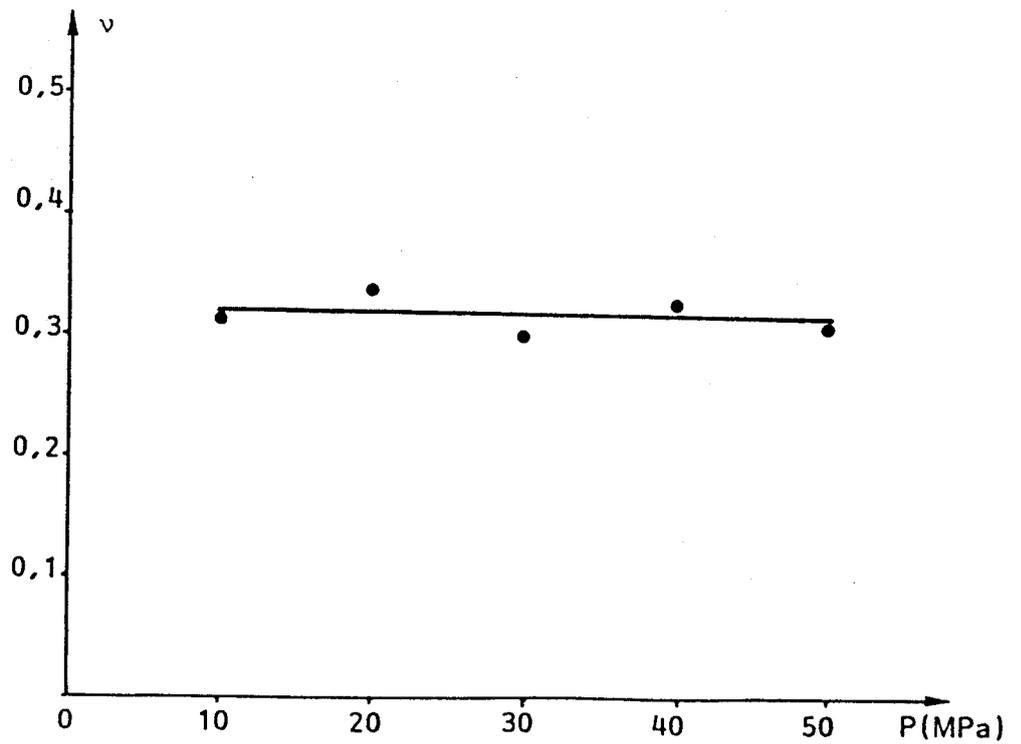


Figure 5.7 :

L'évolution du coefficient de Poisson de la micrite en fonction de la pression

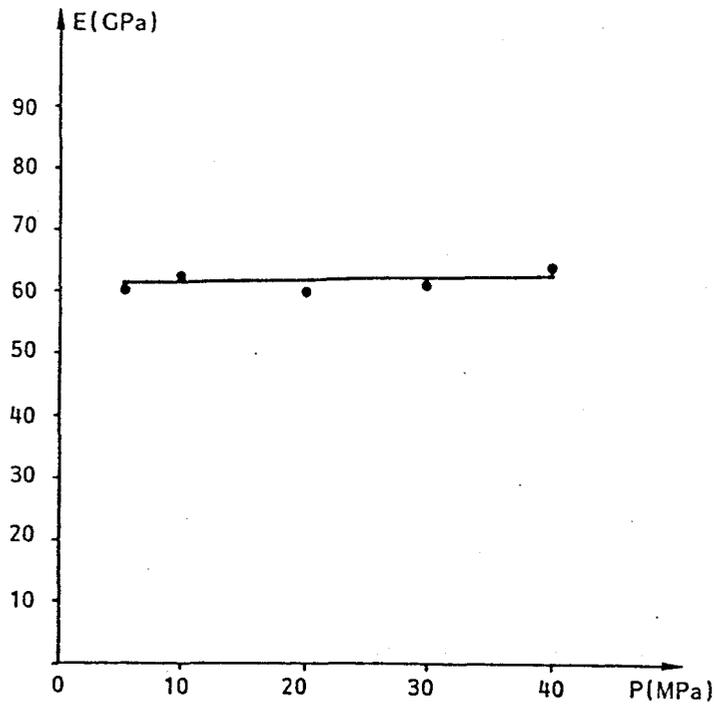


Figure 5.8 :

Evolution du module d'Young du marbre en fonction de la pression

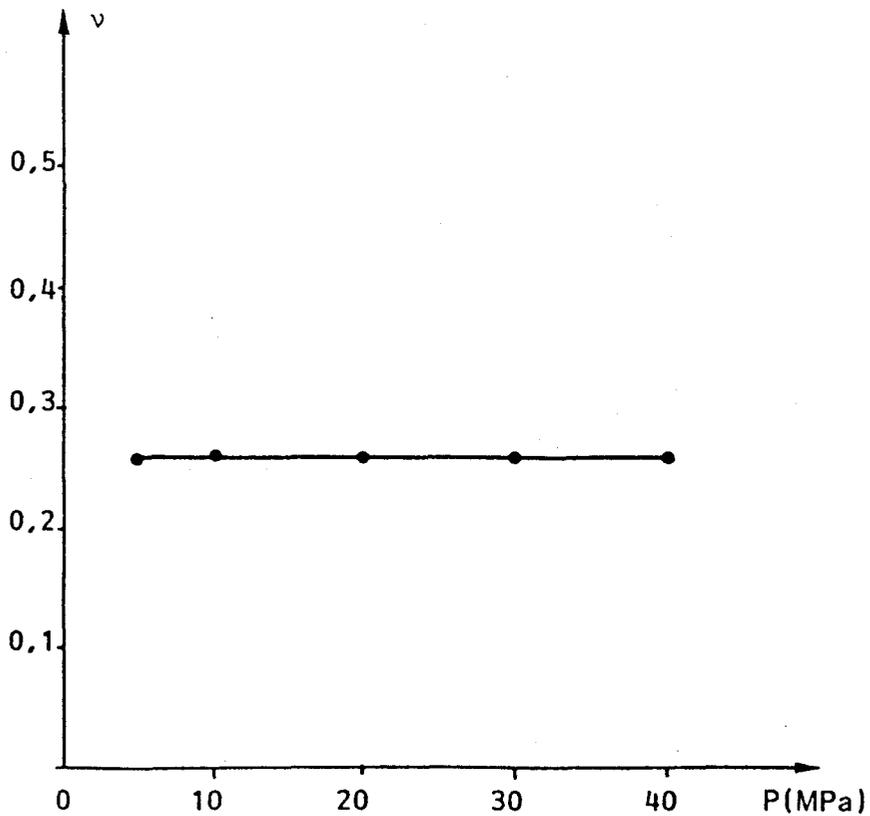


Figure 5.9 :

Evolution du coefficient de Poisson du marbre en fonction de la pression

Le module d'Young et le coefficient de Poisson semblent relativement constants en fonction de la pression pour les deux roches.

5.3 CALCUL DE L'ENERGIE G_c A PARTIR DES ESSAIS TRIAXIAUX

5.3.1 PRINCIPE DU CALCUL

L'énergie G_c est déterminée à partir d'un modèle physique simple tenant compte de la dilatance du matériau. Ce modèle, avec une fissure inclinée frottante (figure 5.11), a été proposé par plusieurs auteurs (4) (8). Les paramètres utilisés sont la longueur de fissure $2l_0$, son orientation initiale (angle θ), le coefficient de frottement μ sur les lèvres de la discontinuité et les contraintes $\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_3$ (figure 5.11) où σ_3 est la contrainte latérale et σ_2 la contrainte qui correspond à la perte de linéarité des déformations transversales.

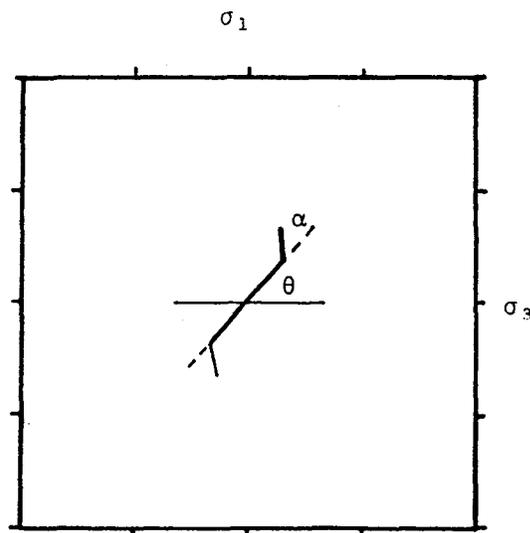


Figure 5.11 :
Modèle de la fissure inclinée frottante

L'étude numérique réalisée par KONDO (19) en utilisant la méthode de discontinuité de déplacement (7) consiste à déterminer pour une contrainte donnée ($\sigma_1 - \sigma_3$), l'orientation de l'angle θ la plus favorable à la rupture $G = G_{\max}$ en fonction du coefficient de frottement μ . L'énergie correspond à la valeur maximale de G quand on fait varier l'angle de branchement α . Les résultats obtenus (19) (figure 5.12) montrent que pour des valeurs du coefficient de frottement compris entre 0,5 et 1, l'orientation privilégiée à la rupture est de $\theta = 60^\circ$. Nous adopterons donc cette valeur.

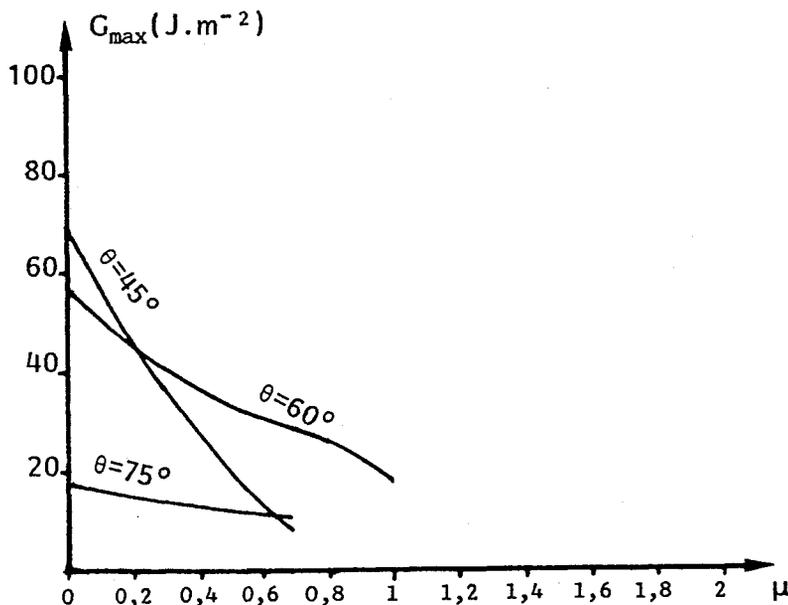


Figure 5.12 :

Variation de $G_{\max}(\mu)$ pour différentes valeurs de θ (19)

Ensuite, la figure 5.13 montre que l'initiation de la propagation est verticale (l'angle de branchement α est aux environs de 30°). Cette initiation axiale se fait en ouverture. Nous notons que la direction de l'évolution ultérieure de propagation de la fissure reste toujours axiale. Nous retiendrons également ces valeurs.

Enfin pour terminer, nous soulignerons que l'état hydrostatique n'apporte aucune contribution au K_{1c} (ou G_c), et que par conséquent, l'essai triaxial peut être dépouillé comme un essai de compression simple sous $\sigma_1 - \sigma_3$.

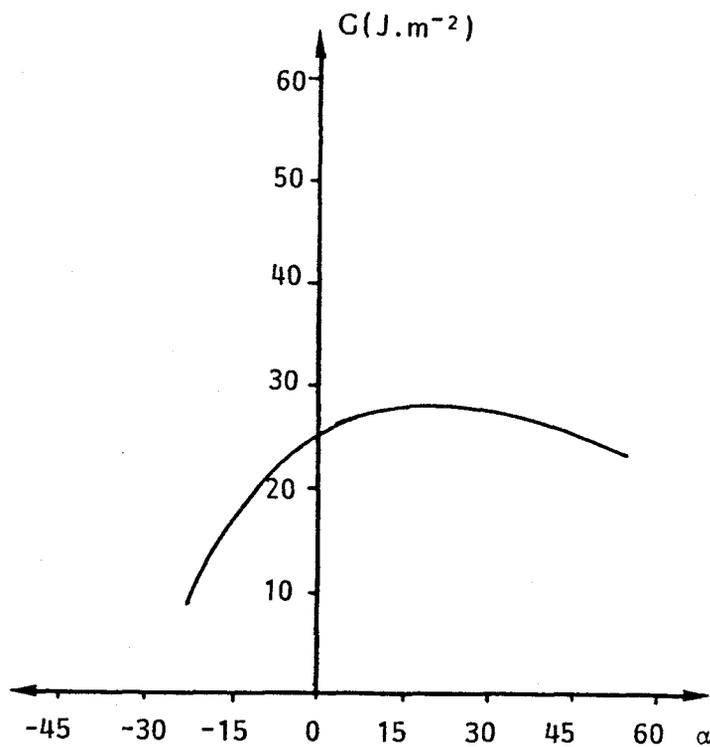


Figure 5.13 :

Variation de G en fonction de α pour $\theta = 60^\circ$ et $\mu = 0,7$ (19)

5.3.2 COMPARAISON DES ENERGIES OBTENUES A PARTIR DES ESSAIS TRIAXIAUX ET DE FLEXION TROIS POINTS

5.3.2.1 Calage des deux énergies G_c à 10 MPa

Le calcul de l'énergie G_c à partir des essais triaxiaux et la comparaison des deux énergies citées ci-dessus nécessite un calage de cette dernière, colage que nous avons effectué à $P = 10$ MPa. Ceci permet de déterminer la longueur de fissure $2l_0$ nécessaire pour le calcul. Cette longueur $2l_0$ est égale à 1,3 mm pour la micrite et à 2,8mm pour le marbre.

Présentation des résultats et comparaison

Les figures (5.14) (5.15) présentent la comparaison des énergies d'initiation $\gamma_i = G_c/2$ des essais de flexion trois points et des essais triaxiaux à différentes pressions.

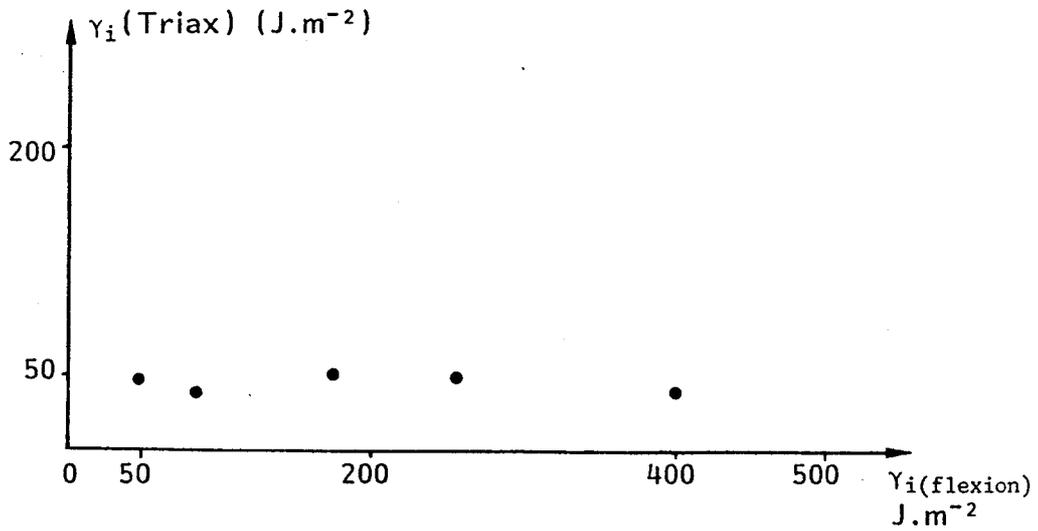


Figure 5.14 :

Comparaison des énergies γ_i (flexion) et γ_i (triax.) pour la micrite

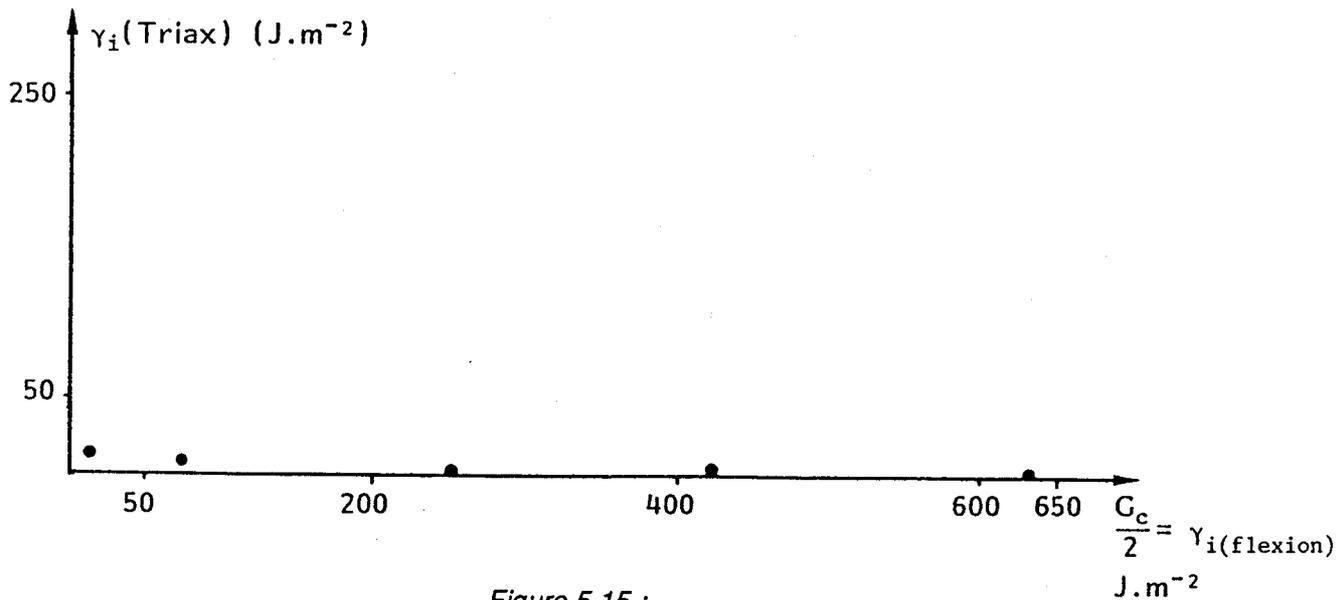


Figure 5.15 :

Comparaison des énergies γ_i (flexion) et γ_i (triax.) pour le marbre

D'après les deux courbes tracées ci-dessus, nous constatons que l'énergie d'initiation γ_i calculée par le modèle :

- reste relativement constante en fonction de la pression, aux environs de 50 J.m^{-2} , et nettement inférieure au γ_i obtenue par les essais de flexion trois points pour la micrite.
- est de l'ordre de 1 J.m^{-2} à partir de 20 MPa pour le marbre. Cependant, nous remarquons qu'il n'y a pas de relation de proportionnalité entre ces deux énergies, et que la contrainte σ_s nécessaire pour vérifier cette relation est nettement supérieure à la contrainte de rupture (deux fois plus grande pour la micrite et 15 fois dans le cas du marbre).

Ce désaccord entre les deux énergies peut provenir de l'incertitude qui existe sur la valeur de certains paramètres utilisés dans le modèle, notamment la longueur de fissure $2 l_0$.

CONCLUSION

L'étude expérimentale qui a été menée sur deux roches calcaires a permis de mettre en lumière un certain nombre de points nouveaux.

Tout d'abord, nous noterons que la microfissuration naturelle joue un rôle primordial dans les conditions de propagation. En premier lieu, elle participe à un mécanisme dissipatif d'énergie qui a donc tendance à stabiliser la propagation et à rendre le matériau moins "fragile". Dans un deuxième temps, elle interagit avec l'essai et le gradient de contrainte appliqué, ce qui conduit à des paramètres de propagation dépendant de la nature de l'essai.

Il a ensuite été montré à travers des essais de plaques percées d'un trou que l'on pouvait considérer que les conditions de propagation pouvaient être considérées comme indépendantes de la longueur propagée. Par ailleurs, il s'est avéré que la méthode de compliance n'est pas vraiment adaptée dans le cas des roches à fissuration naturelle importante.

En ce qui concerne l'influence de la pression de confinement jusqu'à des valeurs de 60 MPa sur les paramètres de résistance à la propagation en mode I, nous noterons que :

- l'énergie de fracture γ_F atteint rapidement un palier se situant à des valeurs de $5 \cdot 10^3$ à 10^4 J.m⁻². Bien que les valeurs de γ_F ne sont pas très précises du fait que l'asservissement en ouverture n'a pas été fait dans un premier temps dans la cellule triaxiale pour des raisons de sécurité. Ces valeurs de γ_F sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées dans le domaine du séisme.
- l'énergie d'initiation γ_i croît linéairement avec la pression pour le marbre, plus lentement pour la micrite.

K_{Ic} croît linéairement avec la pression comme dans les études antérieures (3) (28), (32), mais avec un gradient plus important. Cette différence est due vraisemblablement à la nature d'essai et des conditions aux limites qui influencent fortement les résultats. Il importe donc de chercher un matériau qui permet de mettre sous pression la fissure propagée et de mener des études comparatives entre les différentes techniques expérimentales et en même temps sur plusieurs roches afin de préciser l'influence de la pression de confinement sur les conditions de propagation et par la suite, de bien définir les paramètres nécessaires pour la modélisation.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 ABOU SAYED A.S. (1977) - "Fracture toughness, K_{1C} , of triaxially loaded. Indiana Limestone" - Proc. 17 th U.S. Symp. Rock Mech. 273, p. 1-8
- 2 American Society for testing and materials (1972) - "Tentative method of test for plane strain fracture toughness of metallic materials". - ASTM Designation E 399 72 T. Annual book of standarts, Part 31, ASTM, PA
- 3 BIRET F. (1987) - "Mesure de l'influence de la pression sur la propagation de fissure dans les roches". - Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux
- 4 BRACE W.F., PAULDING B.W., SCHOLZ C.H. (1966) - "Dilatancy in the fracture of cristalline rocks" - Journal of Geophysical Research, vol. 77, 3939
- 5 BUI H.D. (1978) - "Mécanique de la rupture fragile" - Masson
- 6 CORNET F.H. (1977) - "Comparative analysis by the displacement discontinuity method of two energy criteria of fracture" - Int. J. fract. Mech.
- 7 CROUCH S.L. (1976) - "Solution of plane elastic problems by the displacement discontinuity method" - Int. J. Num. Math. in Eng., 10 p. 301-343
- 8 FAIRHURST C. and COOK N.G.W. (1966) - "The phenomenon of rock plitting parallel to a free surface under compressive stress" - Proc. First Cong. Int. Soc. Rock mech., Lisbonne 1 p. 687-692
- 9 FILIS G. (1982) - "Mode opératoire pour le moulage des jaquettes" - Mémoire d'ingénieur EUDIL
- 10 FRANCOIS D. (1975) - "Notions de mécanique de la rupture" - Ann. Soc. Geol. Nord, XCV p. 113-117
- 11 GORDO B., HENRY J.Y., HENRY J.P. (1987) - "Paramètres de résistance à la propagation de fissures dans les roches calcaires. Influence de la pression de confinement" - 8e Congrès Français de Mécanique, Août, Nantes
- 12 GRIFFITH A.A. (1924) - "The phenomena of rupture and flow in solids" - Phil. Trans. Roy. Soc. A 221, p. 163
- 13 HENRY J.P., PAQUET J., TANCREZ J.P. (1977) - "Expérimental study of crack propagation in calcite rocks" - Int. J. Rocks mech. Min. Sci. & Geomech. abstract., vol. 24, n° 2, p. 85-91

- 14 HENRY J.P. (1978) - "Mécanique linéaire de la rupture appliquée à l'étude de la fissuration et de la rupture des roches calcaires" - Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Lille I
- 15 HENRY J.Y. (1980) - "Plaque percée d'un trou et soumise en compression - Etude des conditions de propagation de la fissure de traction" - Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Lille I
- 16 HENRY J.Y. (1983) - "Energie d'avancement de fissure G pour une plaque percée d'un trou et soumise en compression" - Mech. Res. Comm. 10 (5) p. 253-257
- 17 HOGGLAND R.G., HAHN G.T. and ROSENFELD A. (1973) - "Influence of microstructure on fracture propagation in Rock" - Rock Mech. 5, p. 77-106
- 18 IRWIN G.R. (1957) - "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plane" - J. Appl. Mech. 24 p. 361-364
- 19 KONDO D. (1988) - "Application de la mécanique linéaire de la rupture à l'étude de la stabilité des cavités souterraines". Thèse de Doctorat, Université de Lille I (à paraître)
- 20 LAJTAI E.Z., LAJTAI V.N. (1975) - "The collapse of cavities" - Int. J. Rock mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 12, p. 81-86
- 21 LAQUECHE H. (1985) - "Détermination de l'énergie de fracturation des roches anisotropes et sismogénèse" - Thèse de 3e cycle, Univ. de Bordeaux I
- 22 MALKIN J. (1972) - "Mécanique linéaire de la rupture" - Dans rupture des métaux- Masson Ed. p. 13-32
- 23 MOREL E., HENRY J.P. (1983) - "Mise au point de techniques expérimentales de détection de la propagation de fissure de traction" - 18e Congrès de Rhéologie
- 24 MAC HENRY K.D., TRESSLER (1977) - "Subcritical crack growth in silicon carbide"- J. Mater. Sci. 12, p. 1271-1278
- 25 NOLEN-HOEKSEMA R.C., GORDON R.B. (1987) - "Optical detection of crack patterns in the opening - Mode fracture of Marble" - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. abstr., vol. 24, n° 2, p. 135-144
- 26 OUCHTERLONY F. (1980) - "Compliance measurements on notched rock cores in bending" - Sve DE FO report DS 1980.2 Stockholm, Sweden
- 27 PECK L. (1983) - "Stress corrosion and crack propagation in sioux quartzite".. J. of Geophysical Research, 88 (B6), 5937-5046
- 28 SCHMIDT R.A., HUDDLE C.W. (1977) - "Effect of confining pressure on fracture toughness of Indiana limestone" - Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 14, p. 289-293
- 29 SCHMIDT R.A. (1977) - "Fracture mechanics of oil shale- Unconfined fracture toughness, stress corrosion cracking and tension test results" - Proc. 18 th U.S. Symp. on rock mechanics, p. 2A2-1to6, Colorado School of Mines Golden, C.O.



- 30 SUN Z., OUCHTERLONY F. (1986) - "Fracture toughness of stripa granite cores" - Int.-J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 23, n° 6, p. 399-409
- 31 SIH G.C. (1973) - "Mechanics of fracture" - Vol. 1, Nood hold, Int. Publ. Leyden
- 32 TERRIEN M., BERGUES J., SARDA J.P., CHAYE D'ALBISSIN M. (1984) - "Experimental study of the anisotropy of a sand stone and a marble" - Coll. CNRS, Villars de Lans

RESUME :

Des essais de propagation de fissures en mode d'ouverture ont été menés sur deux roches calcaires : une micrite à microfissuration naturelle quasi inexistante et un marbre présentant une anisotropie d'orientation de fissures. Deux paramètres sont étudiés en termes de la théorie de Griffith. Il s'agit de l'énergie d'initiation γ_i d'une fissure macroscopique (ou G_C énergie critique de propagation, ou K_{1C} facteur d'intensité de contraintes) et de l'énergie totale dépensée dans le processus de propagation γ_F . Des essais de flexion trois points asservis en ouverture ont permis d'étudier l'influence de la microfissuration et de l'environnement sur les deux paramètres de résistance (γ_i , γ_F). L'essai de compression de plaque percée d'un trou a permis de traduire l'évolution de K_{1C} avec la longueur de fissure propagée. Des essais de flexion trois points asservis, dans un premier temps, en position ouverte ont été menés en cellule afin d'étudier l'influence de la pression sur γ_i , γ_F et K_{1C} . Enfin des essais triaxiaux conventionnels ont été réalisés afin de comparer les énergies G_C obtenues par flexion trois points et les énergies G_C des essais triaxiaux calculées à partir d'un modèle avec une fissure inclinée frottante.

ABSTRACT :

Crack propagation tests in opening mode are performed on two calcite rocks : - micrite with negligible natural microcracks and a marble which exhibits a structural anisotropy due to a preferential crack distribution. Two parameters are studied in terms of Griffith theory. It's a question of initial energy of a macroscopic crack (or strain energy release rate G_C , or fracture toughness K_{1C}) and total energy consumed in propagation γ_F . Three points bending servo controlled tests allowed to study the effect of the natural microcracks state and the environment on the two parameters of resistance γ_i , γ_F . The evolution of K_{1C} with propagated crack length was studied through compression tests of plate with a hole. Three points bending controlled in position are performed in triaxial cell to determine the confining pressure influence on γ_i , γ_F and K_{1C} . Finally, triaxial tests are used to compare the G_C values obtained in three points bending and the energy G_C of triaxial tests calculated with a model of inclined friction crack.

MOTS CLEFS :

Mécanique linéaire de la rupture
Microfissures
Pression de confinement

Fissuration
Roches calcaires
Paramètres de résistance à la propagation