



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages
École Doctorale RP2E

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de :

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

Spécialité :

Génie civil – Hydrosystèmes – Géotechnique

Par :

Jérôme WASSERMANN

**Etude expérimentale de l'endommagement des
roches par des méthodes acoustiques**

Soutenue publiquement le 05 septembre 2006
devant la Commission d'Examen

Membres du jury :

Président	M. Jean SCHMITTBUHL
Rapporteurs	Mme Maria ZAMORA M. Jean SCHMITTBUHL
Examinateur	M. Patrick LEBON
Directeur de thèse	Mme Françoise HOMAND
Co-directeurs de thèse	Mme Gloria SENFAUTE M. Davide AMITRANO

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages
École Doctorale RP2E

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de :

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

Spécialité :

Génie civil – Hydrosystèmes – Géotechnique

Par :

Jérôme WASSERMANN

**Etude expérimentale de l'endommagement des
roches par des méthodes acoustiques**

Soutenue publiquement le 05 septembre 2006
devant la Commission d'Examen

Membres du jury :

Président	M. Jean SCHMITTBUHL
Rapporteurs	Mme Maria ZAMORA M. Jean SCHMITTBUHL
Examineur	M. Patrick LEBON
Directeur de thèse	Mme Françoise HOMAND
Co-directeurs de thèse	Mme Gloria SENFAUTE M. Davide AMITRANO

RESUME

Afin de mieux comprendre les processus d'endommagement des roches sollicitées mécaniquement, nous avons mené une étude « micro-macro » de l'endommagement au sens où nous avons réalisé des mesures microscopiques et macroscopiques de son évolution durant un essai mécanique. Cette étude a ainsi comporté :

- des mesures de modules élastiques avant la rupture macroscopique ;
- des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques et d'atténuation ;
- des mesures d'activité acoustique (événements d'EA).

De cette étude expérimentale, se dégagent les résultats suivants :

- Il existe une remarquable cohérence entre les trois types de mesures effectuées.
- L'endommagement de roches aux comportements macroscopiques différents découle de micromécanismes eux aussi différents. Pour des roches dilatantes, on observe des micromécanismes en extension (Mode I). L'endommagement de roches non-dilatantes résulte de micromécanismes en cisaillement.
- Une corrélation entre le contenu fréquentiel des événements d'EA et le type de micromécanismes est observée. Les micromécanismes en extension (Mode I) ont le contenu fréquentiel le plus élevé. Les micromécanismes en compression (fermeture de microfissures, de vides inter-granulaires) ont un contenu fréquentiel basse fréquence. Les micromécanismes de cisaillement ont un contenu fréquentiel intermédiaire aux deux précédents.

ABSTRACT

Our aim is here a better understanding of damage process of stressed rocks. We have therefore conducted a “micro-macro” study of the rock damage in the sense that we have realized microscopic and macroscopic measurements of its evolution during mechanical tests.

This study has consisted of :

- measurements of elastic modulus before the macroscopic rupture ;
- measurements of the velocity of elastic waves and attenuation ;
- measurements of acoustic activity (AE events).

This study led to the following results :

- Results from the three types of measurements are consistent.
- Damage of rocks which have different macroscopic behaviours follows from micro-mechanisms which are also different. For dilative rocks, we observe tensile micro-mechanisms (Mode I). For not dilative rocks, damage results from shear microscopic process.
- A correlation between micro-mechanisms type (compressive, tensile, shear) and the frequency of AE events is observed. Compressive microscopic process such as microcrack closure at low frequency. Tensile AE sources are high frequency. Shear micromechanisms are characterized by intermediate frequency.

Mots-clés : endommagement, émissions acoustiques, propriétés élastiques, vitesse des ondes P, atténuation, essai mécanique, minerai de fer.

Key words : damage, acoustic emission, elastic modulus, P-wave velocity, attenuation, mechanical test, iron ore.

AVANT PROPOS

Cette thèse a été effectuée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) au sein du Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LAEGO).

Je remercie Madame Françoise Homand, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie, de m'avoir accueilli au sein du LAEGO, de m'avoir encadré et d'avoir mis à ma disposition son expérience, ses conseils, ainsi que tous les outils nécessaires à la réalisation des expérimentations.

Je remercie Madame Gloria Senfaute, chargée de mission recherche à l'INERIS, et Monsieur Davide Amitrano, maître de conférence à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, pour leur encadrement, leurs conseils et leur soutien tout au long de ce travail.

Je remercie Monsieur Patrick Gaire, technicien au LAEGO, pour son aide précieuse dans la réalisation des essais mécaniques de compression triaxiale.

Je remercie toutes les personnes ayant concouru de près ou de loin à l'élaboration de cette recherche :

Monsieur Marwan Al Heib, ingénieur à l'INERIS.
Monsieur Radwan Farhoud, technicien à l'INERIS.
Monsieur Franz Lahaie, ingénieur à l'INERIS.
Monsieur Armand Lizeur, informaticien à l'INERIS.
Madame Sophie Mazières, ingénieur à l'INERIS.
Monsieur Régis Pacot, technicien à l'INERIS.
Madame Christine Schenck, bibliothécaire à l'INERIS.
Monsieur Laurent Schoumacker, technicien au LAEGO.
Monsieur Mountaka Souley, ingénieur à l'INERIS.
Monsieur Alain Thoraval, ingénieur à l'INERIS.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont tenu compagnie durant cette thèse à Nancy.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
1. Méthodes de mesures de l'endommagement des roches au laboratoire	3
1.1 Introduction	3
1.2 Endommagement : théorie et mesures	3
1.2.1 Approche mécanique de l'endommagement	3
1.2.2 Contrainte effective et principe d'équivalence en déformation	5
1.2.3 Mesures de l'endommagement	6
a) Introduction	6
b) Mesures de modules élastiques	8
c) Mesures de vitesses de propagation des ondes et d'atténuation	9
d) Les émissions acoustiques (EA) : une mesure microscopique indirecte de l'endommagement	11
e) Conclusion	12
1.3 Etude de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques : état de l'art	13
1.3.1 Activité acoustique durant un essai mécanique	13
1.3.2 Méthodes d'analyse des émissions acoustiques et des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques	16
a) Analyse fréquentielle et analyse énergétique	16
b) Analyse des vitesses de propagation, tomographie et localisation	18
c) Analyses statistiques	22
d) Mécanismes des sources	28
1.3.3 Les paramètres acoustiques pertinents	32
1.4 Conclusion	33
2. Procédures expérimentales	35
2.1 Introduction	35
2.2 Roches étudiées et préparation des échantillons	36
2.3 Trois types de mesures	38

2.3.1 Instrumentation et mesures mécaniques	39
2.3.2 Instrumentation et mesures acoustiques	41
2.3.3 Instrumentation, mesures de vitesse de propagation des ondes élastiques, mesures d'atténuation	45
2.4 Mise en oeuvre et déroulement des essais mécaniques	47
2.4.1 Préparation des essais en compression uniaxiale	48
2.4.2 Mise en oeuvre des essais en compression triaxiale	52
2.4.3 Déroulement des essais	56
2.5 Conclusions et perspectives expérimentales	58
3. Résultats expérimentaux de l'étude au laboratoire de l'endommagement des roches	61
3.1 Introduction	61
3.2 Méthodes d'analyse des données expérimentales	62
3.2.1 Méthode d'analyse des données mécaniques	62
3.2.2 Méthode d'analyse des données acoustiques	66
a) Vitesses de propagation des ondes élastiques et atténuation	66
b) Activité acoustique et paramètres associés	67
3.3 Résultats expérimentaux	73
3.3.1 Résultats des essais de compression uniaxiale MAV11, échantillons de l'intercalaire marneux	74
a) Résultats mécaniques	74
b) Vitesses de propagation des ondes P et atténuation	83
c) Emissions acoustiques	88
d) Observations macroscopiques du faciès de rupture	105
3.3.2 Résultats des essais de compression uniaxiale MAV18, échantillons de la couche grise et de la couche brune	108
a) Résultats mécaniques	108
b) Vitesses de propagation des ondes P et atténuation	114
c) Emissions acoustiques	118
d) Observations macroscopiques du faciès de rupture	128
3.3.3 Résultats de l'essai de compression triaxiale MAV11T, échantillon de la couche brune	130
a) Résultats mécaniques	130

b) Vitesses de propagation des ondes P et atténuation	133
c) Emissions acoustiques	135
d) Observations macroscopiques du faciès de rupture	139
3.4 Discussion	140
3.4.1 Couche grise	140
3.4.2 Intercalaire marneux	143
3.4.3 Couche brune	147
3.4.4 Distribution des tailles des événements d'EA : exposant be	150
3.4.5 Vitesses V_P et désaturation progressive	152
3.4.6 Micromécanismes et fréquence centrale des événements d'EA	155
3.5 Conclusion et perspectives	157
4. Etude de la microsismicité induite par l'ennoyage d'un massif rocheux minier	159
4.1 Introduction	159
4.2 Le bassin ferrifère lorrain et la problématique des effondrements miniers	161
4.3 Présentation du site expérimental de Tressange et de son ennoyage	164
4.3.1 Introduction	164
4.3.2 Géométrie et géologie sommaires	164
4.3.3 Etat de la fracturation avant l'ennoyage	166
4.3.4 Ennoyage du site	167
4.3.5 Conclusion	169
4.4 Auscultation microsismique du site pilote de Tressange	169
4.4.1 Introduction	169
4.4.2 Présentation de l'instrumentation microsismique du site	169
4.4.3 Activité microsismique enregistrée : présentation des résultats et de leur analyse	171
a) Les différents types d'événements enregistrés	171
b) Corrélation entre l'activité sismo-acoustique et le régime hydraulique	174

c) Classement des événements	175
d) Analyse énergétique et fréquentielle des événements microsismiques	178
4.4.4 Discussion	184
4.4.5 Conclusion	189
4.5 Expérimentation de chute provoquée de blocs au toit de la couche ennoyée	189
4.5.1 Introduction	189
4.5.2 Protocole expérimental	190
a) Présentation du dispositif expérimental	190
b) Déroulement de l'expérimentation (GMbloc2)	192
4.5.3 Présentation et analyse des résultats	194
a) Résultats mécaniques	194
b) Résultats de l'auscultation microsismique	195
4.5.4 Discussion et conclusion	198
4.6 Conclusion	200
Conclusion générale	201
Bibliographie	205
Annexe A : fonction d'apodisation	213
Annexe B : premiers mouvements d'un événement d'EA	215
Annexe C : synthèse graphique des résultats	217

Introduction générale

L'endommagement est une détérioration irréversible progressive de la matière (Lemaître et Chaboche, 1988) qui peut conduire à la rupture macroscopique. Son origine est microscopique, il est en effet dû à la naissance, la croissance et à la coalescence de microfissures. Ces processus microscopiques de l'endommagement ont pour conséquences macroscopiques des modifications des propriétés physiques de la matière (Kemeny et Cook, 1986). L'étude (au laboratoire) de l'endommagement d'une roche sollicitée mécaniquement est l'analyse des processus microscopiques et macroscopiques qui conduisent à la rupture d'un élément de volume représentatif (échantillon) de cette roche.

L'amorçage, la croissance de microfissures dans les roches, ont généralement lieu aux limites de grains et/ou au voisinage de vides préexistants (Kranz, 1983), ils peuvent générer des émissions acoustiques (EA), ondes élastiques transitoires qui se propagent à travers la roche (Lockner, 1993). Les EA constituent ainsi un outil d'étude des processus microscopiques de l'endommagement des roches. La mesure de propriétés physiques affectées par la détérioration progressive de la roche, telles que la vitesse de propagation des ondes P, les propriétés élastiques, etc., constitue une mesure macroscopique de l'évolution de l'endommagement au cours de la sollicitation.

Nous proposons d'étudier l'endommagement de roches à l'aide de ces outils microscopique et macroscopique durant la sollicitation mécanique. Les roches étudiées provenant du bassin ferrifère lorrain, cette recherche s'insère dans la problématique des effondrements miniers qui affectent la région. Ceux-ci sont la conséquence ultime d'un endommagement des ouvrages souterrains (piliers et galeries). A cette échelle, la naissance et la croissance de fissures, le rejou de fractures, génèrent des ondes élastiques transitoires qui se propagent au sein du massif rocheux, elles constituent la microsismicité.

L'objectif de cette recherche est de mieux cerner les processus d'endommagement de ces roches ferrifères, depuis l'instant où l'endommagement naît au sein de la roche jusqu'à la formation de discontinuités macroscopiques constituant la rupture. Nous procéderons pour cela à des essais mécaniques en compression uniaxiale et en compression triaxiale durant lesquels des mesures microscopiques (EA) et des mesures macroscopiques (propriétés élastiques, etc.) de l'endommagement seront réalisées. Nous analyserons également la microsismicité induite par l'ennoyage d'un site minier. Nous verrons dans quelle mesure les résultats obtenus au laboratoire et les résultats *in situ* peuvent être complémentaires.

Le premier chapitre de ce mémoire sera consacré aux méthodes de mesure de l'endommagement des roches au laboratoire. Nous présenterons un état de l'art d'étudier l'endommagement *via* les EA. Nous en dégagerons des paramètres pertinents pour l'étude au laboratoire de l'endommagement. Le second chapitre présentera la mise en oeuvre des essais

mécaniques en compression uniaxiale et en compression triaxiale. Pour permettre une étude multiéchelle de l'endommagement des roches, ces essais comporteront des mesures macroscopiques de propriétés élastiques ou encore de vitesse de propagation des ondes et des mesures microscopiques par enregistrement d'émissions acoustiques (EA) durant la sollicitation mécanique. Nous exposerons, dans le troisième chapitre, les résultats issus de six essais mécaniques chacun comportant les mesures indirectes macroscopiques et microscopiques précédemment citées. Ces résultats, une fois synthétisés, seront discutés. Le quatrième chapitre sera consacré à l'analyse de la microsismicité induite par l'ennoyage partiel d'une mine du bassin ferrifère lorrain. Enfin, les conclusions synthétiseront les principaux résultats de cette recherche et exposeront des perspectives.

1

Méthodes de mesure de l'endommagement des roches au laboratoire

1.1 Introduction

L'étude de l'endommagement des matériaux découle historiquement de celle de leur rupture. La rupture – de *rumpere*, rompre, « division d'un solide en deux parties après déformation, sous l'effet d'une force » (définition mécanique extraite du Petit Robert) – résulte de l'apparition d'une (ou de plusieurs) discontinuité(s) dans la matière. L'étude de l'endommagement d'une éprouvette de roche sollicitée mécaniquement est l'étude des processus qui conduisent à l'apparition de fractures macroscopiques qui scindent l'échantillon en plusieurs parties. Ce chapitre a tout d'abord pour but de définir succinctement ce que l'on entend par endommagement des roches. Cette définition est issue d'observations microscopiques d'une part, et d'une approche mécanique macroscopique d'autre part. Ensuite, nous exposerons les différentes méthodes (microscopiques ou macroscopiques, directes ou indirectes) de mesures de l'endommagement des roches au laboratoire. Nous insisterons particulièrement sur les méthodes acoustiques (EA et vitesse de propagation des ondes) ainsi que sur celles qui s'appuient sur les variations de propriétés élastiques. Puis nous présenterons un condensé de l'état de l'art expérimental (au laboratoire) d'étudier l'évolution de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques. Enfin nous conclurons par la description des outils et de la méthodologie adoptés afin d'atteindre les objectifs de cette recherche.

1.2 Endommagement : théorie et mesures

1.2.1 Approche mécanique de l'endommagement

L'endommagement des roches est un phénomène progressif qui a lieu au cours de la déformation depuis un état dit initial jusqu'à un état final qui correspond souvent à la rupture

de l'échantillon. On définit généralement l'état initial comme étant celui de l'échantillon soumis à un champ de contraintes « bien » connu, *i.e.* l'état qui correspond au lancement d'un essai mécanique de compression. A l'échelle macroscopique, l'endommagement se manifeste par la détérioration des propriétés physiques de l'éprouvette de roche. Son origine est microscopique, elle comprend l'amorçage, la croissance et la coalescence de microfissures (Lemaître, 1996). Un échantillon de roche endommagé contient donc une population de microfissures plus ou moins grande, à la distribution spatiale plus ou moins diffuse. Cet état endommagé évolue au cours de la déformation. C'est Kachanov qui introduisit en 1958 une variable macroscopique de l'endommagement permettant de décrire son évolution. Lemaître (1996) considère la « pomme endommagée » (figure 1.1) et un élément de volume dont les dimensions sont grandes devant celles des fissures et autres cavités. La surface S est l'intersection d'un plan et de cet élément de volume, elle est orientée par sa normale \vec{n} . Le plan intersecte également les structures de l'endommagement de la pomme (fissures et cavités) dont les traces apparaissent sur S . S_D est la surface de ces traces. On définit l'endommagement selon la direction de \vec{n} par :

$$D_n = \frac{S_D}{S} \quad (1.1)$$

$$0 \leq D_n \leq 1$$

$D_n = 0$, signifie que l'élément de volume est vierge de tout endommagement,

$D_n = 1$, l'élément de volume est rompu.

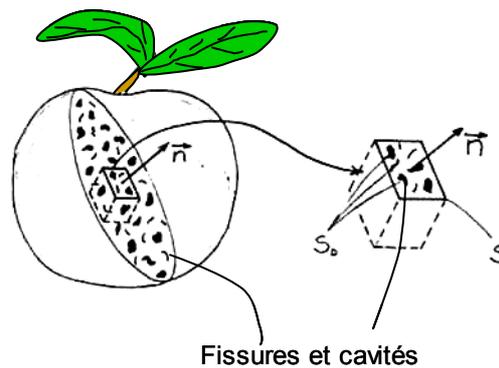


Figure 1.1 : La pomme endommagée d'après Lemaître et Chaboche (1988).

Dans le cas d'un endommagement isotrope, *i.e.* lorsque les discontinuités sont orientées et distribuées de manière homogène dans le solide endommagé, $D = D_n$ caractérise l'état d'endommagement quelle que soit la direction \vec{n} considérée.

1.2.2 Contrainte effective et Principe d'équivalence en déformation

Dans le cas d'une sollicitation unidimensionnelle, à un instant donné, la contrainte usuelle s'écrit :

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1.2)$$

F étant l'effort appliqué sur une section S de l'élément de volume. Ceci ne tient pas compte des micro-défauts présents au sein du matériau. La prise en compte de ces derniers nécessite de considérer la surface qui résiste effectivement aux efforts. Il s'agit de la parcelle (\tilde{S}) qui est dépourvue de toutes discontinuités, soit

$$\tilde{S} = S - S_D \quad (1.3)$$

où S_D est la surface endommagée, et S la surface totale. Dans le cas d'un endommagement uniforme selon la section S, on a :

$$\tilde{S} = S(1 - D) \quad (1.4)$$

Par définition la contrainte effective ($\tilde{\sigma}$) est la force appliquée rapportée à la surface qui résiste effectivement aux efforts, soit :

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} \quad (1.5)$$

de (1.2) et (1.4), il vient

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (1.6)$$

qui exprime la contrainte effective en fonction de la variable d'endommagement D. On a ainsi : $\tilde{\sigma} \geq \sigma$, $\tilde{\sigma} = \sigma$ lorsque le matériau est vierge de tout endommagement, $\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$ à l'instant de la rupture.

Dans le cas de sollicitations tridimensionnelles et d'un endommagement isotrope, on peut écrire, $\tilde{\sigma}$ étant le tenseur contrainte effective :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D}, \quad (1.7)$$

où D est la variable scalaire qui définit l'endommagement.

Le principe d'équivalence en déformation proposé par Lemaître en 1971 s'énonce ainsi : « tout comportement à la déformation d'un matériau endommagé est traduit par les lois de comportement du matériau vierge dans lesquelles on remplace la contrainte usuelle par la contrainte effective » (Lemaître et Chaboche, 1988). La figure 1.2 ci-après illustre ce principe.

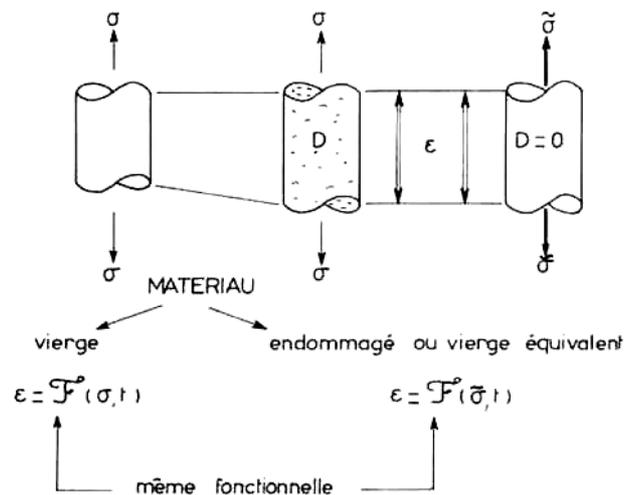


Figure 1.2 : Le principe d'équivalence en déformation, d'après Lemaître et Chaboche (1988).

1.2.3 Mesures de l'endommagement

a) Introduction

On distingue des mesures directes et des mesures indirectes de l'endommagement. Les mesures directes sont basées sur l'observation des structures de l'endommagement, c'est-à-dire des microfissures, de leurs forme, taille, orientation, nombre, répartition, interaction et coalescence. Elles peuvent être réalisées par observation de la surface d'une éprouvette de roche déformée préalablement polie, par observation interne à l'échantillon où des lames

minces sont découpées, enfin par description du faciès de la rupture qui peut refléter les caractéristiques d'un endommagement très avancé. Les observations effectuées sur des lames minces à l'aide d'un microscope sont courantes (par exemple, Moore et Lockner, 1995, Zhao, 1998, Amitrano et Schmittbuhl, 2002). Afin d'observer l'évolution de l'endommagement, il est nécessaire de réaliser ces lames minces à différents stades de la déformation (Tapponnier et Brace, 1976, Homand et al., 2000, Nishiyama et al., 2002, Katz et Reches, 2004) et donc d'utiliser plusieurs échantillons supposés identiques et soumis à un chargement croissant. Si ces méthodes microscopiques permettent une quantification et une description de l'évolution de l'endommagement, elles sont cependant destructives et les observations restent bidimensionnelles selon des plans (plans de coupe des lames minces) dont l'ensemble ne peut décrire fidèlement la structure souvent tridimensionnelle de l'endommagement. Les méthodes indirectes de mesure de l'endommagement exposées ci-après permettent de contourner ces inconvénients. Les mesures indirectes de l'endommagement sont, pour la plupart, des mesures macroscopiques basées sur la mesure d'une propriété physique du milieu rocheux influencée par l'évolution de l'endommagement. Ainsi on peut suivre les variations d'une grandeur physique sensible à la présence de fissures mesurée durant la déformation d'un échantillon au cours d'un essai mécanique depuis l'état initial jusqu'à la rupture, chaque mesure ainsi réalisée est différente selon la propriété physique. On distingue des mesures macroscopiques – perméabilité, résistivité, variations de volume, vitesses de propagation des ondes élastiques, modules élastiques – et des mesures indirectes microscopiques par enregistrement des émissions acoustiques. La figure 1.3 présente un synopsis des mesures indirectes de l'endommagement durant un essai mécanique de compression.

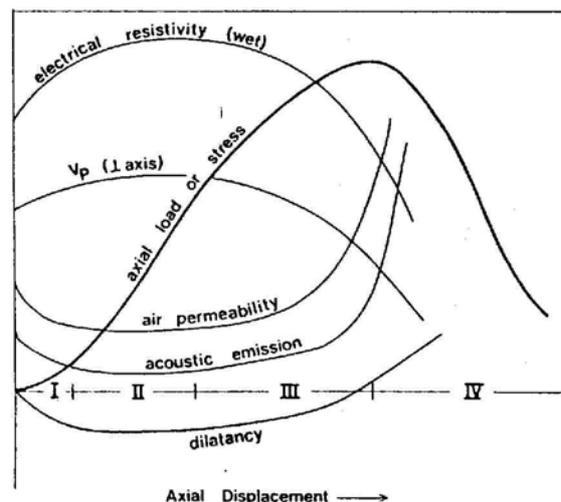


Figure 1.3 : Evolution de propriétés physiques mesurées durant un essai de compression (Paterson, 1978).

Nous examinons ici plus particulièrement les mesures macroscopiques de modules élastiques, de vitesses de propagation des ondes élastiques et d'atténuation, et les mesures microscopiques par enregistrement d'émissions acoustiques.

b) Mesures de modules élastiques

Le module de Young (E) d'une éprouvette de roche non-endommagée soumise à une compression uniaxiale, s'écrit :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1.8)$$

ε représentant les déformations élastiques selon la direction de la contrainte appliquée σ . Selon le principe d'équivalence en déformation précédemment évoqué, la loi d'élasticité de la roche endommagée s'écrit en fonction de la contrainte effective ($\tilde{\sigma}$) :

$$E = \frac{\tilde{\sigma}}{\varepsilon}, \quad (1.9)$$

soit

$$E = \frac{\sigma}{(1-D)\varepsilon}. \quad (1.10)$$

Le module de Young apparent de l'éprouvette endommagée est

$$\tilde{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.11)$$

avec

$$\tilde{E} = E(1-D), \quad (1.12)$$

on obtient

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}. \quad (1.13)$$

Les modules élastiques apparents (modules longitudinal et transversal) peuvent être déterminés en réalisant des cycles de chargement – déchargement durant un essai mécanique de compression. Leurs variations reflètent alors l'évolution de l'endommagement durant la déformation de l'échantillon de roche.

c) Mesures de vitesses de propagation des ondes et d'atténuation

Un phénomène vibratoire transitoire se propageant dans un milieu élastique homogène isotrope doit satisfaire l'équation de Navier :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2(\vec{u}), \quad (1.14)$$

avec ρ la masse volumique, \vec{u} le vecteur déplacement, t le temps, λ et μ les paramètres de Lamé, et $\nabla^2 \vec{u} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) - \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{u})$. Cette équation résulte à la fois de l'équilibre mécanique et de l'hypothèse d'élasticité. On distingue alors deux cas selon qu'il y ait ou non des déformations volumiques. La divergence de (1.14) conduit à l'équation des ondes de compression (ondes P) :

$$\rho \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2(\Theta), \quad (1.15)$$

avec $\Theta = \vec{\nabla} \cdot \vec{u}$, l'onde satisfaisant cette équation se propage à la vitesse V_p suivante :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}. \quad (1.16)$$

Le rotationnel de (1.14) conduit à celle des ondes de cisaillement (ondes S) :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{\Omega}}{\partial t^2} = \mu \nabla^2(\vec{\Omega}), \quad (1.17)$$

avec $\vec{\Omega} = \vec{\nabla} \times \vec{u}$, l'onde qui satisfait cette équation se propageant à la vitesse V_s :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (1.18)$$

Les relations ci-dessous, entre le module de Young (E), le coefficient de Poisson (ν) et les paramètres de Lamé, permettent de réécrire les vitesses en fonction des modules précédents (voir les relations 1.16 et 1.18).

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \text{ et } \nu = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \quad (1.19)$$

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \quad (1.20)$$

et

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (1.21)$$

La mesure de l'évolution de l'endommagement par l'intermédiaire des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques découle directement du fait que les propriétés élastiques varient selon l'état d'endommagement. Rappelons ci-après l'équation (1.13) :

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (1.22)$$

où \tilde{E} et E sont respectivement le module élastique longitudinal apparent du matériau endommagé et le module de Young du matériau vierge de tout endommagement. On peut écrire la vitesse des ondes P se propageant dans un milieu endommagé par :

$$\tilde{V}_P = \sqrt{\frac{\tilde{E}(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\tilde{\rho}}}, \quad (1.23)$$

dans le cas d'un endommagement isotrope (ν constant), avec $\tilde{\rho}$, la densité du matériau endommagé. L'endommagement s'exprime alors ainsi :

$$D = 1 - \frac{\tilde{\rho}(\tilde{V}_P)^2}{\rho(V_P)^2} \quad (1.24)$$

De la même manière, on peut exprimer l'endommagement en fonction des vitesses des ondes S. Ainsi les variations de vitesses de propagation des ondes élastiques reflètent l'évolution de l'endommagement durant la déformation. Pour un essai mécanique en laboratoire, les mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques sont généralement réalisées selon des rais qui traversent l'échantillon, à l'aide d'un émetteur et d'un récepteur.

L'amplitude des ondes qui traversent l'éprouvette de roche lors de ces mesures, peut être également affectée par l'endommagement progressif. L'atténuation des ondes est due à la dissipation de l'énergie associée durant la propagation. Une onde qui traverse un milieu parfaitement élastique isotrope ne subit qu'une atténuation géométrique inversement proportionnelle à la distance r source-récepteur (ou émetteur-récepteur). L'énergie se disperse sur la surface grandissante du front d'onde. Dans les roches, l'atténuation est aussi due à l'absorption d'énergie par le matériau lui-même, sa fabrique, ses défauts (discontinuités, fissures). La diminution de l'amplitude reçue est alors exponentielle selon la distance r . On conçoit que si les discontinuités deviennent plus nombreuses et plus grandes, l'atténuation est modifiée. On exprime couramment l'effet d'atténuation par la relation suivante (Weiss, 1997) :

$$A = \frac{A_0}{r} e^{-\alpha r}, \quad (1.25)$$

A_0 étant l'amplitude de l'onde émise, A l'amplitude de l'onde reçue, r la distance parcourue, et α le coefficient d'atténuation qui dépend de la fréquence. La mesure des amplitudes des ondes reçues lors des mesures de vitesses de propagation des ondes durant la déformation d'une éprouvette de roche permet également le suivi de l'évolution de l'endommagement.

d) Les émissions acoustiques (EA) : une mesure microscopique indirecte de l'endommagement

Les EA sont des ondes élastiques transitoires de contrainte qui se propagent dans un milieu solide (Evans 1979, Figure 1.4). Elles résultent de microdéplacements rapides localisés au sein du matériau qui peuvent se produire lors de mouvements de dislocation, lors de maclage, de clivage (EA intra-cristallines), ou lors de la décohésion de grains et du ciment qui les lie, enfin lors de l'amorçage et la coalescence de microfissures. Ces microdéplacements ont notamment lieu lorsqu'un échantillon de roche est sollicité mécaniquement.

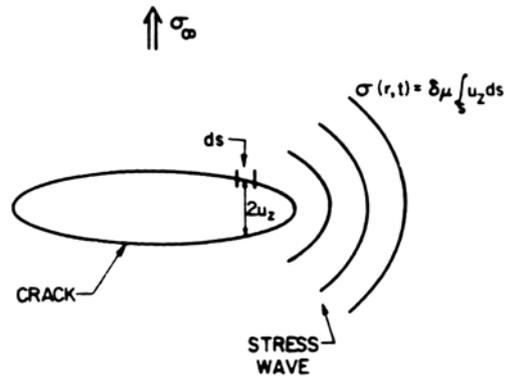


Figure 1.4 : Relation entre l'ouverture d'une microfissure et l'émission d'une onde de contrainte (Evans, 1979). $\sigma(r,t)$ est l'amplitude de l'onde, δ dépend de la fréquence, μ est le module de cisaillement, S la surface de la fissure, et u_z le déplacement local associé à l'ouverture de la microfissure.

Les métallurgistes (Société Française de Métallurgie) sont parmi les premiers à avoir utilisé les EA au cours d'essais mécaniques dans les années 50. Mogi (1962) puis Scholz (1968a) utilisèrent ce phénomène dans l'étude de l'endommagement des roches lors d'essais mécaniques menés jusqu'à la rupture de l'échantillon. Tout comme les séismes, les EA correspondent à une libération d'énergie élastique dans le milieu rocheux. De par leur origine (notamment l'amorçage, la croissance et la coalescence de microfissures) les EA sont intimement liées à l'endommagement se produisant lors de la déformation d'un échantillon de roche sollicité mécaniquement. L'enregistrement des EA au cours d'un essai mécanique à l'aide de réseaux de transducteurs piézoélectriques (TPZ) constitue une mesure indirecte (enregistrement d'ondes élastiques) et microscopique (car directement associée à la formation des structures responsables de la détérioration progressive du matériau) de l'évolution de l'endommagement durant la déformation.

e) Conclusion

Les propriétés élastiques peuvent être déterminées à partir des courbes contrainte-déformations et notamment à partir des mesures de déformations longitudinales et transversales (cf. chapitre 2). Ces mesures mécaniques indirectes de l'endommagement sont des mesures macroscopiques localisées car elles englobent seulement la partie centrale de l'éprouvette (les jauges de déformation étant le plus souvent placées au centre de l'échantillon). Les mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques sont plus localisées, le long de rais (diamètres et hauteur) qui traversent l'échantillon, et intégratrices de l'ensemble de l'endommagement le long de chaque rai. Elles constituent également une

mesure indirecte macroscopique de l'endommagement. Enfin, l'enregistrement des émissions acoustiques (EA) permet, de par leur origine, une mesure indirecte microscopique de l'évolution de l'endommagement durant un essai mécanique. La combinaison de ces trois types de mesures doit donc permettre une étude « multi-échelle » de l'évolution de l'endommagement durant la déformation des roches. Nous présentons ci-après un condensé des études de l'endommagement des roches effectuées à l'aide de mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques et/ou de l'enregistrement des EA.

1.3 Etude de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques : état de l'art

Nous présentons ici un condensé de l'état de l'art d'étudier l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques, qui, comme son nom l'indique, n'est pas exhaustif.

1.3.1 Activité acoustique durant un essai mécanique

Le comportement mécanique d'une roche soumise à une compression peut être représenté par la courbe contrainte-déformation (figure 1.5). On la découpe alors en quatre parties, chacune correspondant à un processus microscopique particulier :

- la partie 1, ou segment [OA], est caractérisée par une augmentation progressive de la pente de la courbe ce qui correspond à un accroissement de la raideur de l'échantillon. Cette première phase est parfois appelée « phase de serrage » car elle est la manifestation macroscopique de la fermeture des fissures préexistantes sub-orthogonales à la direction de contrainte majeure.
- la région 2 [AB] est la phase linéaire du comportement mécanique de l'éprouvette de roche. Elle résulte de la déformation élastique des grains constitutifs de la roche ainsi que de glissements sur les fissures préexistantes et/ou aux limites de grains.
- la partie 3 [BC] correspond à une diminution de la pente de la courbe pendant l'augmentation de la contrainte et ce jusqu'à atteindre le point C où cette pente s'annule. Dans cette partie, ce sont des changements irréversibles au sein de la roche qui se manifestent. En effet, un déchargement depuis un point P du segment [BC] conduit à une déformation permanente ε_0 à contrainte nulle. Un rechargement [QR] se situe en dessous de la courbe initiale OABC mais finit par la rejoindre (au point R). Cette région peut être

interprétée d'un point de vue microscopique par l'amorçage et la croissance de microfissures.

- enfin la partie 4 [CD] est caractérisée par une pente négative de la courbe contrainte-déformation. Un déchargement [ST] conduit à une déformation permanente importante, un rechargement [TU] rejoint la courbe contrainte-déformation à un niveau de contrainte inférieur à celui du point S. Cette partie est le siège de la naissance de la discontinuité macroscopique dont la croissance conduit à la rupture de l'éprouvette.

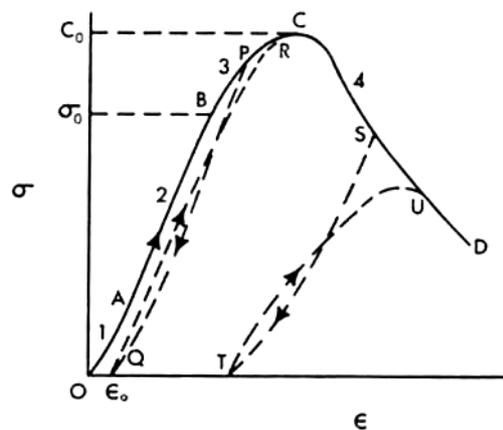


Figure 1.5 : Schéma de la courbe contrainte-déformation d'une roche soumise à une compression, d'après Jaegger et Cook (1979). Les auteurs ont découpé la courbe en 4 phases explicitées dans notre texte.

Les observations expérimentales montrent que la fermeture des fissures préexistantes orientées favorablement (*i.e.* \sim orthogonalement à la contrainte principale maximum), le glissement sur les fissures précédentes, ainsi que le frottement entre les grains, sont associés à une activité acoustique (figure 1.6). Ohnaka et Mogi (1982) montrent que l'activité acoustique se manifeste même avant toute dilatance appréciable. De même, Amitrano (1999), et Jouniaux et al. (2001) observent une activité durant toute la durée de la compression triaxiale d'un granite (figure 1.7). Rappelons que les émissions acoustiques sont principalement engendrées par des processus microscopiques inélastiques (amorçage, croissance et coalescence de microfissures). Une accélération de l'activité acoustique de plusieurs ordres de grandeur (fig. 1.6 et 1.7) est couramment observée dès le début de la dilatance et jusqu'à la rupture macroscopique (Scholz, 1968b, Ohnaka et Mogi, 1982, Lei et al., 1992, Amitrano, 1999, Jouniaux et al., 2001).

Un intérêt particulier est attribué à l'étude de la formation de la discontinuité macroscopique conduisant irrémédiablement à la rupture, *i.e.* de la région du pic de contrainte et la région post-pic de la courbe contrainte-déformation. Cependant, le processus précédant la rupture est qualifié d'instable, brutal et très soudain dans le cas des roches fragiles, il est donc délicat de

le suivre pas à pas. Lockner et al. (1991) proposent de contrôler le chargement via l'activité acoustique. Quand celle-ci devient trop grande, le chargement est inversé. La propagation de la fracture macroscopique peut alors être suivie de façon quasi-statique, mais le chargement n'est alors plus représentatif des conditions que peut subir un volume rocheux à l'intérieur de la croûte terrestre. Lei et al. (2000a) utilisent un système d'acquisition très rapide qui leur permet de suivre un chemin de chargement suivant au mieux les conditions *in situ* c'est-à-dire un chargement constant à partir d'un certain seuil de contrainte.

L'étude des processus qui conduisent à la formation de la fracture macroscopique se base sur des méthodes d'analyse diverses et variées et souvent empruntées au monde de la géophysique. Nous allons maintenant présenter ces différentes méthodes. Nous nous intéressons plus particulièrement aux paramètres qu'elles utilisent ainsi qu'aux résultats expérimentaux associés.

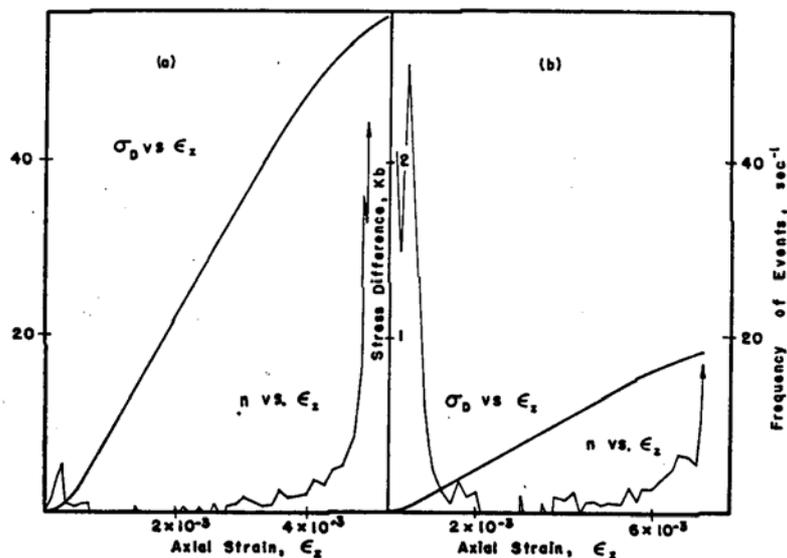


Figure 1.6 : Courbes contrainte-déformations et occurrence des émissions acoustiques obtenues lors de la compression uniaxiale du granite de Westerly (a) et d'un tuf volcanique du Colorado (b), (Scholz, 1968b). La porosité du granite de Westerly et celle du tuf sont respectivement de 0,009 et 0,41. L'activité acoustique observée en tout début d'essai est beaucoup plus forte pour le tuf que pour le granite. Cette forte activité serait due, d'après l'auteur, à l'écrasement de pores.

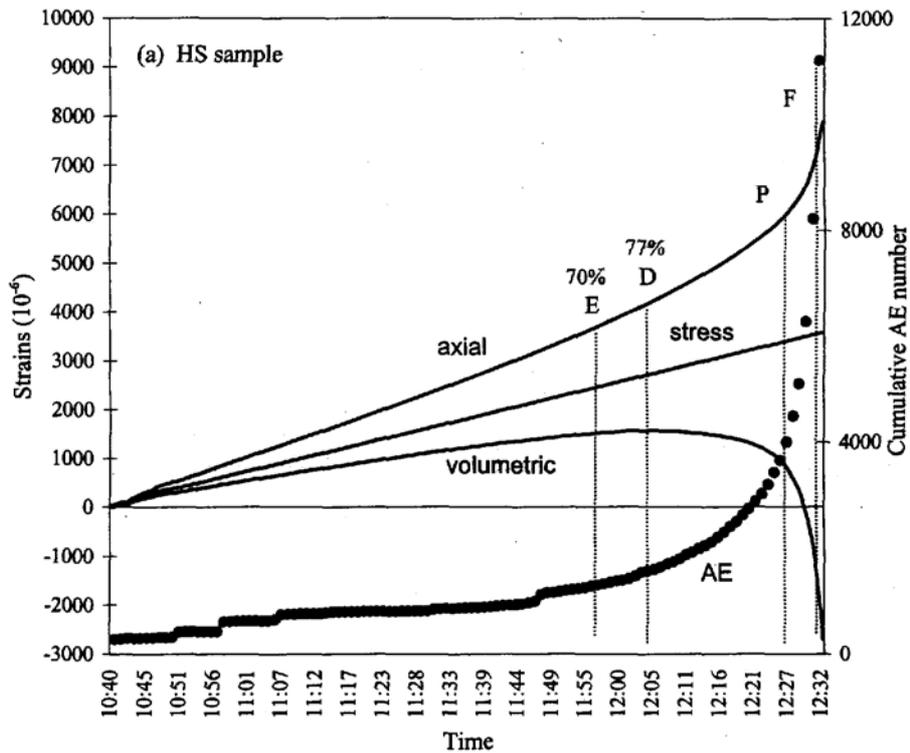


Figure 1.7 : Courbes de l'évolution temporelle, durant un essai en compression triaxiale d'un granite, des contraintes déviatoriques (exprimées en 10^5 Pa sur l'axe des déformations), des déformations axiales et volumiques, et du nombre cumulé d'EA, (Jouniaux et al., 2001).

1.3.2 Méthodes d'analyses des émissions acoustiques et des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques

Nous nous intéressons ici aux diverses analyses des mesures acoustiques et de vitesses rencontrées dans la littérature et qui permettent l'étude des processus qui conduisent à la formation de la fracture macroscopique. Notre but est d'extraire les paramètres acoustiques pertinents de l'endommagement des roches sollicitées mécaniquement. Nous présentons successivement les analyses fréquentielle et énergétique des signaux d'EA, les analyses de vitesse de propagation des ondes, la tomographie et la localisation des hypocentres qui en découlent, les différentes analyses statistiques, enfin l'analyse des mécanismes de source ou mécanismes au foyer. Les paramètres acoustiques qui nous ont paru les plus pertinents sont enfin présentés.

a) Analyse fréquentielle et analyse énergétique

Les signaux d'EA reçus peuvent être caractérisés par leur contenu fréquentiel ainsi que par leur amplitude maximum et leur énergie. Scholz (1968a) distingue deux types de signaux durant la compression uniaxiale d'un échantillon de granite de Westerly (figure 1.8). Le "type 1" est caractérisé par un spectre hautes fréquences (de l'ordre du MHz) alors que le spectre du "type 2" est basses fréquences. L'auteur relie les événements de type 1, beaucoup plus nombreux (de 3 ordres de grandeur) que ceux de type 2, à la nucléation et la propagation de microfissures de la taille des grains (environ 1 mm). Le type 2 résulterait d'un mélange de plusieurs signaux et notamment d'une certaine réponse des transducteurs à la déformation locale de la surface de l'éprouvette.

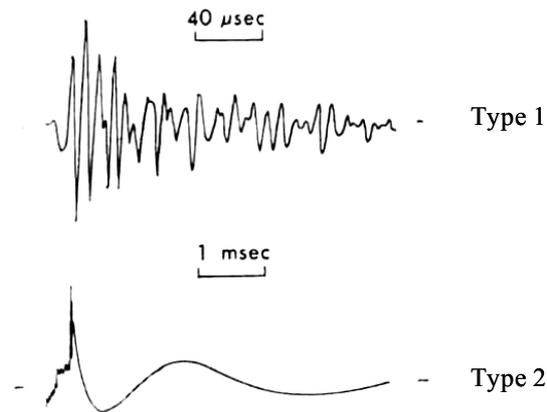


Figure 1.8 - Les deux types (type 1 en haut, type 2 en bas) de signaux observés par Scholz (1968a).

On peut relier la taille des sources *i.e.* les microfissures au contenu fréquentiel des signaux enregistrés. Les petites fissures auront tendance à engendrer des signaux hautes fréquences. Les fissures plus grandes généreront des signaux plutôt basses fréquences. Ohnaka et Mogi (1982) ont étudié les signaux associés aux événements d'EA durant des essais en compression uniaxiale. Ils distinguent trois groupes d'événements. Le premier comporte des signaux basses et hautes fréquences, respectivement 30 kHz et 250 kHz, en proportions égales. Le deuxième groupe d'EA est dominé par les signaux hautes fréquences, le troisième par des signaux basses fréquences. Les auteurs observent un accroissement du nombre d'événements du groupe 3 par rapport à ceux du groupe 2 au voisinage de l'amorçage de la propagation de la fracture macroscopique (pic de contrainte). Ils interprètent ceci par la formation de larges fissures par coalescence de fissures plus petites. Amitrano (1999) observe aussi un glissement des spectres des signaux vers les basses fréquences au cours de l'essai mécanique. L'augmentation du filtrage des hautes fréquences due à l'endommagement est une interprétation possible qui s'accorde bien à celle effectuée par Ohnaka et Mogi précédemment

cités. L'analyse fréquentielle est délicate car il faut tenir compte de l'atténuation par le matériau selon la fréquence.

Par analyse énergétique, on entend ici l'étude de l'énergie du signal. Cette énergie est calculée à l'aide des amplitudes du signal enregistré par chaque voie du réseau de capteurs (TPZ, pour Transducteurs PieZoélectriques) disposés autour de l'éprouvette de roche et pour chaque événement.

$$E = \sum_i A_i^2 \Delta t, \quad (1.26)$$

E est l'énergie du signal échantillonné. A est l'amplitude du signal à chaque pas de temps. Δt est le pas d'échantillonnage. L'analyse de l'énergie des signaux d'EA est peu courante dans la littérature. Zang et al. (1998) observent que les événements les plus énergétiques se produisent au niveau du pic de contrainte lors de la compression uniaxiale d'un granite (figure 1.9). Il a aussi été observé un accroissement brutal de l'énergie lors de la propagation de la fracture macroscopique, notamment en son front (Lockner et al., 1991).

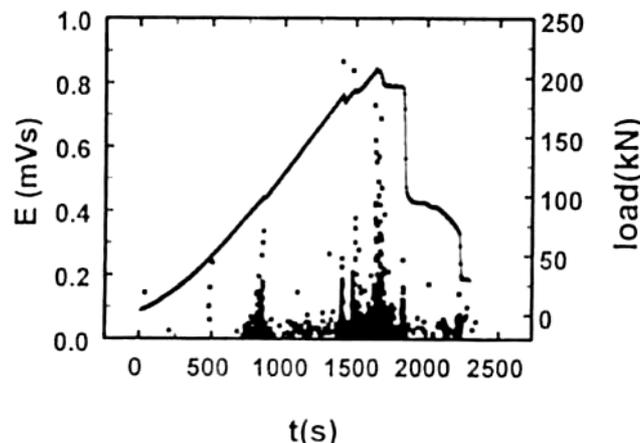


Figure 1.9 : Evolution temporelle de l'énergie des signaux d'EA durant un essai mécanique de compression, (Zang et al., 1998).

L'énergie ainsi calculée permet de hiérarchiser des événements d'EA. Comme pour l'analyse fréquentielle, il est important de tenir compte de l'atténuation des signaux (Weiss, 1997).

b) Analyse des vitesses de propagation, tomographie et localisation

L'analyse des variations de vitesse de propagation des ondes acoustiques constitue un outil d'observation des changements structuraux (fermeture, amorçage, croissance de fissures, etc.) de la roche durant sa sollicitation mécanique. Si le nombre de transducteurs est important, si

le découpage de l'éprouvette par les rais est suffisamment fin, il est envisageable de réaliser des tomogrammes de l'échantillon. Cependant, les réseaux de capteurs autour de l'éprouvette ne sont en général pas assez denses, contraignant la réalisation d'une tomographie seulement planaire. Les mesures de vitesses sont ainsi plus généralement destinées à l'établissement d'un modèle de vitesse nécessaire à la localisation des événements d'EA.

Yukutake (1989) et Chow et al. (1995) s'approchent de la tomographie d'un échantillon cylindrique de roche sous sollicitation mécanique (compression triaxiale pour le premier, compression uniaxiale pour le second). Chow et al. (1995) étudient la variation d'anisotropie du champ de vitesse ("anisotropie de lenteur", la lenteur étant l'inverse de la vitesse) lors de l'essai de compression uniaxiale d'un échantillon de granite à grains grossiers du Lac du Bonnet. Ils corrèlent l'anisotropie initiale à la microfissuration préexistante (les microfissures sont sub-parallèles à l'axe de la carotte). Les lenteurs augmentent plus rapidement pour des rais orthogonaux à l'axe de l'éprouvette (direction de σ_1 , contrainte principale majeure) que pour ceux qui sont parallèles au même axe. D'après les auteurs, ceci s'explique par le développement de microfissures parallèlement à σ_1 et situées dans la partie centrale de l'éprouvette. Le processus d'endommagement serait principalement dû à l'ouverture des microfissures en Mode I (figure 1.10) et à leur coalescence.

Les mesures de vitesses sont aussi utilisées pour la réalisation de modèles de vitesses s'insérant dans des algorithmes de localisation des sources des événements d'EA. Ainsi, la plupart des capteurs du réseau est dédiée aux mesures acoustiques, ce sont des récepteurs, seul un petit nombre d'entre eux fonctionnent en mode émetteur. En général, les mesures de vitesse axiale et radiale sont privilégiées (Sato et al., 1990, Lei et al., 1992, Jouniaux et al., 2001). Zang et al. (2000) observent, une diminution remarquable des vitesses transversales lorsque la fracture macroscopique vient intersecter les rais durant la déformation (figure 1.11)

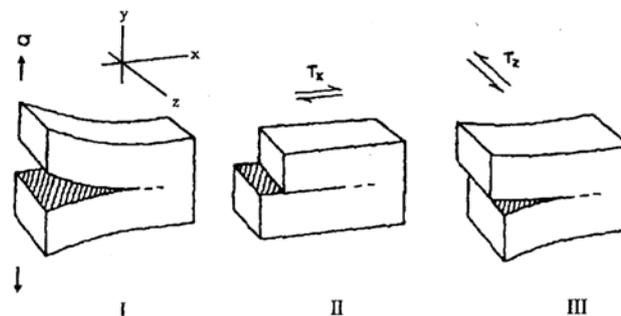


Figure 1.10 : Modes de sollicitations d'une fissure dans un milieu élastique linéaire (Paterson, 1978).

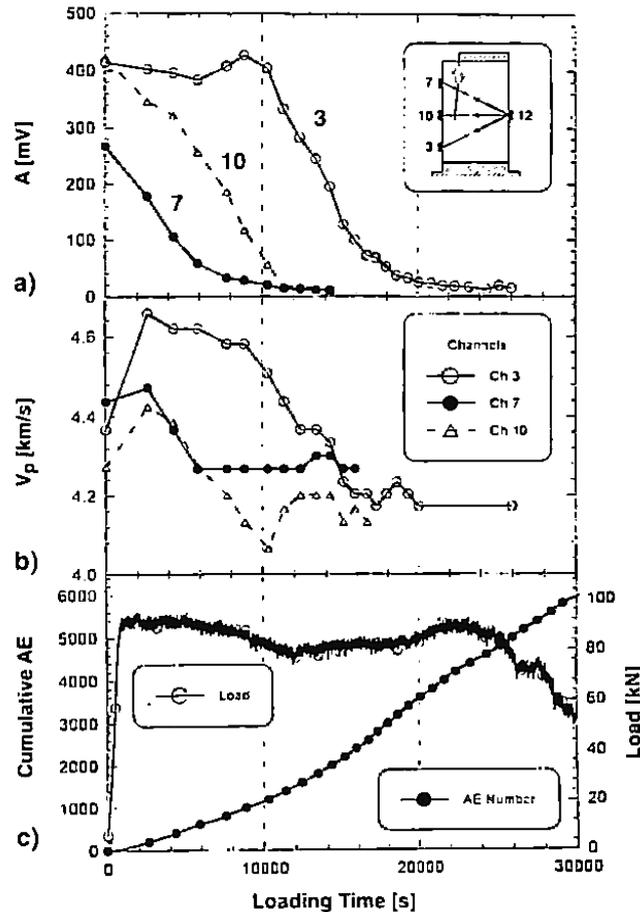


Figure 1.11 : Courbes de l'évolution temporelle de l'amplitude des signaux d'EA (a), des vitesses des ondes P (les rais sont schématisés dans le petit dessin de l'éprouvette), ainsi que du chargement et de l'activité acoustique, pour la compression uniaxiale asymétrique d'un granite, (Zang et al., 2000).

La localisation tridimensionnelle des sources d'émissions acoustiques se base sur les méthodes classiques de localisation des séismes naturels. Qu'elle soit déterminée par des méthodes itératives directes comme celle du Simplex, ou par inversion, la localisation nécessite de connaître les temps d'arrivées des ondes P et/ou des ondes S ainsi que les vitesses de propagation de ces ondes. La nature des modèles de vitesses (homogène ou hétérogène, isotrope ou anisotrope) utilisés dans les algorithmes de localisation n'est généralement pas précisée. L'incertitude de localisation des foyers est estimée par la localisation d'une source d'origine anthropique (émission d'un pulse, source Nielsen, cf. chapitre 2) dont la position est connue ; elle est généralement de l'ordre de 2 à 3 mm lorsque la source est située à l'intérieur du réseau micro-séismique (Lei et al., 1992).

De par l'origine des émissions acoustiques, la localisation des hypocentres des événements permet une visualisation tridimensionnelle de l'évolution spatio-temporelle de

l'endommagement de la roche sollicitée mécaniquement. Ainsi Lockner et al. (1991) suivent la propagation quasi-statique d'une fracture macroscopique dans un échantillon de granite de Westerly. Plus récemment, Jouniaux et al. (2001) ont étudié la formation d'une fracture macroscopique dans deux échantillons de granite du Mayet de Montagne, l'un contient un joint préexistant cicatrisé (JS), l'autre est sain (HS). Ils observent que la résistance à la rupture mesurée pour l'échantillon avec le joint (278 MPa) est plus faible que celle de l'échantillon sans joint (358 MPa). L'échantillon qui comporte un joint préexistant cicatrisé est donc moins résistant qu'un échantillon intact du même matériau. Les événements d'EA dans ce dernier sont distribués de façon plutôt diffuse (figure 1.12, HS), leur distribution spatiale est volumique. En revanche, la distribution des événements dans JS est planaire, les hypocentres se localisant rapidement et principalement sur le joint (figure 1.12, JS). Le joint est une structure de faiblesse à l'intérieur de l'échantillon. Cette hétérogénéité macroscopique est visiblement, un objet privilégié où se localise la déformation inélastique durant l'essai.

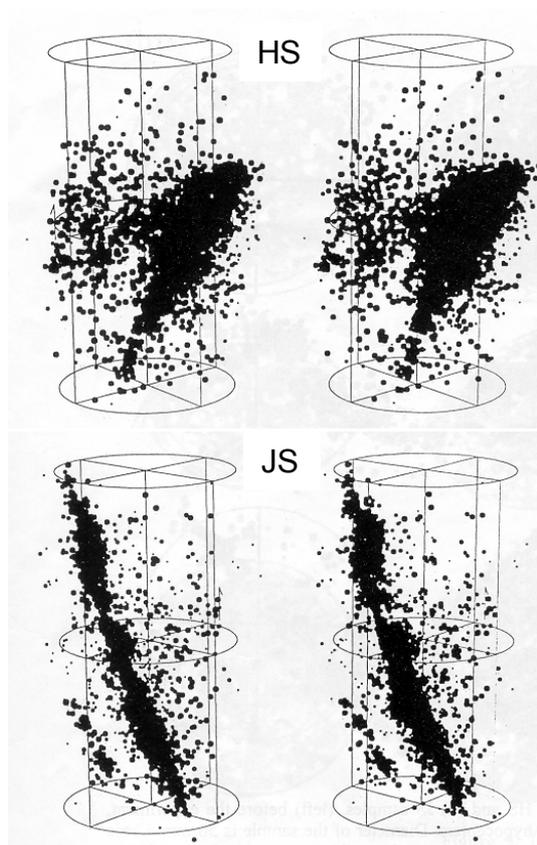


Figure 1.12 : Localisation des hypocentres des événements d'EA (au nombre de 11207 pour HS et 18411 pour JS), d'après Jouniaux et al. (2001). Le joint cicatrisé dans JS (en bas) est un plan incliné de 20° par rapport à la direction de σ_1 .

Si la localisation offre une visualisation indirecte de l'endommagement durant un essai, elle reste cependant qualitative. Un outil quantitatif particulièrement utilisé est l'intégrale de corrélation spatiale qui permet d'identifier la présence éventuelle d'une structure fractale (cf. les analyses statistiques).

c) Analyses statistiques

Le nombre d'événements d'EAs enregistrés durant un essai mécanique est variable, il dépend des capacités du système d'acquisition, de la durée de l'essai, ainsi que du matériau. Cependant, il est, en général, tout de même assez important et autorise des études statistiques de l'activité acoustique liée à la sollicitation mécanique d'une roche. On distingue trois principales relations statistiques qui permettent de caractériser l'activité acoustique d'un milieu rocheux. Ces trois lois, présentées ci-après, ont d'abord été observées pour des séismes (à l'échelle de la croûte terrestre) puis pour les EA au laboratoire. La loi de Gutenberg-Richter qui concerne la taille des séismes, la loi d'Omori qui caractérise le taux d'événements ayant eu lieu après un événement majeur, et la distribution fractale des hypocentres des événements qui permet de quantifier la répartition spatiale des sources. Ces relations statistiques sont toutes des lois de puissance, chacune est caractérisée par un exposant qui lui est propre. Les analyses statistiques des EAs consistent notamment en l'étude des variations des valeurs que peuvent prendre ces exposants durant un essai mécanique.

La loi de Gutenberg-Richter (1954), présentée ci-après, a été déduite des observations empiriques des tremblements de terre, elle exprime la dépendance du nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à M et de la magnitude (M).

$$\text{Log}(N_{\geq M}) = a - b.M, \quad (1.27)$$

avec $N_{\geq M}$ qui est le nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à M , a et b qui sont des constantes, et M la magnitude. Elle traduit notamment le fait que le nombre de séismes est d'autant plus important que la magnitude est faible. En sismologie, b est décrit comme un paramètre caractéristique de la sismicité de la région étudiée. Une loi similaire, a été observée pour l'activité acoustique des roches soumises à une sollicitation mécanique (figure 1.13). Elle met en relation le nombre d'événements et l'amplitude maximum des ondes reçues (Scholz, 1968c) :

$$\text{Log}(N) = a - b.\text{Log}(A), \quad (1.28)$$

N est le nombre d'événements d'amplitude maximum supérieure ou égale à A , a et b qui sont des constantes, et A l'amplitude maximum du signal associé aux événements.

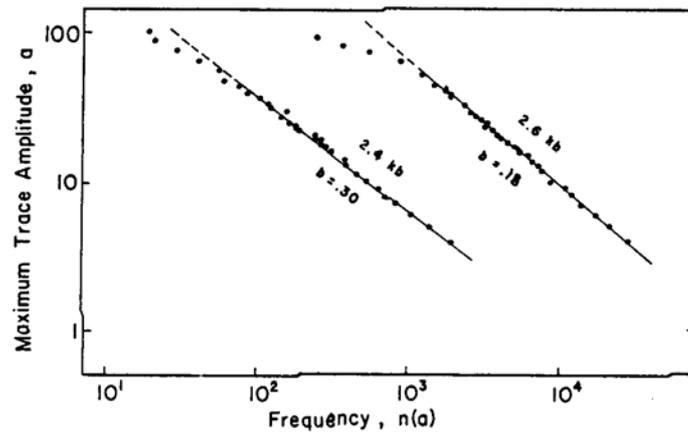


Figure 1.13 : Courbes qui représentent le taux d'événements ($n(a)$) d'amplitude supérieure ou égale à a en fonction de l'amplitude maximum (a) des traces des signaux d'émission acoustique, à deux niveaux de contrainte différents. Elles ont été obtenues par Scholz (1968c) après analyse des émissions acoustiques enregistrées durant la compression uniaxiale d'un granite.

Lors de la compression triaxiale de différentes roches (un gabbro, un granite, un grès, *etc.*) de granulométries différentes, Scholz (1968c) observe une corrélation négative entre b et l'état de contrainte, b diminue quand σ croît ou même quand P_c (la pression de confinement) augmente. Il en déduit que b dépend de l'état de contrainte. La diminution de b lorsque la pression de confinement augmente a certes été observées pour des EA au laboratoire (Scholz, 1968c, Amitrano, 2003) mais aussi pour des séismes en Californie (Mori et Abercrombie, 1997, Gerstenberger, 2001). Zang et al. (1998) observent également la loi de Gutenberg-Richter durant la compression uniaxiale d'un granite. Bien qu'ils ne détectent pas de localisation appréciable de la déformation, la valeur de b décroît avant la rupture de l'échantillon (figure 1.14). Les auteurs précédents qualifient b de précurseurs de la macro-rupture. Lei et al (2000b et c) témoignent eux aussi de la décroissance de b lorsque la rupture finale approche *i.e.* lorsque les hypocentres localisés s'agglutinent et constituent un essaim d'événements. De plus, ils remarquent de multiples fluctuations de la valeur de b qu'ils corrélient à plusieurs petits essais (à l'intérieur de l'amas principal). Ces essais ou "clusters" sont la manifestation visuelle de la localisation de la déformation. Il semble que les variations de b soient plus sensibles à la localisation de la déformation et à la formation progressive de la macro-rupture qu'à l'état de contrainte proprement dit. En effet, Lei et al. (2000a) observent des variations (tableau 1.1) similaires à celles précédemment citées lors d'un essai de fluage mené jusqu'à la rupture sur un échantillon de schiste homogène. Lockner

et al. (1991) trouvent également un minimum à ces variations lorsque la fracture macroscopique s'amorce (figure 1.15).

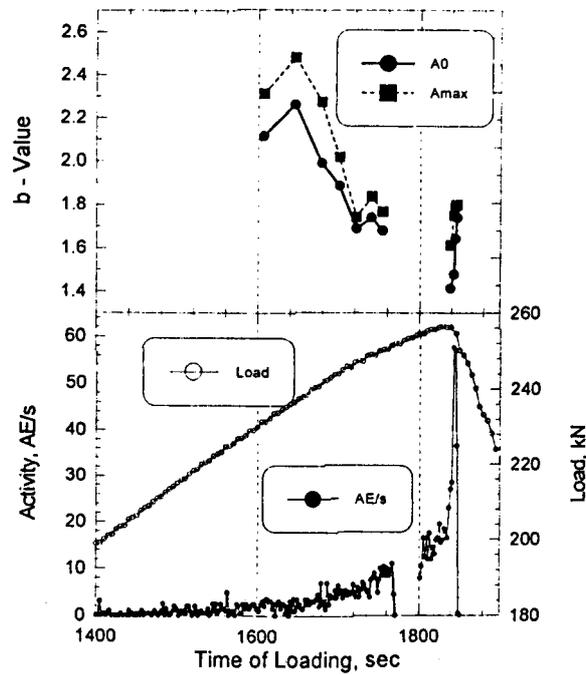


Figure 1.14 : (a) Variations de la valeur de b en fonction du temps calculées à partir de l'amplitude maximum (A_{max}), ou à partir de l'amplitude à la source (A_0). (b) Activité acoustique et le chargement sont représentés eux aussi en fonction du temps. (Zang et al., 1998). Le trou dans les données d'EA entre 1770 s et 1800 s est dû à la sauvegarde de celles-ci.

Stades de la fracturation	Valeurs de b
Avant l'initiation	~ 2
Fracture majeure initiée	$\sim 1,2$
Juste avant la rupture	$\sim 0,5$

Tableau 1.1 : Valeurs de b à des stades déterminants de la fracturation (Lei et al., 2000a).

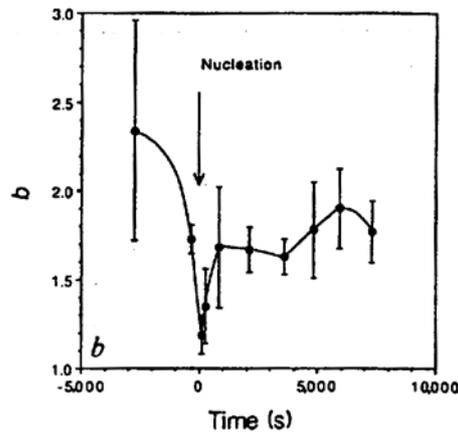


Figure 1.15 : Variations de la valeur de b en fonction du temps (Lockner et al., 1991). b atteint un minimum lors de la naissance de la fracture majeure.

Ces constatations de la diminution de b lors de l’amorçage des fractures macroscopiques, semblent être cohérentes avec les résultats de Ohnaka et Mogi (1982). Ils ont observé une forte augmentation du nombre d’événements de basses fréquences avant la rupture, ils associent ces événements à la formation de grandes fissures par coalescence de fissures plus petites. Si l’on fait l’hypothèse que l’amorçage de grandes fissures produit des événements de forte amplitude, leurs observations signifient que le nombre d’événements de grande amplitude augmente et donc que b diminue lorsque la rupture est imminente.

A noter que les valeurs de b étant calculées à partir des amplitudes des signaux enregistrés, il serait judicieux de prendre en compte les effets de l’atténuation due au matériau, ceci afin de pouvoir éventuellement comparer ces valeurs entre elles pour différentes roches ou pour différentes échelles de rupture (micro-fissuration, séismes naturels).

La loi d’Omori est issue de l’observation empirique des répliques ou “after-shocks” que sont les petits séismes qui suivent un tremblement de terre plus fort. Elle s’exprime par l’équation suivante (d’après Hirata, 1987) :

$$v(t) = \frac{K}{(c+t)^p}, \quad (1.29)$$

où v est le taux de séismes, K , c et p sont des constantes, p étant l’exposant de cette loi. Cette loi traduit une décroissance en loi puissance du taux de séismes après un séisme fort. Hirata (1987) et Rudajev et al. (2000) ont pu observer cette loi pour des événements d’EA durant la compression uniaxiale d’un basalte et d’un granite respectivement. Rudajev et al. (2000) identifient un événement fort par une augmentation brutale du taux d’EA, la séquence des répliques (événements d’EA qui suivent l’événement dit majeur) suit la loi d’Omori. Il est

sans doute préférable d'utiliser les valeurs de l'énergie émise pour distinguer les événements forts des plus faibles.

La dimension fractale a été introduite par Mandelbrot (1975) pour caractériser certains objets notamment naturels qui n'ont pas une dimension entière. On peut mesurer la dimension fractale d'une distribution spatiale de points ou même de celle d'objets complexes comme des réseaux de fissures. Lei et al. (1992) ont étudié la distribution spatiale des événements d'EA durant la compression triaxiale de deux granites qui ne diffèrent que par leur granulométrie (ils possèdent les mêmes compositions chimiques et minéralogiques), le granite d'Oshima est à grains fins (< 2 mm) et le granite d'Inada à grains grossiers (~ 5 mm). Ils ont calculé l'intégrale de corrélation des essais d'événements localisés à différents stades du chargement, afin de quantifier le regroupement spatial des hypocentres. L'intégrale de corrélation s'écrit, d'après Hirata et al. (1987) :

$$C(r) = \frac{2.N_r(R < r)}{N(N-1)}, \quad (1.30)$$

$C(r)$ étant l'intégrale de corrélation, $N_r(R < r)$ le nombre de paires d'hypocentres d'EA dont la distance séparant les deux foyers est inférieure à r , et N le nombre total d'hypocentres analysés. Si cette intégrale de corrélation suit une loi de puissance, l'exposant de cette dernière est appelé dimension de corrélation spatiale de la distribution d'hypocentres (Hirata et al., 1987) :

$$C(r) \propto r^{D_c}, \quad (1.31)$$

D_c est la dimension de corrélation, elle s'apparente à une dimension fractale (D) de la distribution spatiale des hypocentres en question. D_c est la pente de la courbe $\text{Log}(C(r))$ - $\text{Log}(r)$.

Les auteurs précédents remarquent ainsi que le granite d'Oshima (grains grossiers) présente une dimension fractale moyenne ($D \sim 2,2$) inférieure à celle du granite d'Inada (grains fins, $D \sim 2,7$). Ils observent également des variations de dimension fractale avec l'état de contrainte. A de faibles niveaux de contrainte, D semble augmenter avec la contrainte (figure 1.16). Quand le niveau de contrainte avoisine 80 % de la résistance à la compression, D décroît. Lei et al. (1992) attribuent la différence de dimension fractale moyenne entre les deux granites à la différence de taille de grains.

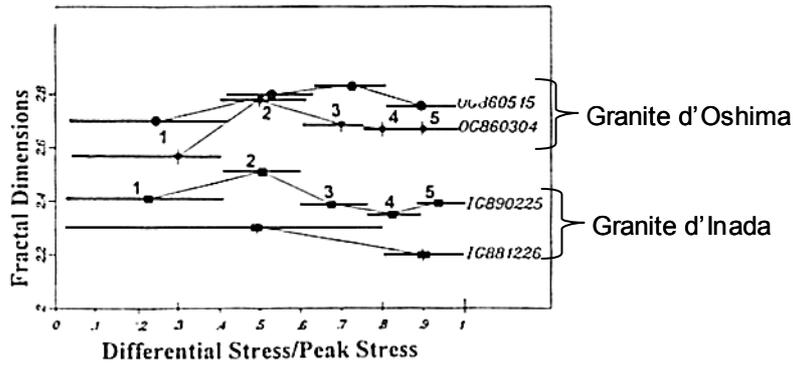


Figure 1.16 : Variations de D en fonction de la contrainte déviatorique normalisée pour 4 échantillons de granite, (Lei et al., 1992). Deux courbes sont associées au granite d'Oshima, deux autres, au granite d'Inada.

Zang et al. (1998) déterminent aussi la dimension fractale des distributions spatiales des hypocentres qu'ils ont pu localiser durant les compressions uniaxiales d'un granite. Ils observent une diminution de la dimension fractale syn- et post- pic, elle atteint $\sim 1,5$ (figure 1.17).

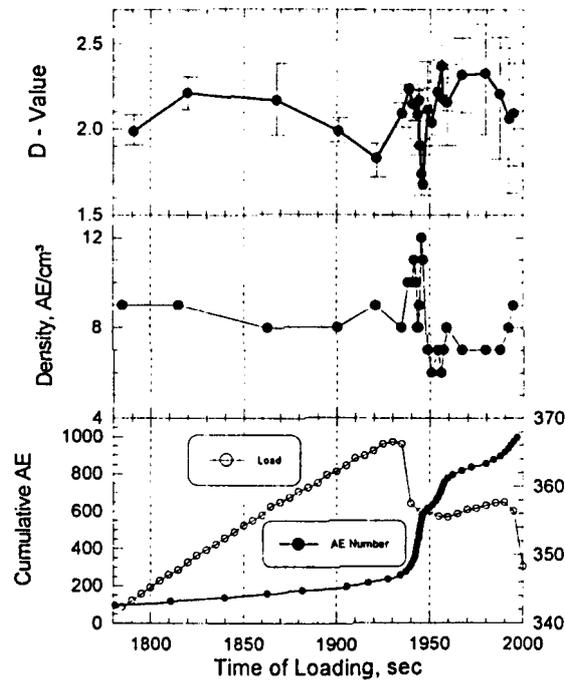


Figure 1.17 : Evolution temporelle de la dimension fractale de la distribution spatiale des hypocentres (a), de la densité d'événements acoustiques (b), du nombre cumulé d'EAs et du chargement durant la compression uniaxiale d'un granite (c), (Zang et al., 1998).

La dimension fractale de la distribution spatiale des hypocentres d'EA apparaît comme une mesure du degré de localisation de la déformation car elle quantifie la dimension de l'objet support des sources de l'ensemble des événements. Les variations de D sont interprétées comme des changements de dimension des distributions des microfissures durant le processus d'endommagement de la roche sollicitée mécaniquement. D varie de 3 pour un essaim de sources homogène dans l'espace, à 0 pour un essaim concentré en un seul point. Lei et al. (1992) distinguent trois phases à l'intérieur de ce processus, la première englobe tous les événements dus aux défauts préexistants (fissures, pores), la deuxième voit l'amorçage diffus de nouvelles microfissures (la densité des microfissures augmente), D croît alors sensiblement, la troisième phase est la naissance des fractures macroscopiques, une diminution de D lui est associée. D constituerait une quantification du passage d'un endommagement diffus ($D \sim 3$, distribution spatiale volumique des événements d'EA) à un endommagement localisé sur une discontinuité macroscopique planaire ($D \sim 2$).

d) Mécanismes des sources

Il est possible de déterminer des mécanismes au foyer pour des événements d'émissions acoustiques enregistrés en laboratoire. Pour cela, on doit connaître le signe du premier mouvement des ondes P à chaque micro-station (chaque TPZ, figure 1.18), ainsi que les coordonnées de l'hypocentre de l'événement en question. Le nombre de capteurs doit être suffisant pour que la couverture de la sphère focale soit optimum et que le mécanisme puisse ainsi être déterminé sans ambiguïté.

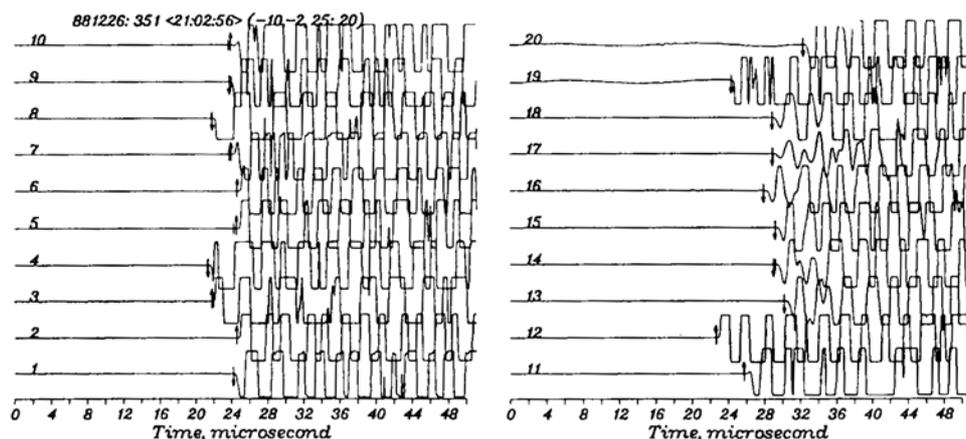


Figure 1.18 : Formes d'onde enregistrées par Lei et al. (1992) et détermination du premier mouvement de l'onde P. Le sens de la flèche indique s'il s'agit d'un mouvement de compression ou de dilatation.

Rappelons que les émissions acoustiques sont principalement produites par l'amorçage, la croissance et la coalescence de microfissures au sein du milieu rocheux lorsque celui-ci est

sollicité mécaniquement (Lockner, 1993). Des observations de laboratoire ont conduit à proposer différents mécanismes-sources. Parmi ceux-ci, on observe notamment l'écrasement d'aspérités à l'intérieur de fissure et/ou la fermeture de fissures préexistantes. Si de tels mécanismes sont bien les causes des émissions acoustiques, on devrait s'attendre à des mécanismes de sources (mécanismes au foyer) différents de ceux communément rencontrés en sismologie, les géophysiciens ne se basant que sur des mécanismes en cisaillement (majoritaires en milieux naturels) et l'hypothèse du « double-couple » (Lay et Wallace, 1995). En effet, Lei et al. (2000a) distinguent quatre types différents de mécanismes au foyer dont un seul (Type S) s'accorde avec l'hypothèse du double-couple (figure 1.19).

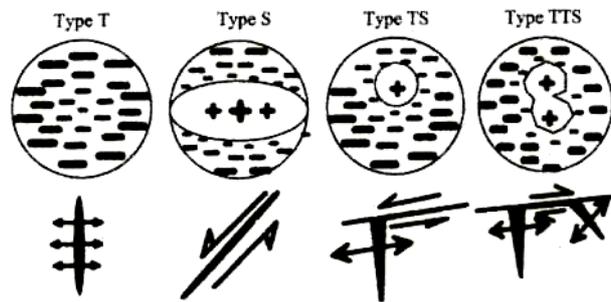


Figure 1.19 : Schéma tiré de Lei et al. (2000a) qui présente quatre types de mécanismes au foyer obtenus après analyse des données acoustiques issues de l'essai de compression triaxiale d'un schiste, ainsi que les propositions correspondantes de mécanismes de micro-rupture. Le mécanisme de type T est un mécanisme de dilatation à la source (une fissure extensive), le type S est un mécanisme cisailant (l'hypothèse du double-couple est probable), le mécanisme de type TS est un mélange de premiers mouvements en dilatation et en compression, idem pour le type TTS, l'hypothèse du double-couple n'est plus vérifiée.

Au cours de leur étude de la rupture fragile d'un granite, Zang et al. (1998, 2000) déterminent des mécanismes au foyer. Puisqu'ils disposent d'un nombre relativement réduit de capteurs autour de leur échantillon (huit transducteurs récepteurs), ils définissent un paramètre de polarité nommé "pol" (Equation (1.32)) qui permet selon sa valeur d'estimer des mécanismes au foyer "composites".

$$pol = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k sign(A_i^i) \quad (1.32)$$

k est le nombre de capteurs utilisés dans la localisation de l'événement en question, A_i^i est l'amplitude du premier mouvement au $i^{\text{ème}}$ capteur.

- Si $-\frac{1}{4} \leq pol \leq \frac{1}{4}$, le mécanisme est de type S, le cisaillement est majoritaire.

- Si $-1 \leq pol \leq -\frac{1}{4}$, le mécanisme est de type T, les premiers mouvements compressifs dominant, on parle de mécanisme de dilatation.
- Si $\frac{1}{4} \leq pol < 1$, le mécanisme est de type C, les premiers mouvements en dilatation dominant, on parle de mécanisme de compression. De tels mécanismes pourraient être apparentés à la fermeture de fissures préexistantes.

Zang et al. (1998) expérimentent ce procédé sur un échantillon de résine où l'amorçage de « wing cracks » (fissures en extension) est provoqué. Ils n'observent, sur leur réseau de 8 capteurs, que des premiers mouvements de dilatation. Au cours de la compression des échantillons de granite, les auteurs précédents distinguent trois types de mécanismes composites. Les mécanismes de types S sont majoritaires (70 %), les mécanismes de type C sont les moins nombreux (10 %), enfin ceux de type T ont un poids intermédiaire (20%). Ces trois mécanismes se manifestent à l'intérieur d'une zone de localisation de l'endommagement, c'est-à-dire une région où se concentrent les événements d'émission acoustique. Les auteurs parlent d'une "fracture process zone" ou FPZ qui serait la zone d'amorçage et de propagation de la fracture macroscopique. Lockner et al. (1991) avaient auparavant évoqué cette "process zone" comme la région de forte activité acoustique où naissait et se propageait la fracture macroscopique. Lors de l'essai de compression triaxiale sur un granite, Satoh et al. (1990) déterminent, grâce à 20 capteurs répartis tout autour de l'échantillon, des mécanismes de sources d'EA localisées à l'intérieur de "cluster" ou amas d'événements correspondant à la zone d'amorçage de la future fracture macroscopique. Ils distinguent des mécanismes en dilatation (premiers mouvements compressifs pour tous les capteurs), des mécanismes dits "en quadrants", et des mécanismes qui comportent des premiers mouvements en compression dominants et des mouvements en dilatation minoritaires se concentrant dans une zone précise de la sphère focale (\equiv type TS de la figure 1.19). Les auteurs précédents observent que ce sont surtout les mécanismes de type quadrant, i.e. de cisaillement, qui deviennent majoritaires au fur et à mesure que la déformation irréversible s'accroît. Par suite de la détermination de mécanismes au foyer de types T, S, et TS (figure 1.19), ainsi que de l'analyse de leur distribution spatio-temporelle durant la compression triaxiale de granites, Lei et al. (1992) proposent l'interprétation illustrée par la figure 1.20 ci-après. Ils présentent un processus d'endommagement subdivisé en trois phases successives.

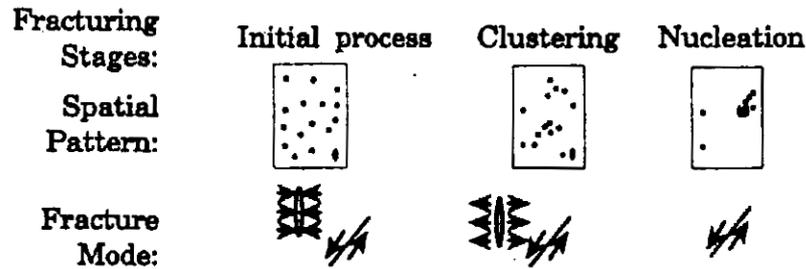


Figure 1.20 : Les différentes phases du processus d'endommagement selon Lei et al. (1992). Aux faibles niveaux de contrainte correspond un processus dit initial qui comprend une activité acoustique spatialement diffuse avec des mécanismes de fermeture de fissures et de glissements sur des fissures préexistantes ou aux limites des grains constitutifs. La phase suivante intermédiaire consiste en plusieurs regroupements (« clustering ») d'événements d'EA, les mécanismes à l'origine des EAs sont l'ouverture de fissures en Mode I et le cisaillement. Enfin la dernière phase est celle de la nucléation de la future fracture majeure, les mécanismes au foyers prédominants sont de type S.

Plus récemment, Lei et al. (2000a) ont proposé quatre types de mécanismes au foyer (figure 1.19) associés à des événements de la “process zone”. Ils distinguent cependant deux régions dans cette zone d'amorçage. L'une comprend la fracture macroscopique déjà formée et constitue ce qu'ils appellent la “damage zone”, l'autre, c'est-à-dire la “process zone” proprement dite, est située au front de cette fracture. La “damage zone” est le siège de mécanismes de types S, TS et TTS. Leur “process zone” est dominée par des mécanismes de type T qui sont interprétés par l'ouverture de fissures en Mode I. Cette observation, d'une fracture où le cisaillement domine et qui voit en son front l'ouverture de fissures en extension, rejoint les hypothèses faites par Reches et Lockner (1994) dans leur modélisation de la propagation de réseaux de microfissures pour une roche fragile. Selon ces derniers la fracture qui conduit à la rupture, naît et se propage par l'interaction de microfissures extensives (Mode I). Lorsque les fissures extensives sont suffisamment proches les unes des autres, elles interagissent (coalescence) pour former une zone où les mécanismes de cisaillement dominent (figure 1.21).

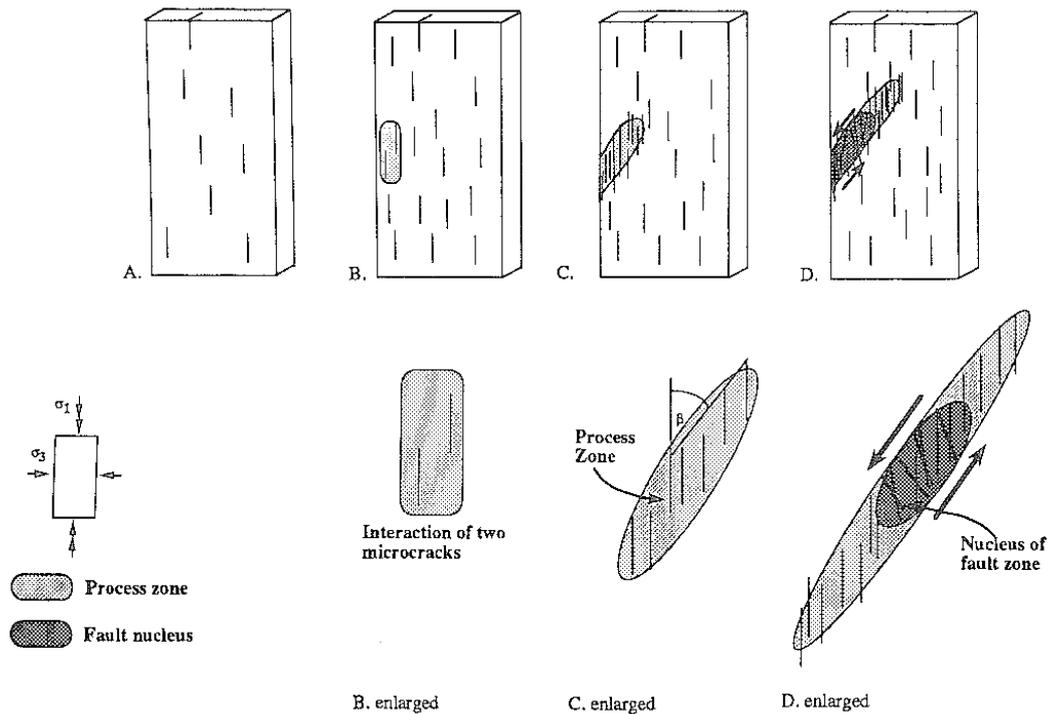


Figure 1.21 : Schéma du modèle d'endommagement d'un solide parallélépipédique fragile sous sollicitation biaxiale proposé par Reches et Lockner (1994).

1.3.3 Les paramètres acoustiques pertinents

Nous avons vu que l'analyse des mesures acoustiques et des mesures de vitesses effectuées au cours d'essais mécaniques a recours à des paramètres variés. Nous présentons ci-après ceux qui nous paraissent être les plus pertinents dans l'étude de l'endommagement des roches sollicitées mécaniquement :

- le contenu fréquentiel, un décalage du spectre vers les basses fréquences peut être dû à la coalescence de microfissures pour en former des plus grandes ou à un filtrage induit par l'augmentation de la densité de fissures ;
- l'énergie des signaux d'EA. La détermination de l'énergie du signal de chaque événement d'EA devrait permettre d'établir une hiérarchisation temporelle des événements ;
- les variations de vitesse de propagation des ondes sont à relier à la densité du réseau de microfissures se développant à l'intérieur de l'échantillon ;
- la dimension fractale (D) ou la dimension de corrélation (D_C) de la distribution spatiale des hypocentres quantifie le passage d'un endommagement diffus à un stade où celui-ci se localise de façon planaire (souvent le futur plan de la fracture macroscopique) ;
- b , l'exposant de la loi de puissance de Gutenberg-Richter. Il semble être un paramètre précurseur de la rupture macroscopique ;

- enfin, les premiers mouvements des signaux d'EA enregistrés et les mécanismes au foyer qui sont déduits. Les mécanismes au foyer et leur distribution spatio-temporelle durant l'essai mécanique sont porteurs de nombreuses informations concernant les processus de micro-rupture et d'endommagement.

1.4 Conclusion

Nous avons vu ici que l'endommagement des roches sollicitées mécaniquement était un phénomène irréversible progressif de détérioration de ses propriétés physiques dû à l'amorçage, la croissance et la coalescence de microfissures. Les mesures de l'endommagement peuvent être directes ou indirectes et microscopiques ou macroscopiques. Les observations directes microscopiques (sous lames minces) nécessitent de découper l'échantillon de roche, elles sont donc destructives et ne permettent pas de suivre l'évolution de l'endommagement d'un même échantillon au cours d'un essai mécanique. Les observations directes macroscopiques, par description du faciès de la fracture macroscopique après la rupture de l'échantillon, ne renseignent que sur le stade final d'endommagement, il est alors délicat de connaître les mécanismes de sa naissance. Les mesures indirectes de l'endommagement permettent de suivre son évolution au cours d'un essai mécanique, elles ne sont pas destructives. Elles consistent en des mesures de propriétés physiques (résistivité, perméabilité, propriétés élastiques, vitesses de propagation des ondes élastiques, EA) qui sont affectées au moins en partie par l'évolution de l'endommagement. Parmi ces mesures indirectes nous avons distingué des mesures macroscopiques (échelle de l'échantillon), mesures de modules élastiques, mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques, mesures d'atténuation, *etc.*, et des mesures microscopiques (échelle des grains constitutifs du matériau), par enregistrement des émissions acoustiques (EA). En effet l'enregistrement des EA constitue de par leur origine (amorçage, ouverture, fermeture, croissance, coalescence de microfissures) une mesure microscopique indirecte et non-destructives des processus d'endommagement durant la déformation d'un échantillon de roche. Les paramètres issus de leur analyse sont nombreux et variés. Ils ont été largement étudiés ainsi que l'évolution des vitesses de propagation des ondes élastiques. Nous avons pu voir que la corrélation qualitative de ces différents paramètres avec le déroulement mécanique de l'essai a déjà été explorée par de nombreux auteurs. Cependant, à notre connaissance, la corrélation entre les variations des paramètres macroscopiques mécaniques (modules élastiques) et celles des paramètres acoustiques (activité acoustique, contenu fréquentiel des EA, énergie des signaux d'EA, vitesses de propagation des ondes élastiques, atténuation), est rarement étudiée. Nous proposons donc de réaliser une étude « micro-macro » de l'endommagement par trois types de mesures réalisées durant un essai mécanique :

- des mesures directes de modules élastiques avant la rupture macroscopique,
- des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques et d'atténuation selon plusieurs rais,
- des mesures d'activité acoustique (événements d'EA enregistrés et numérisés).

Le chapitre suivant présente les procédures expérimentales qui ont été mises en oeuvre afin de réaliser des essais mécaniques en compression uniaxiale et en compression triaxiale qui comportent ces trois types de mesures.

2

Procédures expérimentales

2.1 Introduction

Cette thèse s'inscrit dans la problématique des effondrements miniers se produisant dans les mines de fer de Lorraine. La réalisation d'essais mécaniques au laboratoire constitue une approche à petite échelle de l'analyse des processus d'endommagement des matériaux des ouvrages miniers (piliers, toits et murs des galeries). Nous avons vu que l'évolution de l'état d'endommagement d'un échantillon soumis à un chargement peut être déterminée de manière indirecte par des mesures des propriétés élastiques (modules élastiques), de la vitesse de propagation des ondes élastiques, ou encore par des mesures de l'activité acoustique. Ces différentes variables représentatives de l'évolution de l'endommagement d'un échantillon de roche sollicité mécaniquement sont rarement mesurées simultanément. La démarche expérimentale développée ici, vise à permettre la mesure simultanée de variables acoustiques (EA, vitesse de propagation des ondes élastiques) et de variables mécaniques (modules élastiques) durant des essais mécaniques en compression uniaxiale et en compression triaxiale (axisymétrique ou de révolution). Les essais en compression uniaxiale sont un préambule nécessaire à la réalisation d'essais en compression triaxiale plus complexes à mettre en oeuvre. Ces derniers reproduisent de manière plus fidèle l'état de contrainte subi par les roches au centre d'un pilier de mine.

Nous présenterons, au cours de ce chapitre, en premier lieu, les roches étudiées ainsi que la préparation des échantillons. En second lieu nous développerons la nature des mesures ainsi que l'instrumentation nécessaire à leur bonne réalisation. Nous décrirons ensuite la mise en oeuvre proprement dite des essais en compression uniaxiale et des essais en compression triaxiale ainsi que leur déroulement. Enfin, nous conclurons et évoquerons des perspectives expérimentales.

2.2 Roches étudiées et préparation des échantillons

Les échantillons ont été prélevés dans des carottes issues de sondages sub-horizontaux pratiqués au sein du site pilote de Tressange (Audun-le-Tiche, Moselle), dans le pilier G de la couche grise et dans le pilier G de la couche brune. Des échantillons proviennent également de sondages sub-verticaux traversant la couche intercalaire séparant la couche grise de la couche brune (figure 2.1).

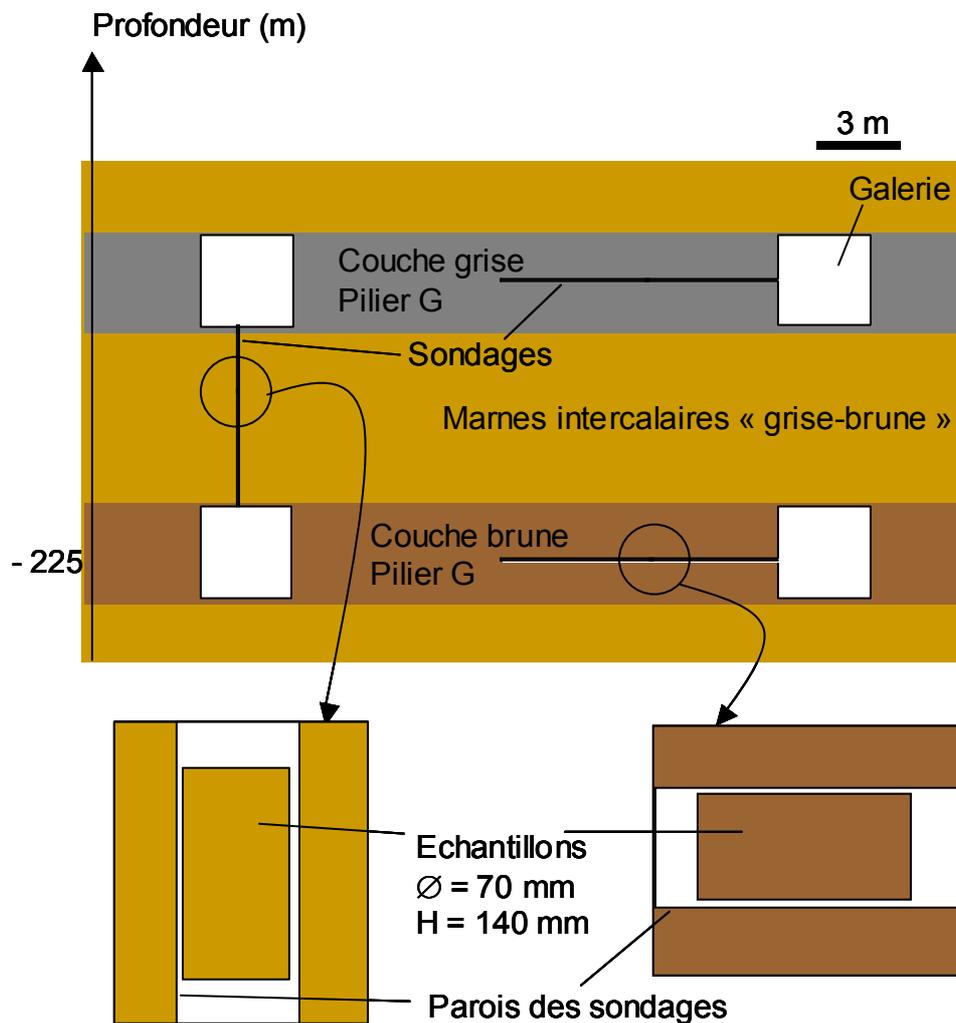


Figure 2.1 : Vue verticale schématisée de la zone de prélèvement des échantillons dans le stot de Tressange (Audun-le-Tiche, Moselle).

Les grains constitutifs majoritaires du minerai de fer sont des oolites ferrugineuses (Grgic, 2001, figure 2.2), les plus grosses peuvent être millimétriques. Ces oolites sont liées par un

ciment constitué de calcite, de sidérite et de phyllosilicate en proportions variées. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques lithologiques ainsi que la porosité des échantillons utilisés dans cette étude selon leur provenance (couche grise, intercalaire grise-brune, couche brune).

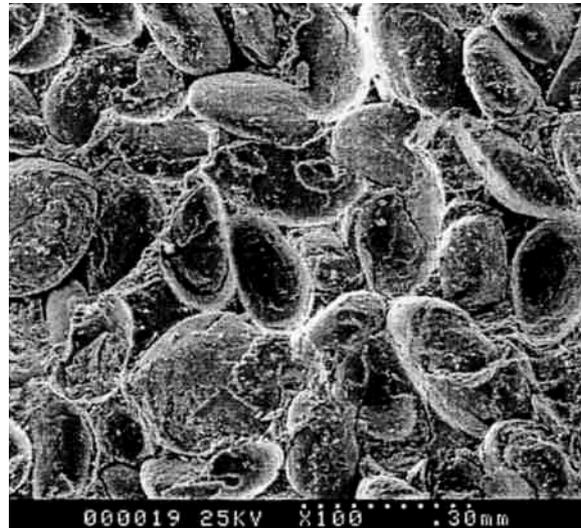


Figure 2.2 : Observation au MEB par Grgic (2001) d'un échantillon de minerais de fer de la couche grise. Les oolites ferrugineuses sont liées par un ciment.

Provenance des échantillons	Lithologie	Porosité
Couche grise	ferri-arénite oolitique	30 %
Intercalaire grise-brune	arénite ferrifère	15 %
	micro-arénite	
	arénite argileuse	
Couche brune	ferriarénite oolitique présence de poches centimétriques d'argile noire	25-30 %

Tableau 2.1 : Lithologie et porosité des roches étudiées.

Les échantillons peuvent être orientés par rapport aux structures géologiques. Les stratifications de la couche grise et de l'intercalaire grise-brune apparaissent continues et régulièrement inclinées d'environ 3° vers le SE, contrairement à celle de la couche brune qui a subi un remaniement. Ainsi, les échantillons provenant de sondages sub-horizontaux dans la couche grise ont leur génératrice sub-parallèle aux joints de stratifications. Les échantillons

issus des sondages sub-verticaux de l'intercalaire grise-brune présentent une génératrice à tendance orthogonale aux joints de stratification. Par contre, on ne peut décrire une orientation particulière des échantillons prélevés dans les sondages sub-horizontaux au sein de la couche brune, les joints de stratification paraissant particulièrement irréguliers et discontinus.

Il a été choisi de prélever des échantillons de 70 mm de diamètre (un maximum compte tenu du diamètre des sondages carottés) pour la réalisation des essais en compression uniaxiale, et de 50 mm de diamètre pour la réalisation des essais en compression triaxiale axisymétrique où les dimensions de la cellule de confinement ne permettent pas d'accueillir des diamètres d'échantillons plus grands. Le dressage des faces de l'échantillon est pratiqué avec minutie afin que les faces soient bien lisses, parallèles entre elles et orthogonales à l'axe du cylindre de roche (tolérance maximale de $\pm 0,25^\circ$). Ceci doit permettre d'écarter tout problème d'alignement avec le système de chargement qui pourrait être la source d'hétérogénéités du champ de contrainte. Tous les échantillons ont un élancement de 2. Il semble que cela soit un minimum nécessaire pour obtenir un champ de contrainte homogène dans la partie centrale de l'échantillon (Brady et Brown, 1985).

Notre choix d'éprouvettes de grand diamètre permet de considérer raisonnablement l'éprouvette de roche comme homogène par rapport aux grains. En effet, les oolites les plus grosses peuvent être millimétriques, des fragments de coquille infra-centimétriques peuvent également être présents au sein d'un même échantillon, le rapport entre la taille des plus gros grains et le diamètre de l'échantillon est de l'ordre de 0,2 pour des échantillons de 50 mm de diamètre. De plus, un tel échantillon offre une surface latérale suffisamment importante pour accueillir l'instrumentation mécanique ainsi qu'une instrumentation acoustique souvent envahissante. Enfin, la courbure de sa surface latérale (d'autant plus faible que le diamètre est grand) permet un meilleur couplage des capteurs acoustiques qui ont une surface active plane.

2.3 Trois types de mesure

Il s'agit ici de décrire les intrumentations utilisées, afin de mesurer les variables pertinentes choisies pour suivre l'état de l'endommagement d'un échantillon de roche soumis à un chargement. Le déroulement de ce dernier sera précisé lors de la description de la mise en oeuvre proprement dite des essais et de leur déroulement.

2.3.1 Instrumentation et mesures mécaniques

L'instrumentation consiste en des jauges d'extensométrie, des capteurs de déplacement, des capteurs de pression permettant de mesurer la pression appliquée à l'intérieure de la cellule de confinement (à 0,07 MPa près) ainsi que la force appliquée par la presse (déterminée avec une précision de l'ordre de 1 %). Celle-ci est asservie *via* une pompe hydraulique contrôlée par un micro-ordinateur permettant en outre l'acquisition des pressions et des déplacements.

Afin de suivre l'évolution des déformations de l'éprouvette au cours du chargement, des jauges extensométriques (circuits résistifs) d'une longueur de 20 mm sont collées sur la surface latérale du cylindre de roche. Leur positionnement est préalablement dessiné sur la surface de l'éprouvette. Selon le diamètre des échantillons, 50 ou 70 mm, 4 ou 6 jauges sont positionnées dans la partie centrale de l'échantillon, en alternance selon les directions longitudinale et transversale (figure 2.3). La surface centrale de l'éprouvette qui accueille les jauges est préalablement résinée afin d'obtenir un couplage optimum malgré la porosité élevée des roches étudiées (figure 2.3).

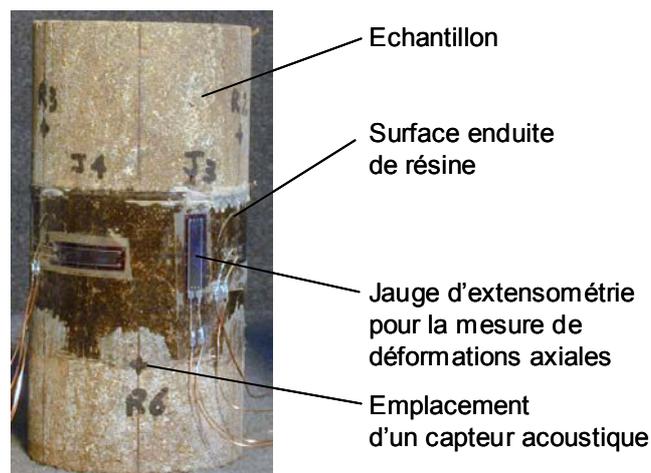


Figure 2.3 : Instrumentation mécanique d'une éprouvette. Surface de collage résinée et positionnement des jauges extensométriques.

Les jauges extensométriques permettent de mesurer très précisément (à 5 $\mu\text{m}/\text{m}$ près) des micro-déformations locales dans la partie centrale de l'éprouvette. Cependant elles ne permettent pas le suivi du comportement post-pic, c'est-à-dire lorsque la déformation se localise sur un ou plusieurs plan(s) de fracture macroscopique(s). En effet, elles sont généralement décollées ou détruites (figure 2.4).

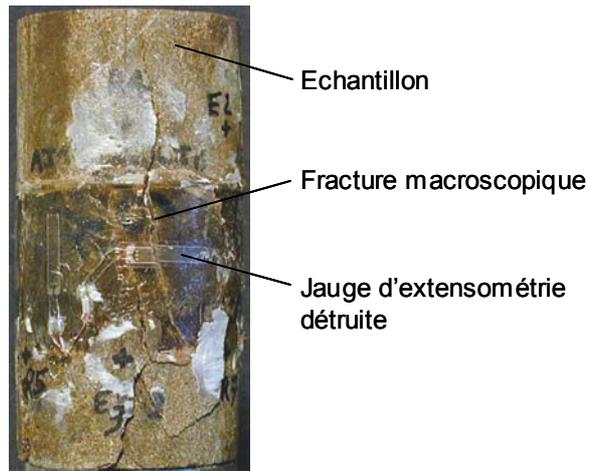


Figure 2.4 : Jauge décollée par le plan de fracture macroscopique.

Afin de suivre le comportement post-pic, on utilise les déplacements mesurés entre le plateau inférieur et le plateau supérieur de la presse (figure 2.5) par deux capteurs LVDT (pour *Low Variable Displacements Transducer*). L'inconvénient de ces mesures, hormis le fait qu'elle ne soient réalisées que selon la direction axiale, est qu'elles ne concernent pas seulement l'échantillon mais également les cales en acier ainsi que toutes les interfaces associées à cet ensemble (figure 2.5). Notons que les mesures de déplacement permettent notamment de piloter la presse lorsque l'on souhaite réaliser des phases de relaxation.

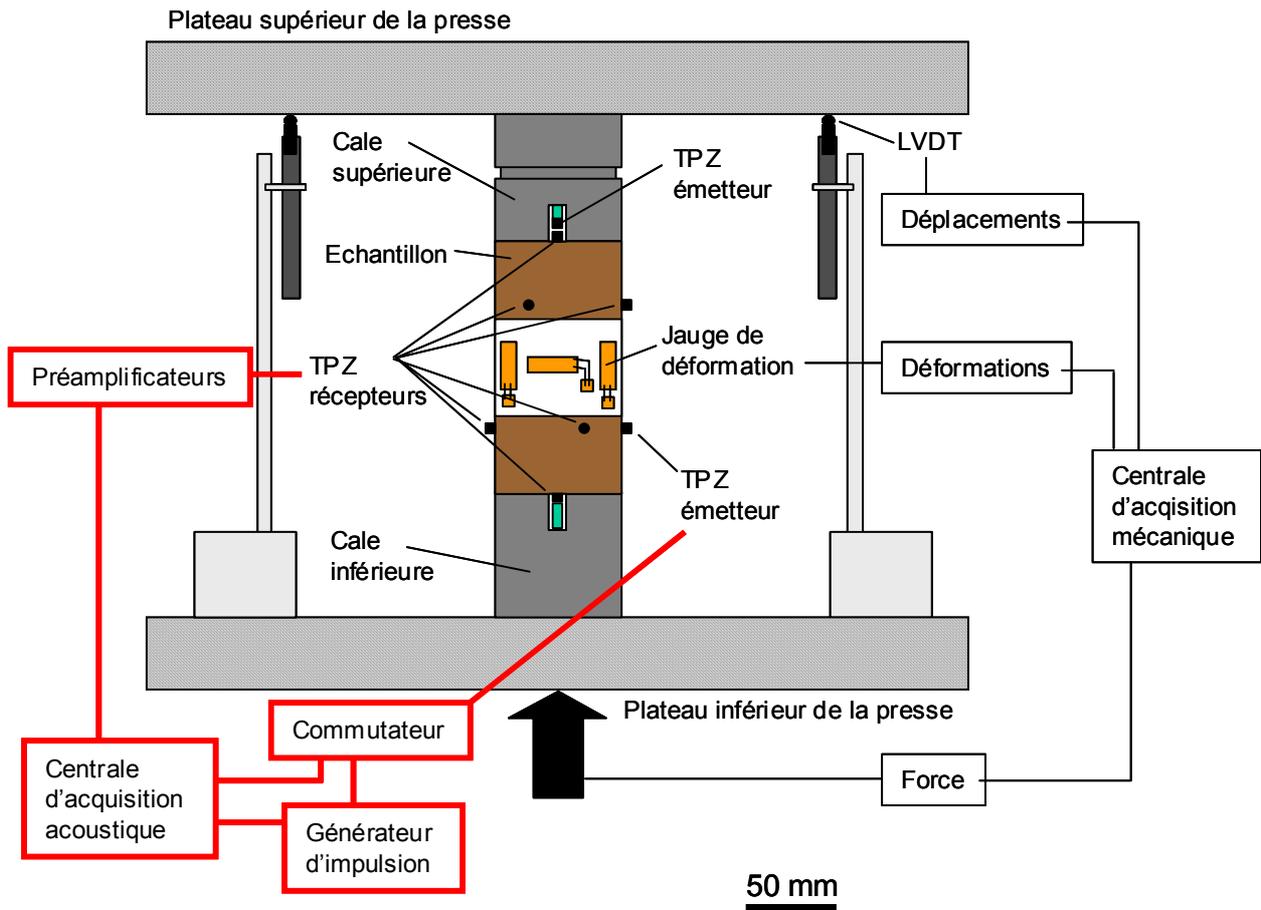


Figure 2.5 : Instrumentation d'un essai de compression uniaxiale. Les chaînes d'acquisition des mesures acoustiques et des vitesses de propagation des ondes sont cerclées de rouge.

2.3.2 Instrumentation et mesures acoustiques

Les mesures acoustiques consistent en l'enregistrement des événements d'EA. Des capteurs piézoélectriques sont utilisés à cet effet. La piézoélectricité (du grec « piézo » signifiant presser), découverte par les frères Jacques et Pierre Curie en 1880, est un phénomène qui existe dans les cristaux (par exemple le quartz), les céramiques (Titanate de Baryum, Titanate zirconates de Plomb) et dans certains polymères (PolyVinylidène DiFluoré, PVDF) anisotropes. Des charges électriques apparaissent à la surface de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. Inversement, si un champ électrique est appliqué sur ces matériaux, ceux-ci se déforment. La figure 2.6 illustre l'origine de l'effet piézoélectrique dans le quartz.

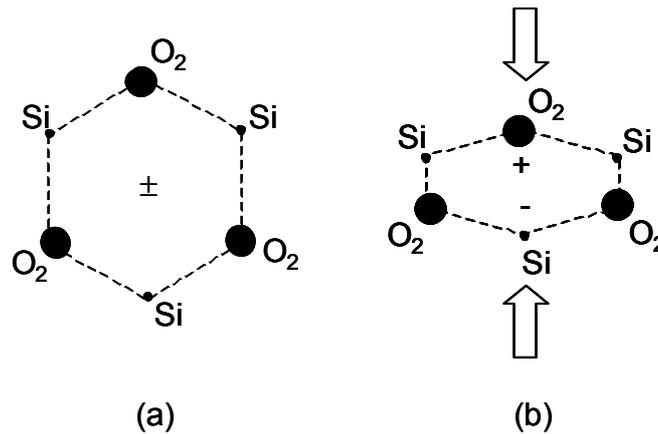


Figure 2.6 : Schématisation de l'origine de la piézoélectricité du cristal de Quartz. En (a), les barycentres des charges positives et des charges négatives sont confondus, le cristal ne présente pas de charges sur sa surface. En (b) les barycentres deviennent distincts car le cristal se déforme sous l'action d'une contrainte mécanique, des dipôles électriques orientés selon la direction de celle-ci apparaissent. D'après Placko et al. (2000).

Les capteurs d'EA, communément nommés PZT (*Pb Zirconium Titanate* qui est l'élément piézoélectrique le plus couramment employé ; nous utiliserons plutôt l'abréviation TPZ pour Transducteur PieZoélectrique), utilisés au cours de cette étude sont des céramiques piézoélectriques blindées au sens électromagnétique (Nano 30, Physical Acoustic Corporation, PAC). Ces TPZ cylindriques (\varnothing de 8 mm, hauteur de 8 mm) ont une bande-passante fréquentielle comprise entre 125 et 750 kHz (données du fabricant), leur fréquence de résonance est de l'ordre de 300 kHz. Nous avons utilisé des capteurs à câblage axial et à câblage latéral. Ces capteurs (figure 2.7), dont la céramique présente une anisotropie longitudinale, ne sont sensibles qu'aux ondes de compression (ondes P).

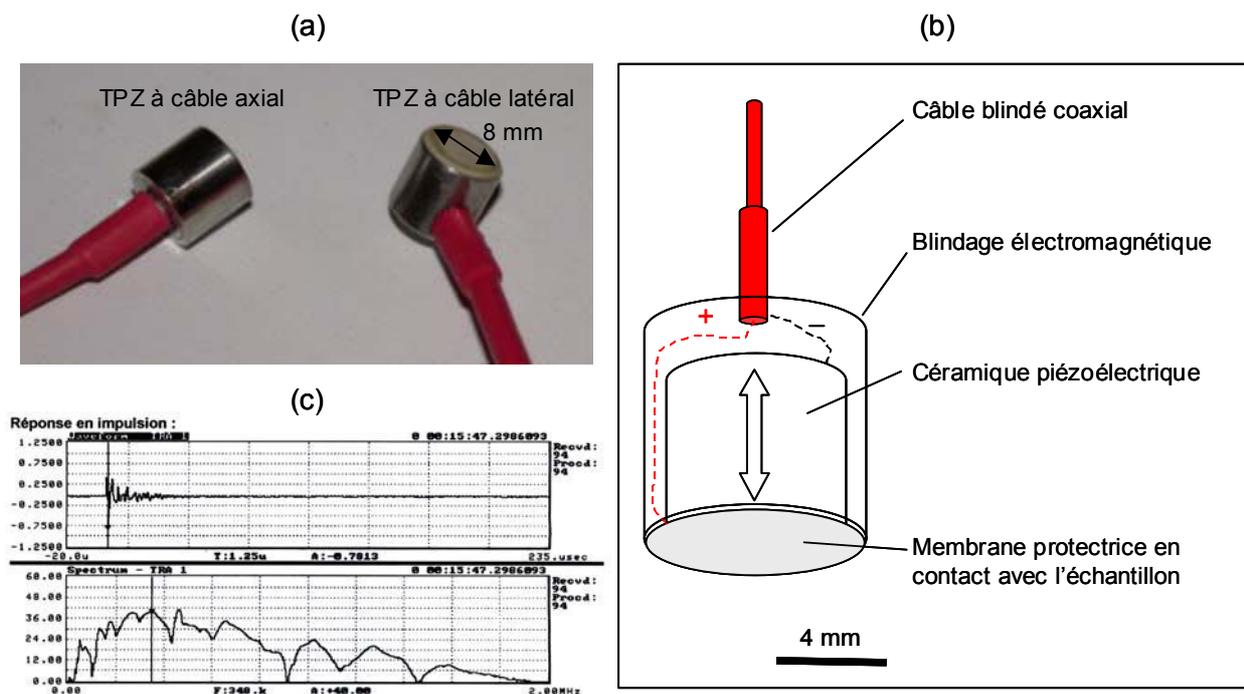


Figure 2.7 : (a) TPZ à câblage axial et à câblage latéral. (b) Schématisation d'un capteur d'EA. Le blindage électromagnétique et le câblage coaxial (blindé) permettent d'isoler l'élément actif du capteur (la céramique piézoélectrique) des bruits ambiants (nombreux et variés dans un laboratoire de mécanique des roches). (c) Spectre de la réponse d'un capteur Nano 30 à une source Nielsen (PAC).

Contrairement aux sismomètres utilisés à des échelles bien plus grandes qui, selon leur mécanisme, enregistrent un déplacement, une vitesse, une accélération, la grandeur enregistrée par un TPZ excité par une émission acoustique serait une combinaison des trois précédemment citées (Shibata, 1984, Glaser et Nelson, 1991). Nous nous préoccupons donc uniquement du signal électrique délivré par le capteur excité. Ce signal constitue la mesure acoustique.

La qualité des enregistrement des événements d'EA dépend fortement de la transmission des signaux entre le capteur et l'échantillon, c'est-à-dire de l'interface. L'amplitude des signaux peut en effet être très affectée par cet interface. Afin d'améliorer la transmission des signaux, on utilise généralement un couplant qui remplit les vides et les irrégularités de la surface de l'échantillon au contact avec la face active du TPZ. D'une part, il doit permettre un couplage mécanique, il doit maintenir fermement le capteur en place au contact de l'échantillon, d'autre part il ne doit pas, ou très peu, empêcher la propagation d'onde. Les résines époxy sont souvent employées (ISRM, 1978, Ohnaka et Mogi, 1982, Scholz, 1968a, b et c), d'autres comme le salicylate de phényle, la feuille de plomb, l'huile, la graisse de silicone, l'eau, ou encore le miel, sont aussi couramment utilisés (Couvreur et Thimus, 1996).

Compte tenu de nos contraintes expérimentales de mise en oeuvre aisée tout en ayant un couplage efficace, nous avons choisi d'utiliser deux couplants, le salicylate de phényle ($C_{13}H_{10}O_3$) pour les TPZ accueillis par la surface latérale de l'échantillon cylindrique lors des essais en compression uniaxiale, et la graisse de silicone pour ceux qui sont placés aux extrémités du cylindre. Ces deux couplants acoustiques sont conseillés par l'ISRM (1978). Le premier, lorsqu'il est pur, est un solide poudreux cristallin blanchâtre à température ambiante, il se liquéfie lorsqu'il est chauffé. Il peut être alors appliqué en petite quantité au pinceau sur la surface de l'échantillon à l'endroit où l'on souhaite positionner un capteur. On ne dispose que de cinq à dix secondes avant sa recristallisation qui maintient le capteur sur l'éprouvette de roche. Si ce type de fixation résiste bien à l'arrachement, il n'en est pas de même pour la résistance au cisaillement, il est alors nécessaire de répandre le salicylate de phényle liquide également sur le pourtour du capteur. Les capteurs positionnés aux extrémités de l'éprouvette sont situés dans les cales en acier inox (figure 2.8) placées de part et d'autre de l'échantillon (figure 2.5), celles-ci ont été usinées afin d'accueillir les TPZ à câblage latéral (figure 2.7a). Les capteurs sont maintenus au contact de la roche par la force exercée par la cale *via* une pièce de silastène (composé siliconé élastique constituant essentiel des jaquettes). Une noisette de graisse de silicone étalée entre le capteur et l'échantillon permet le couplage acoustique. De nombreux essais infructueux lors de l'utilisation du Salicylate de Phényle pour le couplage des TPZ situés dans les cales, nous ont conduit à employer la graisse de silicone.

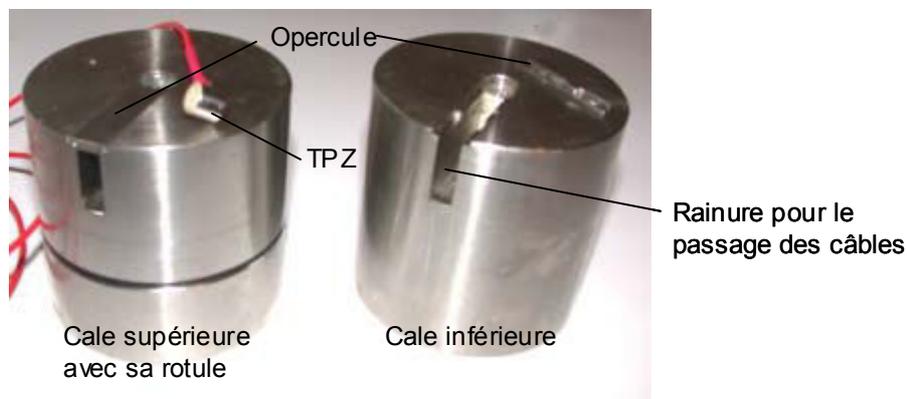


Figure 2.8 : Cales ($\varnothing=70$ mm, $h=70$ mm) en acier inox usinées afin d'accueillir les TPZ couplés aux extrémités de l'échantillon dans le cadre des essais en compression uniaxiale. Une rainure operculée permet le passage des câbles. Nous n'avons pas observé de poinçonnage des surfaces de l'éprouvette dès lors que l'opercule était bien en place malgré le trou central qui laisse le capteur poindre.

Lors des essais en compression triaxiale seule la graisse de silicone a été utilisée. Nous détaillerons la mise en place, bien particulière, des TPZ en préambule de la description d'un essai triaxial.

Les signaux électriques générés sont amplifiés par des préamplificateurs externes de 40 dB (PAC 1220A), puis numérisés par un système d'acquisition (Hyperion, Engeneering Seismology Group, ESG Canada) et enregistrés sur le disque dur d'un micro-ordinateur (figure 2.5). La carte analogique/digitale permet de numériser les signaux sur un nombre maximum de 16 voies avec une fréquence d'échantillonnage (f_e) maximale de 10 MHz et une résolution en amplitude de 14 bits sur un intervalle en amplitude de $\pm 2,5$ V, et ce pour chacune des voies. La fréquence d'échantillonnage élevée satisfait la condition de Shannon où elle se doit d'être supérieure ou égale au double de la fréquence maximum (f_m) des signaux analogiques :

$$f_e \geq 2.f_m \quad (2.1)$$

En effet, la borne supérieure de la bande-passante des TPZ utilisés est inférieure à 1 MHz. Un seuil de déclenchement (en mV) est défini par l'utilisateur (une valeur typique étant 3 à 4 fois le niveau de bruit, soit dans notre cas 50 mV). Si le signal dépasse ce seuil, l'événement numérisé, *i.e.* le signal qui suit le déclenchement ainsi que celui qui le précède sur un certain nombre de points, est sauvegardé sur disque dur. Le taux maximum d'enregistrement d'événements d'EA déterminé empiriquement est de 5 événements par seconde sur 16 voies soit 80 traces enregistrées par seconde. Le comptage des coups d'émissions acoustiques (nombre de dépassement de seuil de déclenchement par le signal) est réalisé de manière quasi-continue. Ainsi, un même événement d'EA peut être à l'origine de plusieurs coups.

2.3.3 Instrumentation, mesures de vitesse de propagation des ondes élastiques, mesures d'atténuation

Les capteurs d'EA décrits précédemment sont également utilisés comme émetteurs pour déterminer la vitesse de propagation des ondes P (V_p). Un générateur (PAC 5072PR) envoie une impulsion négative d'une amplitude maximale de -360 V, le temps de montée étant inférieur à 10 ns. Les formes d'ondes reçues *via* les TPZ récepteurs sont sommées et enregistrées. La génération des impulsions est déclenchée par l'expérimentateur depuis le micro-ordinateur, la mesure de V_p peut donc être réalisée à des instants bien précis au cours de l'essai mécanique. Un commutateur (*SwitchBox*, ESG), branché entre le générateur d'impulsion et les TPZ émetteurs, permet d'émettre successivement sur un nombre maximum de 8 voies. Un déclenchement peut ainsi englober 8 mesures de vitesse de propagation selon 8 rais différents. L'impulsion de forte énergie induit un bruit électromagnétique qui parcourt le système d'acquisition acoustique et qui se manifeste par une impulsion, un artefact, sur les

traces des signaux enregistrés par les TPZ récepteurs. Cet artefact heureux indique de manière précise le temps d'émission de l'onde source (t_0). La vitesse de propagation des ondes P est déduite de la distance séparant l'émetteur du récepteur (d_{ER}) et du temps de trajet ($t_P - t_0$) de l'onde émise :

$$V_P = \frac{d_{ER}}{t_P - t_0}, \quad (2.2)$$

t_P étant le temps d'arrivée de l'onde au TPZ récepteur. La vitesse de propagation des ondes P est déterminée selon des diamètres et selon la hauteur de l'échantillon. Le TPZ émetteur est ainsi bien en face du TPZ récepteur lors de la mesure de vitesse selon un diamètre donné. Les phénomènes d'interférence (la longueur d'onde des signaux émis est de l'ordre de la taille des capteurs) qui seraient dus à une incidence oblique du front d'onde arrivant au récepteur sont ainsi évités (figure 2.9). Ces phénomènes affectent à la fois la réponse en amplitude et en fréquence du capteur. Les travaux de Pettitt (1998) montrent une décroissance en amplitude d'environ 75 % entre une onde à incidence normale (figure 2.9a) et une onde à incidence de 80° par rapport à cette normale (tests de capteurs acoustiques Panametrics v103 d'un diamètre de 12,7 mm ayant une bande-passante fréquentielle comprise entre 100 et 1300 kHz). L'amplitude du signal reçu étant le reflet de l'atténuation, il importe que sa mesure ne soit pas entachée par ces phénomènes. Dans la mesure où nous n'avons pas quantifié leurs effets sur les capteurs utilisés dans nos travaux, nous considérerons uniquement les vitesses de propagation et les amplitudes associées mesurées le long de diamètres ou de la hauteur de l'échantillon cylindrique. Notons que durant ces mesures, aucun événements d'EA ne peut être enregistré.

Des mesures de vitesse pratiquées selon des rais axiaux sur un même échantillon, nous ont permis d'estimer que l'utilisation de couplants différents (graisse de silicone, salicylate de phényle) n'entraîne pas de variations de vitesse de propagation notables. Cependant cette différence peut avoir une influence sur l'amplitude des signaux reçus, qui semble être 5 à 6 % plus faible pour un capteur couplé à l'aide de silicone que pour un capteur couplé par le Salicylate de Phényle.

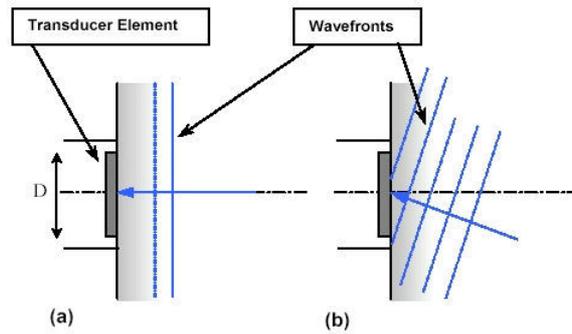


Figure 2.9 : Schéma d'onde incidente normale (a) et d'onde à incidence oblique (b), (Pettitt 1998).

2.4 Mise en oeuvre et déroulement des essais mécaniques

Le conditionnement préalable, en milieu saturé d'eau de site (figure 2.10) ou en milieu sec, des éprouvettes de roche dépend finalement beaucoup de la durée d'instrumentation qui peut fortement varier selon le type d'essai (en compression uniaxiale ou en compression triaxiale) et le nombre de capteurs acoustiques utilisés. Pour certains essais en compression uniaxiale réalisés avec un réseau de 11 TPZ, la mise en place relativement rapide (environ 15 minutes) permet d'escompter une désaturation relativement faible avant le début de la sollicitation mécanique. Une fois le réseau en place, une jaquette en silastène moulée aux dimensions de l'éprouvette et perforée limite la désaturation durant l'essai. En revanche, en ce qui concerne les derniers essais en compression uniaxiale, où l'instrumentation des éprouvettes qui compte 18 capteurs acoustiques est beaucoup plus longue (au moins 30 minutes), l'échantillon est sec en surface (à l'air ambiant). Les essais en compression triaxiale nécessitent une mise en place bien particulière de l'instrumentation acoustique, leur préparation pouvant durer une semaine, nous n'avons pas pu saturer l'échantillon d'eau.

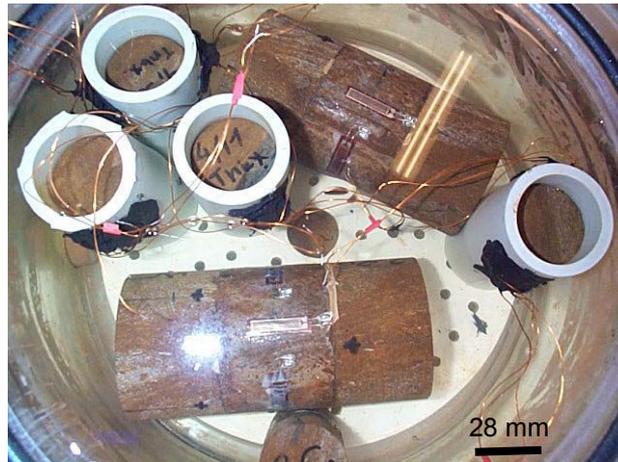


Figure 2.10 : Conditionnement d'échantillons de ferri-arénite dans de l'eau de site.

2.4.1 Préparation des essais en compression uniaxiale

Deux réseaux de capteurs acoustiques ont été établis afin de réaliser des mesures de l'activité acoustique ainsi que des mesures de vitesse de propagation des ondes P durant un essai mécanique en compression uniaxiale. Le premier (figure 2.11) comprend 11 TPZ couplés à l'échantillon, 8 d'entre eux sont des récepteurs et 3 des émetteurs. Ces capteurs sont répartis sur la surface de l'échantillon de manière à avoir une couverture équilibrée du volume compte tenu de la présence des jauges de déformation dans la partie centrale de l'échantillon. La vitesse de propagation des ondes P est mesurée suivant 3 rais, l'un axial (E1R8), les deux autres transversaux (E2R2 et E3R6). Nous nommons ce réseau MAV11 (pour « Mesures Acoustiques et de Vitesses avec un réseau de 11 TPZ »).

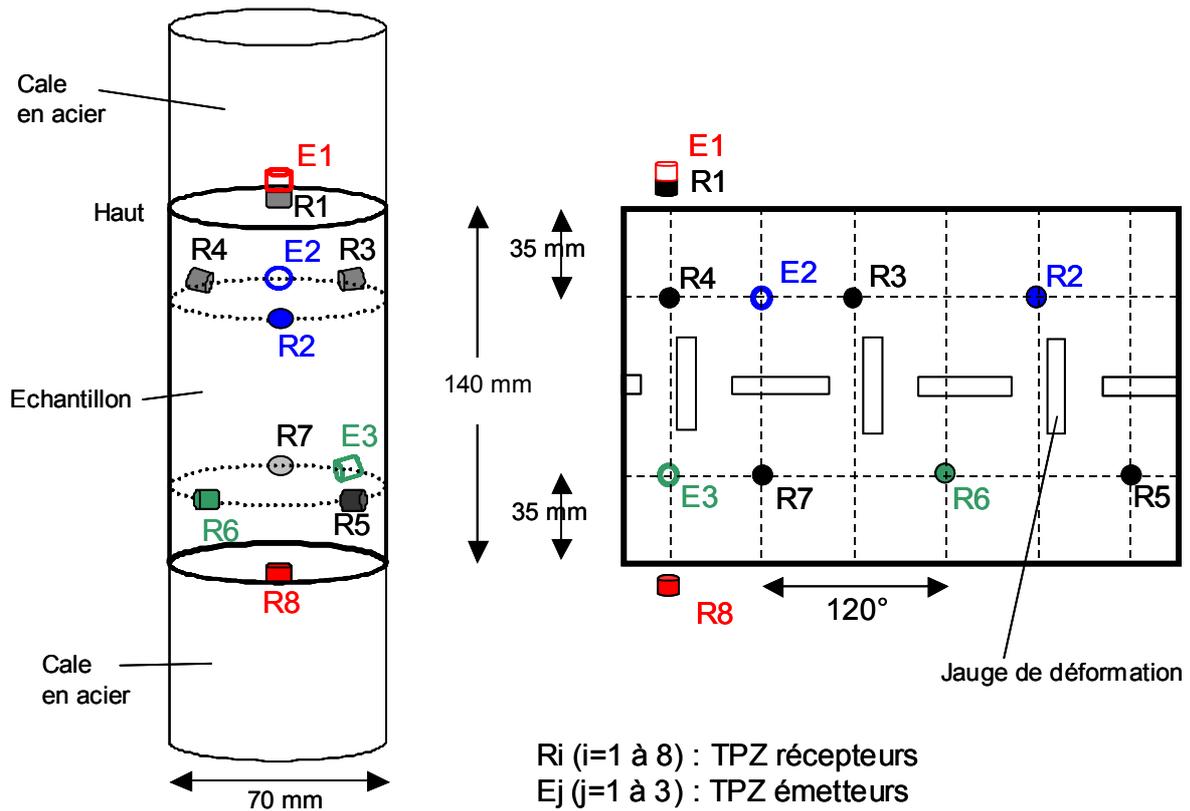


Figure 2.11 : Schémas du réseau MAV11.

Le second réseau (figure 2.12) a pu être mis en oeuvre lors de l'élargissement du nombre de voies de la carte d'acquisition, de 8 à 16 voies), ainsi que du nombre de TPZ à disposition. Il comprend 18 TPZ, dont 3 sont dédiés à l'émission selon le rai axial E1R15 et les rais transversaux E2R2 et E3R10, les 15 capteurs restants sont des récepteurs. Ce réseau est nommé MAV18.

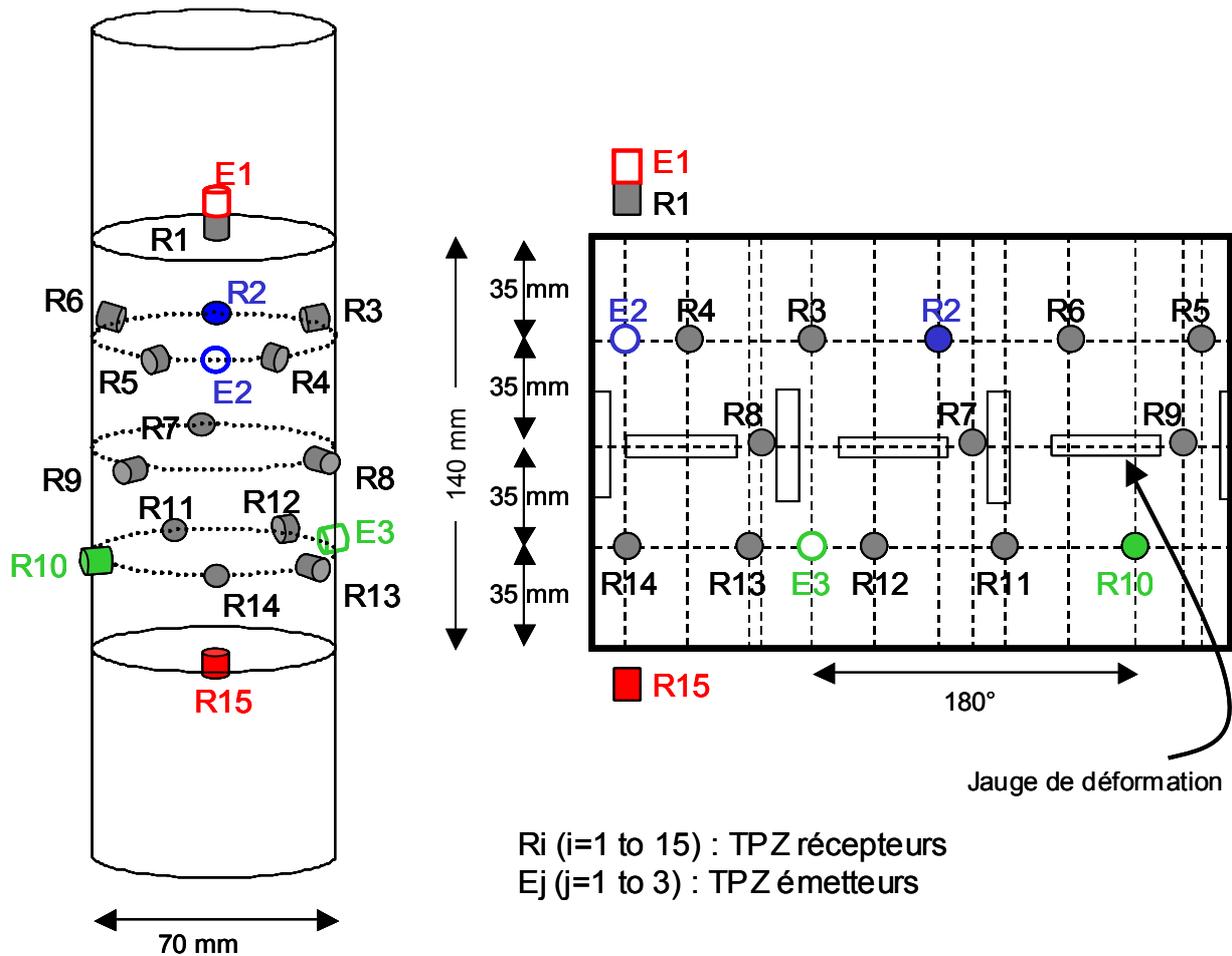


Figure 2.12 : Schémas du réseau MAV18.

Les essais MAV11 ont été réalisés sur des échantillons saturés d'eau. Les jauges d'extensométrie collées puis câblées sur les échantillons ont été préalablement badigeonnées de silicone afin de garantir l'étanchéité. Les TPZ sont ensuite rapidement collés sur la surface latérale de l'éprouvette à l'aide de Salicylate de Phényle, puis l'échantillon est habillé d'une jaquette de silastène préalablement perforée (figure 2.13). Les TPZ situés aux extrémités sont placés dans les cales en acier et leur surface active est enduite de graisse de silicone. Les essais MAV18 ont été réalisés sur des échantillons secs (air ambiant).

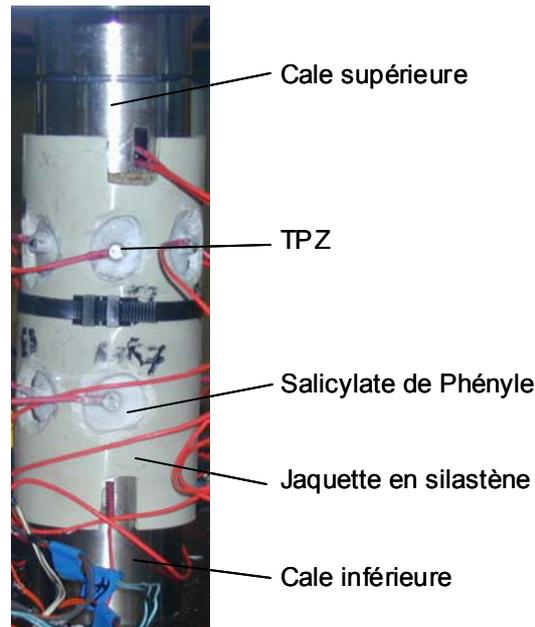


Figure 2.13 : Echantillon instrumenté et habillé de sa jaquette (essais mécaniques MAV11).

L'échantillon placé entre les deux cales est ensuite positionné au centre du plateau inférieur de la presse. Le contact entre le plateau supérieur de la presse et la cale supérieure est établi. La rotule de ce plateau ainsi que celle de la cale permettent un bon ajustement des éléments. Les jauges de déformation sont testées. Une précharge (0,2 à 0,5 kN) est appliquée afin d'avoir un contact homogène entre les faces de l'échantillon et les cales. Les capteurs LVDT sont mis en place entre les plateaux de la presse et de chaque côté de l'échantillon. Les TPZ récepteurs et les TPZ émetteurs sont respectivement branchés aux préamplificateurs et au commutateur (figure 2.5). Puis on réalise des sources Nielsen (rupture de mine de crayon, Nielsen, 1977) sur l'échantillon afin de tester l'ensemble des capteurs acoustiques et de vérifier leur bon couplage. Le niveau de bruit ambiant est alors déterminé, ce qui permet de fixer un seuil de déclenchement (50 mV). La figure 2.14 ci-après présente l'échantillon instrumenté sous la presse (a), la presse asservie (capacité de 5000 kN) et le système d'acquisition mécanique (b), les préamplificateurs en batterie (c), et la centrale d'acquisition acoustique (d).

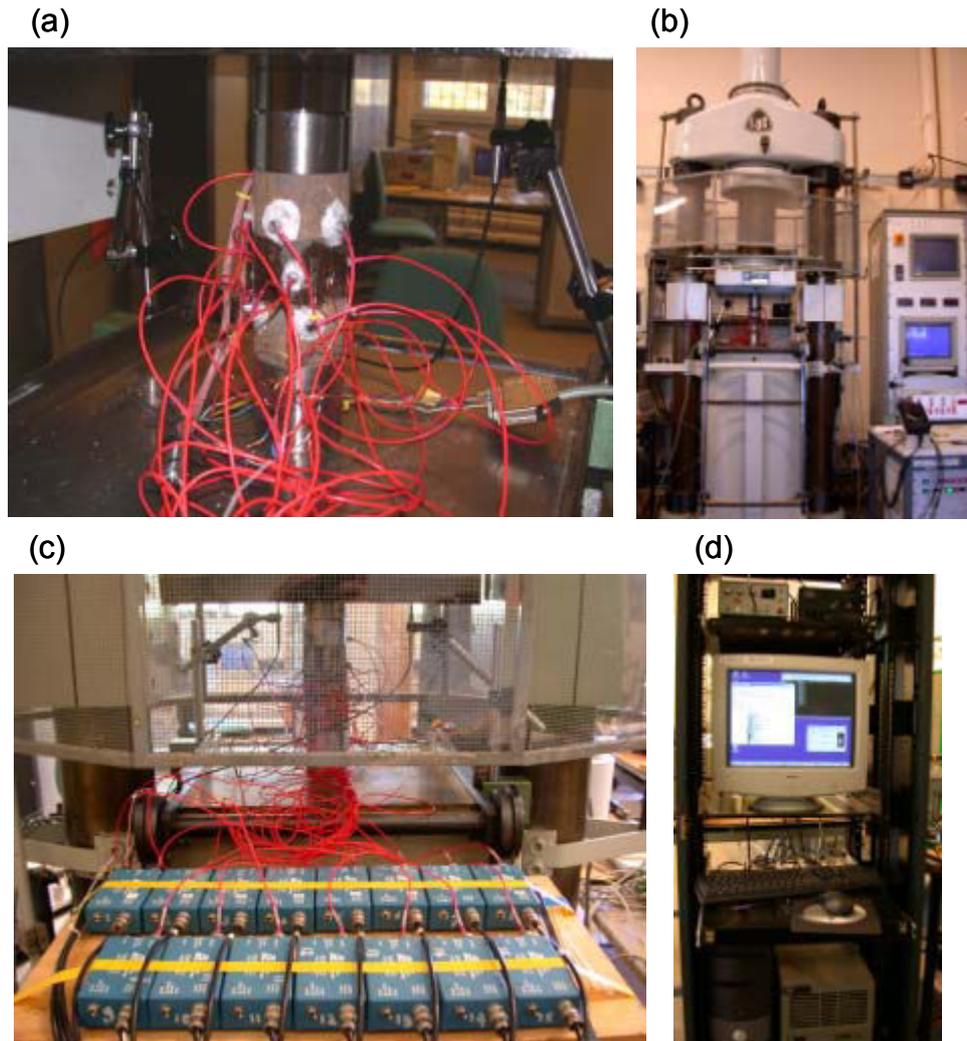


Figure 2.14 : Lancement d'un essai de compression uniaxiale MAV18.

Les essais de compression uniaxiale permettent de simuler un état de contrainte subi par les roches du parement (surface latérale d'un pilier de mine), *i.e.* où la contrainte principale majeure est subverticale et les contraintes horizontales sont nulles en surface. Les essais en compression triaxiale permettent la simulation de l'état de contrainte au coeur du pilier, où les contraintes horizontales sont voisines de 4-5 MPa (Souley, 2002, Lahaie, 2003).

2.4.2 Mise en oeuvre des essais en compression triaxiale

La mise en oeuvre d'essais en compression triaxiale axisymétriques constitue l'aboutissement expérimental de nos travaux. La cellule de confinement ne pouvant accueillir d'échantillon de diamètre supérieur à 50 mm, des éprouvettes ont été carottées suivant ces dimensions ($\varnothing=50$

mm, élancement égal à 2). Quatre jauges de déformation sont collées sur l'échantillon dans sa partie centrale puis câblées. La surface latérale plus réduite, par rapport à celle des essais MAV18, nous a contraint à utiliser dans un premier temps un réseau de type MAV11 (figure 2.11). Les principales difficultés expérimentales ont résidé dans la protection des capteurs acoustiques qui ne résistent pas à la pression et qui sont affectés par l'infiltration de fluides (huile hydraulique de confinement) qui peut se produire par le câblage. Cette protection devait donc résister à la pression de confinement et garantir la parfaite étanchéité du réseau de capteurs tout en s'adaptant à celle de l'échantillon lui-même réalisée par une jaquette de silastène.

Ainsi, la jaquette isolant l'échantillon de l'huile hydraulique est préalablement moulée, elle comporte des trous agencés selon le réseau MAV11 et qui permettent le collage des boîtiers en acier conçus *ad hoc* pour protéger les capteurs acoustiques. Des trous supplémentaires sont pratiqués manuellement afin de laisser passer les câbles des jauges et les câbles des TPZ situés aux extrémités de l'éprouvette à l'intérieur de cales spécialement usinées.

Les TPZ utilisés pour ces essais ont un câblage axial. Leur câble est préalablement sur-gainé par un tube en silicone. Les 8 petits boîtiers de protection sont collés sur l'échantillon revêtu de la jaquette à l'aide d'une colle époxy, leur base courbe est usinée pour s'adapter à la courbure de l'éprouvette. Il est important d'éviter les bavures de colle afin que le capteur introduit par la suite dans le boîtier soit bien en contact avec la surface de l'éprouvette. Un joint d'étanchéité en silicone est alors réalisé sur le pourtour de chaque boîtier, ainsi qu'au niveau des passages de câbles des jauges (figure 2.15a). Après un temps de séchage, les TPZ sont introduits dans les boîtiers et dans les cales, le couplage acoustique étant réalisé par de la graisse de silicone. Le TPZ est maintenu fermement au contact par un opercule (bouchon percé où le câble du TPZ a été préalablement enfilé) qui se visse sur le boîtier et qui applique ainsi une force par un anneau de caoutchouc sur la partie arrière du capteur (figure 2.16 et figure 2.15b). Chaque capteur est testé ainsi que leur bon couplage par des sources Nielsen pratiquées sur l'extrémité supérieure de l'éprouvette. L'étanchéité est ensuite réalisée à l'aide de plusieurs couches de silicone (figure 2.15c). Après séchage, le réseau de TPZ est de nouveau testé. Enfin les passages des câbles des TPZ sont enduits de nombreuses couches de silicone. Le corps de la cellule est ensuite monté sur son embase. La cellule est remplie d'huile (figure 2.15d) puis fermée et placée sous la presse (figure 2.15e).

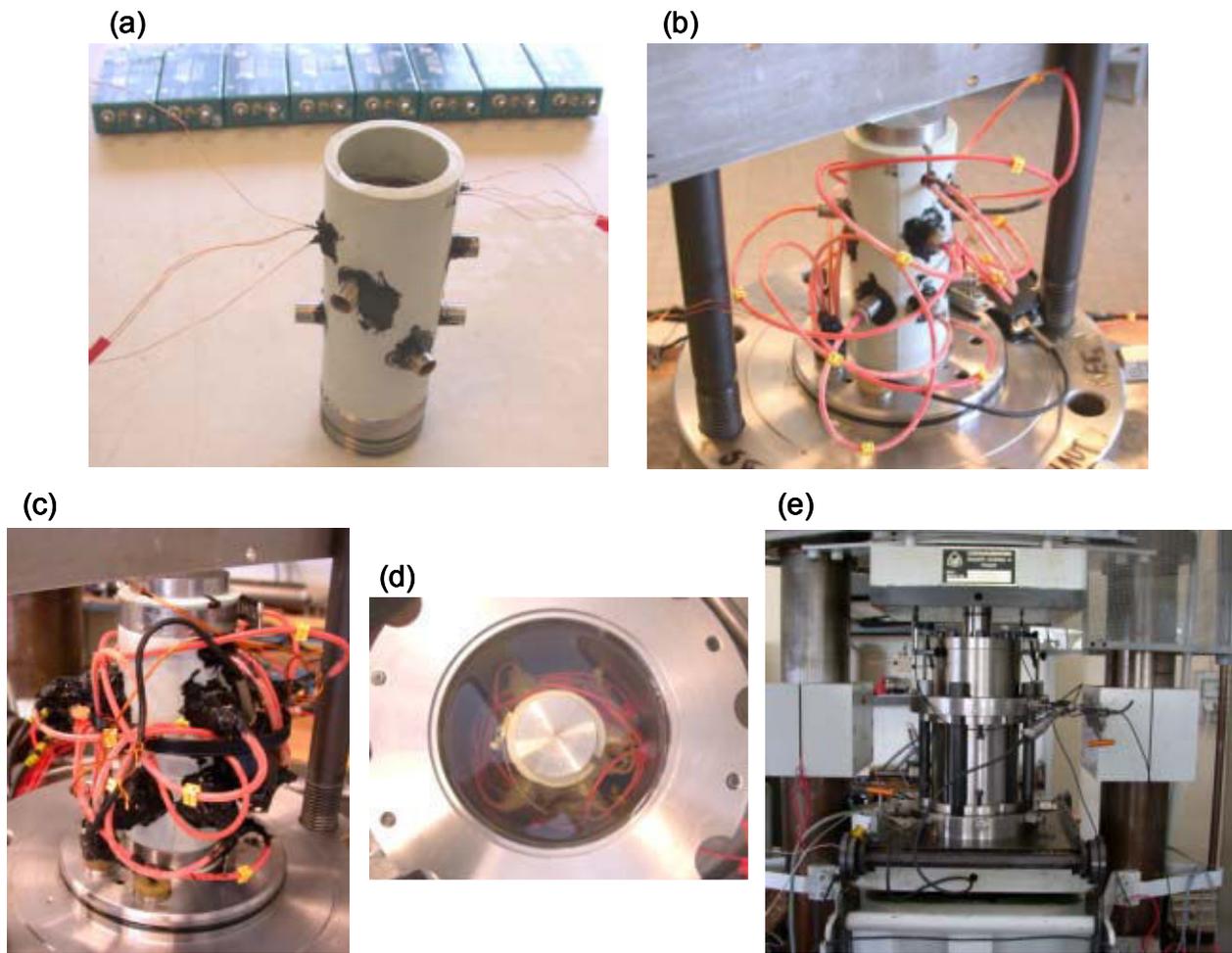


Figure 2.15 : Préparation d'un essai en compression triaxiale. (a) Collage des boîtiers de protection, étanchéité préliminaire en silicone également autour des passages des câbles des jauges. (b) Mise en place (couplage) des TPZ. (c) Réalisation de l'étanchéité finale. (d) Remplissage de la cellule par de l'huile hydraulique. (e) Positionnement de la cellule triaxiale sous la presse.

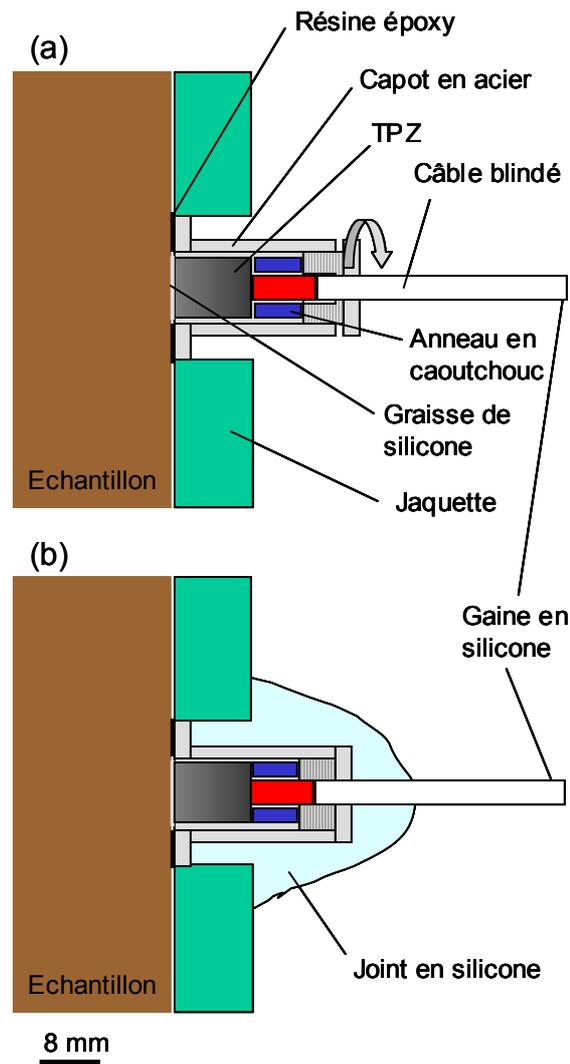


Figure 2.16 : Schématisation en coupe de la protection des capteurs acoustiques.

Le réseau acoustique est relié à la centrale d'acquisition acoustique. Le niveau de bruit est mesuré et le seuil de déclenchement est fixé à 50 mV. Deux capteurs de déplacements sont positionnés de part et d'autre de la cellule (figure 2.17). Ils permettent de piloter la presse en déplacement contrôlé notamment lors des phases de relaxation. La cellule triaxiale comporte une chambre d'autocompensation qui permet de maintenir le déviateur nul lors de la montée hydrostatique qui se fait de manière autonome, sans la presse, jusqu'à une pression de confinement pré-établie ($P_c=5$ MPa) qui sera alors maintenue constante par l'intermédiaire du générateur de pression (figure 2.17).

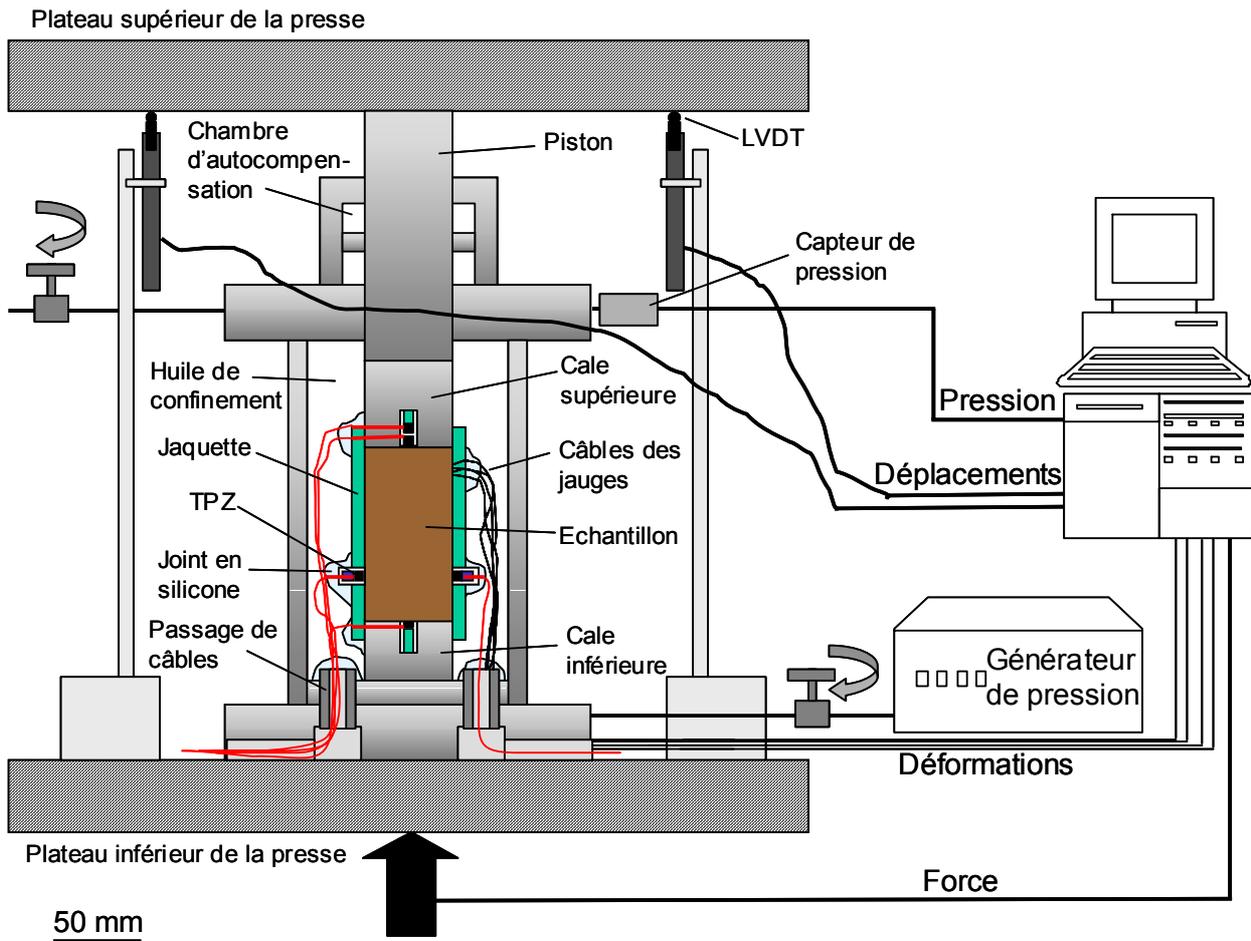


Figure 2.17 : Coupe de la cellule triaxiale en place entre les plateaux de la presse. Les déplacements, les déformations, la force appliquée et la pression de confinement, sont enregistrés et gérés par la centrale d'acquisition.

2.4.3 Déroulement des essais

Le déroulement des essais consiste à suivre un certain chemin de chargement qui permet de déterminer les propriétés élastiques de l'échantillon et de suivre leur évolution durant l'essai. Tous les essais ont été réalisés à une vitesse de déformation longitudinale moyenne constante de 10^{-5} s^{-1} . En ce qui concerne les essais en compression triaxiale, la pression de confinement (P_C) de 5 MPa est atteinte par montée hydrostatique et maintenue constante durant tout l'essai. Les trois types de mesures sont réalisés durant cette montée. Les mesures de vitesses de propagation des ondes selon le rai axial et les deux rais transversaux sont réalisées d'une part avant le début de la montée et d'autre part à sa fin lorsque la pression de confinement préétablie est atteinte. Le chargement, par augmentation de la contrainte axiale (σ_1), consiste en des cycles successifs de chargement – relaxation – déchargement réalisés jusqu'à la rupture de l'échantillon (figure 2.18). La phase de relaxation (d'une durée allant de 15

minutes à 60 minutes) permet de dissiper la déformation visco-élastique avant la phase de déchargement. Cette dernière correspondant alors à une réponse purement élastique du matériau, elle permet la détermination des modules élastiques (Goodman, 1980). La phase de déchargement est effectuée jusqu'à ce que 50 % du niveau de contrainte de la phase de chargement précédente soient atteints. Les mesures de vitesses de propagation des ondes (selon le rais axial et les deux rais transversaux) sont réalisées lors d'un maintien constant toujours bref (moins de 20 s) de la contrainte axiale. Quatre mesures ont lieu durant un cycle de chargement – relaxation – déchargement (figure 2.18) :

- point A, fin de la phase de relaxation (l'activité acoustique est toujours extrêmement faible),
- point B, fin de la phase de déchargement,
- point C, phase de chargement à un niveau de contrainte égal à celui de la fin de la relaxation,
- point D, à un niveau de contrainte égal au maximum atteint lors du chargement précédent.

L'enregistrement de l'activité acoustique (événement d'EA et nombre de coups) s'effectue durant toute la durée de l'essai sauf lors des mesures de vitesse.

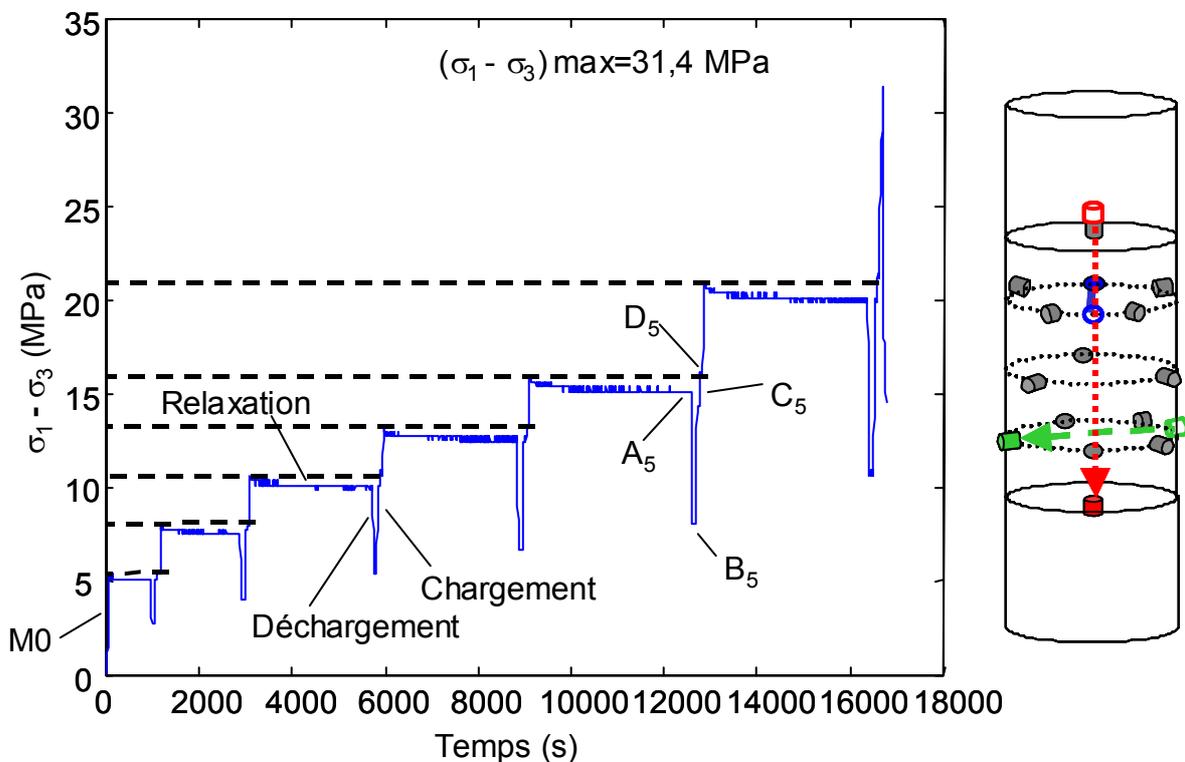


Figure 2.18 : Historique du chargement et points de mesures de vitesse de propagation des ondes selon trois rais (axial en rouge, transversal supérieur en bleu et transversal inférieur

en vert). Chaque cycle de chargement – relaxation – déchargement compte 4 points de mesures de vitesse (A_i , B_i , C_i , et D_i , avec i le nombre de cycles)

Plus le nombre de cycles est grand plus le suivi de l'évolution des modules élastiques et des vitesses de propagation, est large. Cependant du nombre de cycles dépend également la durée d'un essai qui au-delà de 6 heures est difficilement réalisable. Le nombre de cycles réalisés ainsi que leur espacement en contrainte est donc ajusté au mieux durant l'essai en prenant également en compte l'imminence de la rupture.

2.5 Conclusions et perspectives expérimentales

La mise en oeuvre et la réussite d'essais mécaniques comportant à la fois des mesures de déformations, des mesures de vitesses de propagation des ondes P, et l'enregistrement de l'activité acoustique (événements d'EA et comptage des coups), a nécessité la réalisation d'un certain nombre d'essais de faisabilité. Ils sont au nombre de 6 pour les essais en compression uniaxiale (tableau 2.2) et de 3 pour les essais en compression triaxiale (tableau 2.3). Les analyses des données obtenues à partir des essais réussis permettent de déterminer les paramètres qui nous ont paru pertinents dans l'étude de l'évolution de l'endommagement d'un échantillon au cours d'un essai mécanique, *i.e.* les modules élastiques, la vitesse de propagation des ondes P selon trois rais (un axial et deux transversaux), l'activité acoustique, *etc.* Ces analyses seront présentées dans le chapitre 3. Le dernier essai en compression triaxiale réussi ($P_C=5$ MPa) a finalement clôturé ces travaux expérimentaux. Nous estimons qu'il est possible de réaliser d'autres essais de ce type à des pressions de confinement inférieures ou supérieures, en respectant les étapes de la préparation établie et surtout en prenant grand soin lors de l'application des joints de silicone (de leur qualité dépend la parfaite étanchéité du montage).

Roche	Echantillon	Réseau de PZT	Vitesses	EA	Mécanique
Minerai de fer	GGP1-A1	8	non	oui	oui
	GGP1-A2	8	non	oui	oui
	GGP1-D	12	non	oui	oui
	GGP2	18	oui	oui	oui
	BGP0	18	oui	oui	oui
Calcaires du recouvrement	MTBS-1A	12	non	oui	oui
	MTBJ-1A	12	non	oui	oui
	MTBC-3A	12	non	oui	oui
Intercalaire	GM02/03-S1	11	oui	oui	oui
	GM02/03-S2	11	oui	oui	oui
	GM02/03-S3	11	oui	oui	oui

Tableau 2.2 : Récapitulatif des essais en compression uniaxiale réalisés. Les essais considérés comme étant réussis sont distingués en rose.

Roche	Echantillon	Confinement (MPa)	Réseau de PZT	Vitesses	EA	Mécanique
Minerai de fer	GGP2-1	10	11	oui	oui	oui
	GGP2-2	10	11	oui	oui	oui
	BGP1	10	11	oui	oui	oui
	BGP2	5	11	oui	oui	oui

Tableau 2.3 : Récapitulatif des essais en compression triaxiale réalisés. Les essais considérés comme étant réussis sont distingués en rose. Les autres essais étaient accompagnés de fuites de fluide de confinement qui s'infiltrait entre la jaquette et l'échantillon.

3

Résultats expérimentaux de l'étude au laboratoire de l'endommagement des roches

3.1 Introduction

Nous avons vu que l'endommagement est un phénomène progressif irréversible dû à l'amorçage, la croissance et la coalescence de microfissures. A l'échelle macroscopique, l'endommagement se manifeste par la modification des propriétés physiques du matériau. Le premier chapitre a permis de dégager un certain nombre de paramètres pertinents dans l'étude expérimentale de l'endommagement des roches : les modules élastiques du matériau, les vitesses de propagation des ondes élastiques, l'atténuation de ces dernières, l'activité acoustique, le contenu fréquentiel des événements d'EA, leur énergie, la distribution de la taille des événements, les premiers mouvements des ondes reçues. Ces paramètres découlent de l'analyse des données expérimentales obtenues durant les essais mécaniques. Lors du chapitre précédent, nous avons décrit les expérimentations permettant l'étude expérimentale « micro-macro » de l'endommagement des roches. Chaque expérimentation comporte trois principaux types de mesures qui permettent de suivre, à une échelle macroscopique ainsi qu'à une échelle microscopique, les processus d'endommagement d'un échantillon de roche sollicité mécaniquement. Les mesures macroscopiques englobent des mesures des modules élastiques ainsi que les mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques et d'atténuation. Les mesures de l'activité acoustique et l'enregistrement d'événements d'EA constituent la mesure indirecte microscopique de l'endommagement durant l'essai mécanique. Dans ce troisième chapitre, nous présentons tout d'abord les méthodes adoptées dans l'analyse des données expérimentales issues de six essais mécaniques chacun comportant les mesures indirectes macroscopiques et microscopiques précédemment citées. Ensuite, nous exposons les résultats expérimentaux concernant, en premier lieu, trois échantillons issus de l'intercalaire grise-brune (voir figure 2.1, chapitre 2), chacun étant soumis à une compression uniaxiale au cours d'essais de type MAV11 (figure 2.11). En second lieu, nous présentons les résultats de deux essais en compression uniaxiale de type MAV18 (figure 2.12) réalisés sur des échantillons prélevés dans la couche grise et dans la couche brune. En troisième lieu, les résultats d'un essai de compression triaxiale MAV11T mené sur un échantillon de la couche

brune sont exposés. Le tableau 3.1 précise la nature de chaque expérimentation, en terme de compression uniaxiale ou triaxiale et d'instrumentation, *i.e.* de réseau de capteurs. Nous proposons alors au lecteur une synthèse graphique de ces résultats en Annexe C. Enfin, ces résultats expérimentaux sont discutés.

Origine (Mine de Tressange)	Echantillons	Diamètre (mm)	Essai en compression	Capteurs mécaniques	Capteurs acoustiques
Intercalaire grise- brune	gm0203s1	70	uniaxiale	2 LVDT 6 jauges de déformation	11
	gm0203s2				
	gm0203s3				
Couche grise	ggp2	70	uniaxiale	2 LVDT 6 jauges de déformation	18
Couche brune	bgp0	70	uniaxiale	2 LVDT 6 jauges de déformation	18
	bgp2	50	triaxiale	2 LVDT 4 jauges de déformation	11

Tableau 3.1 : Caractéristiques des 6 expérimentations permettant l'étude multiéchelle de l'endommagement des roches du bassin ferrifère lorrain. Tous les échantillons ont un élanement égal à 2. Les échantillons de l'intercalaire grise-brune sont issus d'un sondage sub-vertical. Les échantillons de la couche grise et de la couche brune proviennent de sondages sub-horizontaux.

3.2 Méthodes d'analyse des données expérimentales

Nous distinguons les données expérimentales mécaniques des données expérimentales acoustiques. Elles sont issues des deux systèmes d'acquisition décrits dans le chapitre 2. Nous présentons ici, tout d'abord, les méthodes d'analyse des données mécaniques, puis celles des données acoustiques.

3.2.1 Méthode d'analyse des données mécaniques

Les données mécaniques sont l'ensemble des déformations, des déplacements, et des contraintes appliquées, mesurés durant l'essai.

Les déformations axiales (ϵ_A) et les déformations latérales (ϵ_L) de l'éprouvette (plus précisément de sa partie centrale) sont obtenues en moyennant les déformations mesurées par

les jauges longitudinales et les jauges transversales respectivement. Les données aberrantes dues au dysfonctionnement d'une jauge ou à sa rupture, sont préalablement écartées. Les déformations volumiques (ε_V) sont déduites des deux précédentes :

$$\varepsilon_V = \varepsilon_A + 2\varepsilon_L. \quad (3.1)$$

Par convention, pour les essais de compression réalisés ici, les déformations axiales sont positives et les déformations latérales négatives. Le comportement mécanique est examiné grâce à la représentation des courbes contraintes-déformations ou contraintes-déplacements (figure 3.1). Ces dernières permettent de visualiser le comportement mécanique même après le pic de contrainte lors de la localisation de la déformation sur un ou plusieurs plan(s) de fracture macroscopique(s). Différentes phases du comportement sont identifiables (voir 1.3.1), elles sont délimitées par des seuils de contrainte représentés sur la figure 3.1. Ces seuils sont déterminés graphiquement, nous en avons distingué cinq :

- σ_S , seuil de serrage identifiable en général sur la courbe des déformations axiales, il délimite la phase de serrage durant laquelle les fissures préexistantes se ferment.
- σ_F , seuil de fissuration observé sur la courbe des déformations latérales et qui correspond à la contrainte à partir de laquelle la courbe devient non-linéaire. Ce seuil marque la manifestation macroscopique de l'amorçage de nouvelles fissures, de leur croissance qui n'entraîne pas nécessairement leur coalescence (Goodman, 1980).
- σ_D , seuil de dilatance identifié sur la courbe des déformations volumiques qui correspond à l'initiation de l'augmentation relative de volume de l'éprouvette (la pente de la courbe σ - ε_V change de signe). Cette augmentation de volume est souvent attribuée à l'amorçage et la croissance de fissures extensives (Mode I) dont la plus grande dimension est sub-parallèle à la contrainte principale majeure σ_1 (Jaeger et Cook, 1979).
- σ_L , seuil de « limite élastique » visible sur la courbe des déformations axiales qui marque la perte de linéarité de cette dernière. Nous le nommerons plutôt seuil de perte de linéarité (sous-entendue axiale), la linéarité en question n'impliquant pas nécessairement un comportement purement élastique. Ce seuil est considéré comme la manifestation macroscopique de la coalescence de fissures qui contribueront à former les futures fractures macroscopiques qui scinderont l'échantillon (Goodman, 1980).
- σ_M , contrainte maximale (ou contrainte de pic) généralement obtenue à partir de la courbe contraintes-déplacements. Il peut marquer le début de la propagation de la fracturation macroscopique, le comportement mécanique associé n'étant observable qu'à partir de la courbe contraintes-déplacements (mesures globales entre les plateaux de la presse, voir 2.3.1).

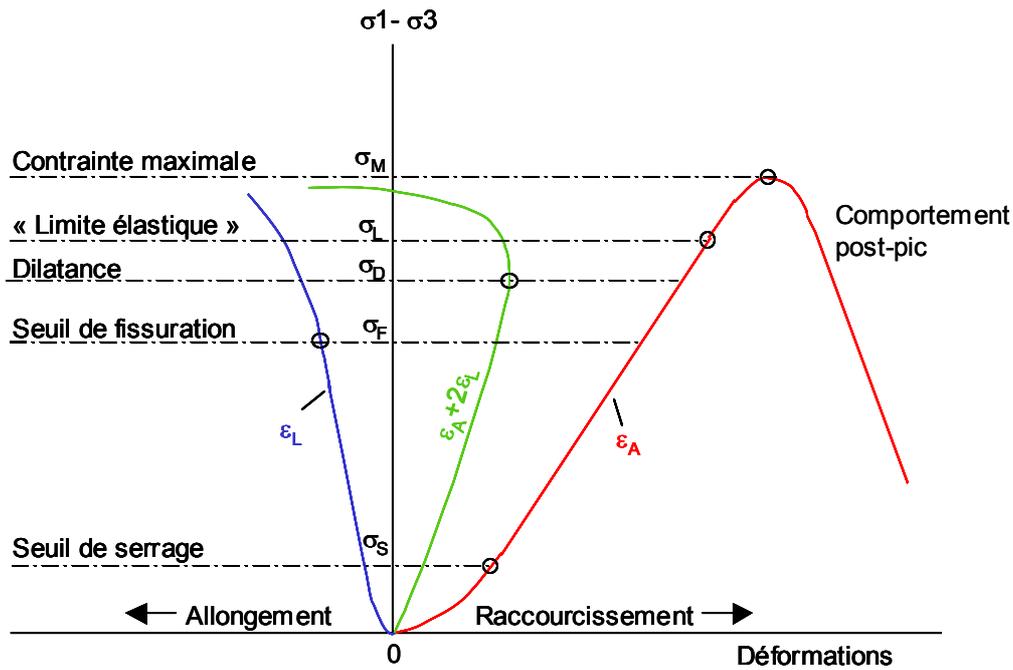


Figure 3.1 : Schématisation des courbes contraintes-déformations et seuils de contrainte caractéristiques. Le comportement post-pic n'est observable qu'à partir des mesures de déplacement.

Les propriétés élastiques du matériau étudié sont déterminées à partir des courbes précédentes de contraintes-déformations axiales et contraintes-déformations latérales. On distingue le module de déformation axial (M_A), le module de déformation latéral (M_L), et le coefficient de Poisson (ν) :

$$M_A = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_A}, \quad (3.2)$$

$$M_L = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_L}, \quad (3.3)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_A}. \quad (3.4)$$

Dans le cas d'un matériau élastiquement isotrope, $M_A = E$, le module de Young, et $M_L = \frac{E}{\nu}$.

Si nous considérons la courbe contraintes-déformations axiales de la figure 3.1, la partie linéaire ne représente pas uniquement un comportement élastique ou réversible. Elle résulte de la superposition d'un comportement réversible et d'un comportement irréversible, un

déchargement ne suivra pas nécessairement le même chemin et des déformations permanentes se manifesteront (figure 3.2). La pente de cette portion linéaire n'est autre qu'un module de déformation, le module de déformation élastique doit être déterminé lors d'une réponse purement élastique du matériau, c'est-à-dire durant une phase de déchargement. Une phase de relaxation (déformations maintenues constantes) précédant la phase de déchargement, permet de dissiper et de mesurer la déformation visco-élastique. Les trois modules élastiques sont déterminés par des régressions linéaires réalisées le long des phases de déchargement des courbes de contraintes-déformations (pour E et M_L , figure 3.3) et de la courbe $\epsilon_A-\epsilon_L$ pour ν . L'intervalle de confiance des paramètres de la régression permet de déterminer la précision de l'estimation.

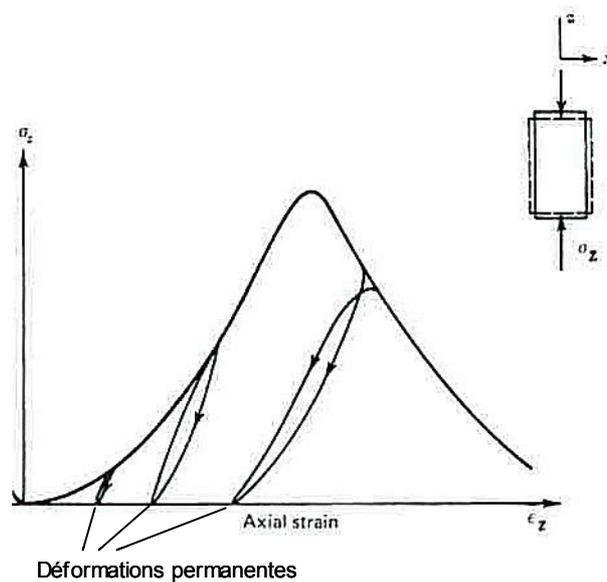


Figure 3.2 : Déchargement durant la phase linéaire du comportement mécanique d'après Goodman (1980). L'hystérésis est due au comportement visco-élastique.

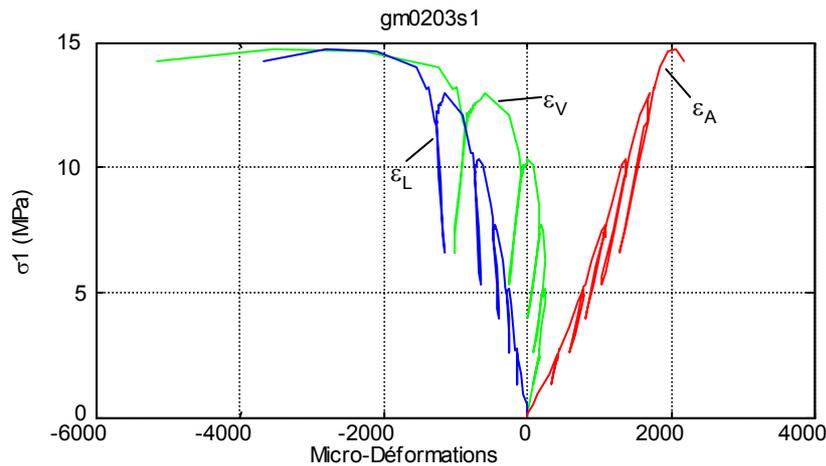


Figure 3.3 : Courbes contraintes-déformations et cycles de chargement-relaxation-déchargement réalisés durant la compression uniaxiale d'un échantillon d'une arénite ferrifère.

Ainsi nous avons réalisé des cycles de chargement-relaxation-déchargement afin de séparer les différents comportements et d'identifier clairement le comportement élastique. Ces cycles et notamment les phases de déchargement, permettent de déterminer les modules élastiques et de suivre leurs variations au cours de la sollicitation mécanique. Les variations de ces propriétés élastiques sont les reflets macroscopiques des processus d'endommagement du matériau sous contrainte.

3.2.2 Méthode d'analyse des données acoustiques

Les données acoustiques regroupent les données issues des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques, ainsi que de l'enregistrement des EA (comptage des coups et numérisation des événements), réalisés durant la sollicitation mécanique. Même s'ils sont sans doute peu nombreux, nous n'avons pu séparer les coups provenant des mesures de vitesses de ceux représentant l'activité acoustique durant la sollicitation mécanique. Nous n'avons donc pas pris en compte ces données (coups d'EA) dans nos analyses.

a) Vitesse de propagation des ondes élastiques et atténuation

La figure 3.4 présente une trace numérisée enregistrée durant une mesure de vitesse. L'artefact (impulsion i) dû au bruit électromagnétique se propageant au sein du système d'acquisition acoustique au moment de l'émission réalisée par le générateur d'impulsion (fig.

2.3, 2.3.1) est bien identifiable et permet de déterminer par pointé manuel le temps de l'impulsion ou t_0 . Le temps d'arrivée t_P de la première phase (onde P) est également pointé manuellement. De ces temps et de la distance d_{ER} entre le capteur émetteur et le capteur récepteur, on déduit la vitesse de propagation V_P de l'onde élastique selon un trajet supposé rectiligne entre les deux capteurs:

$$V_P = \frac{d_{ER}}{t_P - t_0} \quad (3.5)$$

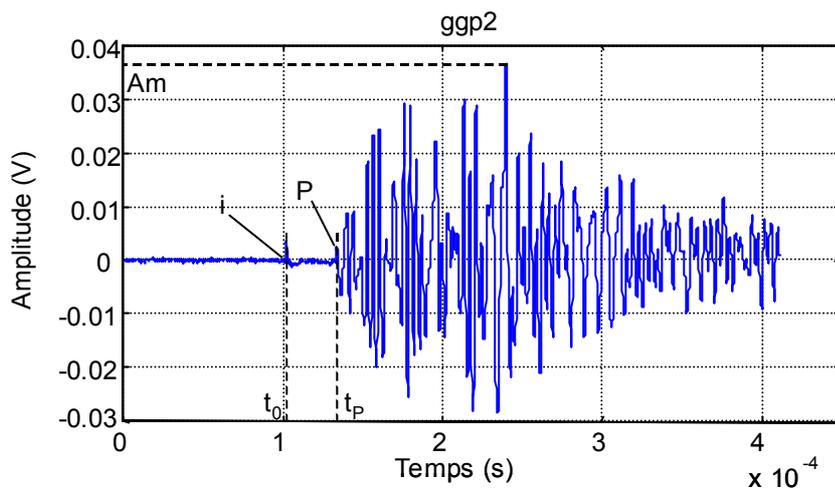


Figure 3.4 : Signal enregistré sur une voie durant une mesure de vitesse réalisée au cours de l'essai de compression uniaxiale de ggp2.

L'incertitude des mesures de vitesse dépend surtout de la précision du pointé manuel du temps d'arrivée. Nous l'avons estimée à moins de 2 %.

L'amplitude maximale des signaux reçus lors des mesures de vitesses est également déterminée (figure 3.4), le générateur émettant des impulsions identiques (même amplitude maximale, même énergie, même période), les variations de l'amplitude maximale mesurée selon le même rai durant l'essai mécanique reflètent l'évolution de l'atténuation.

b) Activité acoustique et paramètres associés

L'activité acoustique durant un essai mécanique est le nombre d'événements d'EA enregistrés et identifiés. La reconnaissance d'un événement d'EA (figure 3.5) est effective lorsque, sur les traces numérisées (une trace par voie) de celui-ci, ont pu être pointés les temps de la première onde arrivée. L'algorithme qui permet cette reconnaissance se base sur la méthode

du rapport de fenêtres glissantes STA/LTA (Allen, 1978) selon lesquelles les amplitudes moyennes du signal numérisé sont calculées, STA et LTA signifiant respectivement « Short Time Average » et « Long Time Average ». Ainsi, la fenêtre LTA est représentative de l'amplitude du bruit de fond alors que la fenêtre STA est sensible à l'apparition d'un événement i.e. un signal transitoire dont les caractéristiques sont radicalement différentes de celles du bruit de fond. Un événement est déclaré (et le temps de première arrivée pointé) lorsque le rapport STA/LTA est supérieur à un seuil préalablement fixé, d'après Allen (1978), lorsque STA devient abruptement supérieur à environ $5 \times LTA$. L'algorithme permet ainsi de pointer automatiquement l'ensemble des traces de chaque enregistrement acoustique réalisé durant un essai mécanique. Les temps de première arrivée (onde P) et les temps caractérisant la fin de l'événement sont identifiés sur chaque trace.

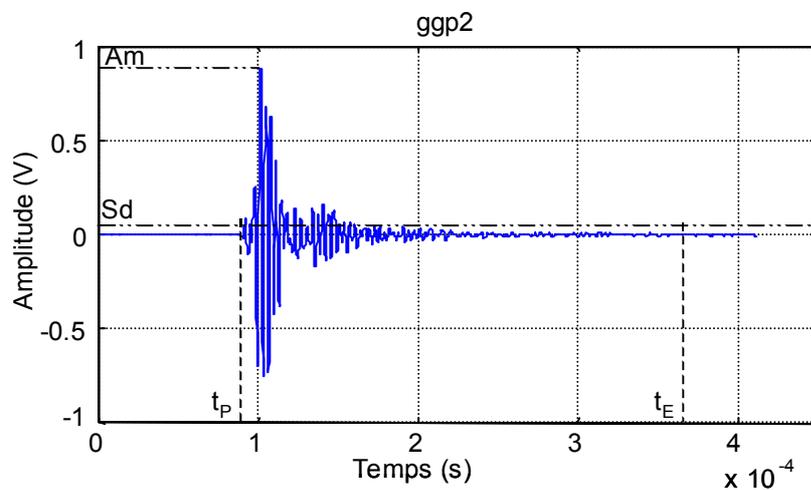


Figure 3.5 : Événement d'EA enregistré et numérisé. A_m est l'amplitude maximale de l'événement, S_d est le seuil de déclenchement (en volts) fixé par l'expérimentateur, t_p et t_E sont le temps de la première arrivée et le temps de fin d'événement obtenus par pointé STA/LTA.

Un événement d'EA est le signal enregistré et numérisé compris entre le pointé de la première phase arrivée (t_p) et le pointé de fin (t_E) ou la fin de la trace. On peut le caractériser par l'amplitude maximale (A_m) et l'énergie du signal (E_s) calculée entre les pointés de début et de fin d'événement. Toutefois cette dernière nous a paru plus discriminante que A_m car elle est plus représentative de l'ensemble de l'événement, l'amplitude maximale n'étant qu'un caractère ponctuel. L'énergie d'un événement s'exprime ainsi :

$$E_s = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \left(\sum_j A_{jk}^2 \cdot \Delta t \right), \quad (3.6)$$

ou E_s est l'énergie moyenne du signal (en $V^2.s$), N_k le nombre de traces où l'événement a été identifié, A_j la valeur de l'amplitude à chaque point d'échantillonnage entre le pointé P et le pointé de fin, et Δt le pas d'échantillonnage. L'énergie ainsi calculée est une mesure globale de la taille de l'événement dans le domaine temporel.

La caractérisation d'un événement dans le domaine fréquentiel se fait également entre les pointés de t_p et de t_E ou de fin de trace (figure 3.6a). Ceux-ci induisent une troncature brutale du signal qui se traduit, dans le domaine fréquentiel, par la convolution du signal par un sinus cardinal dont les lobes secondaires importants altèrent le spectre de l'événement. Il est donc nécessaire d'appliquer préalablement une fonction d'apodisation au signal tronqué entre les pointés afin de rendre la troncature plus progressive. La figure 3.6b expose la fonction d'apodisation utilisée (voir l'annexe A pour son expression analytique). L'énergie spectrale (figure 3.6c) est obtenue en élevant au carré le module du spectre calculé par Transformée de Fourier discrète (FFT). Nous utilisons la fréquence centrale (f_{50} , fréquence à 50 % de l'énergie spectrale cumulée) moyennée sur le nombre de traces où l'événement a été déclaré (pointé) afin de caractériser celui-ci dans le domaine fréquentiel.

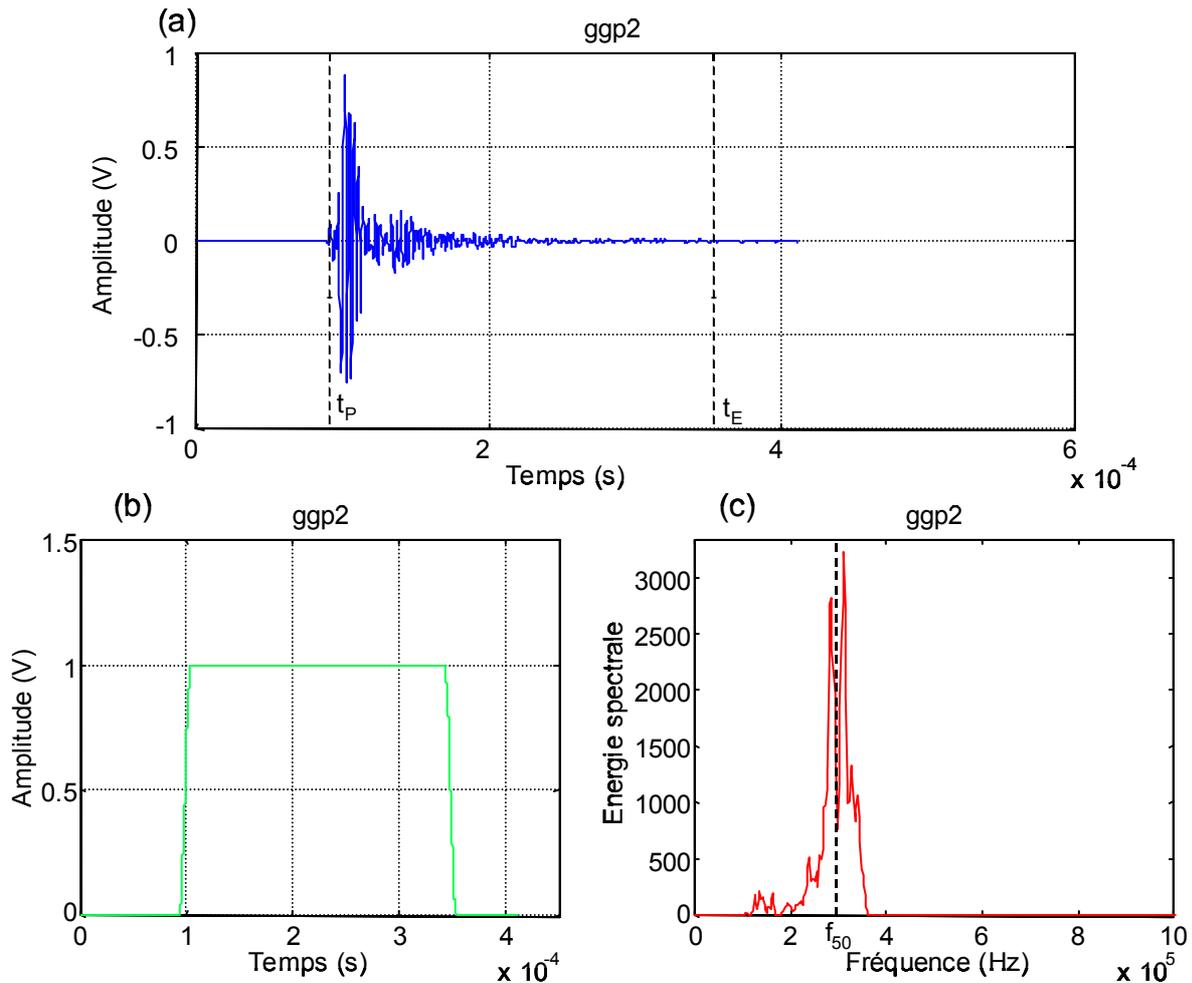


Figure 3.6 : (a) Événement identifié entre les points t_P et t_E . (b) Fonction d'apodisation. (c) Spectre d'énergie obtenu après l'apodisation et la FFT.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'analyse des premiers mouvements d'un événement enregistré sur plusieurs capteurs permet d'estimer la nature du mécanisme à la source dans le cas où la disposition des capteurs offre la meilleure couverture possible du volume de l'échantillon. La polarisation des capteurs est préalablement déterminée par des tests mécaniques. Une pression brève est exercée sur la surface active du transducteur. Une telle excitation se traduit par un premier mouvement positif dans le cas où le capteur est polarisé positivement, par un premier mouvement négatif dans le cas inverse. Les TPZ utilisés dans le cadre de notre étude sont tous polarisés négativement. Un algorithme permet de déterminer automatiquement l'amplitude A_p du premier pic suivant le pointé de la première arrivée (figure 3.7). Le premier mouvement est alors déduit :

- si $A_p > 0$, alors le premier mouvement est extensif ou en dilatation (compte tenu de la polarisation négative des capteurs) ;

- si $A_p < 0$, alors le premier mouvement est compressif.

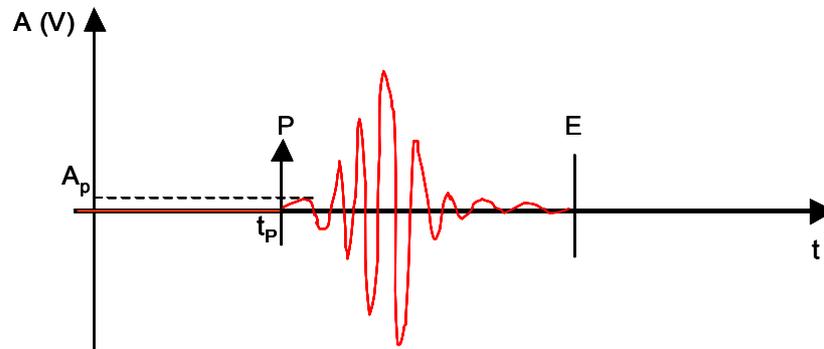


Figure 3.7 : Schématisation du premier mouvement d'un événement, t_p est le temps de la première arrivée pointée, t_E le temps de la fin de l'événement pointée, A_p est l'amplitude du premier pic suivant le pointé P.

Le rapport signal sur bruit (rsb) est utilisé pour vérifier la justesse du pointé et de la détermination du premier mouvement. Ce rapport s'exprime en fonction du bruit moyen :

$$rsb = A_p \cdot \left(\frac{\sum_N A_{bruit}}{N} \right)^{-1}, \quad (3.7)$$

où A_{bruit} est l'amplitude du bruit déterminée entre le premier point de la trace et le pointé de première arrivée (l'intervalle comprenant N points). Ainsi si rsb est inférieur à 2,5, la voie est écartée, elle n'est pas prise en compte dans l'analyse des premiers mouvements de l'événement en question. Un événement qui comportera plus de 2/3 de premiers mouvements compressifs sera associé à un mécanisme de source essentiellement extensif. Un événement caractérisé par moins de 1/3 de premiers mouvements compressifs aura une source au mécanisme majoritairement compressif. Lorsque le nombre de premiers mouvements compressifs d'un événement sera compris entre 1/3 et 2/3, nous associerons cet événement à un mécanisme de source mixte (par exemple de cisaillement). L'annexe B présente un événement enregistré au cours d'un essai de compression uniaxiale de type MAV18 dont tous ses premiers mouvements sont compressifs ($A_p < 0$), il est donc associé à une source au mécanisme extensif.

A ces paramètres – vitesse de propagation des ondes élastiques V_p , amplitude maximale A_m , énergie moyenne du signal E_s , premier mouvement – s'ajoutent des paramètres issus des

distributions des tailles des événements, la taille d'un événement étant caractérisée soit par l'amplitude maximale moyenne soit par l'énergie moyenne des signaux enregistrés par l'ensemble des voies. Ces paramètres sont les exposants b_a ou b_e . b_a est l'exposant de la loi de Gutenberg-Richter adaptée à l'EA et évoquée dans le chapitre 1 dont nous rappelons ici l'expression :

$$\text{Log}(N) = a - b_a \cdot \text{Log}(A_m), \quad (3.8)$$

où N est le nombre d'événement d'amplitude maximale supérieure ou égale à A_m , a et b_a deux constantes, et A_m l'amplitude maximale. Nous avons choisi de caractériser la taille d'un événement par l'énergie du signal correspondant. Nous analyserons donc les distributions d'énergie des événements d'EA plutôt que celles de l'amplitude maximale, mesure de la taille qualifiée de trop ponctuelle. La loi puissance adoptée s'écrit alors :

$$\text{Log}(N) = c - b_e \cdot \text{Log}(E_s), \quad (3.9)$$

où N est le nombre d'événements dont l'énergie du signal est supérieure ou égale à E_s , c et b_e des constantes, et E_s l'énergie du signal exprimée précédemment dans l'équation (3.6). On pourra montrer que E_s est proportionnelle au carré de l'amplitude maximale moyenne d'un événement et donc que $b_a = 2 \cdot b_e$. Nous effectuerons un ajustement par une droite des moindres carrés en coordonnées logarithmiques de la distribution des énergies moyennes, b_e étant la pente de la droite. Pour réaliser cet ajustement nous utiliserons la méthode exposée sur la figure 3.8. La taille des échantillons utilisés dans la détermination de l'exposant b_e dépend du nombre total d'événements enregistrés au cours de l'essai mécanique étudié. (Pickering et al., 1995) a montré qu'un échantillon de 100 événements conduit à une erreur d'estimation de l'exposant de l'ordre de 0,15. Nous choisirons une taille d'échantillon minimale de 100 événements.

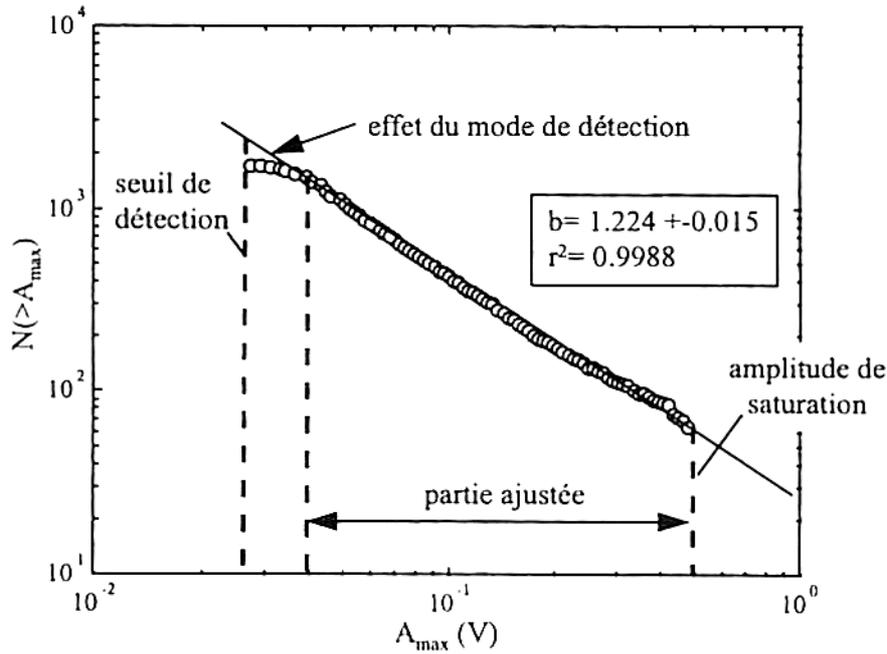


Figure 3.8 : Ajustement d'une loi puissance à une distribution d'amplitude maximale, l'ajustement s'effectuant sur la partie linéaire de la distribution. La partie sub-horizontale de la distribution est attribuée à un effet du seuil de détection. D'après Amitrano (1999).

3.3 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux décrits ci-après découlent des analyses précédemment discutées. Ils concernent tout d'abord trois échantillons (gm0203s1, gm0203s2, gm0203s3) prélevés à différentes profondeurs au sein de l'intercalaire marneux entre la couche grise et la couche brune de la mine de Tressange. Les trois essais de compression uniaxiale ont été réalisés lorsque nous disposions d'une carte d'acquisition de 8 voies (essais MAV11). Les résultats concernent ensuite un échantillon (ggp2) issu de la couche grise et un échantillon de la couche brune (bgp0) soumis à une compression uniaxiale, la carte d'acquisition comportait alors 16 voies (essais MAV18). Enfin, nous présentons les résultats issus d'un essai de compression triaxiale (essai MAV11T) réalisé sur un échantillon de la couche brune (bgp2). Rappelons que le tableau 3.1 précise l'instrumentation utilisée durant chaque essai. Les résultats comprennent le comportement mécanique (courbes contraintes-déformations, seuils de contraintes, modules élastiques), les vitesses de propagation des ondes P et l'atténuation des ondes élastiques, les émissions acoustiques (activité acoustique, caractérisation fréquentielle et énergétique, premier mouvement, distribution de tailles et exposant b_e), ainsi que des observations macroscopiques réalisée sur l'éprouvette rompue.

3.3.1 Résultats des essais de compression uniaxiale MAV11, échantillons de l'intercalaire marneux

La teneur en argile de l'intercalaire grise-brune augmente avec la profondeur. Les trois échantillons de l'intercalaire marneux prélevés à des profondeurs croissantes ont des compositions différentes. Le premier essai concerne un échantillon d'arénite ferrifère nommé gm0203s1, le second essai a été réalisé sur un échantillon de micro-arénite appelé gm0203s2. Le troisième essai MAV11 a été mené sur un échantillon (gm0203s3) d'arénite argileuse de l'intercalaire marneux.

a) Résultats mécaniques

Essai gm0203s1-MAV11

La figure 3.9 ci-après présente les courbes contraintes-déformations (a) et la courbe contraintes-déplacements (b) de l'essai de compression uniaxiale de l'échantillon gm0203s1 (arénite ferrifère). Au cours de cet essai des cycles de chargement-relaxation-déchargement ont pu être réalisés durant la phase linéaire de la courbe $\sigma_1-\varepsilon_A$ pour 4 d'entre eux, le dernier cycle étant situé après le seuil σ_L de perte de linéarité axiale. Il apparaît clairement, à la fois sur la courbe $\sigma_1-\varepsilon_A$ (figure 3.9a) et sur la courbe σ_1-u (u étant les déplacements mesurés longitudinalement entre les plateaux de la presse, figure 3.9b), que cette phase linéaire est le siège de déformations irréversibles. En effet, l'intersection avec l'axe u de l'ajustement linéaire des phases de déchargement montre une déformation permanente (ε_P , figure 3.9b). Quel que soit le cycle considéré, le chemin de déchargement et celui du chargement précédent se confondent. Les phases de déchargement-rechargement paraissent linéaires et réversibles. De plus il n'y a pas ou très peu d'hystérésis. Nous avons graphiquement déterminé les seuils de contrainte caractéristiques dont les valeurs sont reportées dans le tableau 3.2. La phase de serrage délimitée par le seuil σ_S est peu marquée, la courbure vers le haut de la courbe $\sigma_1-\varepsilon_A$ (ou σ_1-u) est peu accentuée. La dilatance visible à travers l'augmentation des déformations volumiques (courbe $\sigma_1-\varepsilon_V$, un raccourcissement étant par convention positif) se manifeste lorsque la contrainte atteint un peu moins de 50 % de la contrainte maximale ($\sigma_{1_{max}}=14,7$ MPa), soit juste au-dessus du seuil de fissuration σ_F repéré sur la courbe des déformations latérales. La figure 3.9b permet de suivre le comportement post-pic, c'est-à-dire une fois que le maximum de contrainte ait été atteint. La courbe σ_1-u décroît assez brutalement puis plus progressivement jusqu'à une contrainte résiduelle de l'ordre de 2 MPa.

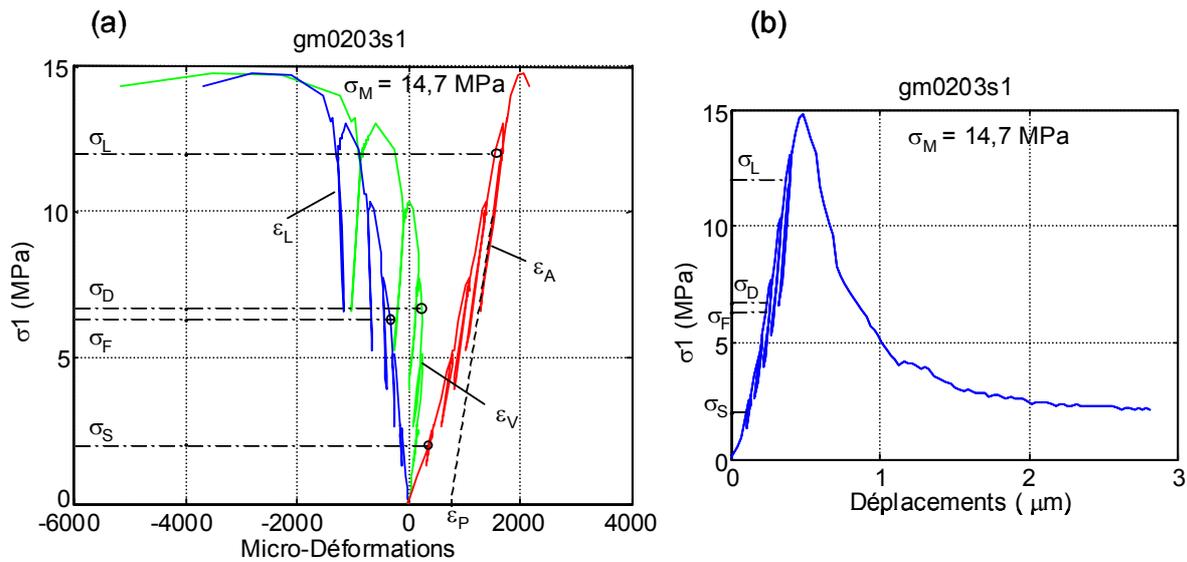


Figure 3.9 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de gm0203s1, arénite ferrifère de l'intercalaire. (a) Courbes contraintes-déformations, ε_L , ε_A , ε_V sont respectivement les déformations latérales, axiales et volumiques. Les seuils de contraintes caractéristiques σ_S , σ_F , σ_D , σ_L , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la dilatance, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint. (b) Courbe contraintes-déplacements et seuils de contrainte.

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	2	13,6
σ_F	6,3	42,8
σ_D	6,7	45,6
σ_L	12	81,6
σ_M	14,7	100

Tableau 3.2 : Seuils de contrainte caractéristiques de l'essai gm0203s1. σ_S , σ_F , σ_D , σ_L , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la dilatance, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint.

Les modules élastiques, *i.e.* le module latéral de déformation (M_L), le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν) déterminés le long des phases de déchargement de chaque cycle, sont respectivement représentés sur les figures 3.10a, 3.10b et 3.10d, la figure 3.10c rappelant la courbe contraintes-déplacements ainsi que les seuils de contrainte. Nous sous-entendons ici et pour l'ensemble des résultats qu'il s'agit de module de Young et de coefficient de Poisson apparents, les appellations « module de Young » et « coefficient de Poisson » supposant un matériau élastiquement isotrope.

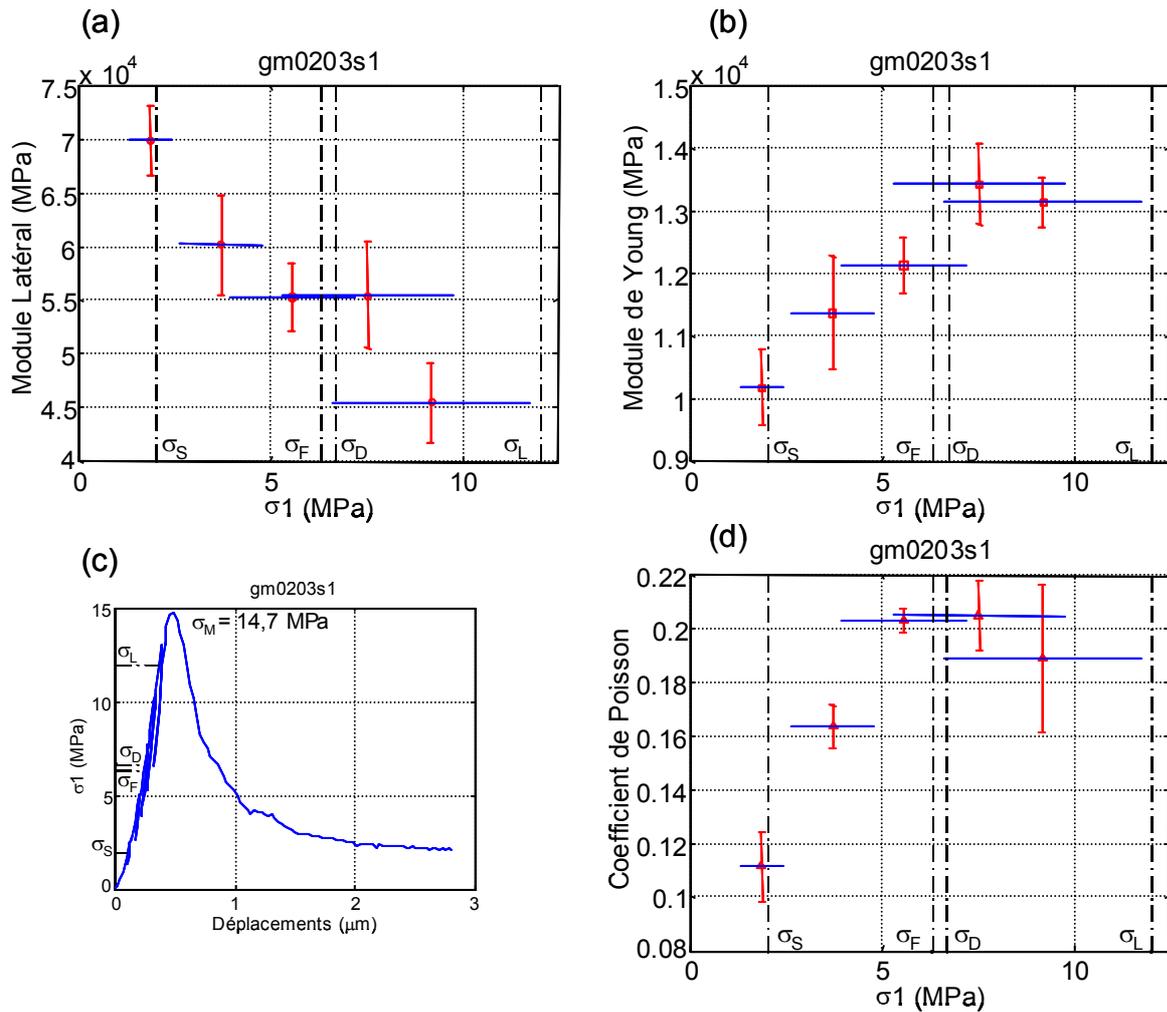


Figure 3.10 : Evolutions des modules élastiques durant la compression uniaxiale de gm0203s1. Les barres verticales indiquent l'écart type, les traits horizontaux, le domaine de contrainte pour lequel la régression linéaire a été réalisée (soit l'intervalle de contrainte de la phase de déchargement). (a) Module latéral de déformation ($M_L = -\sigma_1/\varepsilon_L$). (b) Module de Young ($E = \sigma_1/\varepsilon_A$). (c) Comportement mécanique, courbe contraintes-déplacements et seuils de contraintes. (d) Coefficient de Poisson ($\nu = -\varepsilon_L/\varepsilon_A$). Les seuils de contraintes sont matérialisés par des traits pointillés.

Nous observons une diminution de M_L avec la contrainte (fig. 3.10a). E augmente avec la contrainte (fig. 3.10b) et semble diminuer un peu avant le seuil σ_L (fin de la phase linéaire axiale, fig. 3.10c). ν augmente également avec la contrainte (fig. 3.10d), sa diminution avant σ_L est moins évidente que celle du module de Young compte tenu de l'erreur d'estimation associée à sa dernière valeur.

Essai gm0203s2-MAV11

Le comportement mécanique durant la sollicitation en compression uniaxiale de l'échantillon de micro-arénite gm0203s2 est représenté sur la figure 3.11a et sur la figure 3.11b. La contrainte résiduelle à la fin de l'essai, bien après que le pic de contrainte ait été atteint (54,3 MPa), est de l'ordre de 10 MPa (fig. 3.11b). Au cours de la sollicitation, 7 cycles de chargement-relaxation-déchargement ont pu être réalisés, le dernier cycle se terminant légèrement après le seuil de contrainte σ_L (tableau 3.3) lorsque les courbes σ_1 - ε_A et σ_1 - ε_V deviennent non-linéaires. La non-linéarité de la courbe des déformations latérales débute lorsque la contrainte σ_1 atteint une valeur moindre, soit σ_F (seuil de fissuration, tableau 3.3). La phase de serrage au début de la sollicitation prend fin lorsque σ_1 atteint la valeur de 4,5 MPa (σ_S , tableau 3.3). Nous n'observons pas d'augmentation relative de volume de l'éprouvette, la courbe des déformations volumiques ne présente pas de changement de pente caractéristique, sa pente restant positive. Il n'y a pas de manifestation de la dilatance. Les cycles, et plus particulièrement la succession de chaque phase de déchargement avec la phase de chargement du cycle suivant, paraissent linéaires et réversibles, l'hystérésis est très faible. Pour chaque cycle, l'intersection entre l'ajustement linéaire de la phase de déchargement et l'axe des déformations montre une déformation permanente (ε_P , figure 3.11a).

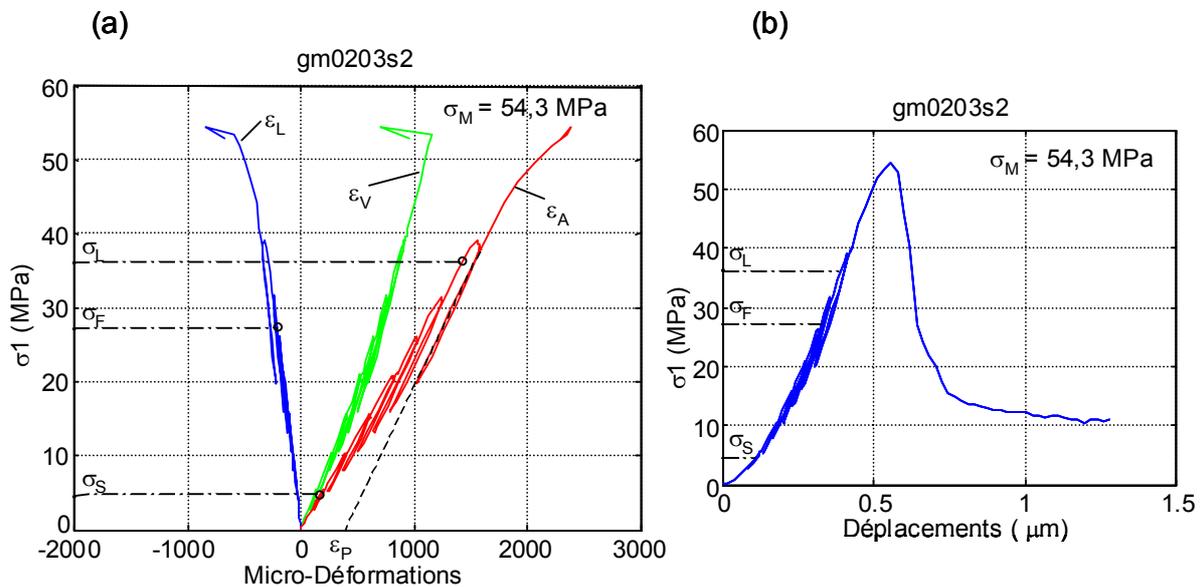


Figure 3.11 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de gm0203s2, micro-arénite de l'intercalaire. (a) Courbes contraintes-déformations, ε_L , ε_A , ε_V sont respectivement les déformations latérales, axiales et volumiques. Les seuils de contraintes caractéristiques σ_S , σ_F , σ_L et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint. (b) Courbe contraintes-déplacements et seuils de contrainte.

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	4,5	8,3
σ_F	27,2	50
σ_L	36,2	66,7
σ_M	54,3	100

Tableau 3.3 : Seuils de contrainte caractéristiques de l'essai gm0203s2. σ_S , σ_F , σ_L et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint.

Les 7 phases de déchargement réalisées durant la sollicitation ont permis de déterminer les modules élastiques de la micro-arénite. Les variations de ceux-ci, soit de E , M_L et de ν sont respectivement présentées sur la figure 3.12.

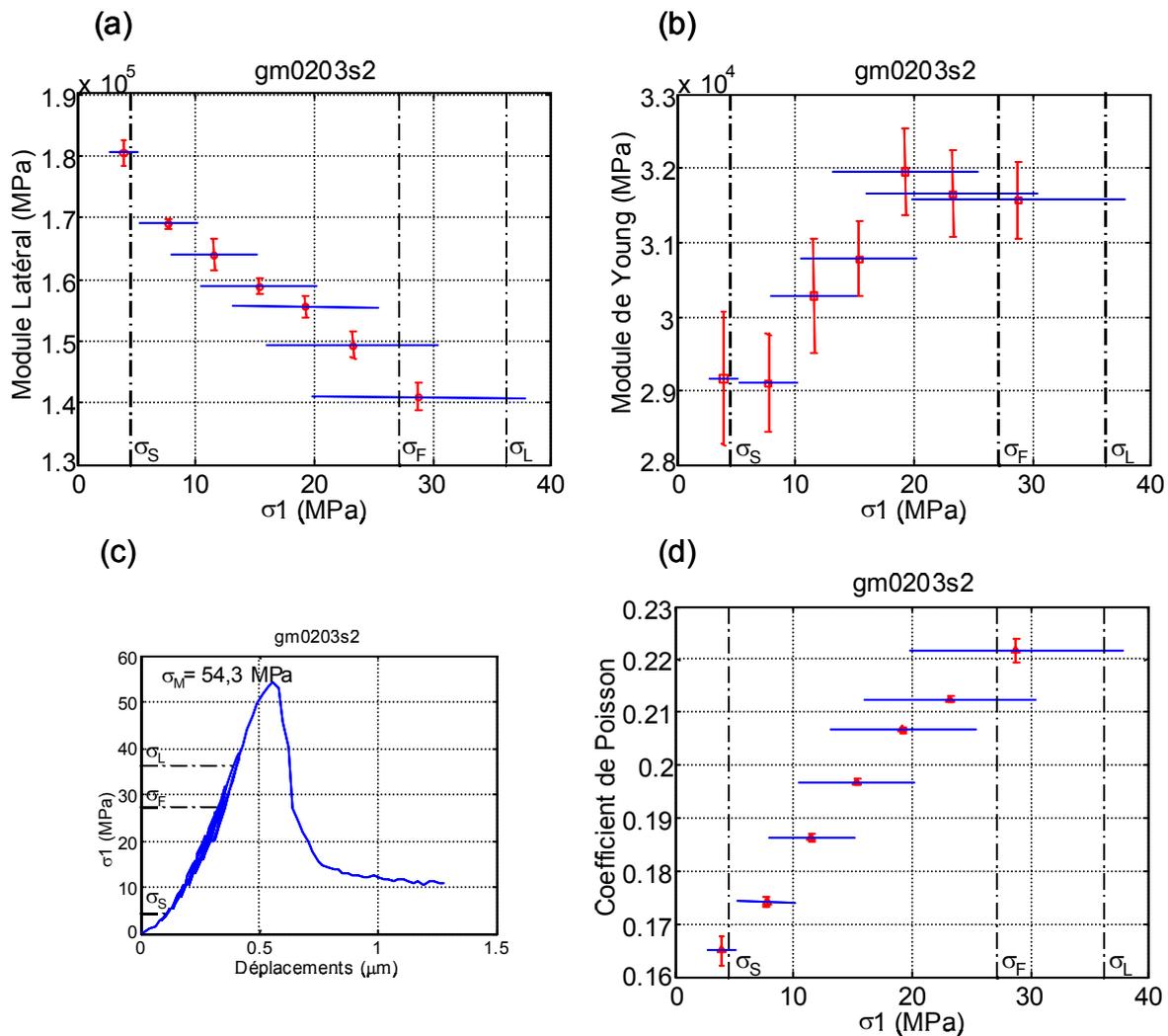


Figure 3.12 : Evolutions des modules élastiques durant la compression uniaxiale de gm0203s2. Les barres verticales indiquent l'écart type, les traits horizontaux, le domaine de contrainte selon lequel la régression linéaire a été réalisée (soit l'intervalle de contrainte de la phase de déchargement). (a) Module latéral de déformation ($M_L = -\sigma_1/\varepsilon_L$). (b) Module de Young ($E = \sigma_1/\varepsilon_A$). (c) Comportement mécanique, courbe contraintes-déplacements et seuils de contraintes. (d) Coefficient de Poisson ($\nu = -\varepsilon_L/\varepsilon_A$). Les seuils de contraintes sont matérialisés par des traits pointillés.

Nous observons clairement une diminution du module latéral M_L au cours de l'essai, tout du moins jusqu'au seuil σ_L . Le module de Young E augmente dans l'ensemble. Toutefois il semble diminuer légèrement un peu avant le seuil de fissuration (σ_F). Le coefficient de Poisson augmente de manière monotone au cours de l'essai.

Essai gm0203s3-MAV11

Les figures 3.13a et 3.13b présentent respectivement les courbes contraintes-déformations ($\sigma_1-\varepsilon_A$, $\sigma_1-\varepsilon_L$ et $\sigma_1-\varepsilon_V$) et la courbe contraintes-déplacements (σ_1-u). Dans le but de

déterminer sans ambivalence les modules élastiques à différents niveaux de contrainte au cours de l'essai, 6 cycles de chargement-relaxation-déchargement ont été réalisés. Ils sont répartis entre le seuil de serrage (σ_S) et au-delà de la partie linéaire de la courbe des déformations axiales (ou de celle de la courbe contraintes-déplacements) *i.e.* au-delà du seuil de contrainte σ_L . Le tableau 3.4 présente les valeurs de contrainte correspondantes aux seuils caractéristiques identifiés. Aux seuils σ_S et σ_L précédents, s'ajoutent les seuils de fissuration (σ_F) et du maximum de contrainte ($\sigma_M = 22,8$ MPa). Après ce dernier, la courbe contraintes-déplacements comporte une pente forte, puis plus faible jusqu'à ce que la contrainte résiduelle d'environ 5 MPa soit atteinte. En ce qui concerne les cycles, et plus particulièrement les phases de déchargement suivies des phases de chargement, nous observons une linéarité ainsi qu'une réversibilité, l'hystérésis est quasiment absent. Des déformations irréversibles seraient attendues si les phases de déchargement étaient totales (fig. 3.13a, courbe σ_1 - ε_A). Nous remarquons les déformations croissantes importantes durant la phase de relaxation du dernier cycle, notamment sur les courbes des déformations latérales et volumiques.

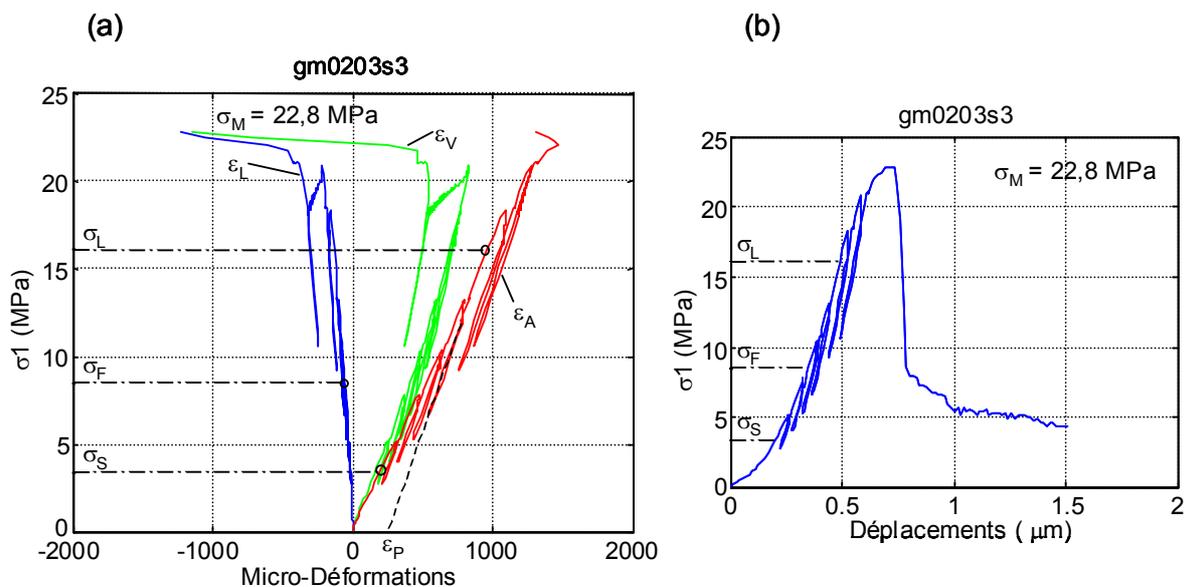


Figure 3.13 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de gm0203s3, arénite argileuse de l'intercalaire. (a) Courbes contraintes-déformations, ε_L , ε_A , ε_V sont respectivement les déformations latérales, axiales et volumiques. Les seuils de contraintes caractéristiques σ_S , σ_F , σ_L , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint. (b) Courbe contraintes-déplacements et seuils de contrainte.

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	3,4	15
σ_F	8,5	37,3
σ_L	16,1	70,6
σ_M	22,8	100

Tableau 3.4 : Seuils de contrainte caractéristiques de l'essai gm0203s3. σ_S , σ_F , σ_L , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint.

Les figures 3.14a, 3.14b et 3.14d présentent respectivement les variations du module latéral de déformation (M_L), du module de Young (E) et du coefficient de Poisson (ν) durant la sollicitation. M_L diminue avec la contrainte, la diminution est plus grande entre le cinquième et le dernier cycle. E augmente clairement avec la contrainte. Quant à ν , il augmente avec la contrainte. La dernière valeur voisine de 0, est à considérer avec prudence étant donné l'observation faite précédemment des courbes de déformations latérales lors du dernier cycle.

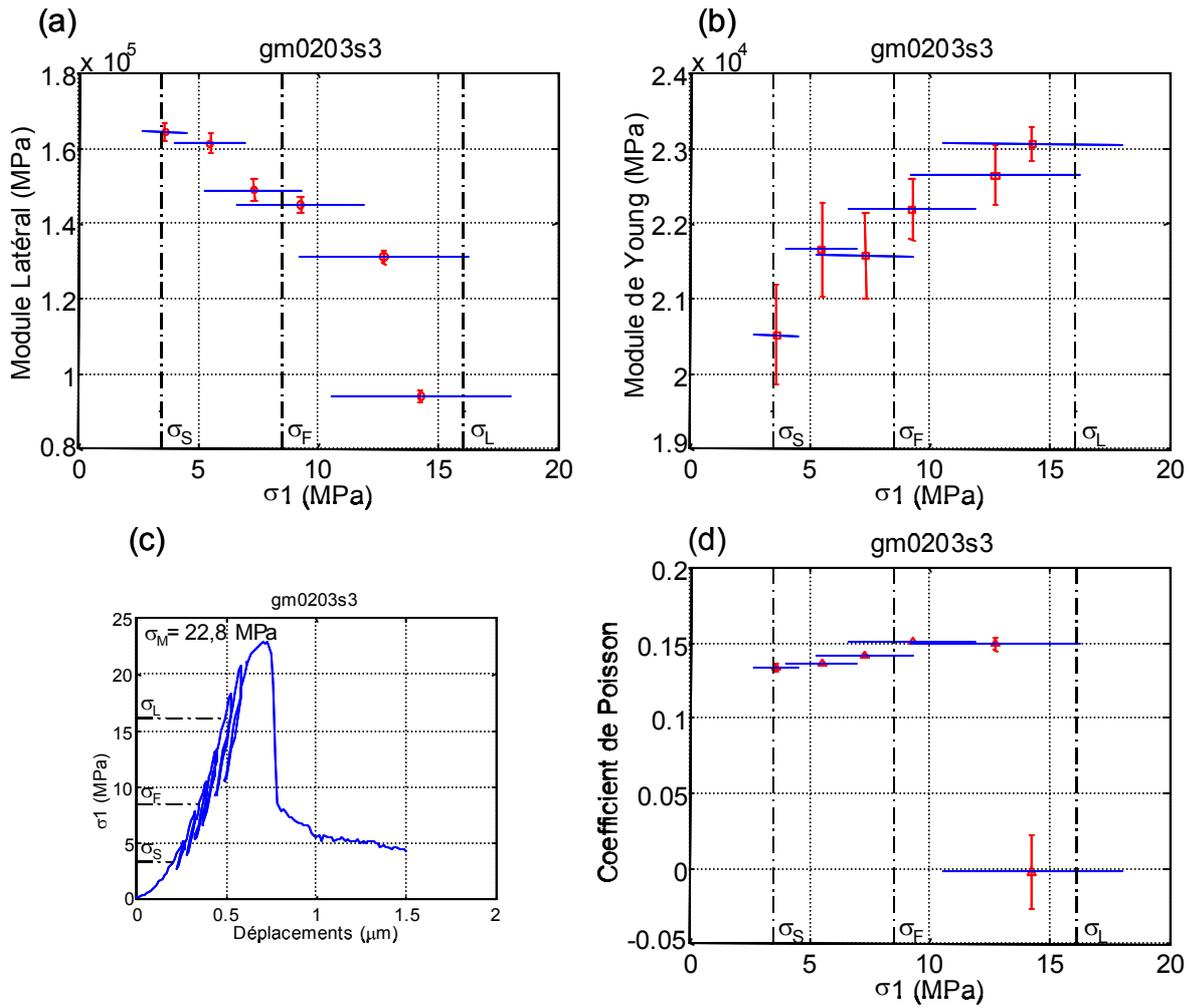


Figure 3.14 : Evolutions des modules élastiques durant la compression uniaxiale de gm0203s3. Les barres verticales indiquent l'écart type, les traits horizontaux, le domaine de contrainte selon lequel la régression linéaire a été réalisée (soit l'intervalle de contrainte de la phase de déchargement). (a) Module latéral de déformation ($M_L = -\sigma_1/\varepsilon_L$). (b) Module de Young ($E = \sigma_1/\varepsilon_A$). (c) Comportement mécanique, courbe contraintes-déplacements et seuils de contraintes. (d) Coefficient de Poisson ($\nu = -\varepsilon_L/\varepsilon_A$). Les seuils de contraintes sont matérialisés par des traits pointillés.

Les résultats acoustiques concernent tout d'abord les vitesses de propagation des ondes et l'atténuation, puis les émissions acoustiques proprement dites, soit l'activité acoustique, l'analyse énergétique, fréquentielle, l'analyse du premier mouvement, et enfin l'analyse statistique (distribution de tailles).

b) Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

Essai gm0203s1-MAV11

Nous avons choisi d'exposer uniquement les résultats des mesures de vitesses et d'atténuation réalisées à des niveaux de contrainte équivalents (ceci sera également notre choix pour l'ensemble des essais), c'est-à-dire les mesures qui ont eu lieu d'une part avant le lancement de l'essai, et d'autre part à chaque fin de phase de relaxation (point A, figure 3.15a) puis à un niveau de contrainte équivalent lors du chargement qui suit (point C, fig. 3.15a). Que cela soit en A ou en C, ces mesures ont été réalisées selon trois rais, l'un axial, les deux autres transversaux (dans la partie basse et dans la partie haute de l'éprouvette). La schématisation de l'éprouvette de la figure 3.15a permet de situer ces rais et présente la signalétique utilisée.

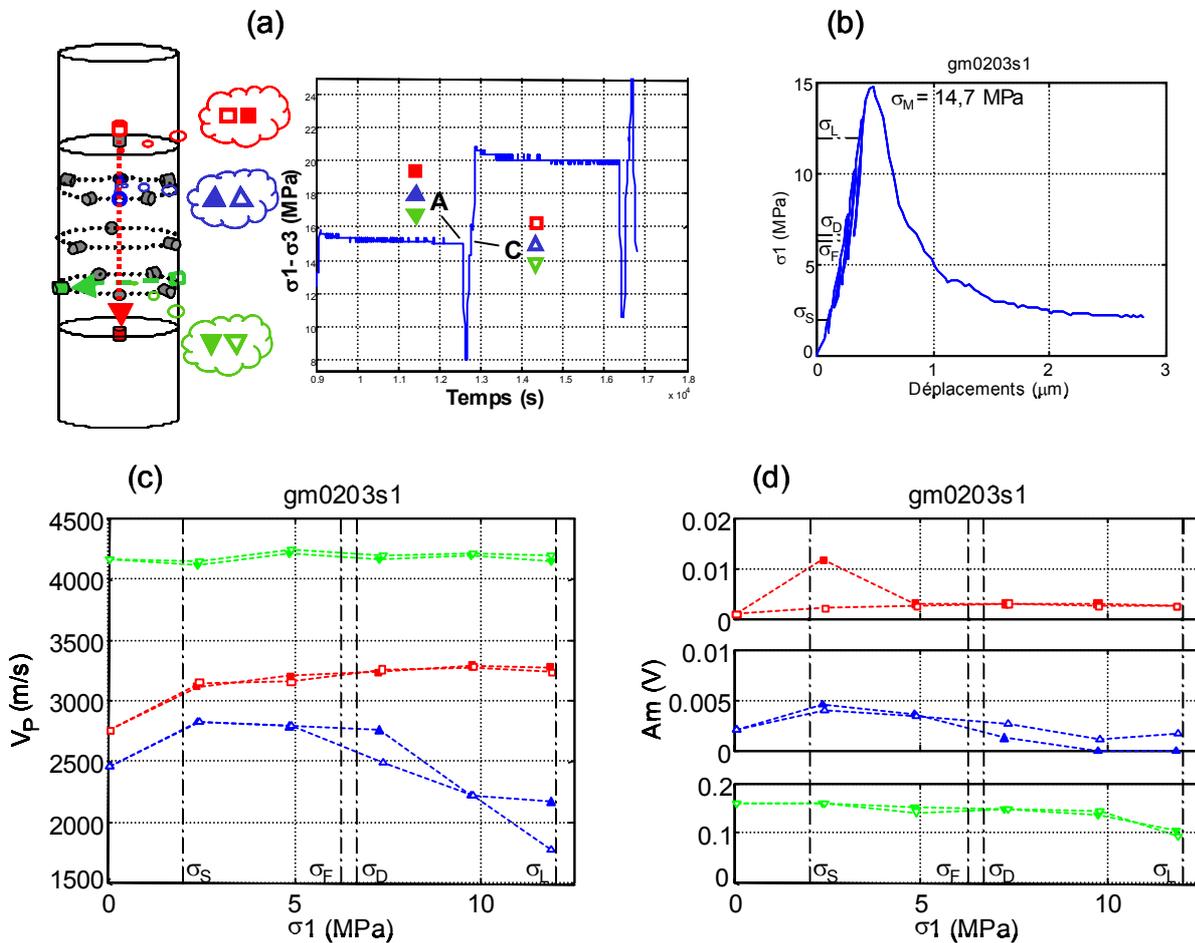


Figure 3.15 : (a) Mesures de vitesses et d'atténuation selon trois rais et signalétique utilisée, essai gm0203s1. (b) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contrainte. (c) Evolution des vitesses de propagation des ondes P durant l'essai mécanique selon le rai axial (\square rouges), le rai transversal haut (Δ bleus) et le rai transversal bas (∇ verts). Les motifs pleins et les motifs vides correspondent respectivement aux points A_i et C_i

de mesure (avec $i=1$ à 5, numéro de cycle). Les seuils de contraintes sont en pointillés. (d) Evolution des amplitudes maximales selon les trois rai précédants aux points A_i et C_i en fonction de la contrainte σ_1 . Les seuils de contraintes sont en pointillés.

Nous observons tout d'abord que les vitesses ou les atténuation en A_i et C_i sont, dans l'ensemble, très voisines ce qui est en accord avec les observations de linéarité et de réversibilité des cycles dans l'analyse précédente du comportement mécanique.

Nous remarquons une hétérogénéité importante entre les vitesses. En effet les vitesses transversales mesurées en bas sont nettement plus élevées que celles mesurée selon l'axe de l'éprouvette et selon le rai transversal supérieur. La vitesse transversale inférieure (∇ verts) apparaît constante et de l'ordre de 4100 m/s. La vitesse transversale supérieure (Δ bleus) augmente durant la phase de serrage jusqu'à atteindre environ 2800 m/s puis décroît faiblement jusqu'à ce que la contrainte atteigne le seuil de dilatance (σ_D). Une fois ce dernier franchi, la vitesse décroît manifestement jusqu'à atteindre 2000 m/s juste avant le seuil σ_L . Quant à la vitesse axiale (\square rouges), elle croît avec la contrainte σ_1 , tout d'abord fortement durant la phase de serrage puis plus faiblement.

Les variations de l'amplitude maximale (A_m) des signaux reçus lors des mesures de vitesses reflètent celles de l'atténuation selon les trois directions de mesure. L'atténuation est d'autant plus forte que l'amplitude maximale est faible. L'amplitude maximale axiale augmente légèrement au cours de l'essai (fig. 3.11d). A_m transversale supérieure montre des variations avec la contrainte similaires à celles observées pour V_p selon le même rai, avec une augmentation durant la phase de serrage puis une diminution une fois que le seuil de contrainte σ_D est atteint. L'amplitude maximale transversale inférieure apparaît constante voire très légèrement décroissante avec la contrainte jusqu'au 4^{ème} cycle, elle décroît plus nettement juste avant σ_L .

Essai gm0203s2-MAV11

La figure 3.16 expose les résultats des mesures de vitesse de propagation des ondes P ainsi que des mesures d'atténuation.

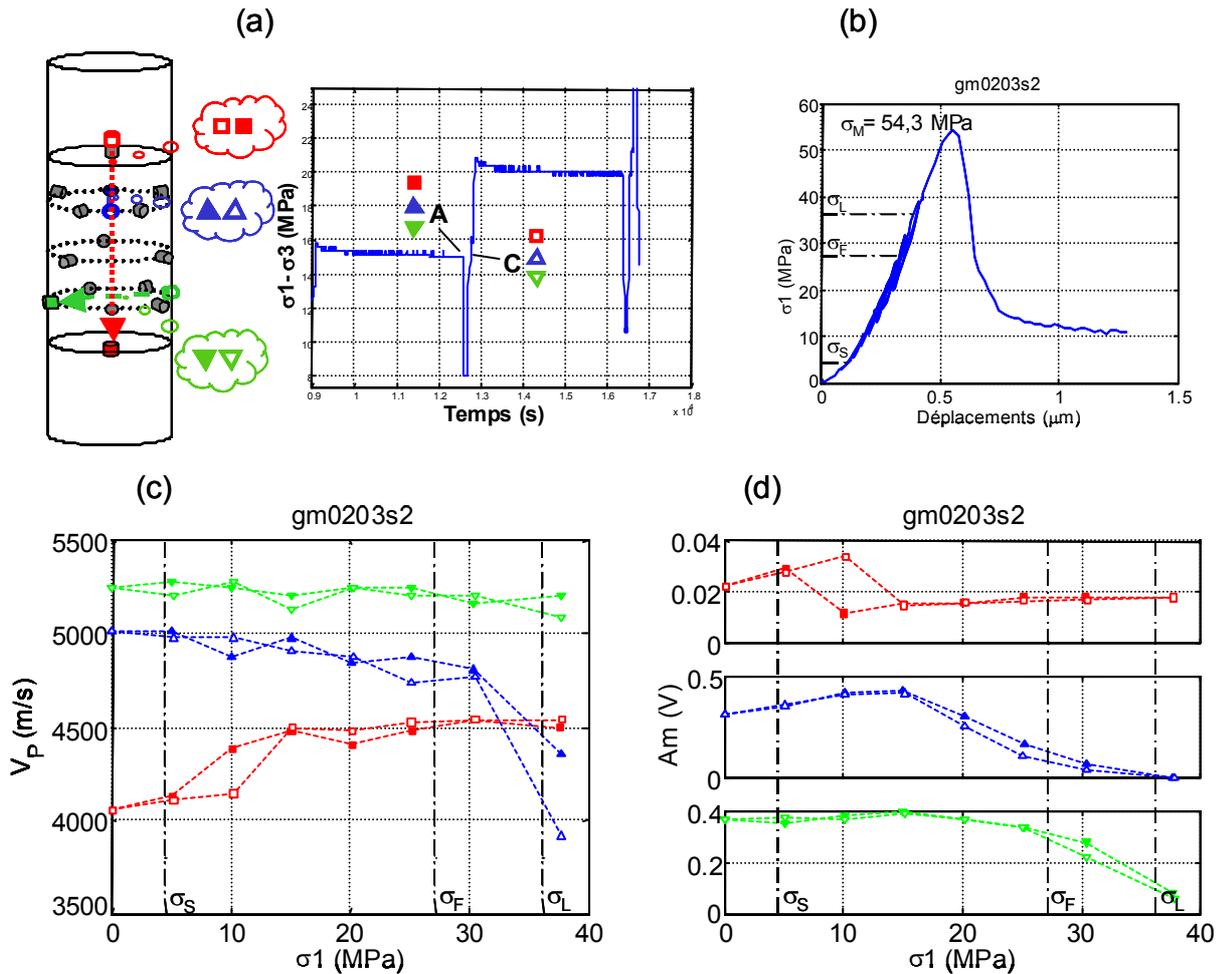


Figure 3.16 : (a) Mesures de vitesses et d'atténuation selon trois rais et signalétique utilisée, essai gm0203s2. (b) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1-u) et seuils de contrainte. (c) Evolution des vitesses de propagation des ondes P durant l'essai mécanique selon le rai axial (\square rouges), le rai transversal haut (Δ bleus) et le rai transversal bas (∇ verts). Les motifs pleins et les motifs vides correspondent respectivement aux points A_i et C_i de mesure (avec $i=1$ à 7, numéro de cycle). Les seuils de contraintes sont en pointillés. (d) Evolution des amplitudes maximales selon les trois rais précédants aux points A_i et C_i en fonction de la contrainte σ_1 . Les seuils de contraintes sont en pointillés.

Nous remarquons tout d'abord que les vitesses ou les amplitudes maximales déterminées aux points A_i semblent très voisines de celles correspondant aux points C_i . Nous observons ensuite une certaine hétérogénéité dans les valeurs de vitesses ou d'amplitudes mesurées. Particulièrement, les vitesses initiales transversales (de 5000 à 5250 m/s) sont bien supérieures à la vitesse axiale (de l'ordre de 4000 m/s). De plus les vitesses transversales inférieures (∇ verts, mesurées dans la partie basse de l'éprouvette) sont supérieures aux vitesses transversales mesurées dans la partie haute. Cette différence notable est conservée durant la sollicitation, les deux vitesses transversales diminuent légèrement avec la contrainte de manière similaire (fig. 3.16c). La diminution de la vitesse transversale inférieure est tout de

même suggestive. Par contre, la vitesse mesurée selon le rai supérieur (Δ bleus) diminue clairement, la diminution étant plus marquée une fois le seuil σ_L (36,2 MPa) atteint. La vitesse axiale (\square rouges) augmente avec la contrainte, elle atteint environ 4500 m/s un peu après σ_L . Les amplitudes maximales (A_m) axiales (mesurées selon le rai axial, \square rouges de la figure 3.16d) augmentent durant la phase de serrage, semblent diminuer ensuite, puis augmentent très légèrement. Les amplitudes transversales supérieures (Δ bleus) augmentent jusqu'à ce que σ_1 atteigne un peu plus de 15 MPa, elles diminuent ensuite clairement. Quant aux amplitudes maximales mesurées dans la partie basse de l'éprouvette, elles apparaissent constantes jusqu'à ce que σ_1 atteigne environ 20 MPa, elles diminuent distinctement après le seuil de fissuration ($\sigma_F = 27,2$ MPa).

Essai gm0203s3-MAV11

Les variations des vitesses de propagation des ondes P (V_P) ainsi que celles des amplitudes maximales (A_m) qui reflètent l'atténuation au cours de la sollicitation de gm0203s3, sont tracées sur les figures 3.17c, 3.17d et 3.17e.

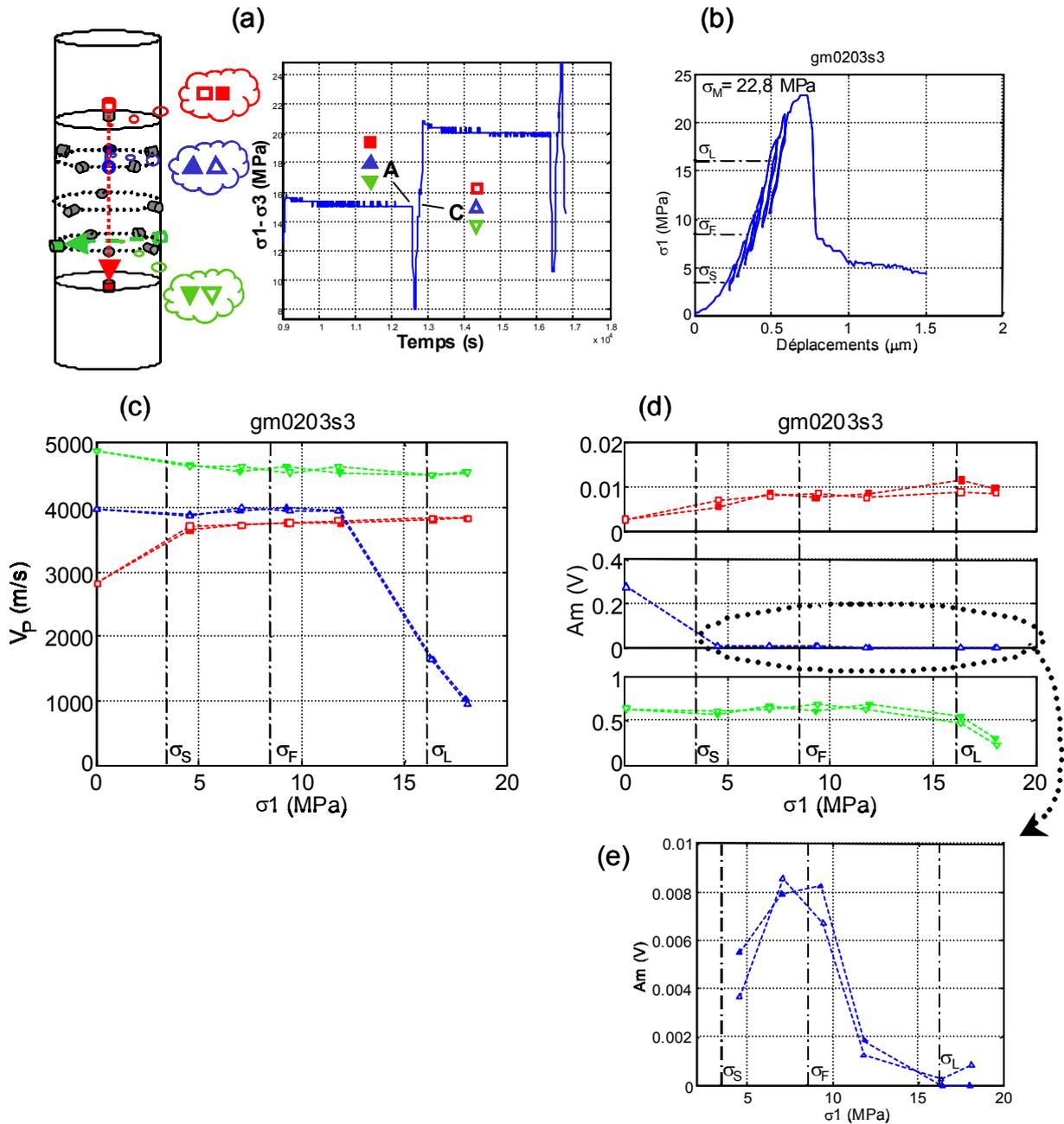


Figure 3.17 : (a) Mesures de vitesses et d'atténuation selon trois rais et signalétique utilisée, essai gm0203s3. (b) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contrainte. (c) Evolution des vitesses de propagation des ondes P durant l'essai mécanique selon le rai axial (\square rouges), le rai transversal haut (Δ bleus) et le rai transversal bas (∇ verts). Les motifs pleins et les motifs vides correspondent respectivement aux points A_i et C_i de mesure (avec $i=1$ à 6, numéro de cycle). Les seuils de contraintes sont en pointillés. (d) Evolution des amplitudes maximales selon les trois rais précédents aux points A_i et C_i en fonction de la contrainte σ_1 . (e) Agrandissement du graphique représentant les amplitudes maximales transversales supérieures en fonction de la contrainte. Les seuils de contraintes sont en pointillés.

Les vitesses comme les amplitudes maximales mesurées en A_i (fig. 3.17a) sont quasiment égales à celles mesurées en C_i . Les vitesses mesurées avant le lancement de l'essai ($\sigma_1 \sim 0$ MPa) diffèrent selon le rai (axial, transversal supérieur, transversal inférieur). La vitesse axiale (\square rouges) est la plus faible, elle est d'environ 2800 m/s. La vitesse transversale supérieure (Δ bleus) est de 4000 m/s. La vitesse initiale la plus élevée est celle qui a été mesurée selon le rai transversal inférieur (∇ verts), elle est d'environ 4800 m/s. Cette dernière restera supérieure aux deux autres durant la sollicitation, ou tout du moins durant la période de mesures de vitesses qui ont lieu à chaque cycle de chargement-relaxation-déchargement (fig. 3.17a et 3.17b). Les vitesses transversales diminuent durant la phase de serrage, elles semblent ensuite augmenter très légèrement jusqu'au 4^{ème} cycle (soit le 5^{ème} point des courbes). Puis, la vitesse transversale supérieure diminue brutalement, elle est d'environ 1500 m/s lorsque σ_1 est égale à σ_L (seuil de non-linéarité axiale), la diminution de la vitesse transversale inférieure reste très suggestive. Quant à la vitesse mesurée selon le rai axial (\square rouges, fig. 3.17a), elle augmente avec la contrainte, assez fortement durant la phase de serrage, puis plus doucement.

L'allure des variations des amplitudes maximales (fig. 3.17d et 3.17e) semblent suivre celle de l'évolution des vitesses précédemment décrite. L'amplitude axiale augmente avec la contrainte. L'amplitude transversale supérieure diminue fortement durant la phase de serrage, atteignant des valeurs très faibles (voir l'agrandissement, fig. 3.17e). Elle augmente ensuite avec la contrainte jusqu'à ce que σ_1 soit proche du seuil de fissuration σ_F (8,5 MPa). Cette A_m diminue ensuite dramatiquement jusqu'au seuil σ_L , où elle devient quasiment nulle. La courbe exposant les variations de l'amplitude maximale transversale inférieure suggère une très légère diminution au cours de la phase de serrage, suivie d'une augmentation plus nette mais toutefois faible et enfin une décroissance entre le 4^{ème} et le 5^{ème} cycle.

c) Emissions acoustiques

Activité acoustique

Essai gm0203s1-MAV11

Rappelons que nous avons écarté le comptage des coups d'EA (difficultés rencontrées lors de la distinction des coups effectivement dus à l'activité acoustique de ceux comptés lors des mesures de vitesses), l'activité acoustique durant un essai est quantifiée par le nombre d'événements d'EA enregistrés. La figure 3.18a présente le nombre cumulé d'événements en fonction des déplacements ainsi que le comportement mécanique (courbe σ_1 -u). Les seuils de contraintes délimitant les différentes phases du comportement mécanique sont également représentés. Le nombre total d'événement d'EA enregistrés est de 675. Nous observons une activité acoustique faible durant la phase de fermeture des fissures préexistantes (phase de serrage délimitée par σ_s). L'activité acoustique devient plus forte ensuite, l'augmentation

étant plus marquée après le seuil de dilataance σ_D . L'activité la plus forte a lieu durant la phase non-linéaire du comportement mécanique, *i.e.* après σ_L et jusqu'au pic (σ_M). Elle reste importante après le pic de contrainte puis devient faible. Le tableau 3.5 présente les nombres d'événements enregistrés avant chaque seuil de contrainte. La plupart des événements (392, soit 58 %) a eu lieu après le pic de contrainte (σ_M).

Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	Proportion d'événements d'EA précédant le seuil (%)
σ_S	2	17	2,5
σ_F	6,3	75	11
σ_D	6,7	75	11
σ_L	12	161	24
σ_M	14,7	283	42

Tableau 3.5 : Seuils de contrainte, nombre et proportion d'événements d'EA précédant chaque seuil de l'essai gm0203s1-MAV11.

La figure 3.18b est un agrandissement de la figure 3.18a. Les événements d'EA se produisent durant les phases de chargement. Les phases de relaxation et de déchargement sont asismiques. L'activité ne reprend que lorsque, au cours du rechargement suivant ces deux phases (relaxation, déchargement), la contrainte atteint le maximum de la phase de chargement précédente. Ce comportement acoustique est bien connu comme étant « l'effet Kaiser » (Holcomb, 1993). L'activité acoustique et le comportement mécanique apparaissent ainsi corrélés durant toutes les phases de l'essai.

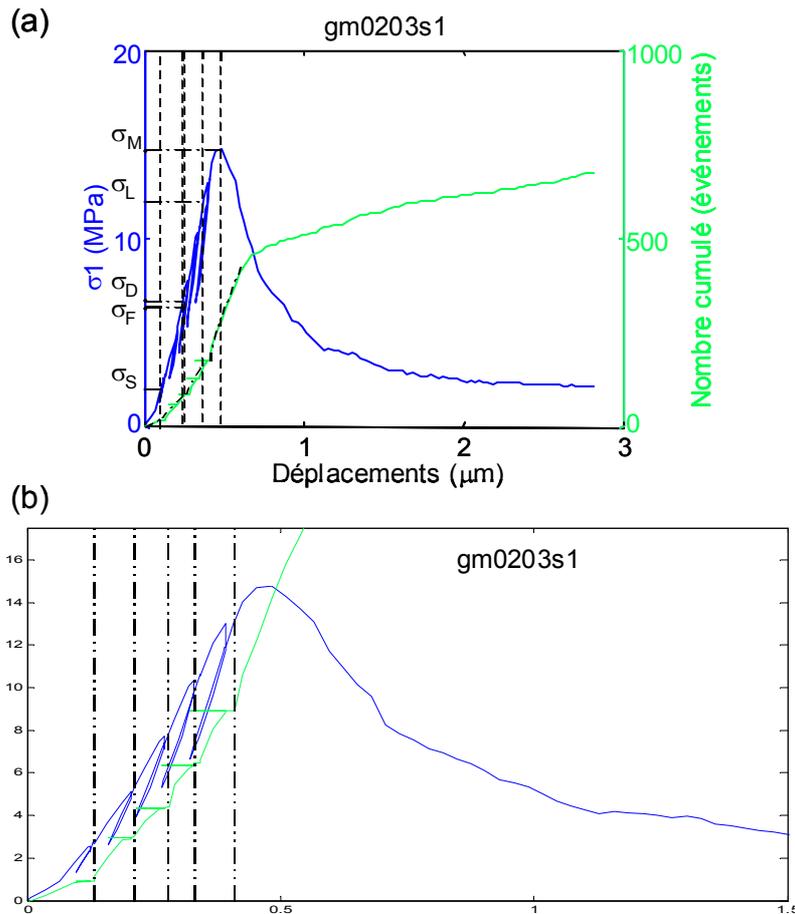


Figure 3.18 : (a) Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de gm0203s1 et activité acoustique (nombre cumulé d'événements d'EA enregistrés). (b) Agrandissement de (a), comportement acoustique durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement.

Essai gm0203s2-MAV11

Comme dans l'analyse de l'essai gm0203s1 précédent, l'activité acoustique est quantifiée par le nombre d'événements d'EA enregistrés et identifiés au cours de la sollicitation de l'éprouvette gm0203s2. Au total, 473 événements ont été enregistrés et clairement identifiés (pointés) durant l'essai de compression uniaxiale de l'échantillon de micro-arénite. Plus précisément, le tableau 3.6 présente les quantités d'événements qui se produisirent avant chaque seuil de contrainte caractéristique. La plupart des événements a eu lieu après le pic de contrainte. La figure 3.19a présente la superposition de l'activité acoustique (nombre cumulé d'événements) et du comportement mécanique (courbe σ_1 - u et seuils de contrainte). L'activité apparaît faible jusqu'à ce que la valeur de σ_1 devienne supérieure au seuil de fissuration (σ_F , tableau 3.6). L'activité acoustique augmente alors puis accélère juste avant le maximum de contrainte (σ_M). Elle se maintient ainsi durant le comportement post-pic. L'activité acoustique se calme finalement lorsque σ_1 est proche de la contrainte résiduelle.

L'observation détaillée de l'activité acoustique durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement offerte par la figure 3.19b montre distinctement l'effet Kaiser déjà rencontré lors de la compression uniaxiale de gm0203s1 (arénite ferrifère de l'intercalaire grise-brune).

Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	Proportion d'événements d'EA précédant le seuil (%)
σ_S	4,5	4	0,8
σ_F	27,2	24	5
σ_L	36,2	40	8
σ_M	54,3	193	41

Tableau 3.6 : Seuils de contrainte, nombre et proportion d'événements d'EA précédant chaque seuil de l'essai gm0203s2-MAV11.

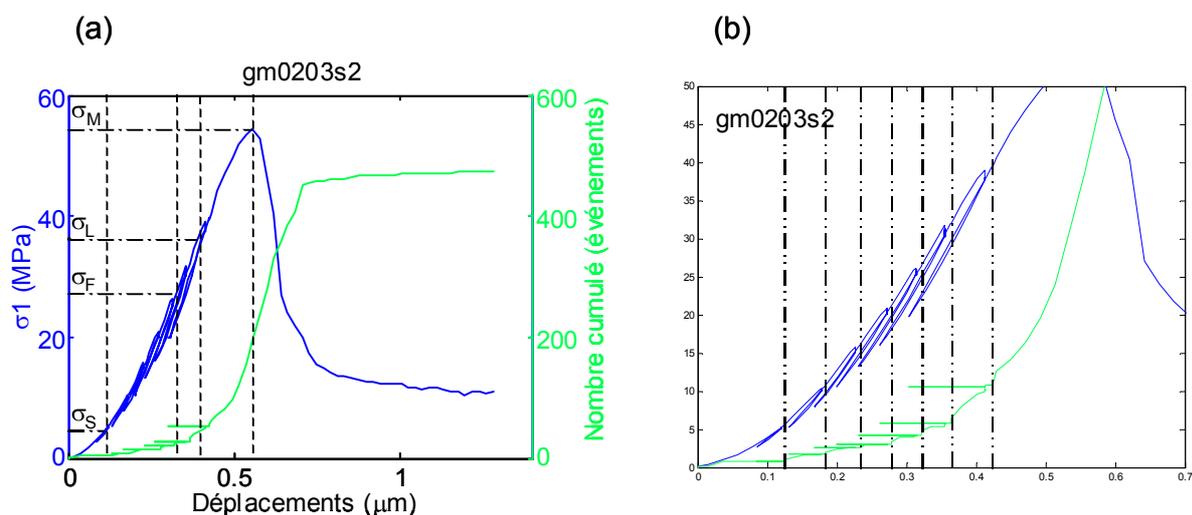


Figure 3.19 : (a) Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de gm0203s2 et activité acoustique (nombre cumulé d'événements d'EA enregistrés). (b) Agrandissement de (a), comportement acoustique durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement.

Essai gm0203s3-MAV11

Le nombre total d'événements d'EA enregistrés durant la sollicitation en compression uniaxiale de l'échantillon d'arénite argileuse gm0203s3 est de 338. Cette activité acoustique se répartit de manière différente selon les phases du comportement mécanique (tableau 3.7 ci-après), la plupart des événements se produisant avant le pic de contrainte (seuil σ_M). La figure 3.20a permet d'observer l'activité acoustique qui se produit durant la sollicitation. La phase de serrage s'accompagne d'une activité acoustique importante comparée aux 2 essais

précédents, en effet 29 événements d'EA ont eu lieu (tableau 3.7). L'activité se calme ensuite. Elle augmente lorsque σ_1 atteint le seuil de non-linéarité axiale ($\sigma_L = 16,1$ MPa). Une brève accalmie se produit cependant juste avant le pic de contrainte. Au-delà et jusqu'à ce que la contrainte résiduelle (de l'ordre de 5 MPa) soit atteinte, l'activité acoustique est de nouveau forte. Ainsi, dans l'ensemble, à chaque phase du comportement mécanique, correspond un régime acoustique particulier.

Lorsque nous observons le comportement acoustique plus en détail (figure 3.20b), et notamment durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement, l'effet Kaiser vu précédemment (essais gm0203s1 et gm0203s2) ne se produit pas clairement. En effet, si l'activité acoustique apparaît nulle durant les phases de relaxation et de déchargement, elle ne recommence pas nécessairement dès que σ_1 atteint, lors de la phase de chargement du cycle suivant, la valeur du maximum de contrainte du cycle précédent. Pour les deux derniers cycles, les événements d'EA se produisent de nouveau un peu avant ce niveau de contrainte (par exemple, le petit carré noir sur la fig. 3.20b). Pour les autres cycles, l'activité acoustique se manifeste de nouveau un peu après (voir le petit rond noir sur la fig. 3.20b, par exemple).

Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	Proportion d'événements d'EA précédant le seuil (%)
σ_S	3,4	29	8,5
σ_F	8,5	61	18
σ_L	16,1	88	26
σ_M	22,8	218	64,5

Tableau 3.7 : Seuils de contrainte et nombre d'événements d'EA précédant chaque seuil de l'essai gm0203s3-MAV11.

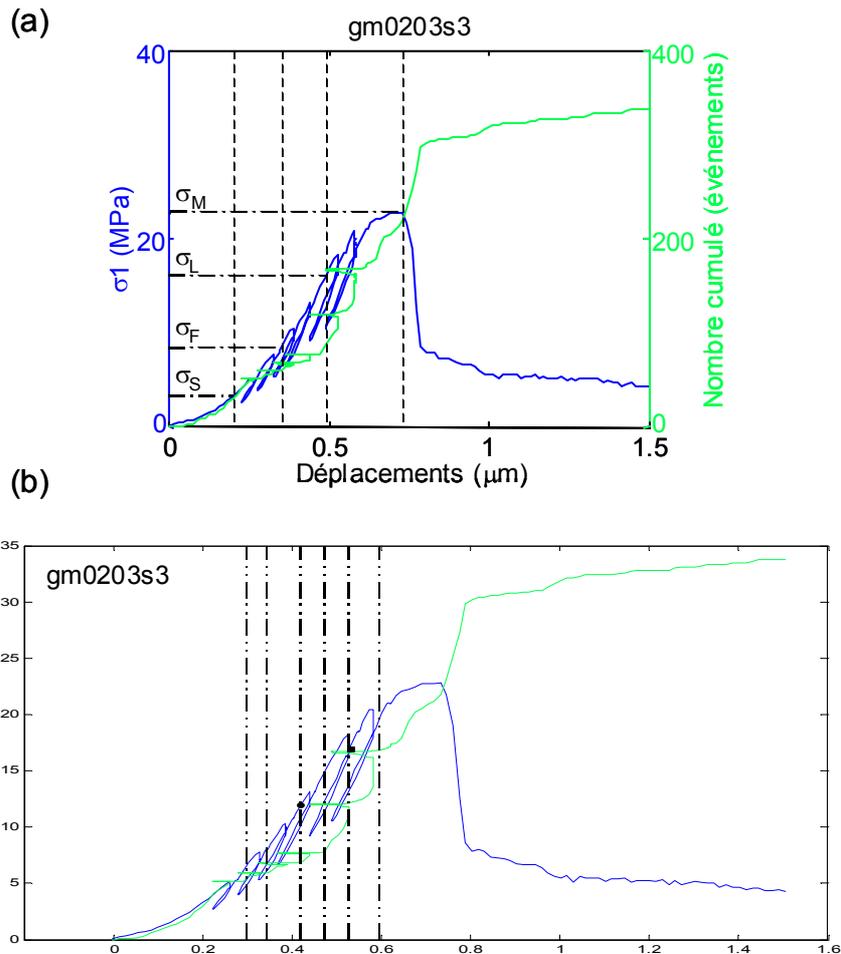


Figure 3.20 : (a) Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de gm0203s3 et activité acoustique (nombre cumulé d'événements d'EA enregistrés). (b) Agrandissement de (a), comportement acoustique durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement.

Analyse énergétique

Essai gm0203s1-MAV11

Une autre manière d'observer l'activité acoustique est d'étudier l'énergie du signal cumulée des événements (figure 3.21). Nous observons des événements très énergétiques durant la phase de serrage. Leur énergie est ensuite relativement faible. Un peu avant le seuil de dilatance, des événements forts (énergie élevée) ont été enregistrés. D'autres se produisent également avant le pic de contrainte et juste après. Les événements se produisant ensuite, en fin de propagation des fractures macroscopiques, sont plus petits (l'énergie est une mesure de la taille d'un événement).

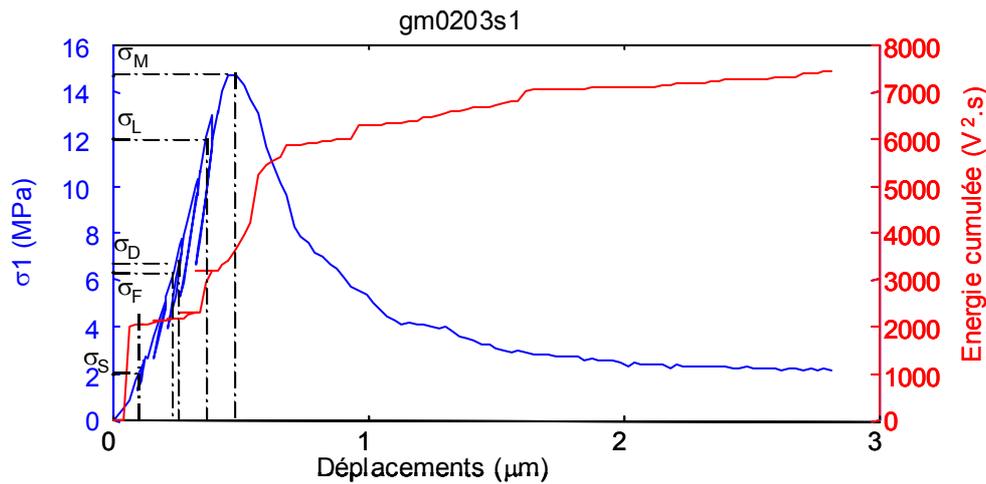


Figure 3.21 : Comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et énergies cumulées des événements enregistrés durant la sollicitation de gm0203s1. Les seuils de contraintes délimitent les phases du comportement mécanique.

Essai gm0203s2-MAV11

La figure 3.22 expose la courbe des énergies (E_s) cumulées des événements d'EA est superposée au comportement mécanique. Les 4 événements de la phase de serrage sont très énergétiques. Les événements suivants sont petits (faiblement énergétiques) et ce jusqu'à ce que σ_1 atteigne le seuil σ_L . Même si l'énergie cumulée semble augmenter ensuite, cela ne traduit pas nécessairement que les événements sont plus forts, l'activité acoustique étant également plus importante au voisinage et après ce seuil (figure 3.19a). Si l'on fait abstraction des événements de la phase de serrage, les événements les plus forts se produisent une fois σ_L dépassé, surtout juste avant le pic de contrainte. Lorsque ce dernier est atteint, on peut observer un palier qui indique des événements plus petits, puis les événements forts surviennent de nouveau, un second palier a lieu lorsque la décroissance de la courbe σ_1 - u devient plus faible, le dernier palier se prolonge jusqu'à la fin de l'essai lorsque la contrainte résiduelle est atteinte.

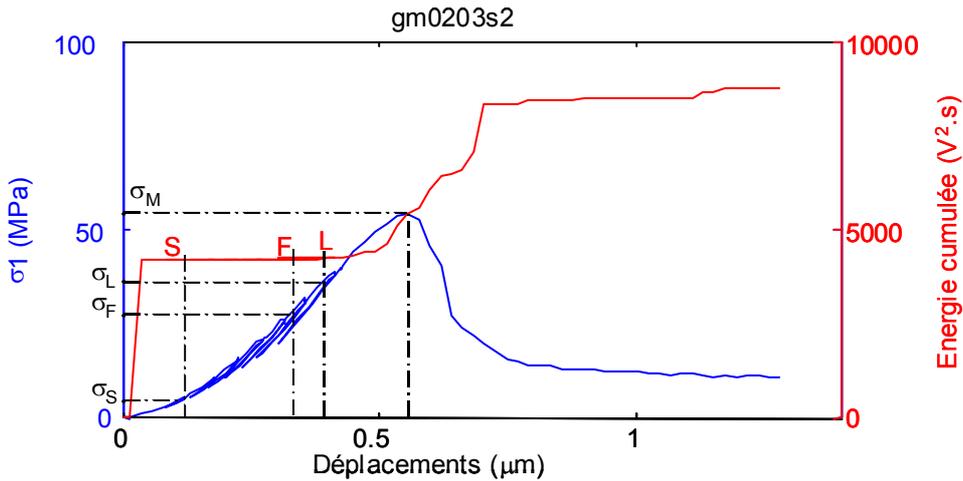


Figure 3.22 : Comportement mécanique (courbe σ - u) et énergies cumulées des événements enregistrés durant la sollicitation de gm0203s2. Les seuils de contraintes délimitent les phases du comportement mécanique.

Essai gm0203s3-MAV11

La figure 3.23 ci-après présente l'énergie cumulée des événements d'EA superposée au comportement mécanique. Les événements de la phase de serrage sont de faible énergie. Il en est de même pour ceux qui ont eu lieu avant le seuil σ_L , les événements les plus énergétiques se produisant après ce seuil, avant et après le pic de contrainte σ_M .

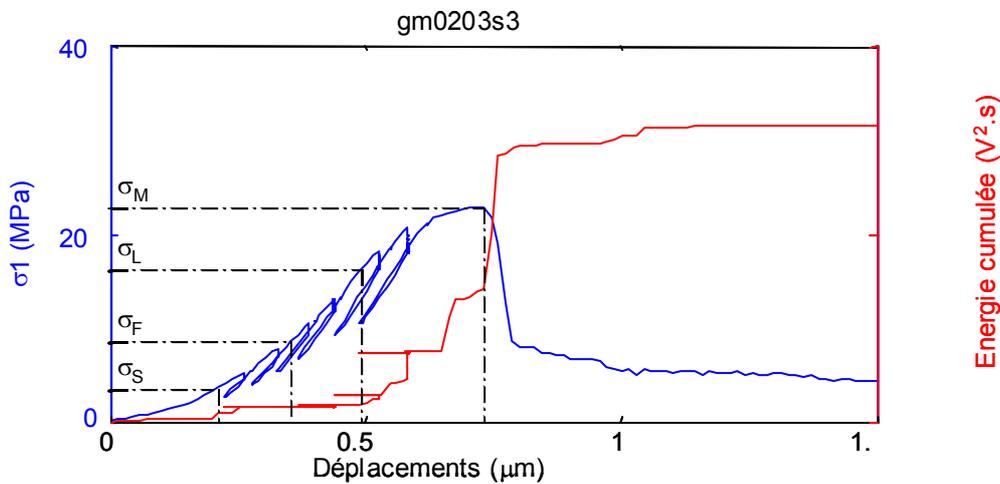


Figure 3.23 : Comportement mécanique (courbe σ - u) et énergies cumulées des événements enregistrés durant la sollicitation de gm0203s3. Les seuils de contraintes délimitent les phases du comportement mécanique.

Analyse fréquentielle

Essai gm0203s1-MAV11

Le contenu fréquentiel des événements a été étudié, nous avons choisi d'observer l'évolution de la fréquence centrale des événements. La figure 3.24a présente les fréquences centrales des événements enregistrés durant l'essai gm0203s1, les différentes phases du comportement mécanique sont représentées par les seuils de contraintes (figure 3.24b). Nous observons globalement, une diminution des fréquences centrales des événements au cours de l'essai. Si les basses fréquences (<100 kHz) semblent être présentes durant toutes les phases, ce n'est pas le cas des hautes fréquences (>200 kHz). Durant la phase de serrage, les événements ont des fréquences centrales (f_{50}) comprises entre 50kHz et environ 250 kHz, la plupart sont caractérisés par des f_{50} supérieures à 150 kHz. Entre le seuil σ_S et le seuil de fissuration (σ_F confondu avec le seuil de dilatance σ_D), les fréquences centrales dominantes se situent entre 125 kHz et 200 kHz. Entre σ_{F-D} et σ_L , la plupart des événements présentent des fréquences centrales comprises entre 100 et 150 kHz. On retrouve cette dernière tendance après σ_L . Au-delà du pic de contrainte (σ_M) les événements ont des fréquences centrales plus basses, inférieures à 100 kHz.

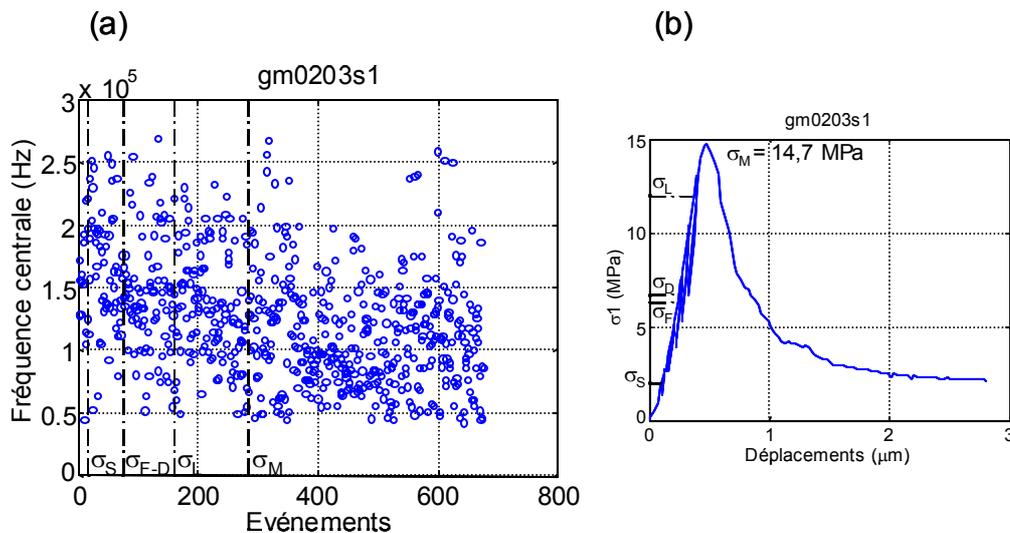


Figure 3.24 : (a) Fréquence centrale de chaque événement d'EA et seuils de contrainte pour l'essai gm0203s1. (b) Comportement mécanique.

Essai gm0203s2-MAV11

La fréquence centrale moyenne (f_{50}) des 473 événements d'EA enregistrés durant la sollicitation en compression uniaxiale de gm0203s2 a été déterminée, la figure 3.25a l'expose. Nous observons que f_{50} est comprise entre 50 kHz et 300 kHz pour les événements qui se sont produits avant que le seuil σ_L (36,2 MPa) ne soit franchi par σ_1 (fig. 3.25b), la

plupart ayant des fréquences centrales voisines de 200 kHz. Durant la phase de non-linéarité axiale (entre σ_L et σ_M), f_{50} est comprise entre 100 kHz et un peu plus de 300 kHz. La majorité des événements est caractérisée par une fréquence centrale supérieure à 200 kHz. Il s'agit d'événements hautes fréquences. Après le pic de contrainte, c'est-à-dire après le seuil σ_M (54,3 MPa), f_{50} diminue progressivement, pour la plupart des derniers événements, la fréquence centrale est de l'ordre de 50 kHz. Ce sont des événements d'EA basses fréquences.

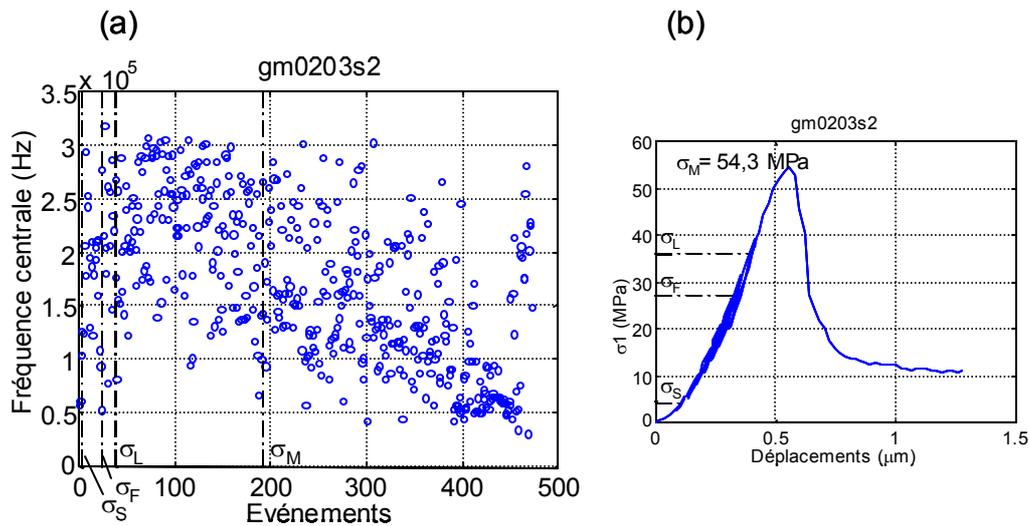


Figure 3.25 : (a) Fréquence centrale de chaque événement d'EA et seuils de contrainte pour l'essai gm0203s2. (b) Comportement mécanique.

Essai gm0203s3-MAV11

L'analyse fréquentielle présentée ici ne diffère pas de celles qui ont été réalisées pour les précédents essais, elle consiste essentiellement en l'observation des variations de la fréquence centrale (f_{50}) des événements durant la sollicitation. Ces variations sont présentées sur la figure 3.26a. Nous observons, selon les phases du comportement mécanique :

- avant σ_S , c'est-à-dire durant la phase de serrage, la fréquence centrale des événements est largement comprise entre 50 kHz et 200 kHz, la plupart des événements étant caractérisée par une f_{50} de l'ordre de 100 kHz.
- entre σ_S et σ_F , les événements sont plus hautes fréquences, la f_{50} atteignant près de 225 kHz pour certains.
- après le seuil de fissuration, entre σ_F et σ_L , les fréquences centrales sont en majorité comprises entre 150 kHz et 250 kHz. Les événements durant cette phase sont plus haute fréquence que ceux des phases précédentes.
- durant la partie non-linéaire du comportement mécanique (axial), soit après σ_L et jusqu'au pic de contrainte σ_M , la plupart des événements ont leur fréquence centrale

comprise entre 125 et 175 kHz. Certains événements basse fréquence sont présents. Nous n'observons plus d'événements haute fréquence comme dans la phase précédente du comportement.

- après le pic de contrainte, nous retrouvons des f_{50} réparties selon la bande étroite de fréquences décrite précédemment (125 à 175 kHz). Des fréquences centrales nettement plus hautes (250 kHz) sont également observées. Les derniers événements enregistrés sont basse fréquence (≤ 100 kHz).

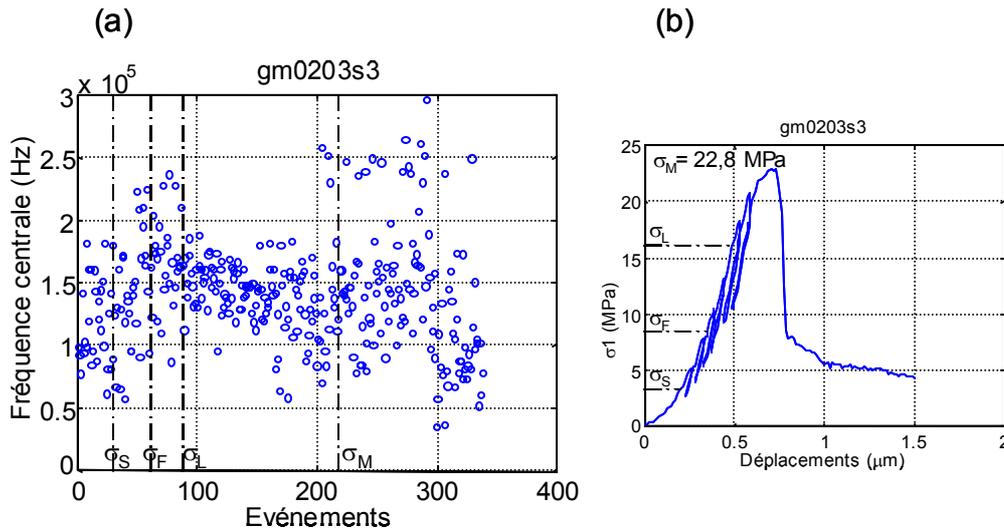


Figure 3.26 : (a) Fréquence centrale de chaque événement d'EA et seuils de contrainte de l'essai gm0203s3. (b) Comportement mécanique.

Analyse du premier mouvement

L'analyse du premier mouvement des ondes reçues par les capteurs répartis de manière équilibrée sur la surface de l'éprouvette soumise à la compression, apporte des informations quant au mécanisme de la source de l'événement d'EA.

Essai gm0203s1-MAV11

La figure 3.27a expose les proportions de premiers mouvements compressifs des événements enregistrés durant l'essai gm0203s1. Les phases du comportement mécanique sont également représentées par les seuils de contrainte (fig. 3.27d). Plus de 70 % des voies (soit plus de 5 voies sur 8) ont été utilisées (fig. 3.27c) dans la détermination de ces proportions, ce qui permet de considérer une bonne couverture spatiale de chaque événement compte tenu du réseau acoustique (cf. chapitre 2, figure 2.11). Les proportions des mécanismes de source (extension E, mixte M, compression C) sont exposées pour chaque phase du comportement mécanique sur la figure 3.27b. Durant la phase de serrage, c'est-à-dire avant le seuil σ_S , les sources de type E sont majoritaires, les sources de type C minoritaires. Entre les seuils σ_S et

σ_{F-D} (les seuils de fissuration et de dilatance sont confondus sur ce mode de représentation), les sources mixtes (type M) dominant, les sources C restent minoritaires. Celles-ci deviennent ensuite plus nombreuses que les sources de type E, les mécanismes de type M restant prépondérants jusqu'au pic de contrainte (seuil σ_M) et même après (fig. 3.27a et 3.27d). En fin d'essai, les mécanismes de compression (type C) sont majoritaires.

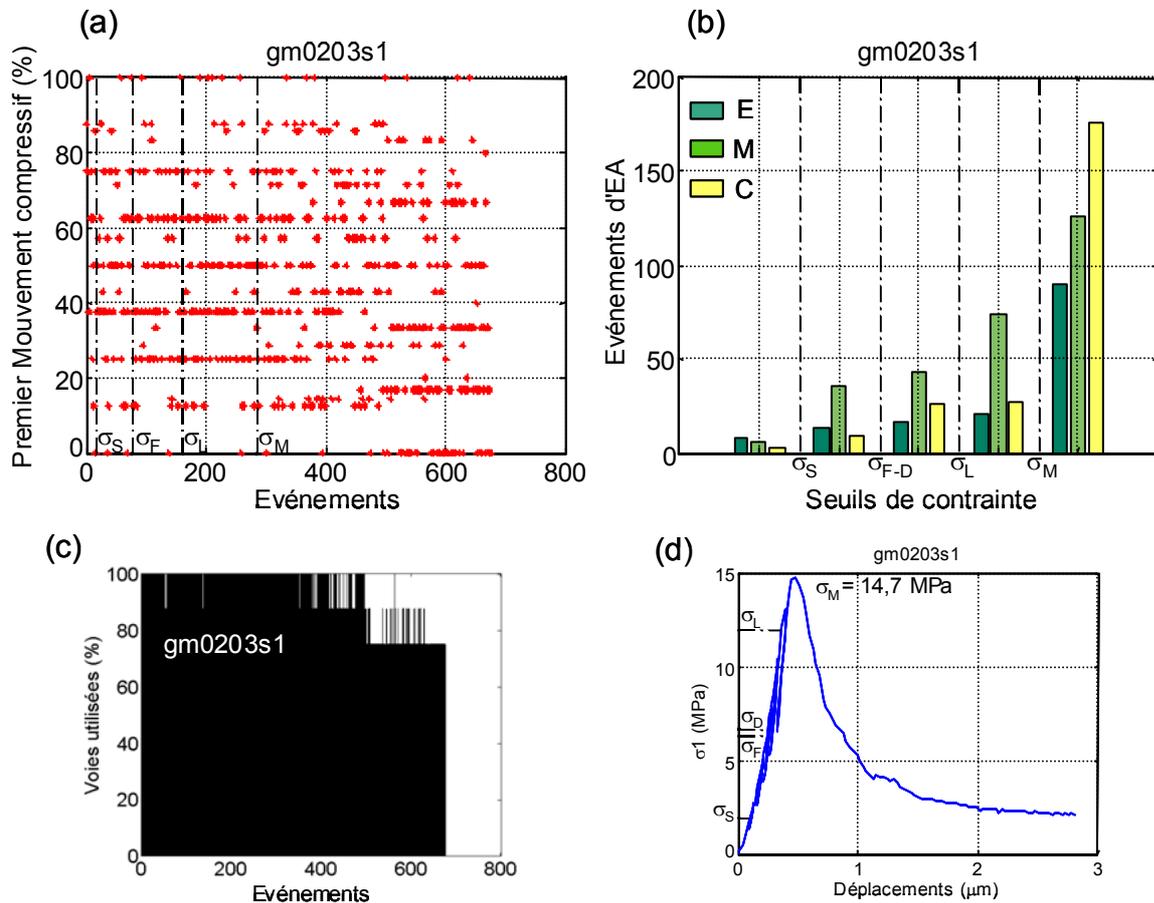


Figure 3.27 : (a) Proportions des premiers mouvements compressifs pour chaque événement d'EA enregistré durant la compression uniaxiale de gm0203s1. (b) Proportions des mécanismes de source, en extension (E), en compression (C), mixte (M) durant chaque phase du comportement mécanique. (c) Pourcentages des voies utilisées (le réseau acoustique comprenant 8 voies réceptrices) lors de la détermination des premiers mouvements. (d) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contraintes.

Essai gm0203s2-MAV11

La figure 3.28a présente les proportions de premiers mouvements compressifs pour chaque événement. Plus de 70 % des voies (8 au total) ont été utilisées dans la détermination de ces proportions (figure 3.28c). Les proportions des mécanismes de sources déterminés durant les différentes phases du comportement mécanique, sont exposées sur la figure 3.28b. Durant la phase de serrage (avant σ_S), les sources de type C (compression, par exemple fermeture d'une

fissure préexistante) sont les plus nombreuses. Les deux autres types de mécanismes sont quasiment absent. Entre σ_S et σ_F (seuil de fissuration), les mécanismes C restent majoritaires, les mécanismes mixte (M) sont également présents ainsi que les sources en extension (type E) mais dans des proportions moindres. Après le seuil de fissuration et avant celui de non-linéarité axiale (σ_L), les sources de type C sont rares, ce sont les mécanismes mixtes qui dominant (en proportion), les sources de type E sont moins nombreuses. Les sources mixtes restent majoritaires jusqu'à la fin de la sollicitation. Durant la phase de non-linéarité axiale avant le pic de contrainte (fig. 3.28b), les sources d'EA de type E sont plus nombreuses que celles de type C. Enfin, en post-pic, les mécanismes de sources de type C sont en plus grand nombre que ceux de type E, les sources mixtes restant majoritaires.

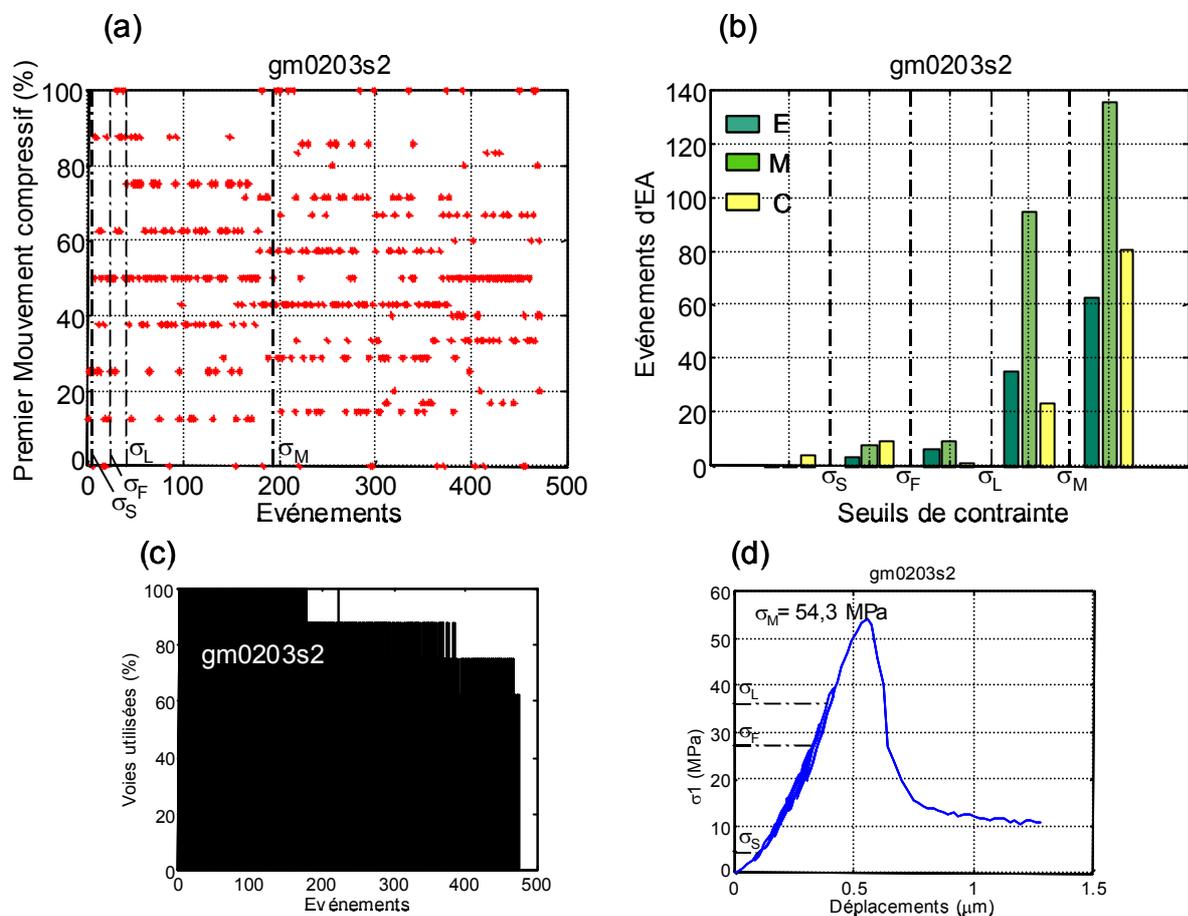


Figure 3.28 : (a) Proportions des premiers mouvements compressifs pour chaque événement d'EA enregistré durant la compression uniaxiale de gm0203s2. (b) Proportions des mécanismes de source, en extension (E), en compression (C), mixte (M) durant chaque phase du comportement mécanique. (c) Pourcentages des voies utilisées (le réseau acoustique comprenant 8 voies réceptrices) lors de la détermination des premiers mouvements. (d) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contraintes.

Essai gm0203s3-MAV11

Les figures 3.29a et 3.29b exposent les résultats obtenus à partir de cette analyse pour la compression uniaxiale de l'éprouvette gm0203s3 d'arénite argileuse. Les proportions des voies utilisées dans la détermination des premiers mouvements sont présentées sur la figure 3.29c. Rares sont les événements pour lesquels moins de 70 % des voies (8 au total) ont été utilisés.

Durant la phase de serrage, avant le seuil σ_S , les mécanismes de type C (compressifs, comme les fermetures de fissures préexistantes) sont majoritaires (fig. 3.29b), parmi ceux-ci quelques uns apparaissent compressifs (fig. 3.29a). Les sources purement extensives (100 % de premiers mouvements compressifs) sont inexistantes (fig. 3.29a), on compte tout de même un certain nombre, minoritaire durant cette phase, de source de type E. Les mécanismes mixtes ne sont pas négligeables.

Entre σ_S et σ_F , ce sont les mécanismes mixtes qui sont les plus nombreux (fig. 3.29b). Les sources de type C sont également présentes, les mécanismes de type E restant minoritaires (les sources purement extensives sont absentes, fig. 3.29a).

Après le seuil de fissuration et jusqu'au seuil σ_L , les sources de type E et de type M sont en proportions égales, nous notons également la présence de mécanismes purement extensifs (fig. 3.29a).

Une fois le seuil de non-linéarité axiale franchi, les événements aux mécanismes de source de type C deviennent minoritaires. Jusqu'au pic de contrainte (σ_M), nous n'observons plus de mécanismes purement compressifs (0 % de premiers mouvements compressifs), par contre des mécanismes de type E purement extensifs sont bien présents (fig. 3.29a). Ce dernier type de mécanisme semble avoir largement eu lieu durant cette phase du comportement mécanique (près de 40 événements de type E, fig. 3.29b), néanmoins il est moins fréquent que le mécanisme mixte (type M, 70 événements).

Après le pic de contrainte, les mécanismes de type E et de type M sont en proportions voisines. Les mécanismes de type C restent minoritaires. Toutefois, nous notons des mécanismes de type C purement compressifs qui se manifestent de nouveau durant cette phase (fig. 3.29a).

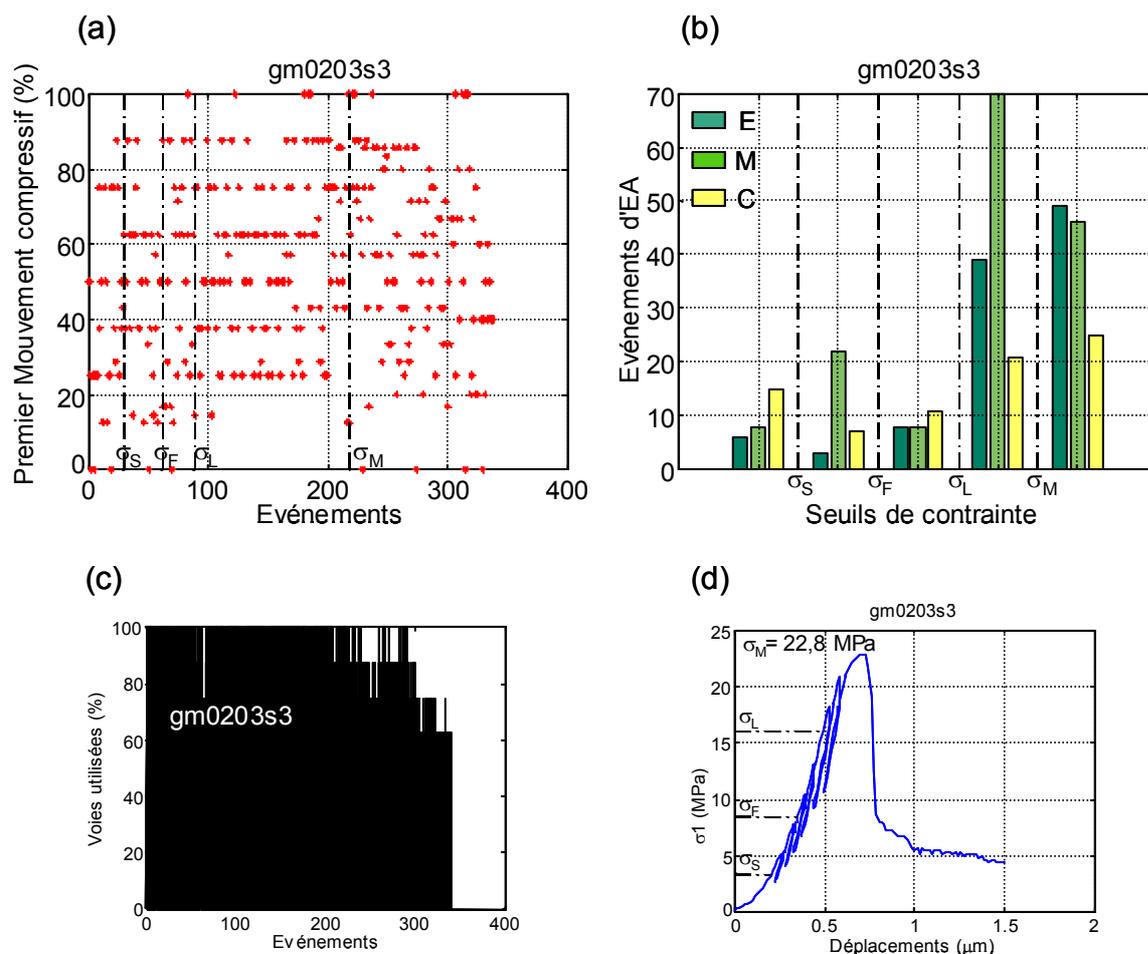


Figure 3.29 : (a) Proportions des premiers mouvements compressifs pour chaque événement d'EA enregistré durant la compression uniaxiale de gm0203s3. (b) Proportions des mécanismes de source, en extension (E), en compression (C), mixte (M) durant chaque phase du comportement mécanique. (c) Pourcentages des voies utilisées (le réseau acoustique comprenant 8 voies réceptrices) lors de la détermination des premiers mouvements. (d) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contraintes.

Distribution des tailles d'événements

Essai gm0203s1-MAV11

La distribution des tailles des événements est tracée sur la figure 3.30a ci-après. La taille d'un événement est mesurée par l'énergie moyenne du signal E_s . L'exposant b_e est tout d'abord calculé pour l'ensemble des événements enregistrés durant la compression uniaxiale, soit un échantillon de 675 événements, la plage de la distribution selon laquelle b_e a effectivement été déterminé est encadrée par des pointillés verticaux sur la figure 3.30a. Ainsi la valeur de b_e estimée est de $0,83 \pm 0,03$. Ces variations durant l'essai sont représentées sur la figure 3.30b. Nous observons une diminution de b_e avant le seuil de linéarité σ_L et après, jusqu'à atteindre environ 0,6. b_e augmente ensuite jusqu'à ce que le pic de contrainte (σ_M) soit atteint. L'exposant diminue juste après ce dernier seuil.

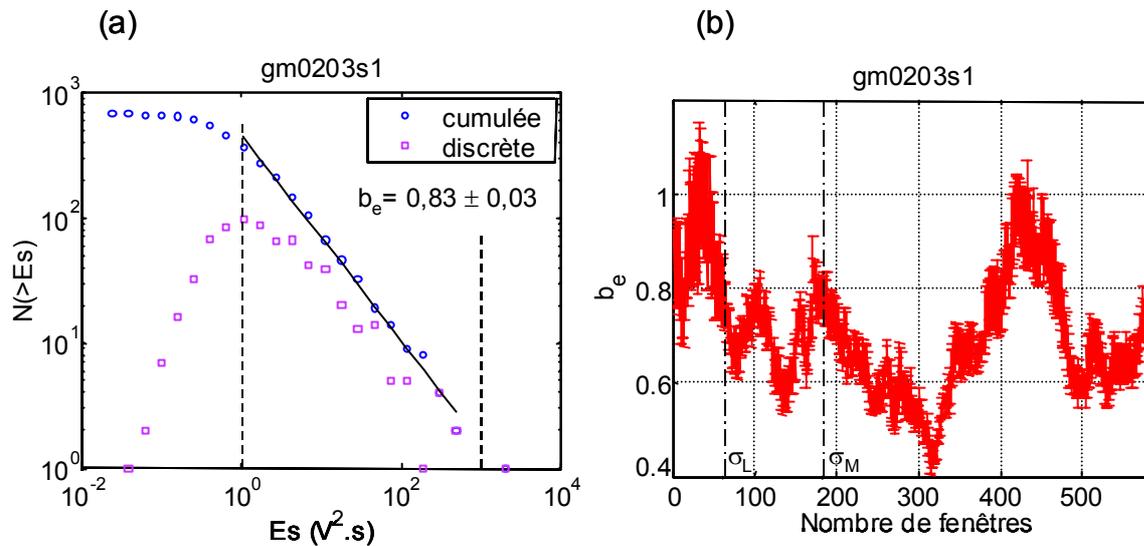


Figure 3.30 : (a) Distribution cumulée des énergies des événements enregistrés lors de l'essai gm0203s1. La plage pour laquelle b_e est calculé, est délimitée par les traits pointillés verticaux. Cette plage est estimée à partir de l'allure de la courbe des écarts des données cumulées, elle délimite la partie linéaire de cette courbe. L'erreur associée à l'estimation de b_e est donnée pour un intervalle de confiance de 95 %. (b) Evolution de b_e au cours de la sollicitation mécanique. Chaque valeur de l'exposant a été calculée pour une fenêtre glissante de 100 événements, l'incrément glissant est de un événement. Les seuils de contrainte σ_L et σ_M sont représentés par les traits pointillés verticaux.

Essai gm0203s2-MAV11

La distribution des énergies cumulées, et donc des tailles des événements d'EA enregistrés durant la compression uniaxiale de gm0203s2, est représentée sur la figure 3.31a. Nous avons utilisé la même méthode de détermination de l'exposant b_e déjà exposée lors de la description des résultats de gm0203s1. Pour l'ensemble des 473 événements, nous trouvons une valeur de $0,47 \pm 0,02$, la loi puissance n'étant vérifiée que sur un ordre de grandeur en énergie. Les variations de cet exposant déterminé pour une fenêtre glissante de 100 événements sont présentées sur la figure 3.31b. Nous observons clairement une diminution de la valeur de l'exposant avant le pic de contrainte (σ_M sur la figure). b_e atteint une valeur de l'ordre de 0,6. b_e atteint des valeurs plus faibles en fin d'essai (pour les 100 dernières fenêtres), il semble donc que le calcul de la valeur (0,47) déterminée sur l'ensemble des événements a pu être influencée par des événements qui se sont produits en fin de sollicitation.

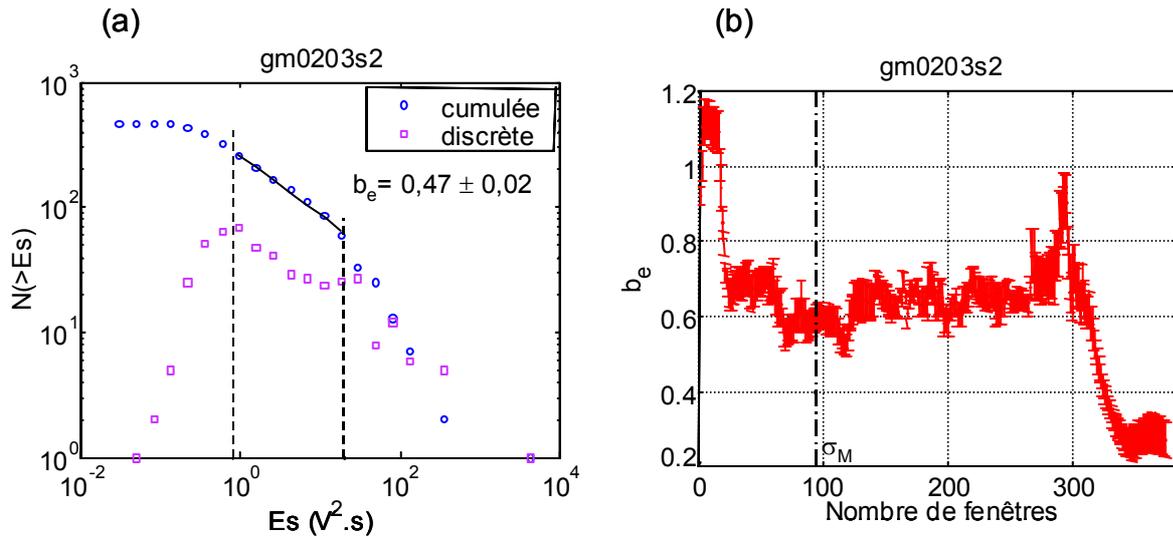


Figure 3.31 : (a) Distribution cumulée des énergies des événements enregistrés lors de l'essai gm0203s2. La plage pour laquelle b_e est calculé, est délimitée par les traits pointillés verticaux. Cette plage est estimée à partir de l'allure de la courbe des écarts des données cumulées, elle délimite la partie linéaire de cette courbe. L'erreur associée à l'estimation de b_e est donnée pour un intervalle de confiance de 95 %. (b) Evolution de b_e au cours de la sollicitation mécanique. Chaque valeur de l'exposant a été calculée pour une fenêtre glissante de 100 événements, l'incrément glissant est de un événement. Le seuil de contrainte σ_M est représenté par le trait pointillé vertical.

Essai gm0203s3-MAV11

La distribution cumulée des tailles des événements d'EA enregistrés durant la sollicitation de l'échantillon gm0203s3 est présentée sur la figure 3.32a. La valeur de l'exposant b_e déterminée pour l'ensemble des 338 événements est de $0,66 \pm 0,03$. Les variations de b_e au cours de l'essai ont été calculées sur une fenêtre glissante de 100 événements (figure 3.32b). La première valeur englobe tous les événements qui se sont produits avant le seuil de non-linéarité axiale. L'exposant b_e fluctue, puis diminue clairement avant que le maximum de contrainte (σ_M) ne soit atteint. b_e augmente ensuite durant la phase post-pic.

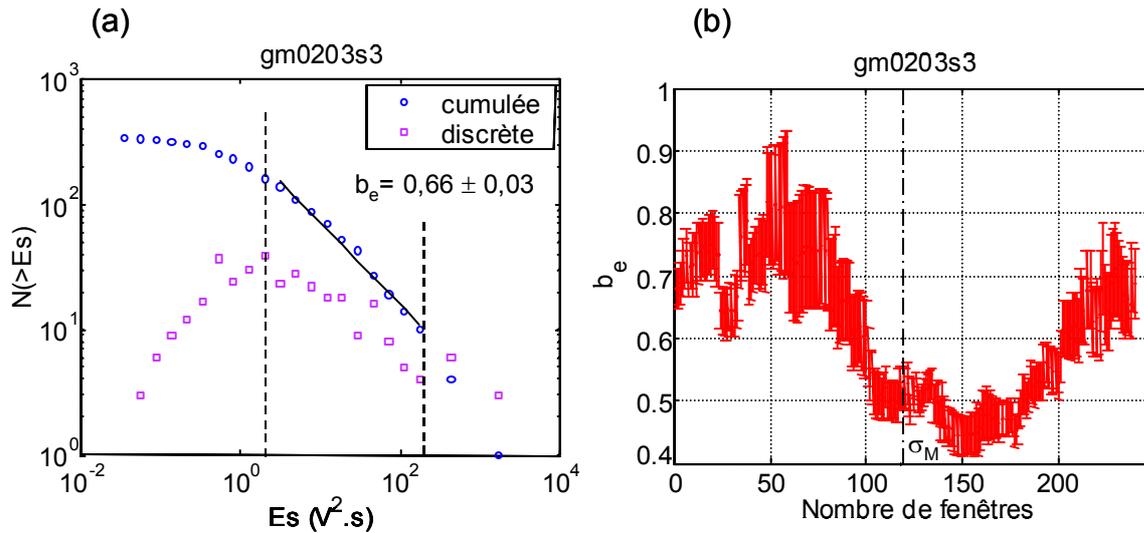


Figure 3.32 : (a) Distribution cumulée des énergies des événements enregistrés lors de l'essai gm0203s3. La plage pour laquelle b_e est calculé, est délimitée par les traits pointillés verticaux. Cette plage est estimée à partir de l'allure de la courbe des écarts des données cumulées, elle délimite la partie linéaire de cette courbe. L'erreur associée à l'estimation de b_e est donnée pour un intervalle de confiance de 95 %. (b) Evolution de b_e au cours de la sollicitation mécanique. Chaque valeur de l'exposant a été calculée pour une fenêtre glissante de 100 événements, l'incrément glissant est de un événement. Le seuil de contrainte σ_M est représenté par le trait pointillé vertical.

d) Observations macroscopiques du faciès de rupture

Essai gm0203s1-MAV11

Les fractures macroscopiques qui scindent l'échantillon d'arénite ferrifère (gm0203s1) sont surlignées de blanc sur la photo de l'éprouvette après essai (figure 3.33a). Un calque des traces de ces mêmes fractures a été déroulé et superposé aux schémas des réseaux de capteurs acoustiques (11 TPZ) et mécaniques (6 jauges de déformation). Le montage est exposé sur la figure 3.33b. Nous observons des fractures sub-verticales dans la partie supérieure de l'éprouvette. Cette partie apparaît plus fracturée que la partie inférieure où les fractures se rejoignent, semble-t-il un peu au-dessus de l'anneau inférieur de capteurs (porteur notamment de l'émetteur E3 et du récepteur R6). Enfin les fractures s'inclinent dans la partie basse de l'éprouvette.

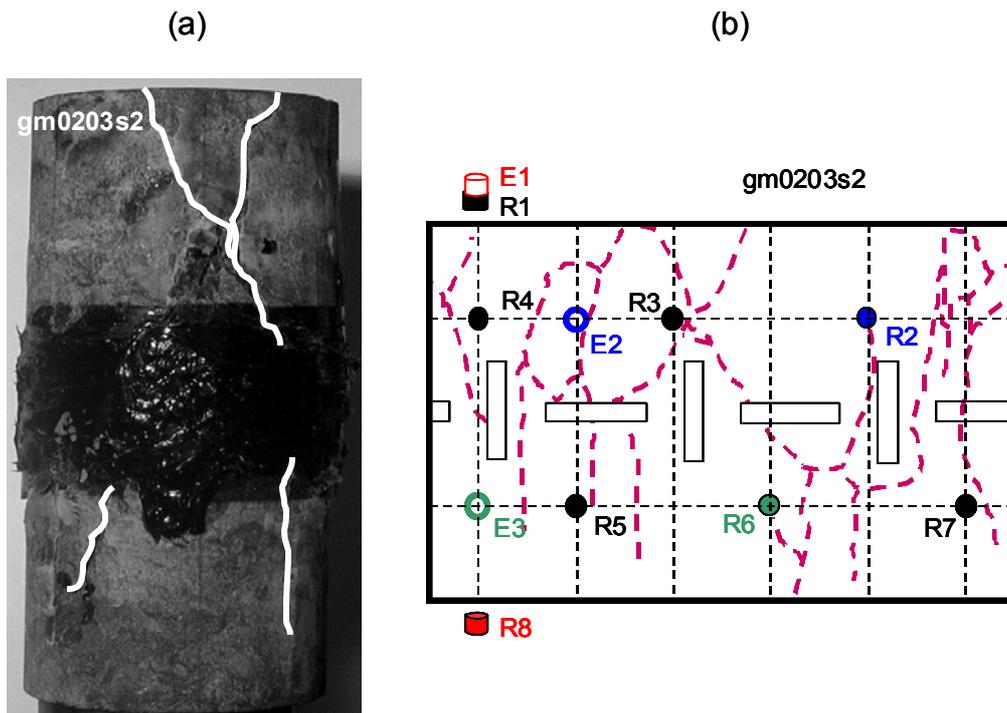


Figure 3.34 : (a) Photo de l'éprouvette gm0203s2 rompue et fractures macroscopiques. (b) Traces des macro-fractures sur la surface de l'échantillon.

Essai gm0203s3-MAV11

Les observations à l'oeil nu de l'éprouvette gm0203s3 rompue sont synthétisées sur les figures 3.35a et 3.35b. L'éprouvette semble être nettement moins fracturée que gm0203s1 ou gm0203s2. Cependant, comme précédemment, c'est la partie supérieure de l'échantillon qui est scindée par le plus grand nombre de fractures, les traces de celles-ci sur la surface de l'échantillon sont nombreuses (figure 3.35b).

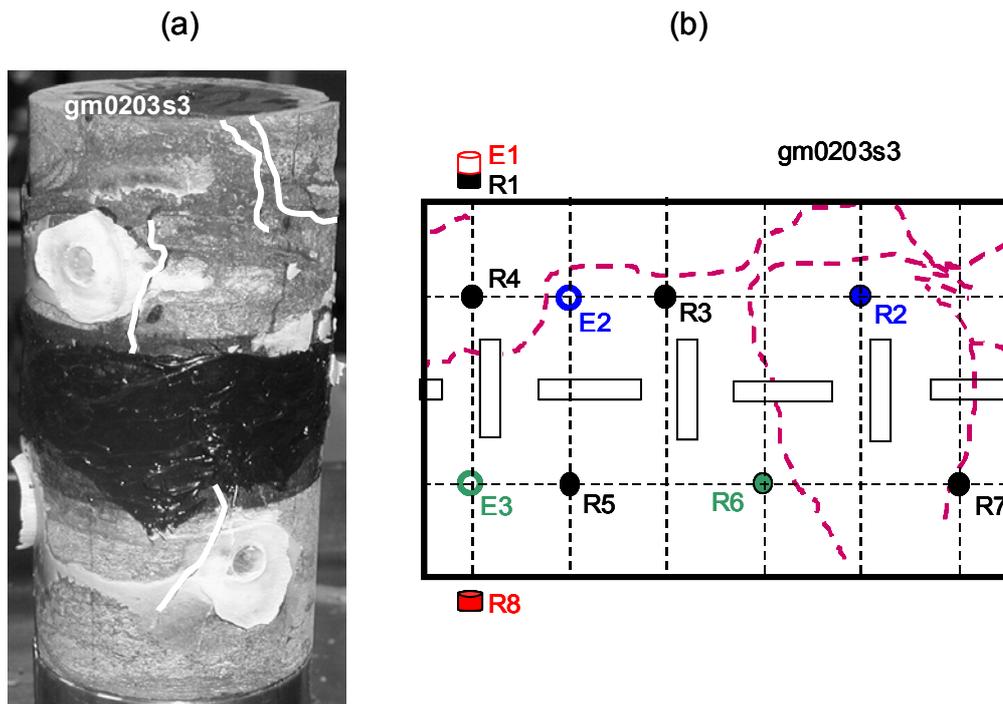


Figure 3.35 : (a) Photo de l'éprouvette rompue et fractures macroscopiques. (b) Traces des macro-fractures sur la surface de l'échantillon.

3.3.2 Résultats des essais de compression uniaxiale MAV18, échantillons de la couche grise et de la couche brune

Les résultats concernant la couche grise sont issus de l'analyse des données expérimentales enregistrées au cours de la compression uniaxiale d'un échantillon de ferriarénite oolitique (ggp2). Les résultats concernant la couche brune proviennent de la compression uniaxiale d'un échantillon d'arénite ferrifère à poches argileuses (bgp0).

a) Résultats mécaniques

Essai ggp2-MAV18

Le comportement mécanique de ggp2 durant la sollicitation est représenté par les courbes contraintes-déformations et contraintes-déplacements sur les figures 3.36a et 3.36b respectivement. Six cycles de chargement-relaxation-déchargement ont été réalisés, les 5 premiers durant la partie linéaire du comportement mesuré longitudinalement (figure 36a, courbe σ_1 - ε_A , et fig. 3.36b). Les phases de déchargement et de chargement consécutives apparaissent linéaires, l'hystérésis est quasiment absent. Il semble qu'un prolongement des phases de déchargement conduirait à des déformations non-nulles irréversibles.

La concavité tournée vers le haut de la courbe σ_1 - u (fig. 3.36b) nous permet d'identifier la phase de serrage et le seuil de contrainte σ_S associé. La portion linéaire de la courbe des déformations latérales se termine en σ_F (11,4 MPa) qui marque l'initiation de la fissuration, soit à un peu moins de 40 % de la contrainte maximale ($\sigma_M = 31,4$ MPa) atteinte lors de cet essai. Le seuil de non-linéarité axiale (σ_L) est quant à lui identifié à environ 60 % de σ_M (tableau 3.8). Enfin l'évolution de la pente de la courbe σ_1 - ε_V , indique la manifestation de la dilatance, i.e. une augmentation relative de volume de l'éprouvette durant la sollicitation. Le seuil σ_D qui marque l'initiation de ce phénomène est identifié graphiquement à 77 % du maximum de contrainte.

Concernant l'allure de la courbe contraintes-déplacements (fig. 3.36b), la portion non-linéaire post σ_L comporte une courbure assez marquée. Le comportement post-pic (après le maximum de contrainte) peut être qualifié de fragile, la pente de la courbe est très forte.

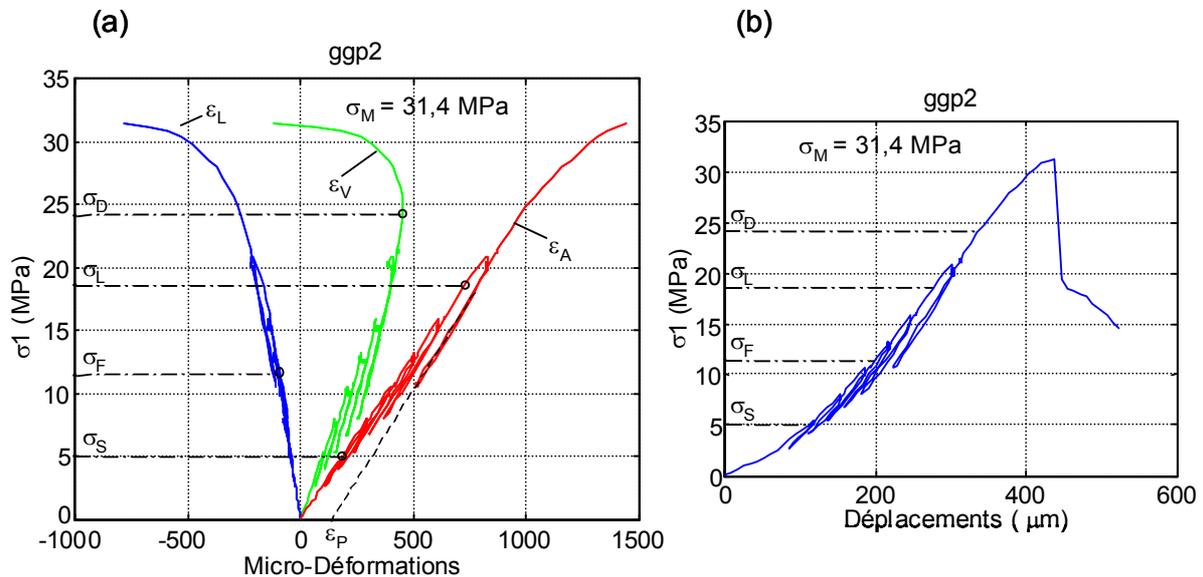


Figure 3.36 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de ggp2, ferri-arénite oolitique. (a) Courbes contraintes-déformations, ε_L , ε_A , ε_V sont respectivement les déformations latérales, axiales et volumiques. Les seuils de contraintes caractéristiques σ_S , σ_F , σ_L , σ_D et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le seuil de dilatance et le maximum de contrainte atteint. (b) Courbe contraintes-déplacements et seuils de contrainte.

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	5	16
σ_F	11,4	36,3
σ_L	18,6	59,2
σ_D	24,2	77
σ_M	31,4	100

Tableau 3.8 : Seuils de contrainte caractéristiques de l'essai ggp2. σ_S , σ_F , σ_L , σ_D et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, la manifestation de la dilatance et le maximum de contrainte atteint.

Le module latéral de déformation (M_L) ainsi que le module d'Young (E) sont respectivement déterminés à partir des courbes σ_1 - ε_L et σ_1 - ε_A comme le montre les figures 3.37a, 3.37b et 3.37c, le coefficient de Poisson (ν) est également calculé (fig. 3.37d).

Nous observons que M_L diminue dans l'ensemble durant la sollicitation. Les variations de E apparaissent moins claires dans le sens où ses valeurs fluctuent. L'erreur importante associée à la première valeur est probablement due à la taille de l'échantillon réduite, l'ajustement a été fait sur un nombre réduit de points car la première phase de déchargement est courte. Cependant E diminue, atteignant près de 28 GPa après la phase de serrage, puis augmente et diminue de nouveau un peu avant le seuil de fissuration (σ_F). Enfin E augmente lors des 3 derniers cycles. Si nous prenons en compte les erreurs associées aux valeurs de module d'Young, nous pouvons le considérer constant durant la sollicitation. Quant au coefficient de Poisson, il augmente clairement avec la contrainte, ses valeurs sont comprises entre 0,25 et 0,32.

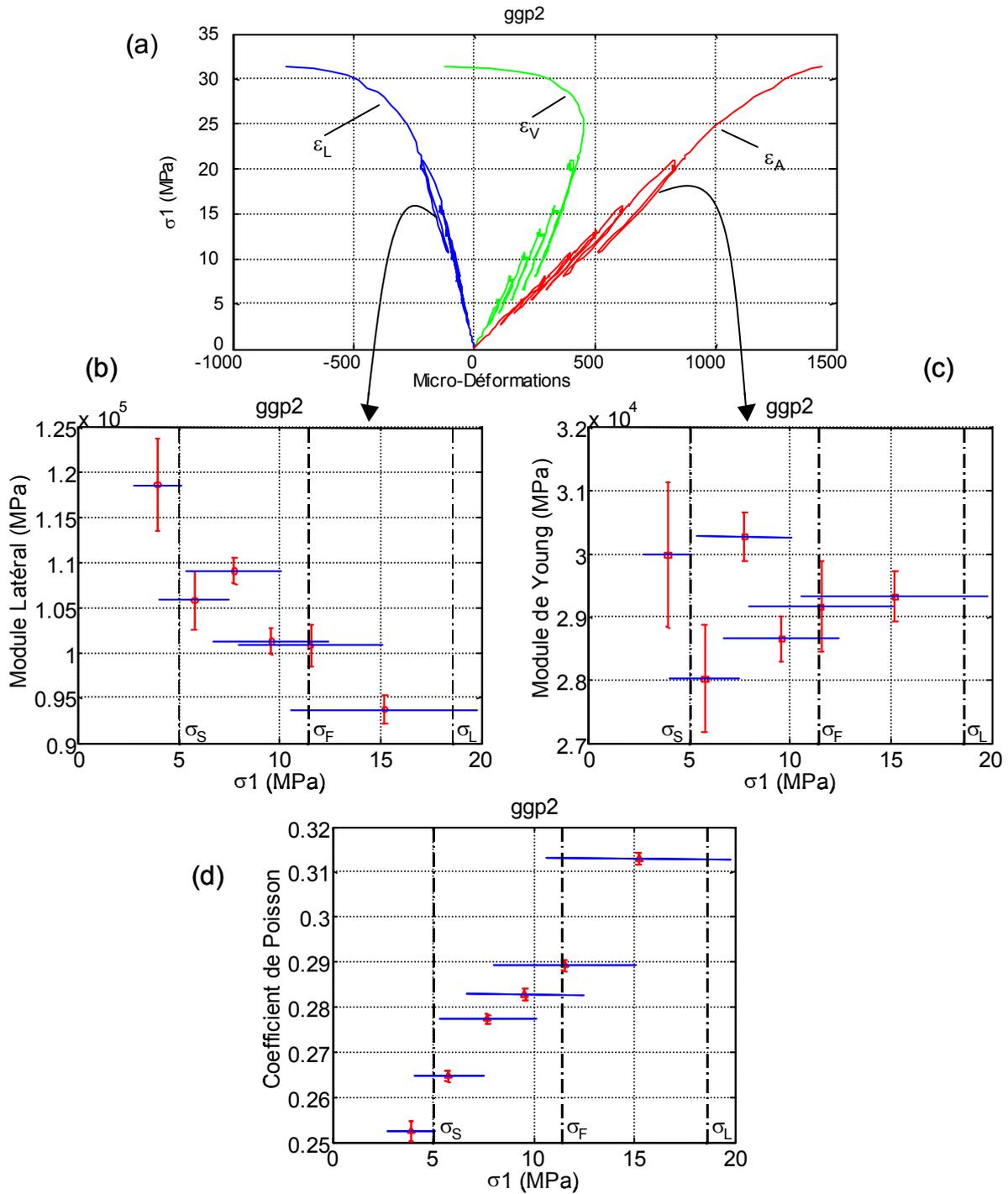


Figure 3.37 : Evolutions des modules élastiques durant la compression uniaxiale de ggp2. Les barres verticales indiquent l'écart type, les traits horizontaux, le domaine de contrainte selon lequel la régression linéaire a été réalisée (soit l'intervalle de contrainte de la phase de déchargement). (a) Courbes contraintes-déformations. (b) Module latéral de déformation ($M_L = -\sigma_1/\varepsilon_L$). (c) Module de Young ($E = \sigma_1/\varepsilon_A$). (d) Coefficient de Poisson ($\nu = -\varepsilon_L/\varepsilon_A$). Les seuils de contraintes sont matérialisés par des traits pointillés.

Essai bgp0-MAV18

Le comportement mécanique de bgp0, sous sollicitation de compression uniaxiale, est exposé sur les figures 3.38a et 3.38b. Le comportement post-pic de contrainte, au-delà d'un maximum atteint de 38,9 MPa, n'a pu être suivi qu'un très court instant, la rupture a été très fragile, très brutale, la presse utilisée a été automatiquement arrêtée par sécurité. La courbure bien marquée (concavité vers le haut) de la courbe contraintes-déplacements (fig. 3.38b) cesse lorsque σ_1 atteint environ 5 MPa, il s'agit du seuil de serrage σ_S (tableau 3.9). L'amorçage d'une phase non-linéaire de la courbe σ_1 - ε_L (fig. 3.38a) a été identifiée, il s'agit du seuil de fissuration σ_F . Le seuil équivalent (σ_L) a également été observé sur la courbe des déformations axiales. Nous n'observons pas de dilatance. Aucune augmentation de volume ne se manifeste. Quant aux cycles de chargement-relaxation-déchargement, au nombre de 7, les phases de déchargement et de rechargement apparaissent linéaires et réversibles, l'hystérésis est quasiment nul. Des déformations non-nulles irréversibles (ε_p) sont mises en évidence en prolongeant l'allure linéaire du déchargement jusqu'à une contrainte nulle (figure 3.38a).

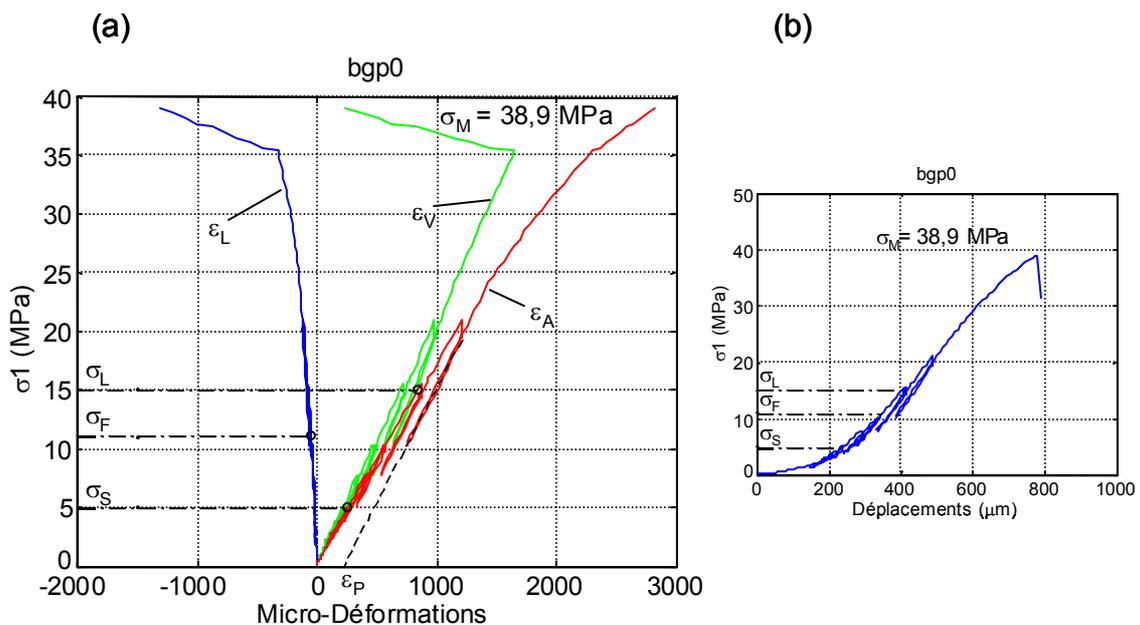


Figure 3.38 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de bgp0. (a) Courbes contraintes-déformations, ε_L , ε_A , ε_V sont respectivement les déformations latérales, axiales et volumiques. Les seuils de contraintes caractéristiques σ_S , σ_F , σ_L , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint. (b) Courbe contraintes-déplacements et seuils de contrainte.

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	5	12,8
σ_F	11	28,3
σ_L	15	38,5
σ_M	38,9	100

Tableau 3.9 : Seuils de contrainte caractéristiques de l'essai bgp0. σ_S , σ_F , σ_L , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration, la perte de linéarité axiale, le maximum de contrainte atteint.

Les variations du module latéral de déformation (M_L), du module de Young (E) et du coefficient de Poisson (ν) déterminés le long des phases de déchargement durant la sollicitation en compression uniaxiale de bgp0, sont présentées respectivement sur les figures 3.39a, 3.39b et 3.39d. Les variations de M_L et de E sont similaires. Ces modules semblent diminuer durant la phase de serrage, puis augmenter jusqu'à ce que σ_1 atteigne le seuil de fissuration (σ_F), au-delà ils diminuent de nouveau. Cependant, étant donné les larges erreurs associées aux deux premières valeurs, la diminution de ces modules durant la phase de fermeture des fissures préexistantes (phase de serrage) reste suggestive. Quant au coefficient de Poisson, même s'il diminue légèrement entre le 4^{ème} et le 6^{ème} cycle, il augmente dans l'ensemble avec la contrainte.

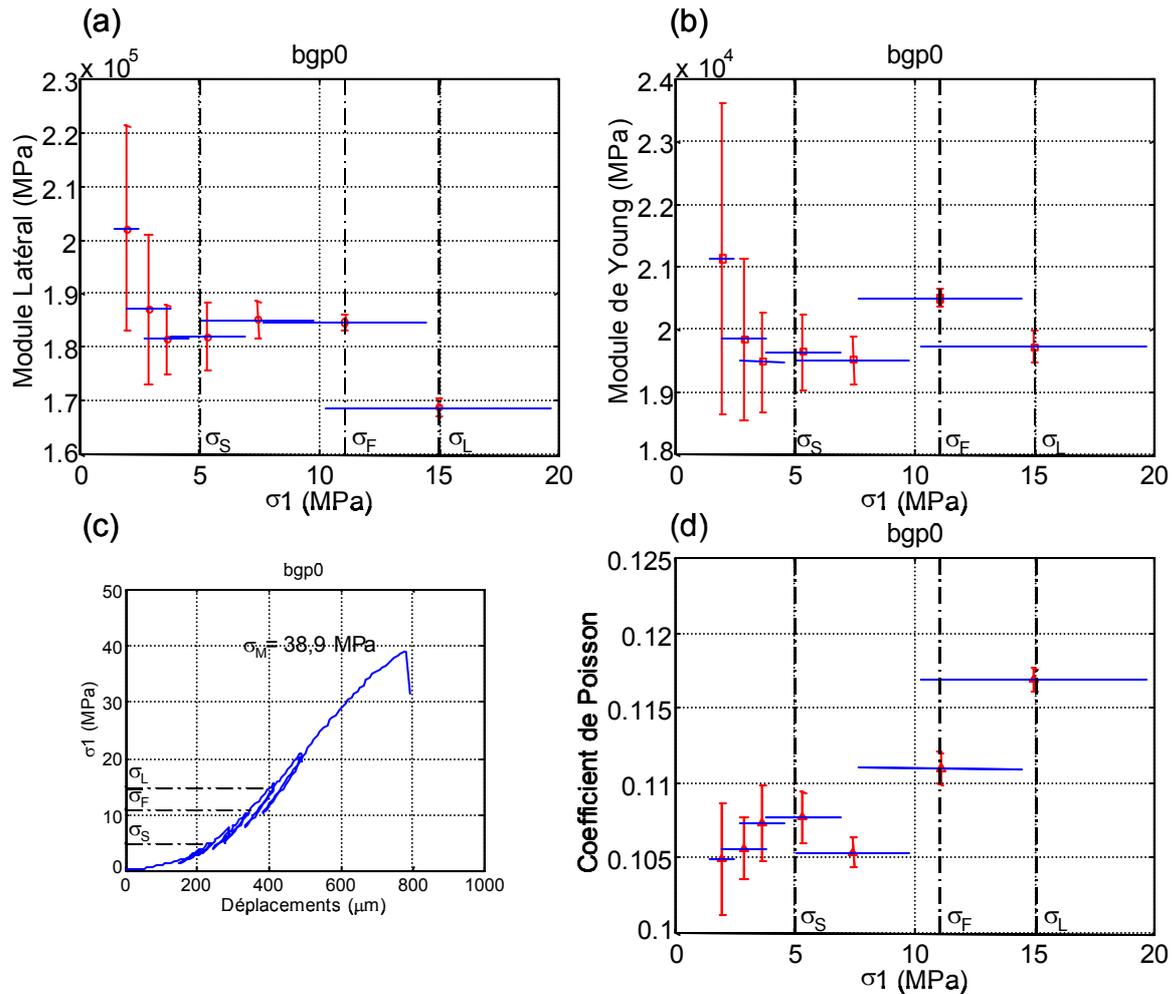


Figure 3.39 : Evolutions des modules élastiques durant la compression uniaxiale de bgp0. Les barres verticales indiquent l'écart type, les traits horizontaux, le domaine de contrainte selon lequel la régression linéaire a été réalisée (soit l'intervalle de contrainte de la phase de déchargement). (a) Module latéral de déformation ($M_L = -\sigma_1/\varepsilon_L$). (b) Module de Young ($E = \sigma_1/\varepsilon_A$). (c) Comportement mécanique, courbe contraintes-déplacements et seuils de contraintes. (d) Coefficient de Poisson ($\nu = -\varepsilon_L/\varepsilon_A$). Les seuils de contraintes sont matérialisés par des traits pointillés.

b) Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

Essai ggp2-MAV18

Les variations de vitesses de propagation des ondes P ainsi que celles des atténuations mesurées selon trois rais (axial, transversal supérieur, transversal inférieur) durant la sollicitation en compression uniaxiale de ggp2, sont présentées sur les figures 3.40c et 3.40d. Concernant les variations des atténuations, rappelons qu'il s'agit d'une observation bien indirecte se basant sur les variations des amplitudes maximales (A_m) des signaux reçus lors

des émissions effectuées pendant les mesures de vitesses. L'atténuation est grandissante lorsque A_m diminue.

Nous remarquons que les vitesses ou les amplitudes maximales mesurées aux points A_i sont, pour la plupart, très voisines de celles mesurées aux points C_i . Ceci excepté pour les vitesses transversales supérieures (Δ bleus) où les valeurs aux points A_i sont inférieures à celles déterminées aux points C_i .

Avant le lancement de l'essai (premiers points des courbes, fig. 3.40c), les vitesses sont très voisines quel que soit le rai considéré. Les vitesses selon le rai transversal supérieur et celles du rai axial sont quasiment égales (~ 4150 m/s), les vitesses transversales inférieures sont un peu supérieures (~ 4200 m/s). Cependant durant la sollicitation, les vitesses transversales inférieures (∇ verts) restent supérieures d'environ 100 m/s aux vitesses mesurées selon le rai transversal supérieur. Ces dernières diminuent tout d'abord légèrement puis plus fortement une fois que la contrainte atteint le seuil de fissuration (σ_F). Au-delà de σ_L , ces vitesses transversales supérieures sont proches de 3800 m/s. La diminution des vitesses transversales inférieures jusqu'au seuil de fissuration n'est pas claire comparée à celle qui se produit lorsque σ_1 franchit ce seuil. Ces vitesses atteignent près de 4000 m/s après σ_L . Quant aux variations des vitesses selon le rai axial, une légère augmentation est observable depuis la phase de serrage jusqu'à ce que σ_1 atteigne environ 7 MPa, ensuite ces vitesses semblent diminuer. Ces variations sont faibles.

Les variations des amplitudes maximales selon chaque rai sont plus nettes. A_m axiale augmente avec la contrainte (fig. 3.40d). A_m transversale supérieure apparaît constante puis augmente un peu avant le seuil de fissuration, et enfin diminue entre environ 13 et 20 MPa. L'amplitude maximale inférieure diminue clairement durant la sollicitation. Tout d'abord légèrement jusqu'au seuil de fissuration, puis plus fortement.

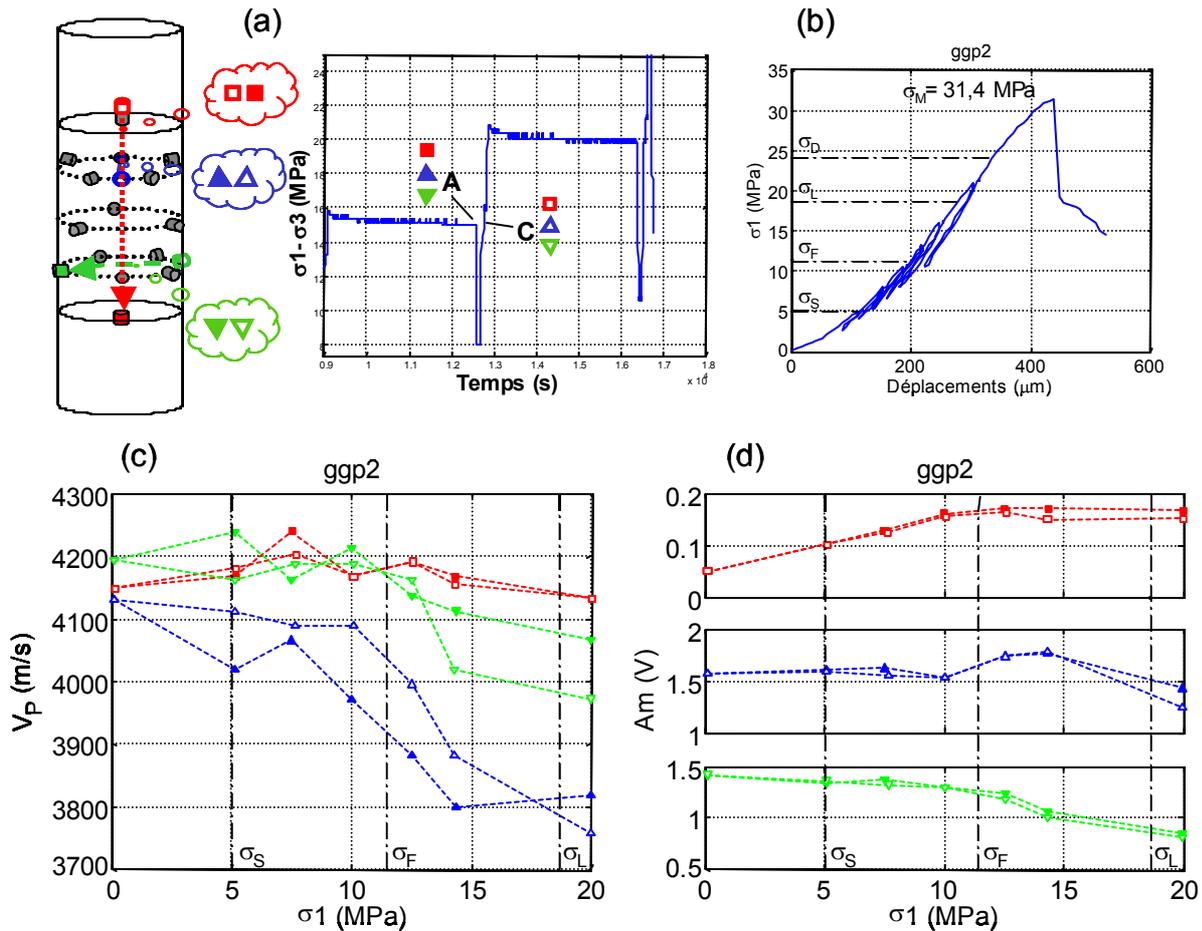


Figure 3.40 : (a) Mesures de vitesses et d'atténuation selon trois rais et signalétique utilisée, essai ggp2. (b) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contrainte. (c) Evolution des vitesses de propagation des ondes P durant l'essai mécanique selon le rai axial (\square rouges), le rai transversal haut (Δ bleus) et le rai transversal bas (∇ verts). Les motifs pleins et les motifs vides correspondent respectivement aux points A_i et C_i de mesure (avec $i=1$ à 6, numéro de cycle). Les seuils de contraintes sont en pointillés. (d) Evolution des amplitudes maximales selon les trois rais précédents aux points A_i et C_i en fonction de la contrainte σ_1 . Les seuils de contraintes sont en pointillés.

Essai bgp0-MAV18

Les résultats des mesures des vitesses de propagation des ondes P et des amplitudes maximales (A_m) sont présentés sur la figure 3.41. L'ensemble des vitesses mesurées (selon le rai axial, les rais transversaux supérieur et inférieur) sont, avant le lancement de la sollicitation en compression uniaxiale, comprises entre environ 3000 et 3200 m/s (fig. 3.41c). La vitesse axiale (\square rouges) étant la plus élevée. Celle-ci diminue au début de la phase de serrage et augmente ensuite légèrement, puis plus fortement au-delà du seuil de fissuration. Elle atteint finalement 3300 m/s lorsque σ_1 est proche de 20 MPa. La vitesse transversale supérieure (Δ bleus) semble augmenter très légèrement pendant la phase de serrage, puis plus nettement jusqu'au seuil de fissuration (σ_F). Elle diminue au-delà de ce dernier, elle est alors

voisine de 3050 m/s. La vitesse transversale inférieure (∇ verts) diminue au début de la phase de serrage, augmente ensuite. Elle diminue de nouveau entre σ_S et σ_F , puis semble augmenter jusqu'à environ 3080 m/s. Nous notons que les valeurs des vitesses transversales du dernier cycle, soit lorsque σ_1 est d'environ 20 MPa, sont proches de leurs valeurs initiales. Ce qui n'est pas le cas de la vitesse mesurée selon le rai axial.

Concernant, les variations des amplitudes maximales (fig. 3.41d), soit indirectement, les variations des atténuations, tout d'abord, les amplitudes axiales (\square rouges) diminuent au début de la phase de serrage, elles augmentent ensuite légèrement. Les amplitudes maximales transversales supérieures (Δ bleus) sont constantes jusqu'au seuil σ_L , elles diminuent ensuite. Enfin les amplitudes maximales transversales inférieures (∇ verts) diminuent durant la phase de serrage, elles apparaissent constantes entre σ_S et σ_L , puis diminuent.

Ajoutons que les valeurs de A_m ou de V_P en A_i sont, dans l'ensemble assez proches de celles en C_i .

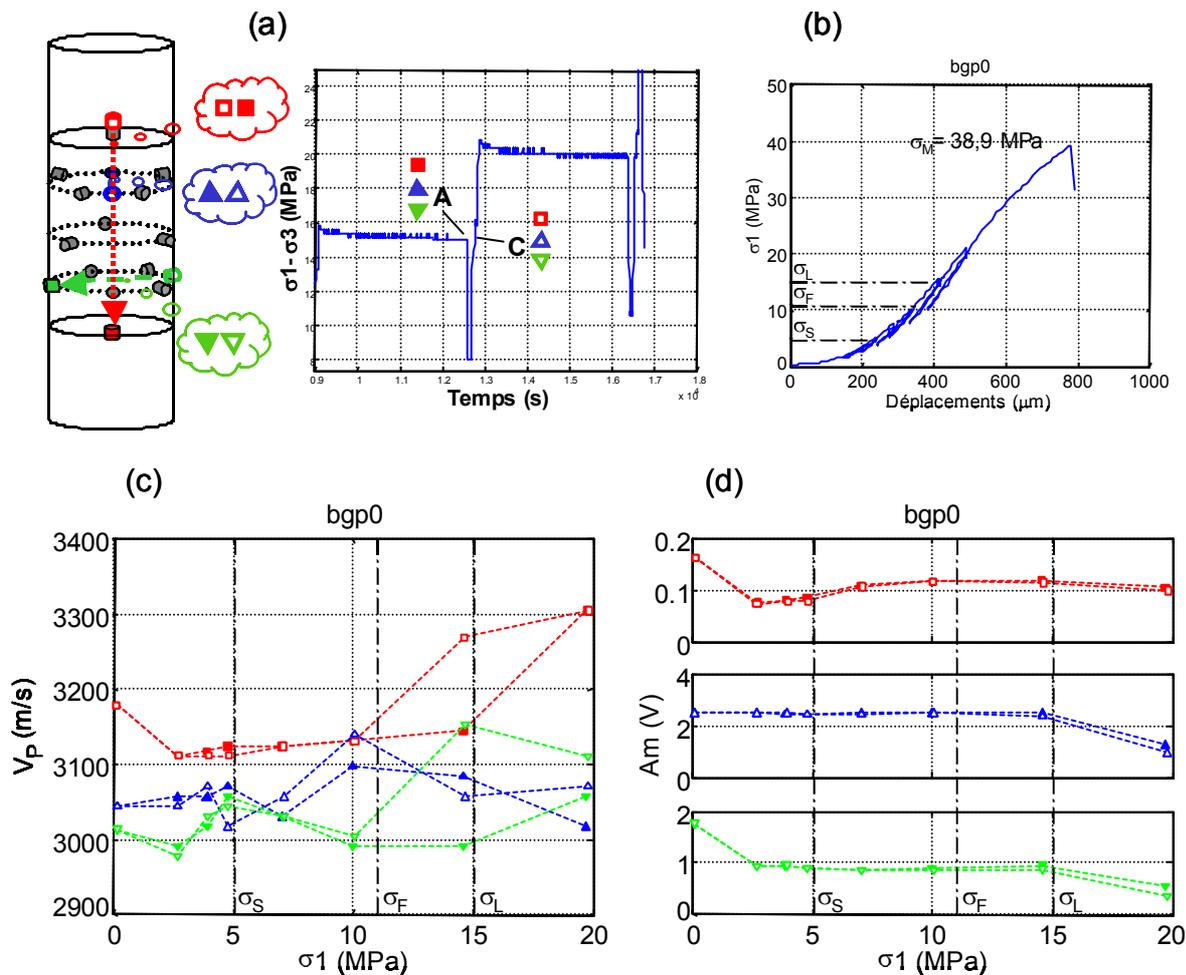


Figure 3.41 : (a) bgp0, mesures de vitesses et d'atténuation selon trois rais et signalétique utilisée. (b) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et seuils de contrainte. (c)

Evolution des vitesses de propagation des ondes P durant l'essai mécanique selon le rai axial (\square rouges), le rai transversal haut (Δ bleus) et le rai transversal bas (∇ verts). Les motifs pleins et les motifs vides correspondent respectivement aux points A_i et C_i de mesure (avec $i=1$ à 5, numéro de cycle). Les seuils de contraintes sont en pointillés. (d) Evolution des atténuations selon les trois rais précédants aux points A_i et C_i en fonction de la contrainte σ_l . Les seuils de contraintes sont en pointillés.

c) Emissions acoustiques

Activité acoustique

Essai ggp2-MAV18

Durant la sollicitation en compression uniaxiale de ggp2 (ferriarénite oolitique), 112 événements d'EA ont été enregistrés et identifiés dont seulement 77 avant le pic de contrainte (σ_M , tableau 3.10). Cette activité acoustique enregistrée assez faible est peut-être due au fait qu'un minimum de 8 capteurs (sur 15 récepteurs) nécessaire au déclenchement de l'acquisition ait été choisi (rappelons que pour les essais précédents comportant 8 voies réceptrices, nous avons choisi un minimum de 4 capteurs). Il se peut que le conditionnement de l'éprouvette avant l'essai joue également un rôle, la désaturation de l'échantillon en surface est d'autant plus importante que la durée de l'instrumentation est longue (cette durée dépend du nombre de capteurs). Cette faible activité comparée à celles des essais précédemment décrits (gm0203s1, gm0203s2 et gm0203s3 ont respectivement comporté 283, 193 et 218 événements avant le pic de contrainte), peut s'expliquer également par le fait que ggp2 est un matériau différent, l'activité acoustique faible en est peut-être une caractéristique.

Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	Proportion d'événements d'EA précédant le seuil (%)
σ_S	5	21	19,7
σ_F	11,4	59	52,6
σ_L	18,6	59	52,6
σ_D	24,2	59	52,6
σ_M	31,4	77	68,7

Tableau 3.10 : Seuils de contrainte, nombre et proportion d'événements d'EA précédant chaque seuil.

Détaillons maintenant, grâce à la figure 3.42a, l'occurrence de ces événements suivant les différentes phases du comportement mécanique.

Durant la phase de serrage, l'activité diminue progressivement, elle est nulle avant que le seuil σ_S ne soit atteint. Au-delà de ce seuil, nous n'enregistrons une activité significative qu'au niveau du maximum de contrainte de chaque cycle, les phases de relaxation et de déchargement étant asismiques. En ces points, l'activité acoustique est très brève (d'une durée inférieure au pas d'échantillonnage des données mécaniques, soit ~ 6 s). Ceci explique l'allure de la courbe des événements cumulés « en marches d'escalier ». Après le dernier cycle, l'activité acoustique recommence de manière assez forte lorsque σ_1 atteint environ 90 % de la contrainte maximum σ_M . Ensuite elle semble diminuer tout proche du pic, puis augmente de nouveau juste avant et pendant le pic de contrainte. L'activité reste soutenue durant la phase post-pic.

La description précédente ainsi que la figure 3.42b nous permettent de dire que l'effet Kaiser ne se manifeste apparemment pas durant la sollicitation de cette ferri-arénite oolitique.

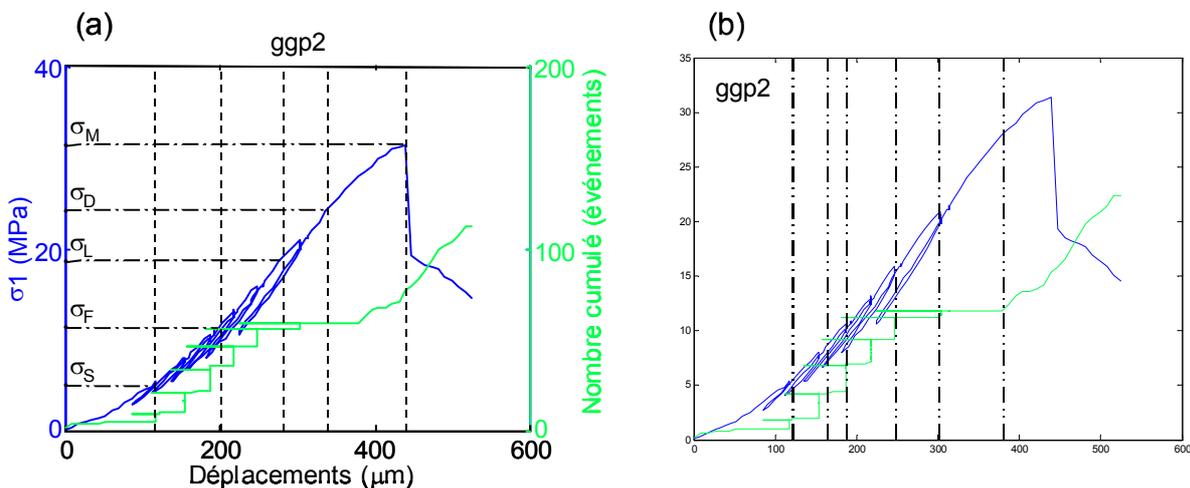


Figure 3.42 : (a) Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de ggp2 et activité acoustique (nombre cumulé d'événements d'EA enregistrés). (b) Agrandissement de (a), comportement acoustique durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement.

Essai bgp0-MAV18

Un total de 160 événements d'EA ont été identifiés durant l'essai bgp0. Le tableau 3.11 présente les nombres d'événements d'EA précédant chaque seuil de contrainte. Plus de 96 % des événements enregistrés durant l'essai de compression uniaxiale (bgp0) se sont produits avant le pic de contrainte ($\sigma_M = 38,9$ MPa). Ceci s'explique par le fait que nous n'avons pu suivre le comportement post-pic (bien trop fragile). Ces 96 % représentent 154 événements.

Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	Proportion d'événements d'EA précédant le seuil (%)
σ_S	5	79	49
σ_F	11	93	58
σ_L	15	93	58
σ_M	38,9	154	96

Tableau 3.11 : Seuils de contrainte de *bgp0*, nombre et proportion d'événements d'EA précédant chaque seuil.

L'activité acoustique durant les différentes phases du comportement mécanique de *bgp0* est explicitée sur la figure 3.43a. Ainsi, durant la phase de serrage, jusqu'au seuil σ_S , l'activité est particulièrement soutenue, 79 événements ont été enregistrés (tableau 3.11). Cette forte activité se poursuit un peu après le seuil précédent (entre σ_S et σ_F), puis une accalmie est observée jusqu'à ce que σ_1 atteigne environ 27 MPa. En effet, durant cette phase du comportement acoustique, seulement 14 événements ont pu être enregistrés. Ensuite, l'activité est de nouveau forte (61 événements d'EA) jusqu'au pic de contrainte et légèrement au-delà (nos données expérimentales ne couvrent pas la phase post-pic).

Comme le montre la figure 3.43b, l'effet Kaiser ne semble se manifester que lors des 4 premiers cycles. Lors des trois derniers, l'activité acoustique ne reprend que bien au-delà du niveau du maximum de contrainte du cycle précédent.

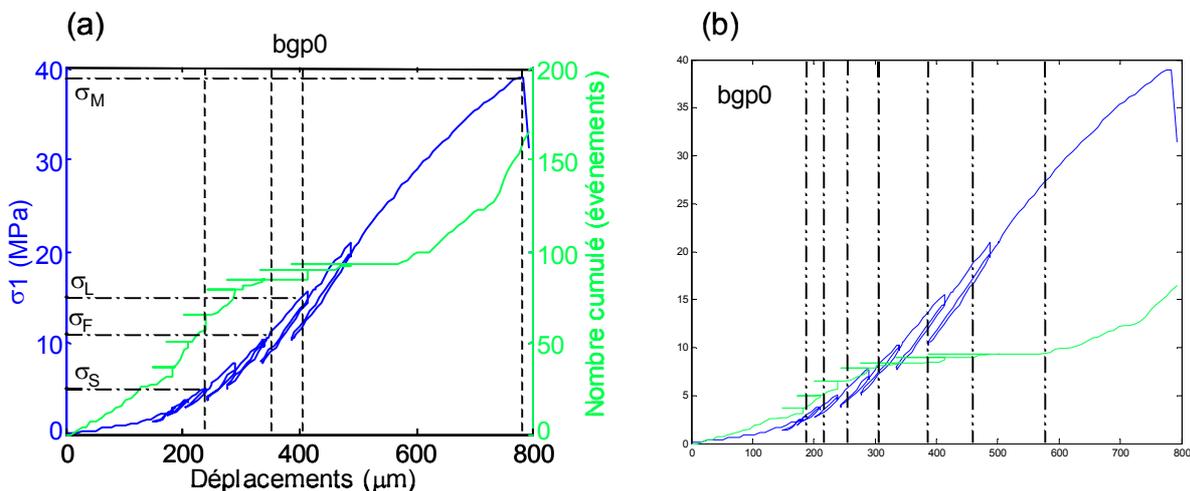


Figure 3.43 : (a) Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de *bgp0* et activité acoustique (nombre cumulé d'événements d'EA enregistrés). (b) Agrandissement de (a), comportement acoustique durant les cycles de chargement-relaxation-déchargement.

Analyse énergétique

Essai ggp2-MAV18

La représentation des énergies cumulées des événements d'EA de l'essai ggp2 (figure 3.44) est très similaire à la courbe de l'activité acoustique. Les événements de la phase de serrage sont très faiblement énergétiques. Il en est de même pour la plupart des événements qui ont eu lieu après σ_S et jusqu'à la manifestation de la dilatance. Les événements les plus forts se sont produits durant la phase post-pic.

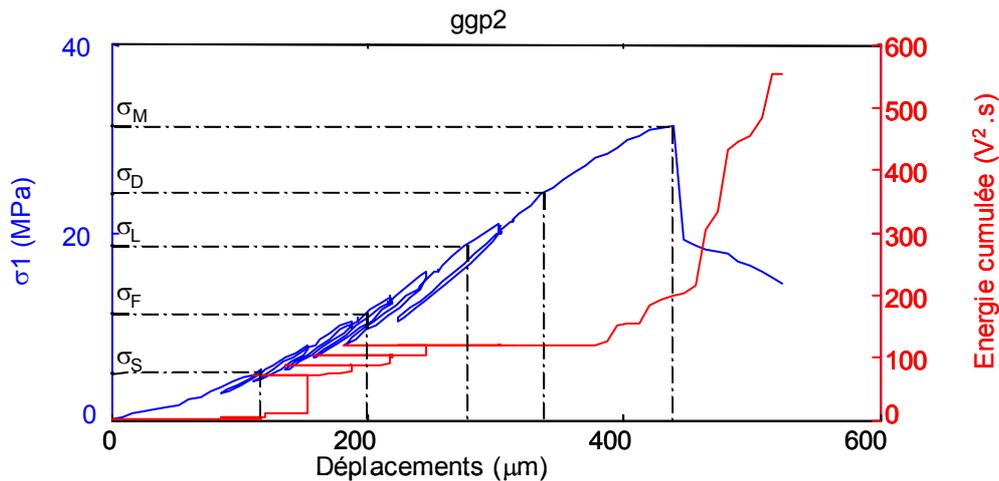


Figure 3.44 : Comportement mécanique (courbe σ_1 - u) et énergies cumulées des événements enregistrés durant la sollicitation de ggp2. Les seuils de contraintes délimitent les phases du comportement mécanique.

Essai bgp0-MAV18

Nous pouvons voir, sur la figure 3.45a, que les événements enregistrés durant la phase de serrage du comportement mécanique de bgp0, sont pour la plupart de petite taille car faiblement énergétiques. Les événements les plus forts ont lieu au-delà de 27 MPa, lorsque l'activité acoustique soutenue se manifeste de nouveau (fig. 3.43a). Les 6 événements d'EA enregistrés juste après le pic de contrainte sont particulièrement forts.

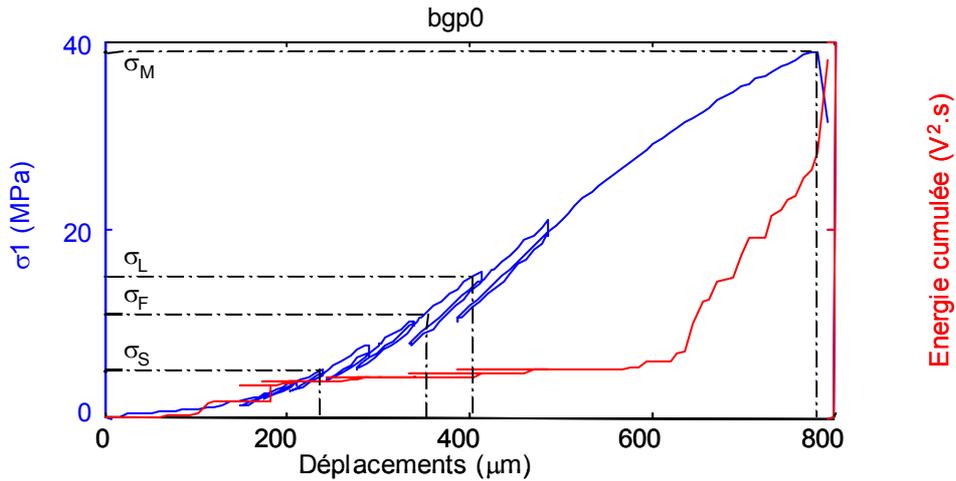


Figure 3.45 : Comportement mécanique (courbe σ_1 - d) et énergies cumulées des événements enregistrés durant la sollicitation de bgp0. Les seuils de contraintes délimitent les phases du comportement mécanique.

Analyse fréquentielle

Essai ggp2-MAV18

La figure 3.46a ci-après présente l'évolution de la fréquence centrale (f_{50}) des événements durant les différentes phases du comportement mécanique rappelé sur la figure 3.46b. Ainsi, la phase de serrage s'accompagne d'événements dont la f_{50} est comprise entre environ 80 kHz et 320 kHz, et pour la plupart d'entre-eux, supérieure à 150 kHz. Après σ_S (seuil de serrage) et jusqu'au seuil de dilatance (en fait sur cette représentation, les seuils σ_F , σ_L et σ_D sont confondus), f_{50} est comprise entre 110 kHz et 320 kHz, la majorité des événements ont des fréquences centrales supérieures à 200 kHz. Entre σ_D et le maximum de contrainte σ_M , f_{50} se situe entre 150 et 270 kHz pour la plupart des événements. Enfin, après le pic de contrainte, les fréquences centrales sont toutes inférieures à 220 kHz, elles sont particulièrement basses pour les derniers événements (< 100 kHz).

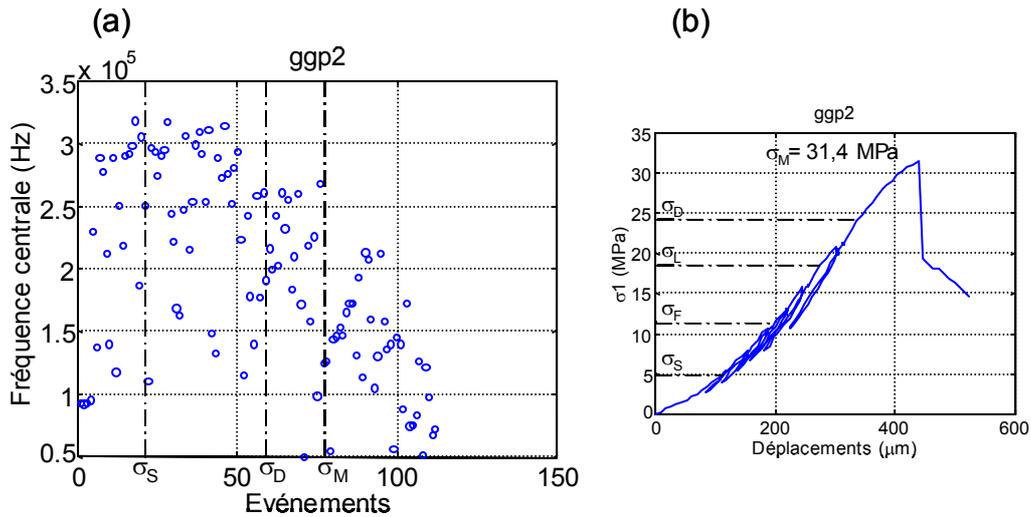


Figure 3.46 : (a) Fréquence centrale de chaque événement d’EA et seuils de contrainte de l’essai ggp2-MAV18. (b) Comportement mécanique.

Essai bgp0-MAV18

L’analyse fréquentielle, en terme de fréquence centrale (f_{50}), de chaque événements d’EA enregistré durant l’essais bgp0-MAV18 et les phases du comportement mécanique sont exposées sur la figure 3.47.

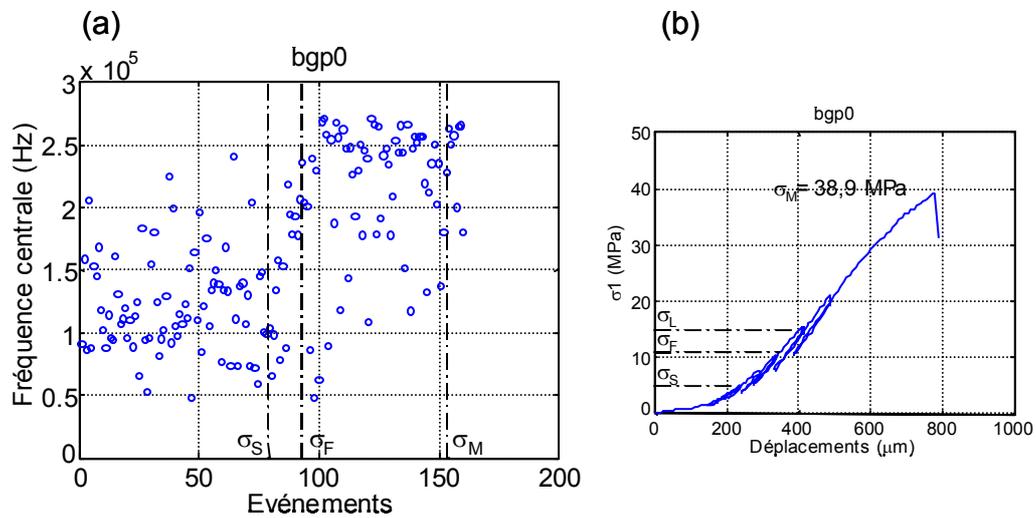


Figure 3.47 : (a) Fréquence centrale de chaque événement d’EA et seuils de contrainte de bgp0. (b) Comportement mécanique de bgp0.

Lors de la sollicitation en compression uniaxiale de bgp0, nous observons (fig. 3.47a):

- durant la phase de serrage, avant le seuil σ_S , $50 \text{ kHz} \leq f_{50} < 250 \text{ kHz}$. La majorité des événements ont une fréquence centrale comprise entre 80 kHz et 150 kHz.

- entre σ_S et σ_F , le précédent intervalle est respecté.
- au-delà de σ_F , la plupart des événements sont haute fréquence, f_{50} est de l'ordre de 250 kHz.

Analyse des premiers mouvements

Essai ggp2-MAV18

L'analyse des proportions de premiers mouvements des événements enregistrés au cours de la sollicitation de ggp2 est présentée sur la figure 3.48. Pour la majorité des événements, plus de 80 % des voies ont été utilisées dans la détermination des premiers mouvements (fig. 3.48c). Compte tenu de la bonne répartition des récepteurs acoustiques sur la surface de l'éprouvette (chapitre 2, figure 2.12), nous estimons que les proportions de premiers mouvements compressifs permettent de déduire des mécanismes de source E, C ou M, représentatifs des mécanismes effectifs. Les proportions des trois types de source diffèrent selon la phase du comportement mécanique.

Durant la phase de serrage, nous remarquons (fig. 3.48a) des sources purement compressives (0 % de premiers mouvements compressifs), de type C, et des sources purement extensives, de type E. Les sources de type E sont cependant plus nombreuses (fig. 3.48b). Les mécanismes mixtes (type M) sont minoritaires.

Après le seuil de serrage et jusqu'aux seuils confondus σ_F , σ_L et σ_D , nous n'observons quasiment plus de sources purement compressives (fig. 3.48a) et les sources de type C deviennent minoritaires (fig. 3.48b). Les mécanismes de type E sont très largement majoritaires.

Ensuite, jusqu'au pic de contrainte (σ_M), la plupart des événements ont des mécanismes de source de type M. Les proportions des mécanismes E et C sont voisines.

Enfin, durant la phase post-pic du comportement mécanique, les mécanismes de type E sont minoritaires, les sources de type mixte sont les plus nombreuses et les mécanismes de type C ne sont pas négligeables.

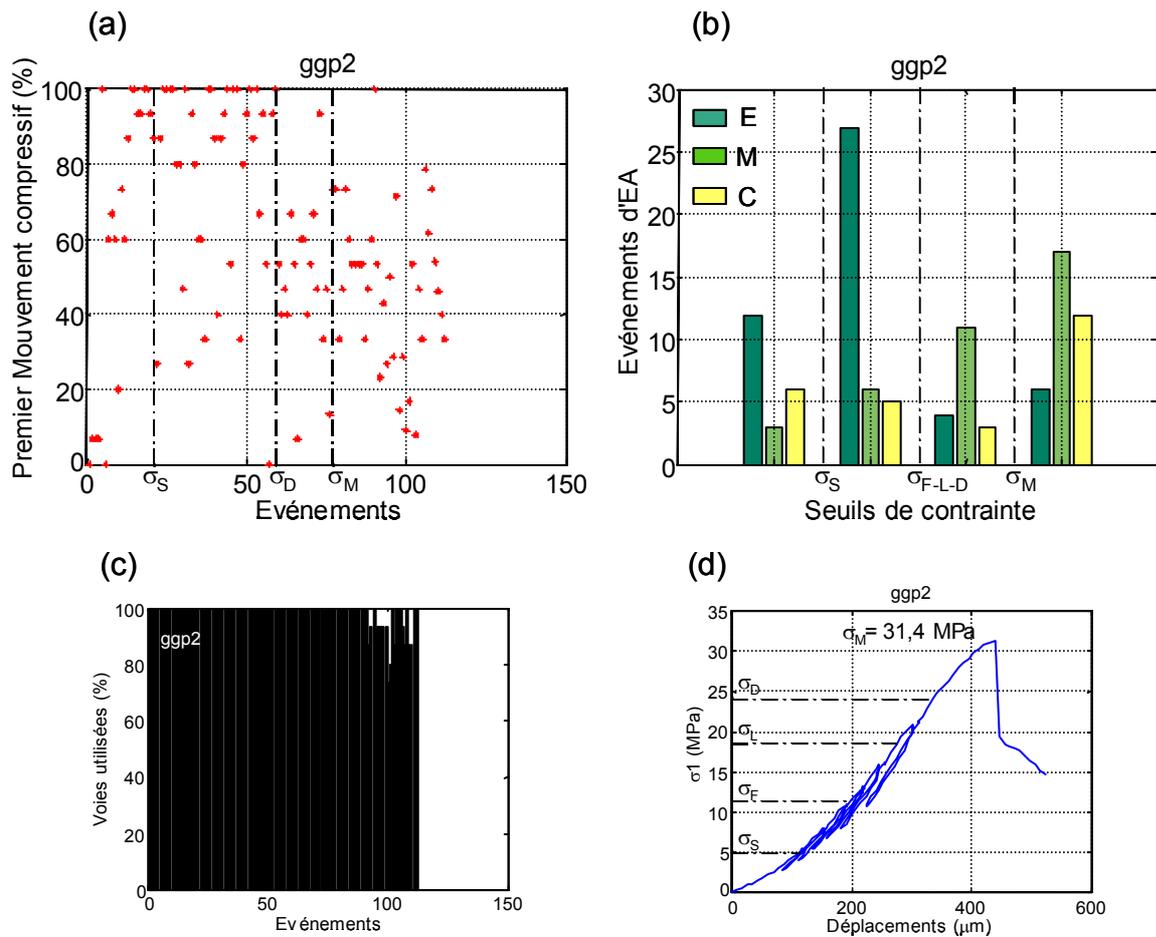


Figure 3.48 : (a) Proportions des premiers mouvements compressifs pour chaque événement d'EA enregistré durant la compression uniaxiale de ggp2. (b) Proportions des mécanismes de source, en extension (E), en compression (C), mixte (M) durant chaque phase du comportement mécanique. (c) Pourcentages des voies utilisées (le réseau acoustique comprenant 15 voies réceptrices) lors de la détermination des premiers mouvements. (d) Rappel du comportement mécanique (courbe σ - l - u) et seuils de contraintes.

Essai bgp0-MAV18

L'analyse des premiers mouvements des événements d'EA identifiés lors de l'essai de compression uniaxiale bgp0 est présentée sur la figure 3.49. Comme le souligne la figure 3.49c, notre estimation des premiers mouvements de chaque événement n'a que très rarement utilisée moins de 80 % des voies. Nous décrivons ces résultats en procédant par phase de comportement mécanique. Ainsi durant la phase de serrage (attribuée à la fermeture de fissures préexistantes), les mécanismes de type C sont les plus nombreux (fig. 3.49b). Nous remarquons que les sources apparaissant purement compressives sont également nombreuses (fig. 3.49a), les sources purement extensives (100 % de premiers mouvements compressifs) sont rares. Nous n'en comptons qu'une seule. Les sources de type E, sont minoritaires. Des sources de type M sont présentes. Entre le seuil de serrage (σ_S) et les seuils de fissuration (σ_F) et de non-linéarité axiale (σ_L), les mécanismes de type C restent majoritaires (fig. 3.49b), les sources en extension sont peu présentes. Le nombre de sources mixtes est voisin de celui des

sources de type C. Au-delà des deux seuils précédents (σ_F et σ_L) et jusqu'au maximum de contrainte (σ_M), les mécanismes de type E et ceux de type C ont des proportions voisines, les sources mixtes sont nettement plus nombreuses. Au-delà du pic de contrainte, nous n'observons que des mécanismes de type M (majoritaires) et des mécanismes de type C (fig. 3.49b).

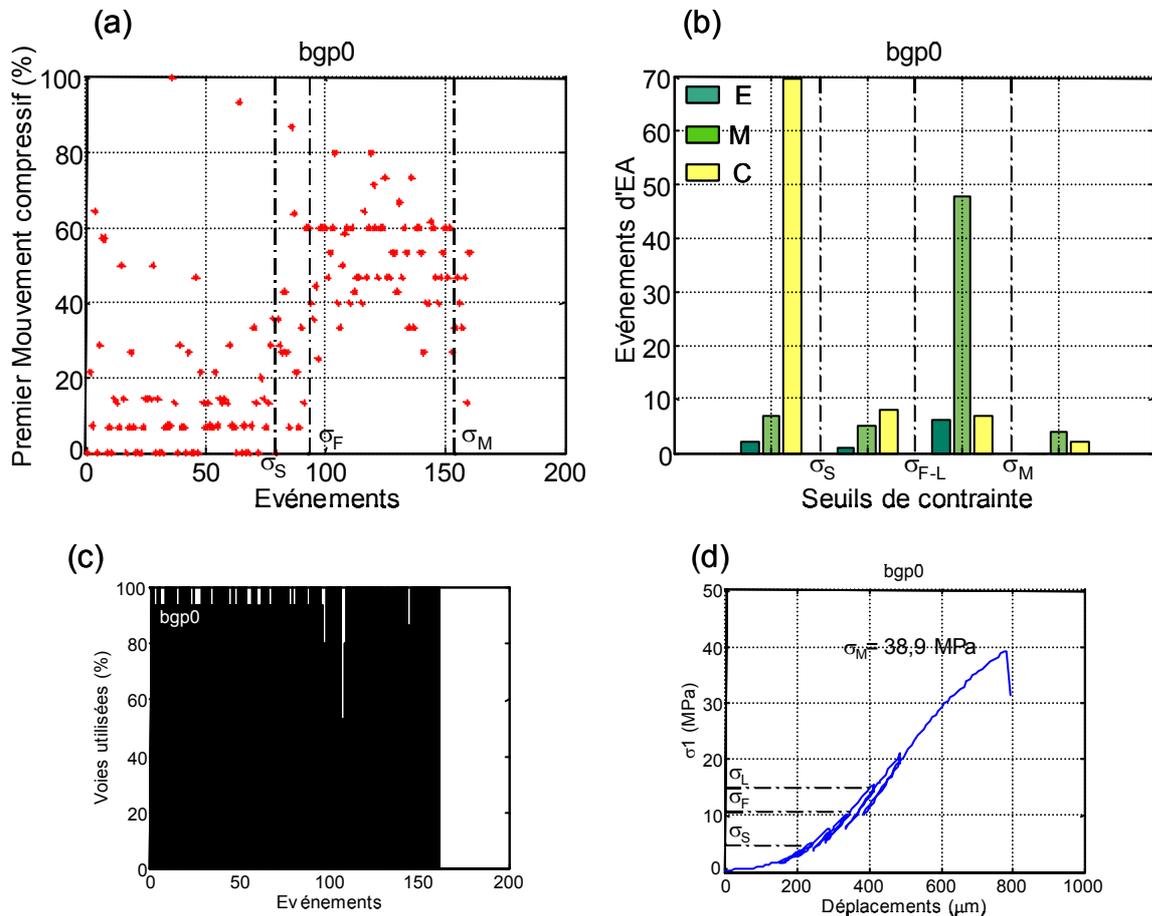


Figure 3.49 : (a) Proportions des premiers mouvements compressifs pour chaque événements d'EA enregistrés durant la compression uniaxiale de bgp0. (b) Proportions des mécanismes de source, en extension (E), en compression (C), mixte (M) durant chaque phase du comportement mécanique. (c) Pourcentages des voies utilisées (le réseau acoustique comprenant 15 voies réceptrices) lors de la détermination des premiers mouvements. (d) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1 -u) et seuils de contraintes.

Distribution des tailles des événements

Essai ggp2-MAV18

La détermination de l'exposant b_e de la loi puissance ajustée à la distribution cumulée des énergies des 112 événements d'EA est explicitée par la figure 3.50. L'échantillon disponible ici (112 événements au maximum) ne nous a pas permis d'étudier les variations de l'exposant durant la sollicitation et notamment avant le pic de contrainte.

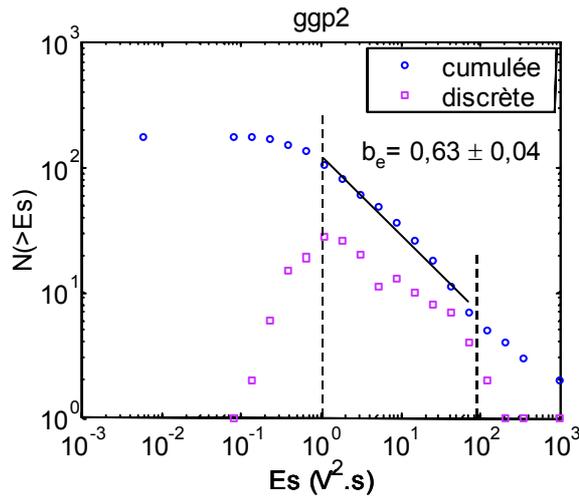


Figure 3.50 : Distribution cumulée des énergies des événements enregistrés lors de l'essai ggp2. La plage pour laquelle b_e est calculé, est délimitée par les traits pointillés verticaux. Cette plage est estimée à partir de l'allure de la courbe des écarts des données cumulées, elle délimite la partie linéaire de cette courbe. L'erreur associée à l'estimation de b_e est donnée pour un intervalle de confiance de 95 %.

Essai bgp0-MAV18

Comme pour les essais précédemment décrits, l'analyse statistique consiste en la détermination de l'exposant de la loi puissance ajustée à la distribution des tailles des événements d'EA enregistrés, c'est-à-dire à la distribution cumulée de leurs énergies (énergie du signal en $V^2.s$). La figure 3.51a présente cette analyse statistique pour l'ensemble des 160 événements enregistrés au cours de la sollicitation en compression uniaxiale de bgp0. La valeur de l'exposant b_e calculé est de $0,51 \pm 0,03$. Nous avons également déterminé b_e sur une fenêtre glissante de 100 événements, l'évolution de l'exposant durant l'essai est exposée sur la figure 3.51b. b_e diminue tout d'abord puis augmente avant le maximum de contrainte, il diminue ensuite.

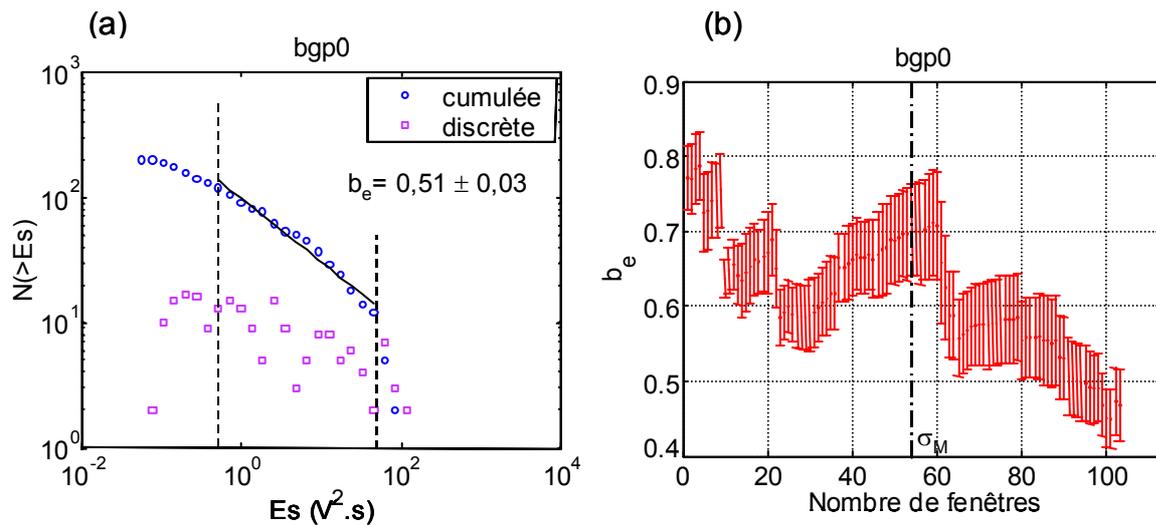


Figure 3.51 : (a) Distribution cumulée des énergies des événements enregistrés lors de l'essai bgp0. La plage pour laquelle b_e est calculé, est délimitée par les traits pointillés verticaux. Cette plage est estimée à partir de l'allure de la courbe des écarts des données cumulées, elle délimite la partie linéaire de cette courbe. L'erreur associée à l'estimation de b_e est donnée pour un intervalle de confiance de 95 %. (b) Evolution de b_e au cours de la sollicitation mécanique de bgp0. Chaque valeur de l'exposant a été calculée pour une fenêtre glissante de 100 événements, l'incrément glissant est de un événement. Le seuil de contrainte σ_M est représenté par le trait pointillé vertical.

d) Observations macroscopiques du faciès de rupture

Essai ggp2-MAV18

Nos observations macroscopiques (à l'oeil nu) de l'éprouvette rompue sont présentées sur la figure 3.52. Les fractures macroscopiques semblent subverticales comme le suggèrent leurs traces sur la surface de l'échantillon (figure 3.52b).

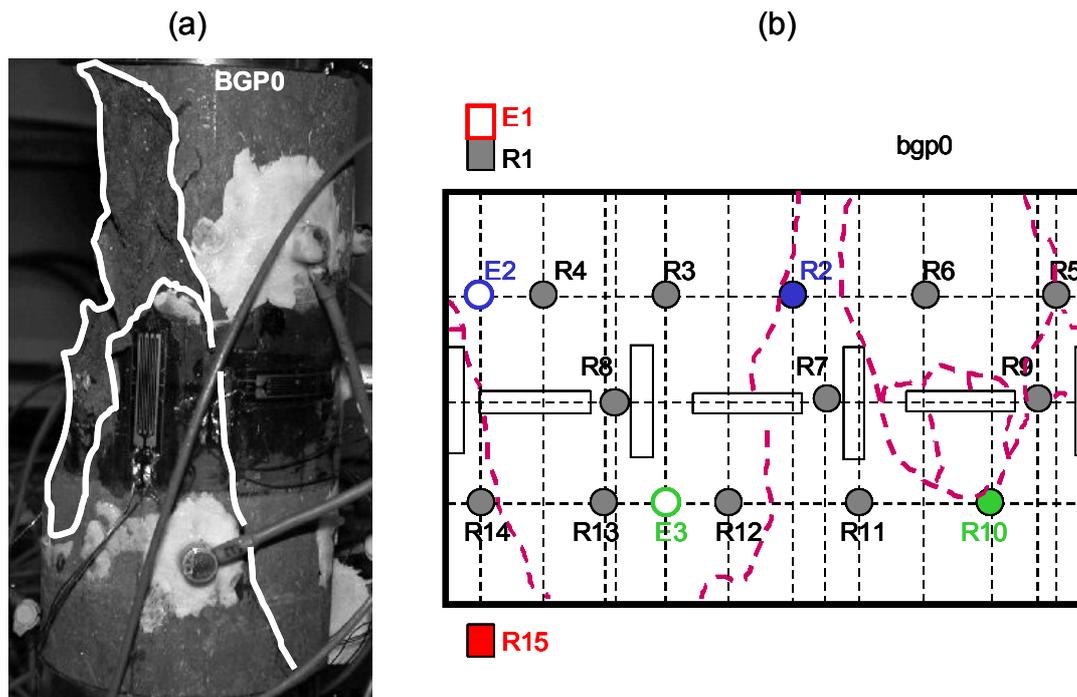


Figure 3.53 : (a) Photo de l'éprouvette *bgp0* rompue et fractures macroscopiques. (b) Traces des macro-fractures sur la surface de l'échantillon *bgp0*.

3.3.3 Résultats de l'essai de compression triaxiale MAV11T, échantillon de la couche brune

L'essai de compression triaxiale a été réalisé sur un échantillon d'arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune, l'échantillon ayant un diamètre de 50 mm et un élancement égal à 2. La pression de confinement (P_c) de cet essai était de 5 MPa. Nous présentons successivement les résultats mécaniques, les résultats de mesures de vitesses et d'atténuations ainsi que les résultats liés aux enregistrements d'événements d'EA.

a) Résultats mécaniques

La figure 3.54a expose le comportement mécanique de *bgp2* soumis à une compression triaxiale ($P_c = 5$ MPa) obtenu à partir des mesures de déformations réalisées à l'aide des jauges. La figure 54b présente quant à elle, le comportement issu des mesures de déplacements. Celles-ci ont permis de suivre la phase de post-pic de contrainte ($\sigma_M = 54,1$ MPa). La contrainte résiduelle est de l'ordre de 25 MPa. Nous observons, au début de la sollicitation, une phase de serrage réduite (fig. 3.54b), le seuil de serrage σ_S est de 3 MPa

(tableau 3.12). Le seuil de fissuration (σ_F) a été identifié lorsque $(\sigma_1 - \sigma_3)$ atteint environ 19 MPa (courbe des déformations latérales, fig. 3.54a). Nous n'avons pu détecter de phase linéaire et donc de seuil de perte de linéarité sur la courbe des déformations axiales. Nous n'observons pas de dilatance, aucune manifestation d'augmentation relative de volume n'est notable. Dix cycles de chargement-relaxation-déchargement ont été réalisés. Les phases de déchargement et de rechargement consécutives semblent être linéaires, cependant elles ne se confondent pas (courbe $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_A$, fig. 3.54a). Le prolongement de chaque phase de déchargement conduit à une déformation permanente (ε_P , figure 3.54a).

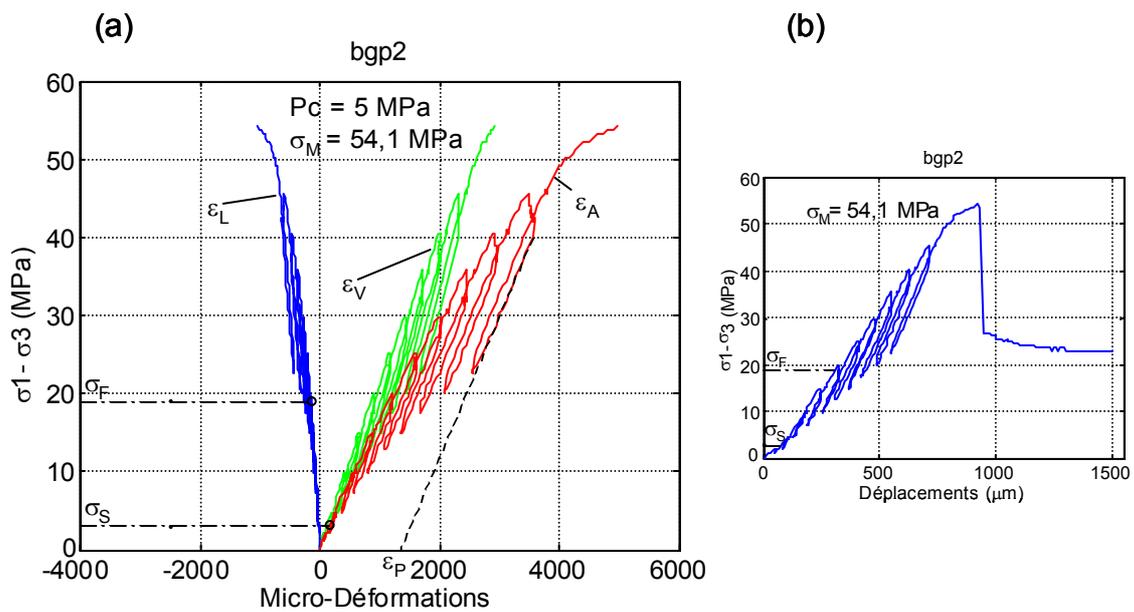


Figure 3.54 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de bgp2. (a) Courbes contraintes-déformations, ε_L , ε_A , ε_V sont respectivement les déformations latérales, axiales et volumiques. Les seuils de contraintes caractéristiques σ_S , σ_F , et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration et le maximum de contrainte atteint. (b) Courbe contraintes-déplacements et seuils de contrainte.

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	3	5,5
σ_F	19	35,1
σ_M	54,1	100

Tableau 3.12 : Seuils de contrainte caractéristiques de l'essai bgp2. σ_S , σ_F et σ_M marquent respectivement la fin de la phase de serrage, l'initiation de la fissuration et le maximum de contrainte atteint.

La figure 3.55 ci-après présente le comportement mécanique d'échantillons d'une ferri-arénite oolitique à poches argileuses à une pression de confinement nulle (essai bgp0-MAV18) et à une pression de confinement de 5 MPa (essai bgp2-MAV11T). Nous remarquons tout d'abord que la résistance à la compression est plus élevée lorsque le confinement est de 5 MPa ($\sigma_M(5 \text{ MPa}) = 54,1 \text{ MPa}$, $\sigma_M(0 \text{ MPa}) = 38,9 \text{ MPa}$). Nous observons ensuite que la phase de serrage est nettement moins marquée à 5 MPa qu'à 0 MPa de confinement. La phase linéaire du comportement à 5 MPa est difficilement identifiable. Par contre la phase post-pic a pu être suivie. Ce qui tend à montrer que la rupture est moins fragile à 5 MPa qu'à 0 MPa de confinement. En ce qui concerne les cycles, les phases de déchargement paraissent linéaires, mais elles sont nettement moins réversibles à 5 MPa de confinement que lorsque P_c est nulle.

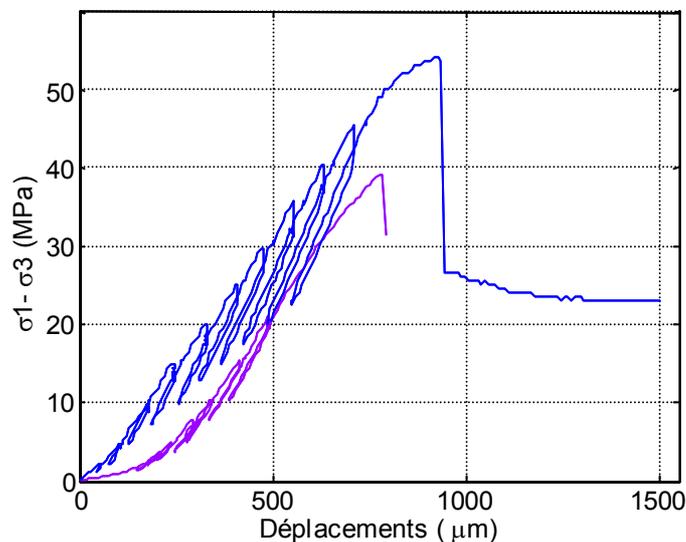


Figure 3.55 : Comportements mécaniques de bgp0 ($P_c = 0 \text{ MPa}$) et de bgp2 ($P_c = 5 \text{ MPa}$).

Les figures 3.56a, 3.56b et 3.56d exposent respectivement les variations de M_L , E et ν durant la sollicitation en compression triaxiale ($P_c = 5 \text{ MPa}$) de bgp2. On observe clairement que M_L et E diminuent, et que ν augmente avec la contrainte.

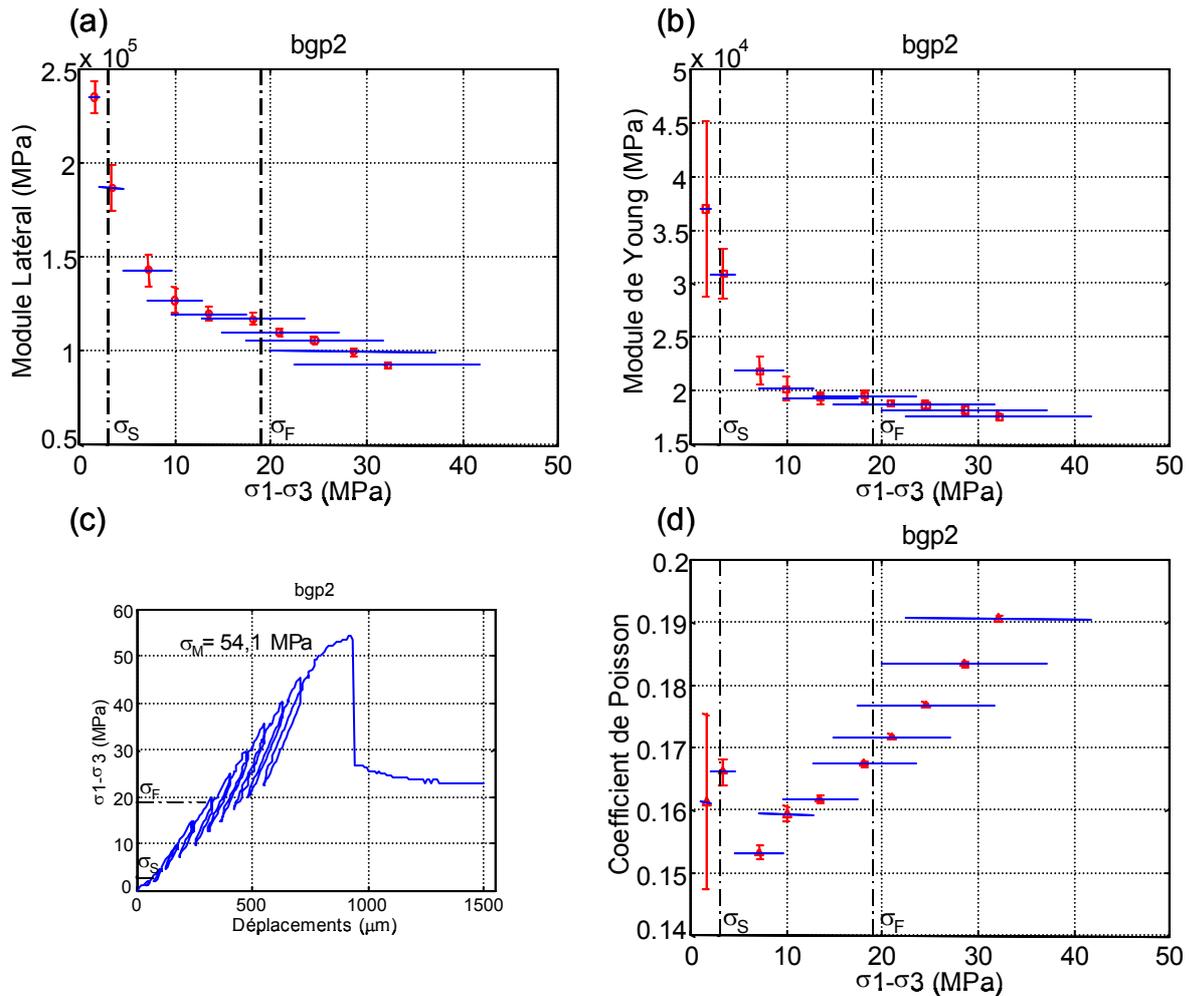


Figure 3.56 : Evolutions des modules élastiques durant la compression uniaxiale de bgp2. Les barres verticales indiquent l'écart type, les traits horizontaux, le domaine de contrainte selon lequel la régression linéaire a été réalisée (soit l'intervalle de contrainte de la phase de déchargement). (a) Module latéral de déformation ($M_L = -\sigma_l/\varepsilon_L$). (b) Module de Young ($E = \sigma_l/\varepsilon_A$). (c) Comportement mécanique, courbe contraintes-déplacements et seuils de contraintes. (d) Coefficient de Poisson ($\nu = -\varepsilon_L/\varepsilon_A$). Les seuils de contraintes sont matérialisés par des traits pointillés.

b) Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

Les variations des vitesses de propagation des ondes P et celles des amplitudes maximales pour l'essai en compression triaxiale (bgp2-MAV11T) sont présentées sur la figure 3.57. Notons qu'un dysfonctionnement de l'émetteur du rai transversal supérieur (Δ bleus, figure 3.57a) lors de l'essai bgp2 ne nous a pas permis de mesurer les vitesses ou les amplitudes maximales durant la sollicitation. Ainsi les résultats concernés (figure 3.57) ne sont issus que des mesures effectuées selon le rai axial (\square rouges) et le rai transversal inférieur (∇ verts).

Les vitesses axiales sont supérieures aux vitesses transversales (fig. 3.57c), elles sont initialement d'environ 3110 m/s et 3050 m/s respectivement. Leurs variations sont similaires. Elles augmentent en effet fortement durant la phase de serrage puis plus légèrement, l'augmentation de la vitesse transversale inférieure étant alors nettement moins marquée. Les variations des amplitudes maximales se calquent sur celles des vitesses précédemment décrites (fig. 3.57d). Les vitesses ou les amplitudes mesurées en A_i sont proches de celles mesurées en C_i .

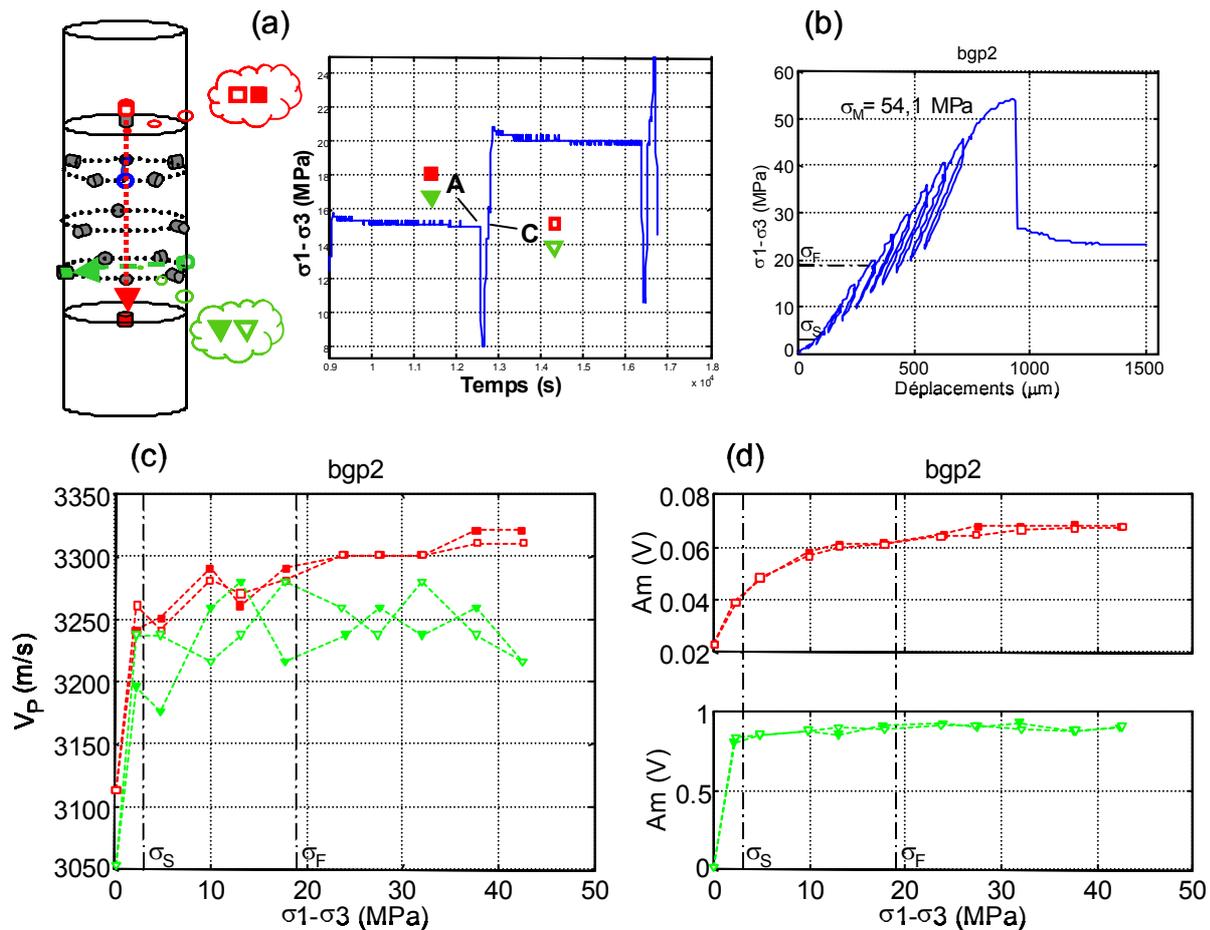


Figure 3.57 : (a) bgp2, mesures de vitesses et d'atténuation selon trois rais et signalétique utilisée. (b) Rappel du comportement mécanique (courbe σ_1-u) et seuils de contrainte. (c) Evolution des vitesses de propagation des ondes P durant l'essai mécanique selon le rai axial (\square rouges) et le rai transversal bas (∇ verts). Les motifs pleins et les motifs vides correspondent respectivement aux points A_i et C_i de mesure (avec $i=1$ à 5, numéro de cycle). Les seuils de contraintes sont en pointillés. (d) Evolution des atténuations selon les trois rais précédents aux points A_i et C_i en fonction de la contrainte σ_1 . Les seuils de contraintes sont en pointillés.

c) Emissions acoustiques

Activités acoustiques

144 événements ont été identifiés pendant l'essai de compression triaxiale bgp2. Le tableau 3.13 présente les nombres d'événements d'EA précédant chaque seuil de contrainte. L'activité acoustique durant l'essai en compression triaxiale est très faible. Jusqu'au maximum de contrainte σ_M , seulement 14 événements ont été enregistrés. Au-delà de ce seuil, nous avons identifié 130 événements.

Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	Proportion d'événements d'EA précédant le seuil (%)
σ_S	3	0	0
σ_F	19	8	5,5
σ_M	54,1	14	9,7

Tableau 3.13 : Seuils de contrainte de bgp2, nombre et proportion d'événements d'EA précédant chaque seuil.

Le comportement acoustique enregistré durant la sollicitation en compression triaxiale de bgp2 est superposé au comportement mécanique sur la figure 3.58. Nous observons une activité acoustique nulle durant la phase de serrage et très faible jusqu'au pic de contrainte (14 événements identifiés). L'activité n'est soutenue que durant la phase post-pic.

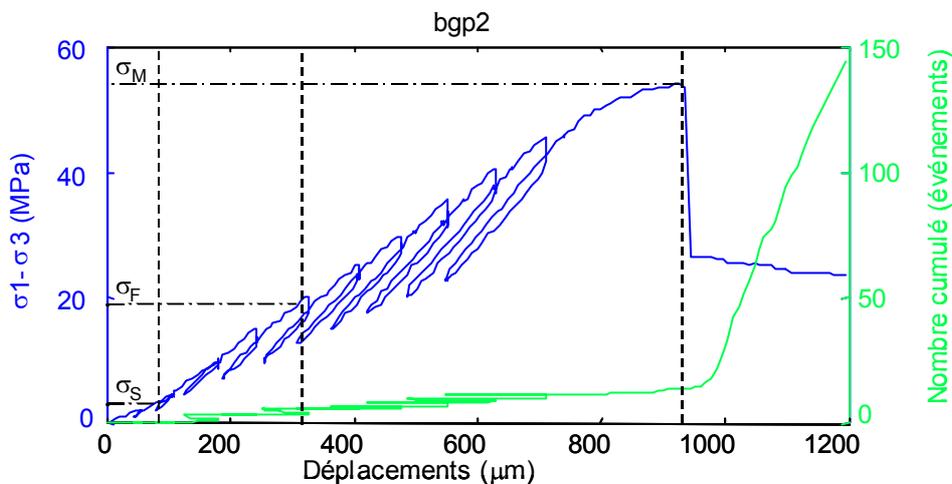


Figure 3.58 : Comportement mécanique au cours de la compression uniaxiale de bgp2 et activité acoustique.

Analyse énergétique

La figure 3.59 présente la courbe des énergies cumulées des événements d'EA enregistrés lors de la sollicitation de bgp2. Les événements les plus forts ont eu lieu durant la phase post-pic du comportement mécanique.

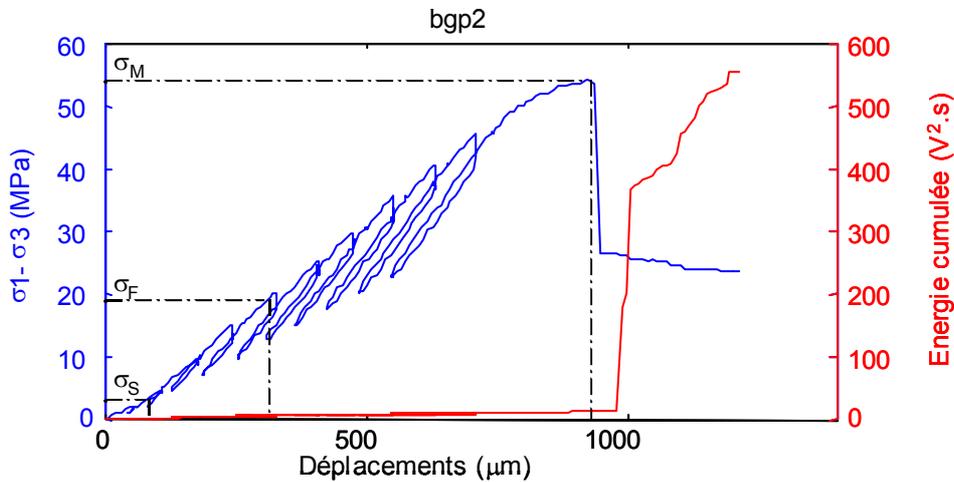


Figure 3.59 : Comportement mécanique (courbe $\sigma_1 - \sigma_3$) et énergies cumulées des événements d'EA enregistrés durant la sollicitation de bgp2. Les seuils de contraintes délimitent les phases du comportement mécanique.

Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle, en terme de fréquence centrale (f_{50}), de chaque événements d'EA enregistré durant l'essai bgp2-MAV11T et les phases du comportement mécanique est exposée sur la figure 3.60 ci-après.

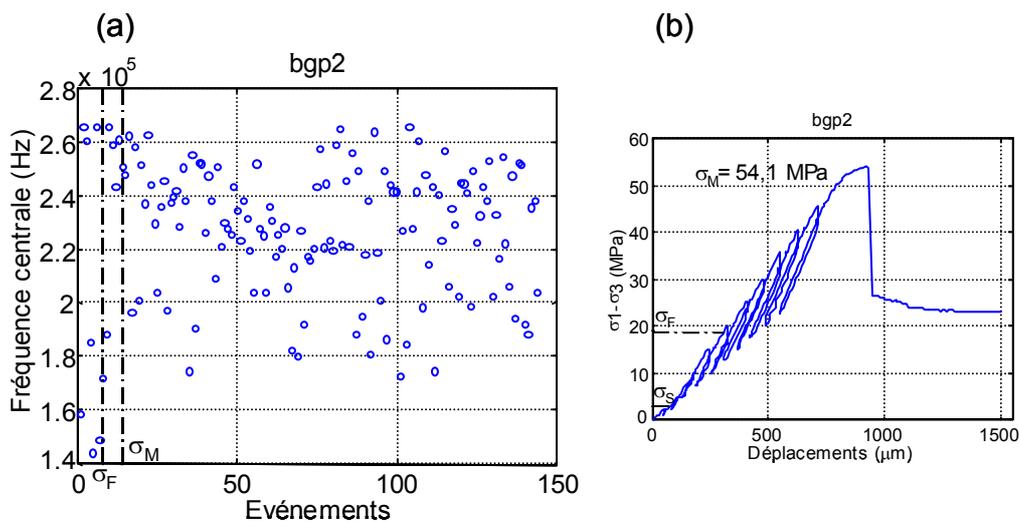


Figure 3.60 : (a) Fréquence centrale de chaque événement d'EA et seuils de contrainte de bgp2. (b) Comportement mécanique de bgp2.

Durant la sollicitation en compression triaxiale de bgp2, nous observons (fig. 3.60) :

- des événements enregistrés pendant la phase de serrage et jusqu'au seuil de fissuration (σ_F) dont les f_{50} sont comprises entre 140 kHz et 270 kHz.
- entre σ_F et σ_M , la majorité des événements d'EA ont une f_{50} comprise entre 240 et 270 kHz.
- au-delà du maximum de contrainte, les fréquences centrales semblent diminuer de 260 à environ 220 kHz. Puis, concernant les 100 derniers événements, les valeurs de f_{50} se dispersent, elles sont comprises entre 170 et 270 kHz.

Analyse des premiers mouvements

Les résultats de cette analyse sont présentés sur la figure 3.61. Nous rappelons que l'éprouvette bgp2 était notamment instrumentée par un réseau de TPZ réduit par rapport à celui qui était couplé à bgp0 ou à ggp2, en effet il ne comportait que 8 récepteurs d'EA (tout comme lors des essais concernant les échantillons de l'intercalaire grise-brune précédemment décrits). Ainsi les mécanismes estimés ici reflètent moins fidèlement les mécanismes effectifs (la couverture du volume de l'éprouvette est moins bonne).

Aucun événement n'a été enregistré durant la phase de serrage. Les événements enregistrés entre σ_S et σ_F ont des sources de type E, de type C et de type M, ces dernières étant très peu nombreuses (fig. 3.61b), les deux premiers types apparaissent en proportions voisines. Entre σ_F et le pic de contrainte, nous n'observons pas de sources mixte, seules sont présentes des sources de type E et de type C en nombres égaux. Durant la phase post-pic, *i.e.* au-delà de σ_M , des sources de type M se manifestent de nouveau, elles sont cependant bien moins nombreuses que celles de type C, les sources de type E étant minoritaires. Enfin, nous notons que les 8 voies ont été utilisées dans la détermination des premiers mouvements de chaque événement d'EA enregistré (fig. 3.61c).

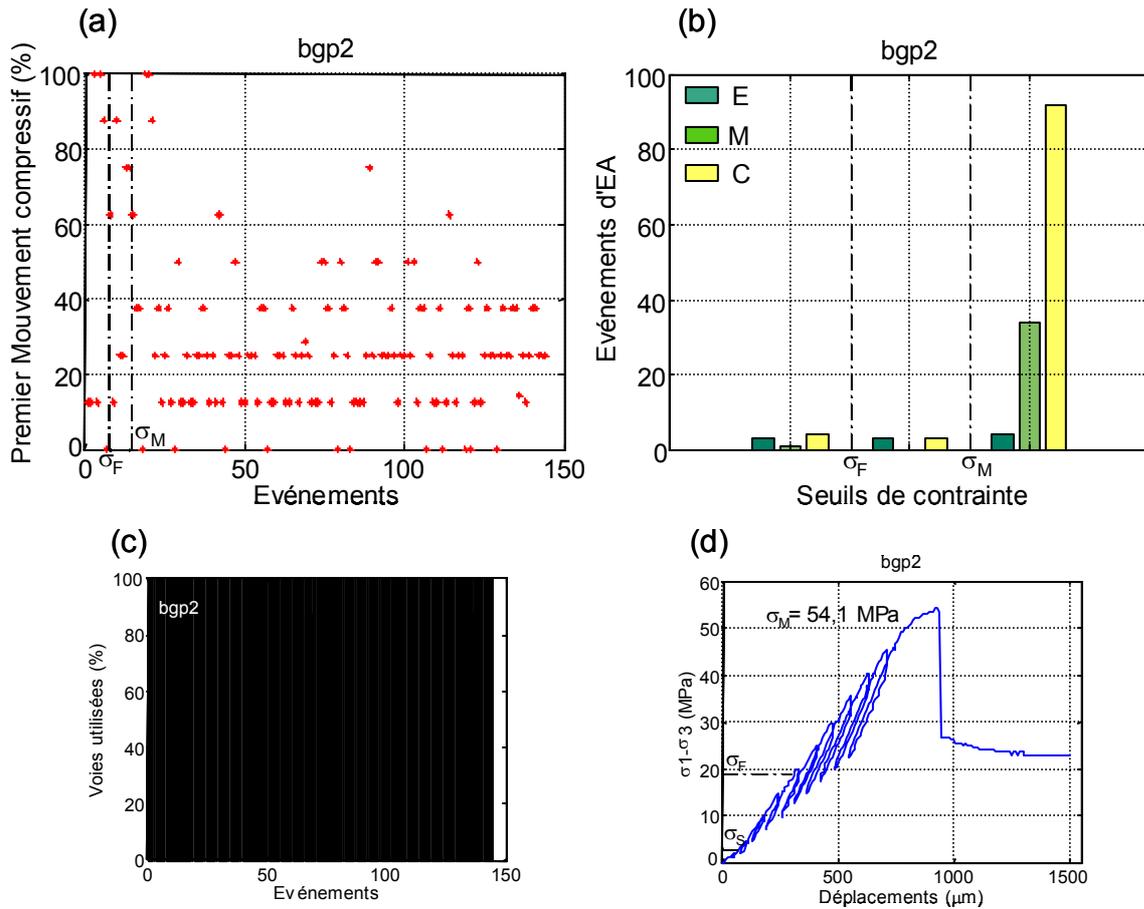


Figure 3.61 : (a) Proportions des premiers mouvements compressifs pour chaque événement d’EA enregistré durant la compression triaxiale de bgp2. (b) Proportions des mécanismes de source, en extension (E), en compression (C), mixte (M) durant chaque phase du comportement mécanique. (c) Pourcentages des voies utilisées (le réseau acoustique comprenant 8 voies réceptrices) lors de la détermination des premiers mouvements. (d) Rappel du comportement mécanique (courbe $\sigma_1 - \sigma_3$) et seuils de contraintes.

Distributions des tailles des événements

La distribution des tailles des événements d’EA enregistrés durant l’essai de compression triaxiale (bgp2) est exposée sur la figure 3.62. L’exposant b_e a été calculé pour un échantillon englobant l’ensemble des 144 événements, il est de $0,8 \pm 0,03$. Le peu d’événements enregistrés avant le pic de contrainte (soit 14 en tout), ne nous a pas permis de déterminer l’évolution de l’exposant avant ce seuil.

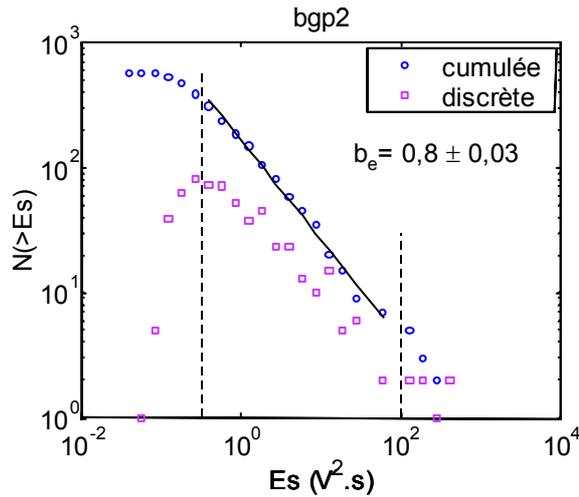


Figure 3.62 : Distribution cumulée des énergies des événements enregistrés lors de l'essai bgp2. La plage pour laquelle b_e est calculé, est délimitée par les traits pointillés verticaux. Cette plage est estimée à partir de l'allure de la courbe des écarts des données cumulées, elle délimite la partie linéaire de cette courbe. L'erreur associée à l'estimation de b_e est donnée pour un intervalle de confiance de 95 %.

d) Observations macroscopiques du faciès de rupture

La fracturation de l'éprouvette bgp2 (figure 3.63a et 3.63b) contraste avec celles précédemment décrites, en effet une seule fracture macroscopique est observable, elle scinde proprement l'échantillon en deux parties. Elle semble orienté d'un peu moins de 30° par rapport à l'axe de l'éprouvette.

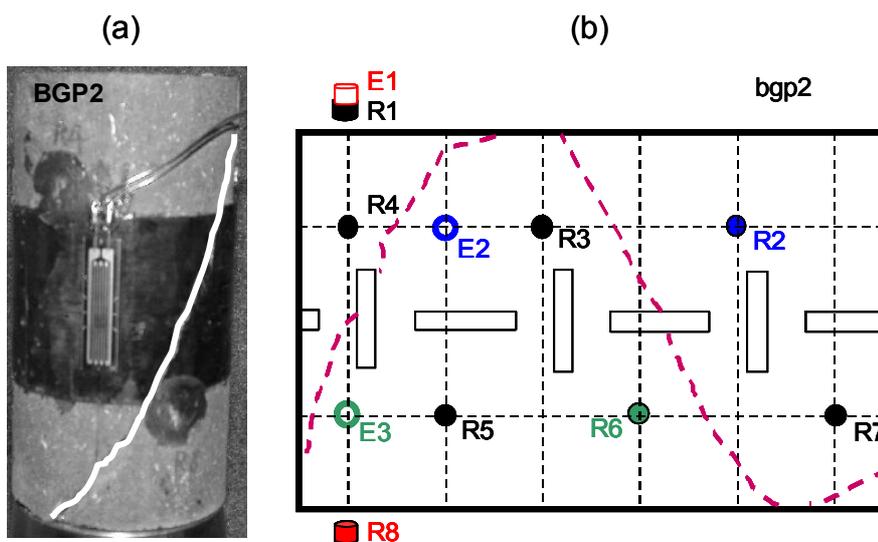


Figure 3.63 : (a) Photo de l'éprouvette bgp2 rompue et fractures macroscopiques. (b) Traces des macro-fractures sur la surface de l'échantillon bgp2.

3.4 Discussion

Nous avons choisi de débiter cette discussion des résultats expérimentaux décrits précédemment d'une manière la plus exhaustive possible, par l'interprétation de ceux concernant les matériaux au comportement mécanique pouvant être qualifié de courant. En effet, nombreuses sont les études de roches au comportement dilatant sous sollicitation mécanique (Brace et al., 1966; Scholz, 1968b; Jouniaux et al., 2001). Ainsi nous discuterons en premier lieu des résultats issus de la compression uniaxiale de l'échantillon provenant de la couche grise (arénite ferrifère oolitique, essai ggp2). Dans un second lieu, nous interpréterons les résultats concernant l'intercalaire marneux, c'est-à-dire issus des essais gm0203s1 (arénite ferrifère), gm0203s2 (micro-arénite) et gm0203s3 (arénite argileuse). Nous examinerons, en troisième lieu, les résultats des compressions des échantillons de la couche brune (arénite ferrifère à poches argileuses, bgp0 et bgp2). Les 2 premiers essais qui seront interprétés (ggp2 et gm0203s1) ont concerné des échantillons au comportement typiquement dilatant (fig. 3.9 et 3.36), les 4 derniers échantillons (gm0203s2, gm0203s3, bgp0 et bgp2) présentant un comportement apparemment non-dilatant (fig. 3.11, 3.13, 3.38 et 3.54). Enfin, nous énoncerons des remarques générales portant sur les résultats des analyses statistiques de l'activité acoustique, sur les mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques et la désaturation progressive des échantillons, et sur la corrélation observée entre le contenu fréquentiel et le type de micromécanisme des événements d'EA.

3.4.1 Couche grise

Le comportement mécanique sous sollicitation en compression uniaxiale de ggp2 (fig. 3.36) comporte les différentes phases visibles sur les courbes de contraintes-déformations (fig. 3.1). La phase de serrage est relativement marquée, la concavité de la courbe contraintes-déplacements exprime la progressive diminution de la compressibilité axiale du matériau. On attribue généralement ce comportement à la fermeture de microfissures préexistantes (Paterson, 1978) orientées sub-horthogonalement à la direction de la contrainte appliquée, et/ou à la fermeture de vides intergranulaires (inter-oolitiques). Ainsi, l'échantillon prélevé n'est pas vierge de microfissures, il comporte un endommagement initial. Ce dernier peut être naturel (diagénétique et/ou tectonique) ou anthropique (excavation minière). Cette hypothèse de fermeture de microfissures préexistantes est confortée par l'observation de l'augmentation, durant cette phase de serrage, de la vitesse de propagation des ondes P (V_P) mesurée selon le rai axiale ainsi que de l'amplitude maximale (A_m) axiale (fig. 3.40c et d) d'une part, par la présence de sources apparemment purement compressives (fig. 3.48a) d'autre part. La

réversibilité des phases de déchargement effectuées suggère des processus élastiques de déformation, d'autant que ces phases ne présentent aucune activité acoustique (fig. 3.42a et b). En effet, nous avons vu que les événements d'EA résultent de phénomènes localement inélastiques (amorçage d'une microfissure). De plus les vitesses V_P ou les amplitudes maximales mesurées avant le déchargement (points A_i) et après rechargement (points C_i) sont quasiment égales (fig. 3.40c et d). A la réversibilité des cycles de déchargement-rechargement s'ajoute leur linéarité, l'absence d'hystérésis. Entre ces cycles, une activité acoustique est enregistrée, témoignant de processus inélastiques. Les déformations permanentes obtenues par prolongements linéaires des phases de déchargement s'associent aux observations d'EA et mettent en évidence des processus irréversibles de déformation. Ainsi le comportement mécanique observé (fig. 3.36a et b) est une superposition de deux processus de déformation. L'un résulte de phénomènes réversibles, par déformation élastique des grains (oolites) et du ciment intergranulaire. L'autre dont le caractère irréversible semble manifeste est dû à l'amorçage de microfissures, leur croissance (EA enregistrées), il s'agit de l'endommagement. Jusqu'au seuil de fissuration σ_F , on peut considérer que les processus de déformation élastiques dominent car la courbe globale reste linéaire (fig. 3.36a). Ensuite l'amorçage de microfissures puis leur coalescence au-delà du seuil σ_L peuvent constituer les processus de déformation prépondérants. Les variations des modules élastiques – décroissance du module latéral (M_L , fig. 3.37b), les variations du module de Young (E , fig. 3.37c) qui est globalement constant, et celles du coefficient de Poisson (fig. 3.37d) qui augmente – traduisent un endommagement anisotrope par ouverture de microfissures dont la plus grande dimension serait subparallèle à l'axe de chargement (essai de compression uniaxiale), cette proposition est cohérente avec l'observation de la dilatance (fig. 3.36a) attribuée à l'amorçage, à l'ouverture de microfissures axiales (Jaeger et Cook, 1979). Les variations de vitesses et d'amplitudes maximales observées (fig. 3.40c et d) confirment cette hypothèse d'endommagement anisotrope, en effet les vitesses axiales apparaissent constantes et les vitesses transversales décroissent fortement après le seuil de fissuration (associé à l'ouverture des microfissures et croissance sans coalescence, Goodman, 1980). La différence notable entre les variations des vitesses transversales supérieures et celles des vitesses transversales inférieures, *i.e.* une décroissance plus forte des vitesses transversales supérieures, est sans doute due au fait que l'endommagement est plus accentué dans la partie haute de l'échantillon. En effet, au stade ultime de l'endommagement, nous observons de nombreuses fractures macroscopiques qui intersectent le rai transversal supérieur (fig. 3.52b) et non le rai inférieur.

L'interprétation des observations macroscopiques (mesures mécaniques, vitesses de propagation des ondes élastiques) par un processus d'endommagement anisotrope (amorçage et croissance de microfissures axiales) est corroborée par l'analyse des mécanismes de sources d'EA (analyse du premier mouvement, fig. 3.48) ainsi que par la répartition des tailles des événements enregistrés (analyse énergétique, fig. 3.44). En effet les mécanismes de type E

que l'on peut associer à des microfissures extensives sont nettement majoritaires jusqu'au seuil de dilatance. Les événements d'EA associés sont faiblement énergétiques. Au-delà du seuil de dilatance et jusqu'au pic de contrainte, les mécanismes mixtes (type M) sont majoritaires et semblent plus énergétiques que les mécanismes précédents (fig. 3.44), ils peuvent s'expliquer par des mouvements cisailants sur des plans de fractures résultant de la coalescence des microfissures axiales extensives. A des événements d'EA plus énergétiques on peut associer des sources plus grandes au mécanisme de cisaillement. Ces fractures se propagent ensuite au sein de l'échantillon lors de la phase post-pic. Ces interprétations qualitatives des processus d'endommagement conduisant à la rupture macroscopique – amorçage de microfissures en extension (Mode I) qui interagissent entre elles et avec des microfissures préexistantes, pour former enfin des fissures plus grandes ou fractures au mécanisme de cisaillement (Mode II) se propageant au sein de l'échantillon – sont en accord avec des observations faites par Moore et Lockner (1995) sur des lames minces issues d'un échantillon de granite soumis à une compression triaxiale. Lei et al. (2000) observent également un tel processus par l'intermédiaire de l'analyse des mécanismes de source des événements d'EA qu'ils enregistrent au cours de la compression triaxiale d'un schiste. Plus précisément, selon ces auteurs, la propagation d'une fracture cisailante comporte une activité acoustique intense au front de la dite fracture. Cette activité peut s'expliquer par la coalescence de nombreuses microfissures en extension, et leur interaction. Reches et Lockner (1994) modélisent la propagation d'une telle fracture (cf. Chapitre 1, fig. 1.21) qui naît dans une zone à forte densité de microfissures en extension, croît par coalescence de ces dernières, et se propage en provoquant l'amorçage de microfissures extensives en son front. D'après Ohnaka et Mogi (1982), les fractures en cisaillement seraient les sources d'événements d'EA au contenu fréquentiel basses fréquences et fortement énergétiques, l'amorçage, la croissance de microfissures induiraient des événements d'EA hautes fréquences et faiblement énergétiques. Nos observations concernant le contenu fréquentiel des événements d'EA que nous avons enregistrés durant la compression uniaxiale de ggp2 (arénite ferrifère oolitique) montrent une apparente absence d'événements hautes fréquences au-delà du pic de contrainte (σ_M sur la figure 3.46a), et même après le seuil de dilatance où les fréquences centrales des événements n'atteignent plus 300 kHz comme lors des phases précédentes du comportement mécanique. Pourtant des événements aux sources de type E sont toujours enregistrés (fig. 3.48a et b), elles ne sont cependant pas purement extensives. L'évolution des fréquences centrales au cours de la sollicitation et notamment après le seuil de dilatance peut être expliquée par la concurrence de deux phénomènes. D'une part, au-delà du seuil de dilatance, les fractures ou les fissures au mécanisme cisailant sont prépondérantes. D'autre part, l'endommagement anisotrope par ouverture et croissance de microfissures extensives axiales induit une atténuation anisotrope, plus forte transversalement que longitudinalement. Cette atténuation conduit à un filtrage des composantes hautes fréquences des événements d'EA enregistrés (la plupart des capteurs se trouve sur la surface latérale de l'éprouvette). Les

événements d'EA basses fréquences ($< 100\text{kHz}$, fig. 3.46a) enregistrés durant la phase de serrage, peuvent être dus, comme le suggèrent Ohnaka et Mogi (1982), à la fermeture de fissures préexistantes relativement longues orientées orthogonalement par rapport à la direction de chargement.

L'échantillon ggp2 a été longitudinalement prélevé dans une carotte issue d'un sondage sub-horizontal réalisé au parement du pilier G de la couche grise (cf. chapitre 2, fig. 2.1). L'axe de l'éprouvette est donc sub-parallèle à la stratification. Il est possible que celle-ci ait constitué des plans de faiblesses préférentiellement orientés, aidant l'amorçage de microfissures extensives axiales puis la formation de fractures macroscopiques sub-verticales (fig. 3.52) scindant l'échantillon, caractéristiques de « l'axial splitting » lors d'un essai de compression uniaxiale (Jaeger et Cook, 1979).

3.4.2 Intercalaire marneux

Les échantillons gm0203s1 (arénite ferrifère), gm0203s2 (micro-arénite) et gm0203s3 (arénite argileuse) proviennent d'un sondage sub-vertical, leur axe est donc sub-orthogonal aux plans de stratification de l'intercalaire marneux.

L'arénite ferrifère (gm0203s1) a un comportement mécanique en partie similaire à celui de l'échantillon de la couche grise (ggp2). Nous avons observé la manifestation de la dilatance sur leurs courbes contraintes-déformations (fig. 3.9 pour gm0203s1, fig. 3.36 pour ggp2). Le faciès d'arénite ferrifère de l'intercalaire marneux est en effet analogue à celui de la couche grise.

La phase de serrage relativement peu marquée (fig. 3.9) comporte quelques sources purement compressives (fig. 3.27a) due à la fermeture de microfissures préexistantes dont la dimension la plus grande serait sub-orthogonale à la direction axiale du chargement. L'augmentation de la vitesse V_P axiale (fig. 3.15c) durant cette phase, conforte l'interprétation précédente bien classique. Cette phase de serrage peut également résulter de la fermeture de vides intergranulaires. Les deux micromécanismes (fermeture de microfissures ou de vides intergranulaires) peuvent être des sources d'événements d'EA. L'énergie de ces événements serait relativement faible (Zang et al., 1996, lors de la compression uniaxiale d'un grès) comparée à celle des événements issus de la formation de fractures macroscopiques par coalescence des microfissures. Ainsi nous considérons avec prudence les événements hautement énergétiques enregistrés au cours de la phase de serrage de gm0203s1 (fig. 3.21) et, nous le verrons plus loin, de gm0203s2 (micro-arénite). Il est probable qu'ils soient dus à un ajustement progressif de l'opercule, initialement mal positionné (ces essais ont été les 2

premiers réalisés avec ce matériel), des cales aciers embrassant l'éprouvette (voir 2.3.2, fig. 2.8).

L'aspect linéaire et réversible des cycles de déchargement-rechargement et les mesures de vitesses de propagation des ondes P ou de l'amplitude maximale constantes durant ces cycles ($V_P(A_i) \approx V_P(C_i)$ et $Am(A_i) \approx Am(C_i)$, fig. 3.15c et d), indiquent l'existence de processus élastiques de déformation. Les déformations irréversibles auxquelles conduiraient des phases de déchargement complètes ainsi que les événements d'EA (phénomènes locaux inélastiques) enregistrés entre les cycles précédents (« effet Kaiser » précédemment décrit, fig. 3.18), impliquent des processus de déformation inélastiques. Tout comme ggp2, le comportement macroscopique observé sur les courbes contraintes-déformations et/ou contraintes-déplacements, apparaît comme une superposition de processus élastique et inélastique de déformation. Les mécanismes susceptibles d'engendrer ces déformations irréversibles sont essentiellement l'amorçage de microfissures et leurs interactions, le cisaillement sur des fissures préexistantes. Les variations des modules élastiques, et notamment la diminution du module latéral de déformation (M_L , fig. 3.10a), l'augmentation du coefficient de Poisson (fig. 3.10d), suggèrent un endommagement anisotrope par développement, ouverture et croissance, de microfissures axiales en extension. La dilatance observée à presque 50 % du maximum de contrainte (fig. 3.9a) renforce cette hypothèse. Quant à l'augmentation du module de Young (fig. 3.10b), elle traduit une diminution de la compressibilité axiale, connu sous le terme anglais « axial hardening ». Elle peut être interprétée comme étant due à la fermeture progressive de vides intergranulaires préférentiellement orientés (sub-orthogonalement) par rapport à la direction de σ_1 , d'autant que le phénomène s'accompagne d'une légère, mais constante, augmentation de la vitesse V_P selon le rai axial (fig. 3.15c). Cet « axial hardening » peut être favorisé par l'orientation des éprouvettes, les plans de stratification étant sub-orthogonaux à l'axe de l'éprouvette. L'ouverture en extension de microfissures axiales suggérée par les variations de module transversal (M_L) et par la manifestation de la dilatance entraîne également la diminution des amplitudes maximales transversales (fig. 3.15d) et de la vitesse V_P transversale supérieure (fig. 3.15c). Le développement de ces microfissures est apparemment plus important dans la partie haute de l'éprouvette, V_P transversale inférieure est plus ou moins constante. La partie supérieure de l'éprouvette (fig. 3.33) apparaît comme le lieu de la nucléation des fractures macroscopiques qui se propageraient vers le bas.

L'analyse des mécanismes des sources des événements d'EA ne confirme pas totalement l'hypothèse de microfissures axiales de Mode I. Malgré la présence d'événements purement extensifs (fig. 3.27a), les mécanismes en cisaillement (type M) apparaissent prépondérants tout au long de la sollicitation (fig. 3.27b). Brace et al. (1966) proposent trois types de fissures axiales (figure 3.64 ci-après). Le type b correspond bien à nos observations. Il s'agit en effet de fissures inter-granulaires (aux jointures de trois grains) conjugant des mécanismes de cisaillement prédominants et un mécanisme en extension.

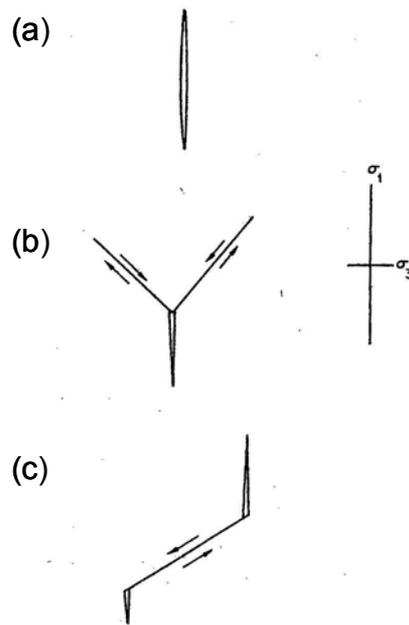


Figure 3.64 : Trois types de fissures axiales proposés par Brace et al. (1966) dans leur étude de la dilatance des roches cristallines. Le type a correspond à une fissure axiale de Mode I.

L'activité acoustique provenant de ces microfissures reste modérée, jusqu'au seuil de non-linéarité, à partir duquel ces dernières interagissent pour former des fractures alors sources d'événements d'EA statistiquement plus énergétiques (fig. 3.21). La formation par coalescence de ces fractures est accompagnée d'une diminution des fréquences centrales des événements enregistrés (fig. 3.24a). Cette diminution est sans doute due (comme pour ggp2) à un filtrage des hautes fréquences (augmentation de l'atténuation) conjugué à la formation de fractures générant des événements d'EA plus basses fréquences. Lors des derniers stades de la propagation des fractures macroscopiques, de nombreux mécanismes purements compressifs se manifestent (fig. 3.27a et b). Ceci est peut-être en relation avec la géométrie incurvée des fractures macroscopiques (fig. 3.33).

La micro-arénite (gm0203s2) et l'arénite argileuse (gm0203s3) présentent des comportements mécaniques qui ne diffèrent de celui de l'arénite ferrifère (gm0203s1) que par une dilatance très faible voire inexistante (fig. 3.11 pour gm0203s2 et fig. 3.13 pour gm0203s3). Les variations de modules élastiques (fig. 3.12 et fig. 3.14) ainsi que celles des vitesses de propagation des ondes P (V_p) et des amplitudes maximales (fig. 3.16 et fig. 3.17), sont bien similaires d'un essai à l'autre. Nous pouvons donc avancer de nouveau l'hypothèse d'un endommagement anisotrope associé à un raidissement axial (« axial hardening ») pour gm0203s2 et gm0203s3. Cependant, de par l'absence de dilatance macroscopique, il semble que les micro-mécanismes à l'origine de cet endommagement diffèrent de ceux proposés lors

de l'analyse de gm0203s1. L'analyse des premiers mouvements des événements d'EA enregistrés a montré la quasi-absence (comparé à gm0203s1) de sources purement extensives dans le cas de gm0203s2 et de gm0203s3 (respectivement, fig. 3.28a et fig. 3.29a). Les mécanismes de type M et donc des sources où le cisaillement est prépondérant, ainsi que les mécanismes de type C associés à des sources compressives, sont majoritaires jusqu'au seuil de non linéarité axiale (σ_L sur les figures 3.28b et 3.29b). L'activité acoustique accélère dès ce seuil (fig. 3.19 et 3.20), et les événements d'EA sont les plus énergétiques (les événements hautement énergétiques enregistrés durant la phase de serrage de gm0203s2 sont écartés pour les raisons déjà évoquées lors de la discussion des résultats de gm0203s1). On associe ces événements forts à des sources plus grandes issues de la coalescence de microfissures. Cette coalescence débiterait donc à partir du seuil σ_L . Les microfissures auraient des mécanismes de cisaillement et/ou compressif. Les irrégularités des plans de cisaillement provoqueraient, lors du jeu de la microfissure, de la dilatance locale par création d'espaces entre les lèvres de la microfissure (figure 3.65). Ce mécanisme d'augmentation de volume est cependant bien moins efficace que ne l'est l'ouverture de microfissures en Mode I, néanmoins il est apparemment suffisant pour affecter la propagation des ondes élastiques ainsi que le module latéral de déformation (M_L), les microfissures en cisaillement étant nécessairement sub-verticales ou légèrement inclinées par rapport à la direction du chargement uniaxial. La coalescence de ces microfissures accentuerait le phénomène (forte décroissance des V_p transversales supérieures lorsque σ_1 atteint σ_L) sans pour autant entraîner une dilatance macroscopique observable comme c'est le cas pour ggp2 ou gm0203s1. En ce qui concerne le contenu fréquentiel des événements d'EA, la décroissance des fréquences centrales apparaît clairement au cours de l'essai gm0203s2 et particulièrement lors de la propagation des fractures macroscopiques (fig. 3.25a). La conjugaison d'une atténuation plus forte et de la formation de fractures plus grandes serait à l'origine du phénomène (hypothèse émise pour ggp2 et gm0203s1). Les variations de la fréquence centrale (f_{50}) des événements enregistrés durant la compression uniaxiale de l'arénite argileuse (gm0203s3) sont plus complexes (fig. 3.26a). Rappelons que f_{50} semble augmenter jusqu'au seuil de coalescence ou seuil de non-linéarité axiale (σ_L), puis paraît constante pour la plupart des événements, même durant la propagation des fractures macroscopiques où des f_{50} hautes sont également présent.

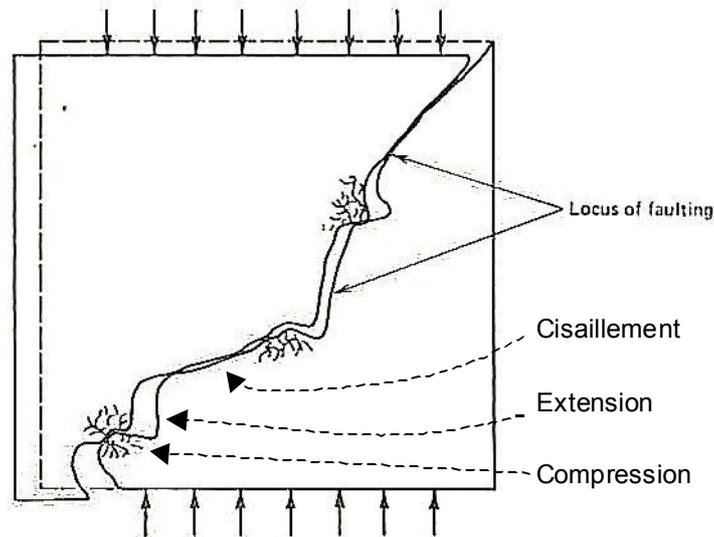


Figure 3.65 : Dilatance locale due aux irrégularités des lèvres d'une fracture en cisaillement, modifié d'après Goodman (1980). Des zones de compressions sont également présentes.

Les remarquables hétérogénéités de vitesses V_P transversales – la vitesse V_P inférieure apparaît supérieure à V_P mesurée dans la partie haute – observées lors des essais ggp2, gm0203s1, gm0203s2 et gm0203s3 (essais dont les échantillons ont été préalablement saturés d'eau), seront discutées dans le paragraphe 3.4.4.

Nous poursuivons par la discussion des résultats issus des compressions uniaxiale puis triaxiale d'échantillons d'arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune.

3.4.3 Couche brune

Nous nous intéressons tout d'abord aux résultats issus de l'essai de compression uniaxiale (essai bgp0) puis nous étudions les effets de la pression de confinement (P_c) par comparaison avec l'essai de compression triaxiale (bgp2, $P_c = 5$ MPa).

Comme pour les essais précédemment discutés, la compression uniaxiale d'un échantillon d'arénite ferrifère à poches argileuse (bgp0) s'accompagne d'un comportement mécanique résultant de la superposition de processus élastiques de déformation et de processus irréversibles. On a pu en effet observer, d'une part des cycles de déchargement-rechargement linéaires et réversibles, la similarité des vitesses V_P ou des amplitudes A_m mesurées aux points A_i puis C_i ($V_P(A_i) \approx V_P(C_i)$ et $A_m(A_i) \approx A_m(C_i)$, fig. 3.41c et d) ainsi que l'absence de sismicité durant les cycles précédents (absence d'activité acoustique, fig. 3.43a et b),

témoignant de leur réversibilité et de l'élasticité des processus de déformation ; d'autre part, les déformations permanentes, l'activité acoustique se manifestant entre les cycles, suggérant des mécanismes de déformation inélastiques. Les variations des modules élastiques (fig. 3.39), nous permettent d'avancer l'hypothèse d'un endommagement anisotrope. Les microfissures (microstructures de l'endommagement) sont probablement orientées telle que leur plus grande dimension soit parallèle à la direction de chargement. Cet endommagement ne se manifeste macroscopiquement qu'au-delà du seuil de serrage, les modules élastiques apparaissant constants durant la phase correspondante (fig. 3.39). Les variations de A_m selon les rai transversaux, décroissance légère puis plus forte au-delà du seuil de fissuration (σ_F) s'accordent à la diminution du module latéral de déformation (M_L , fig. 3.39a), plus franche au-delà de σ_F . La déformabilité latérale augmente vraisemblablement en raison de l'amorçage de microfissures qui provoque alors une augmentation faible de l'atténuation du matériau. Nous n'avons pas distingué de variations franches des vitesses transversales (fig. 3.41c), les amplitudes maximales et, indirectement, l'atténuation apparaissent plus sensibles aux modifications micro-structurales (endommagement) que subit la roche. De plus, l'absence de toute dilatance, nous suggère que les microfissures ne sont pas extensives (Mode I ou type (a) proposé par Brace et al., 1966), les mécanismes évoqués pour gm0203s2 et gm0203s3 correspondraient mieux. L'analyse des premiers mouvements des événements d'EA enregistrés durant la sollicitation nous renseigne un peu plus quant aux micromécanismes. Rappelons que la phase de serrage très marquée de bgp0 comporte une intense activité acoustique caractérisée par des événements aux sources majoritairement compressives, certains apparaissent purement compressifs (fig. 3.49a). Ces sources de type C, sont encore présentes (il n'y a cependant plus de mécanisme purement compressif) jusqu'au seuil de non-linéarité axial au-delà duquel les événements les plus énergétiques sont enregistrés (fig. 3.45), c'est-à-dire les événements certainement produits par des fissures plus grandes résultant de la coalescence des microfissures. Ces événements plus forts sont associés à des mécanismes au cisaillement prédominant, on distingue également une petite composante extensive (fig. 3.49a et b). La fermeture de vides intergranulaires, de fissures préexistantes orthogonales à l'axe de l'éprouvette, seraient les sources de cette forte activité acoustique durant la phase de serrage jusqu'au seuil de perte de linéarité axiale (ou seuil de coalescence, σ_L) les mécanismes compressifs seraient associés à des cisaillements, les phénomènes extensifs étant très peu nombreux. Les variations peu claires de la vitesse V_P mesurée selon le rai axial n'infirme pas cette hypothèse. Au-delà du seuil de coalescence, les cisaillements sur des fractures naissantes s'accompagneraient de phénomènes compressifs et extensifs au niveau d'aspérités, d'irrégularités, comme nous l'avons déjà suggéré pour les roches non-dilatantes de l'intercalaire marneux (fig. 3.65). Au vu des mesures d'amplitudes maximales (diminution franche dès le seuil de coalescence, fig. 3.41d), et des micromécanismes de fermeture de vides, impliquant une atténuation faible, nous pouvons penser que le filtrage des composantes hautes fréquences (HF) des événements d'EA est peu important. Nous observons une

évolution claire des fréquences centrales des événements durant la sollicitation (fig. 3.47a), à chaque régime de micromécanismes s'associe un intervalle bien particulier. Les événements compressifs ou majoritairement compressifs de la phase de serrage sont basses fréquences (BF), les événements ayant eu lieu durant la coalescence de microfissures supposées conjuguées (compressives et cisailantes) produisent des événements d'EA HF. L'évolution des fréquences centrales est clairement corrélée à celle des micromécanismes (figure 3.66 ci-après). La rupture très brutale de l'échantillon ne nous a pas permis de suivre la propagation des fractures macroscopiques au sein du matériau. On assiste donc durant la sollicitation de bgp0, à de nombreuses fermetures de vides intergranulaires et/ou de microfissures préexistantes durant la phase de serrage qui émettent des événements d'EA BF. Au-delà du seuil de fissuration, l'amorçage de microfissures cisailantes et leur coalescence sont associés à des événements d'EA HF. Ces mécanismes conduisent à une augmentation des déformations latérales relativement aux déformations axiales, l'endommagement semble anisotrope.

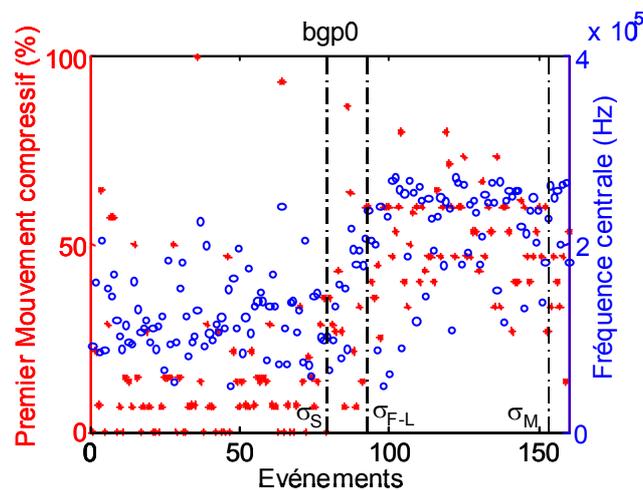


Figure 3.66 : Corrélation entre les régimes micromécaniques et les régimes fréquentiels. Les ronds bleus représentent les valeurs des fréquences centrales moyennes des événements d'EA enregistrés lors de la sollicitation en compression uniaxiale de bgp0. Les étoiles rouges sont les pourcentages de premiers mouvements compressifs de chaque événement. Les seuils de contrainte marquant les phases du comportement mécanique sont tracés en pointillés verticaux. Sur cette représentation, le seuil de coalescence (σ_L) et le seuil de fissuration (σ_F) sont confondus.

L'essai de compression triaxiale bgp2 permet d'étudier en partie les effets de la pression de confinement sur le comportement non-dilatant de l'arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune.

Tout d'abord, nous avons observé deux effets remarquables bien connus (Jaeger et Cook, 1979) : l'augmentation de la résistance à la compression (fig. 3.55) et la localisation de la déformation suivant une unique fracture macroscopique inclinée par rapport à la direction de σ_1 (fig. 3.63). Ensuite, les variations des modules élastiques, plus claires (fig. 3.56) suggèrent un endommagement anisotrope. Celui-ci n'a apparemment pas d'incidence sur les variations des vitesses V_P ou des amplitudes A_m transversales (fig. 3.57). Le très petit nombre d'événements enregistrés avant le pic de contrainte, indique un endommagement faible (peu d'amorçage de microfissures). Il est également possible que les événements d'EA émis soient de trop faible amplitude ou aient un contenu fréquentiel tels qu'ils ne peuvent être détectés par notre chaîne de mesure acoustique. Cependant on observe bien des déformations irréversibles malgré les phases de déchargement incomplètes, indiquant l'existence de processus inélastiques de déformation. La dissociation de grains et de la matrice, suivie de rotations et de glissement inter-grains pourraient être les processus microscopiques à l'origine des déformations permanentes observées macroscopiquement. Les glissements accentués entre les grains seraient à l'origine de la naissance de la fracture macroscopique qui se propage lors de la phase post-pic. Les nombreux événements d'EA ont été enregistrés après que la contrainte résiduelle ait été atteinte, c'est-à-dire une fois que le plan de fracture se soit formé. Ils résultent apparemment de sources cisailantes et compressives (fig. 3.61a) probablement localisées sur le plan de la fracture macroscopique. Ainsi la faible activité acoustique enregistrée avant la formation de la fracture macroscopique et apparemment également durant sa propagation (très rapide) ne nous permet pas de renforcer nos hypothèses émises à partir des observations macroscopiques. Cependant, bien que le confinement ne modifie pas le comportement mécanique macroscopique (la roche reste non-dilatante), il réduit apparemment la fermeture de microfissures préexistantes et de vides intergranulaires, ainsi que le développement de microfissures cisailantes similaires à celles observées en compression uniaxiale.

Les remarques générales sont au nombre de trois. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux distributions de tailles des événements d'EA et aux exposants b_e associés. Dans un second temps, nous examinons les effets (néfastes ?) de la désaturation progressive sur les variations de vitesses de propagation des ondes P. Enfin, nous discutons de la corrélation observée entre le type de micromécanisme et le contenu fréquentiel des événements d'EA.

3.4.4 Distribution des tailles des événements d'EA : exposant b_e

L'exposant b_e a été déterminé à partir des distributions des énergies moyennes des événements, c'est-à-dire des énergies des signaux enregistrés. L'énergie du signal est une

mesure de la taille de l'événement plus discriminante que l'amplitude maximale couramment utilisée. En effet deux événements distincts par leurs énergies peuvent avoir des amplitudes maximales voisines. b_e est donc différent de l'exposant courant (b_a). Cependant, on peut montrer que l'énergie du signal d'un événement est proportionnelle à son amplitude maximale élevée au carré. Ainsi b_e est de l'ordre de $b_a/2$. Le tableau 3.14 ci-après présente les valeurs de b_e calculé sur l'ensemble des événements d'EA enregistrés pour chaque essai, ainsi que la valeur de b_a déduite.

Essai	b_e	b_a
ggp2	0,63	1,26
gm0203s1	0,83	1,66
gm0203s2	0,47	0,94
gm0203s3	0,66	1,32
bgp0	0,51	1,02
bgp2	0,8	1,6

Tableau 3.14 : Exposants b_e et b_a de chaque essai. Les lignes rouges signalent les roches au comportement dilatant (soit ggp2 et gm0203s1), les lignes bleues correspondent aux roches non-dilatantes. La mise à l'écart de bgp2 est explicitée dans le texte.

Les valeurs de b_a présentées ici ne semblent pas surprenantes, au sens où elles ne semblent pas éloignées de celles que l'on observe lors d'expérimentations au laboratoire, durant des essais en compression uniaxiale ou en compression triaxiale visant l'étude des processus de rupture (Amitrano, 2003). Etant donné que la quasi-totalité des événements d'EA enregistrés durant l'essai bgp2 s'est produite en fin de propagation de la fracture macroscopique, l'exposant déterminé ne peut être mis en relation avec les processus d'endommagement (taille des sources, localisation, etc.) précédant la rupture macroscopique. Rappelons que l'exposant b_e est une mesure de la proportion des événements de petite taille (faiblement énergétique) et de grande taille (énergie du signal importante). Nous n'observons pas de corrélation entre les valeurs de b_e et les deux comportements majeurs que nous avons identifiés. Quant aux variations de b_e durant la sollicitation (elles n'ont pu être observées pour ggp2), elles apparaissent plus ou moins clairement. b_e semble cependant diminuer à l'approche du pic de contrainte (voir les figures 3.30, 3.31, 3.32 et 3.51) soit bien au-delà du seuil de coalescence lorsque les fractures macroscopiques s'amorcent. La diminution de l'exposant peut être interprétée comme une augmentation de la proportion d'événements de grandes tailles. Nous avons associé ces événements, lors de notre discussion antérieure, à la formation de fractures par coalescence de microfissures ayant lieu au-delà du seuil de non-linéarité axiale (nommé alors seuil de coalescence). Cette corrélation entre l'évolution de l'exposant et l'évolution de l'endommagement qui tend à résulter de fractures macroscopiques (formées par coalescence

de microfissures) s'accorde aux observations de nombreux auteurs. Ceux-ci, par exemple Lockner et al. (1991) et Amitrano (2003), témoignent d'une diminution de l'exposant lors de la nucléation des fractures macroscopiques (juste avant le pic de contrainte) dont la propagation conduit à la rupture.

3.4.5 Vitesses V_p et désaturation progressive

Nous discutons ici de l'effet de la désaturation progressive durant les expérimentations des échantillons qui ont été préalablement plongés dans de l'eau du site pilote de Tressange (échantillons ggp2, gm0203s1, gm0203s2 et gm0203s3). La désaturation progressive de l'échantillon pendant son instrumentation ainsi que durant l'essai de compression uniaxiale est difficilement contrôlable. Malgré une protection de silicone placée autour de l'éprouvette (échantillons de l'intercalaire marneux uniquement), la désaturation gravitaire est inévitable, la progression de l'endommagement accélère probablement le phénomène, plus précisément la fissuration facilite l'échange eau/air à la surface de l'échantillon. Quels sont les effets de cette désaturation progressive sur nos mesures ? Sont-ils négligeables ?

Des études des effets de la saturation partielle et totale à l'eau de roches sédimentaires sur les vitesses de propagation des ondes P (V_p) ont montré que V_p pour une roche partiellement saturée est inférieure à V_p lorsque la roche est sèche. La vitesse mesurée est maximale lorsque la saturation est totale (Bourbié et al., 1986), soit : $V_{p(\text{partielle})} < V_{p(\text{sec})} < V_{p(\text{totale})}$. Concernant les effets sur l'atténuation, celle-ci est plus forte lorsque le milieu est partiellement saturé, plus faible lorsque la roche est sèche, elle a une valeur intermédiaire quand la saturation est totale (Bourbié et al., 1986). La relation $V_{p(\text{sec})} < V_{p(\text{totale})}$ a également été observée par Zang et al. (1996) durant la compression uniaxiale d'un grès (figure 3.67).

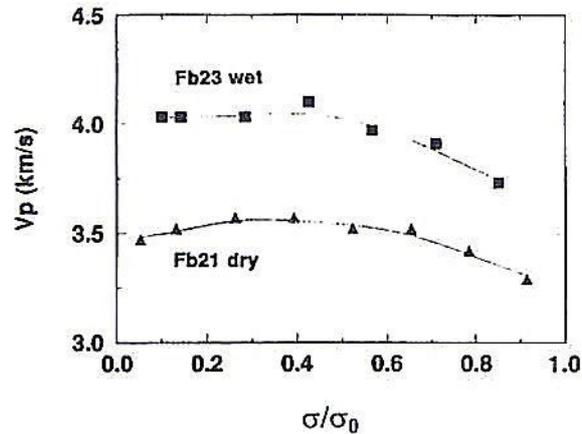


Figure 3.67 : Evolution des vitesses transversales de propagation des ondes P mesurées au centre d'un échantillon de grès sec (triangles) et d'un échantillon de grès saturé d'eau (carrés), durant la sollicitation en compression uniaxiale (Zang et al., 1996).

Nous avons observé effectivement et systématiquement une différence entre les mesures de vitesses transversales réalisées selon le rai supérieur et celles effectuées selon le rai inférieur, et ce uniquement dans les cas où les échantillons avaient été préalablement plongés dans l'eau. L'eau s'évacuant du haut vers le bas, la partie supérieure de l'éprouvette peut être plus désaturée que la partie inférieure, voire presque sèche en surface. La vitesse V_P alors mesurée dans la partie haute est inférieure à celle mesurée dans la partie basse où la saturation serait partielle. L'effet attendu concernant l'atténuation et donc indirectement les amplitudes maximales mesurées, n'est cependant pas observé, et ce quel que soit l'essai considéré.

Afin de quantifier l'effet de la désaturation sur nos mesures de vitesses V_P transversales, nous avons réalisé une expérimentation en l'absence de toute sollicitation. Elle a consisté en la mise en place d'un réseau de récepteurs et d'émetteurs autour d'un échantillon issu de l'intercalaire marneux (sondage sub-vertical gm0204), la configuration du réseau de capteurs est identique à celle utilisée lors des essais mécaniques. Les mesures ont été réalisées tous les quarts d'heure durant 8 heures, elles englobent donc 32 mesures selon 3 rais (axial, transversal supérieur et transversal inférieur). La figure 3.68 ci-après présente les résultats de ces mesures. Précisons que l'échantillon était protégé par une jaquette en silicone. Rappelons que l'axe de l'éprouvette est sub-orthogonal à la stratification. La présence de joints de stratification explique la différence observée entre les vitesses transversales et la vitesse axiale nettement plus faible. Les vitesses transversales supérieures (Δ bleus) et inférieures (∇ verts) apparaissent tout d'abord équivalentes. La désaturation progressive semble avoir un effet au bout de seulement 4 heures (les essais durent en moyenne 5 heures). Les vitesses transversales diminuent, la vitesse inférieure est très légèrement inférieure à la vitesse supérieure. Cette observation tend à s'accorder à la relation $V_P(\text{partielle}) < V_P(\text{sec})$. Cependant

ces différences ne sont pas significatives compte tenu de l'erreur de 2 % associée à chaque détermination de vitesse. Cette expérimentation n'apparaît donc pas concluante.

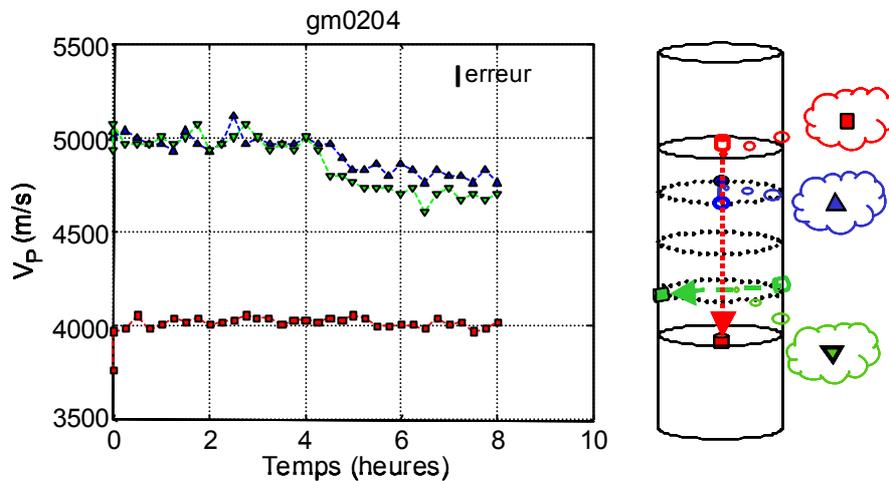


Figure 3.68 : Effet de la désaturation progressive sur les mesures de vitesses V_p . L'expérimentation est présentée dans le texte.

La différence observée lors de nos essais, c'est-à-dire $V_p(\text{transversale supérieure}) < V_p(\text{transversale inférieure})$ s'accorderait avec la relation évoquée précédemment telle que $V_p(\text{sec}) < V_p(\text{totale})$ si la partie supérieure était vraiment sèche, ce qui ne peut être vraisemblablement le cas au bout de seulement 5 heures (des mesures de masse d'échantillon avant et après essai, ainsi qu'après séchage à l'étuve le confirment). Il est plus probable que la surface de l'échantillon deviennent progressivement plus sèche en haut qu'en bas (où l'eau s'évacue). Cet assèchement en surface a peut-être une incidence sur le couplage des capteurs créant des vides entre le couplant et la roche (vides initialement remplis d'eau), ce qui affecterait le trajet de l'onde émise. Nous observons ainsi des différences allant de 80 m/s à environ 500 m/s pour les essais ggp2, gm0203s2 et gm0203s3. Nous attribuons la différence remarquable de l'ordre de 2000 m/s observée lors de l'essai gm0203s1 à la présence d'une hétérogénéité particulière au sein du matériau dans sa partie supérieure. Nous remarquons que la différence entre les vitesses transversales se manifeste dès la première mesure avant le début de la sollicitation (fig. 3.15, 3.16, 3.17 et 3.40). De plus elle reste constante au cours de la sollicitation jusqu'à ce que l'endommagement se manifeste macroscopiquement. Nous pensons donc que la désaturation progressive n'altère que faiblement notre suivi macroscopique de l'endommagement au cours de la sollicitation mécanique. La question de ses effets quant à l'amorçage des microfissures ou encore sur l'atténuation des émissions acoustiques, reste entière. Nous énoncerons dans la conclusion de ce chapitre quelques propositions d'expériences permettant d'éviter un tel phénomène ou de le contrôler.

3.4.6 Micromécanismes et fréquence centrale des événements d'EA

Les variations de la fréquence centrale des événements d'EA enregistrés au cours de la compression uniaxiale d'un échantillon de la couche grise (essai ggp2-MAV18) sont représentés sur la figure 3.69a. Nous avons attribué la diminution de la fréquence centrale après le seuil de dilatance (σ_D) à la concurrence de deux phénomènes. D'une part, au-delà de σ_D , les micromécanismes cisailants sont prépondérants (figure 3.69a), ils produiraient des événements d'EA aux fréquences centrales faibles par rapport à celles d'événements issus de sources en extension (ouverture de microfissures, avant σ_D , figure 3.69a). D'autre part, l'endommagement anisotrope par ouverture de microfissures extensives axiales, induisant une atténuation anisotrope plus forte transversalement que longitudinalement, entraînerait un filtrage des hautes fréquences des événements d'EA.

Dans le cas de l'essai de compression uniaxiale d'un échantillon de la couche brune (essai bgp0-MAV18). Nous observons une corrélation entre le type de micromécanisme et la fréquence centrale des événements d'EA (figure 3.69b). Les micromécanismes compressifs (avant le seuil de serrage σ_S) sont associés à des événements aux fréquences centrales proches de 100 kHz. Les micromécanismes mixtes (cisaillement) produisent des événements aux fréquences centrales de l'ordre de 200 kHz.

Il semblerait que le phénomène de filtrage des hautes fréquences évoqué précédemment soit mineur et que ce soit le type de micromécanisme qui agisse sur le contenu fréquentiel des événements d'EA. La figure 3.70, réunion des résultats des deux essais précédents, illustre ce propos. Les micromécanismes en extension (ouverture de microfissures) produisent des événements aux fréquences centrales élevées (300 kHz, fig. 3.70 et 3.69a), les micromécanismes compressifs génèrent des événements basses fréquences (100 à 150 kHz, fig. 3.70 et 3.69b), enfin les micromécanismes en cisaillement engendrent des événements aux fréquences centrales intermédiaires (200 kHz, fig. 3.70 et 3.69a et b).

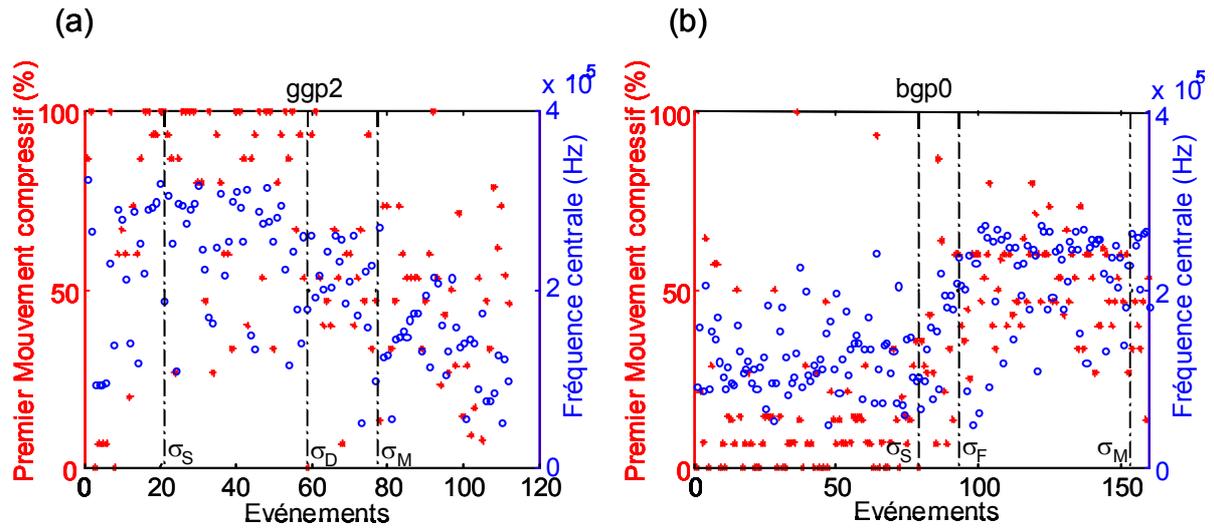


Figure 3.69 : (a) Premier mouvement et fréquence centrale des événements d'EA enregistrés au cours de la sollicitation en compression uniaxiale d'un échantillon de la couche grise (essai ggp2-MAV18). (b) Premier mouvement et fréquence centrale des événements d'EA enregistrés au cours de la sollicitation en compression uniaxiale d'un échantillon de la couche brune (essai bgp0-MAV18).

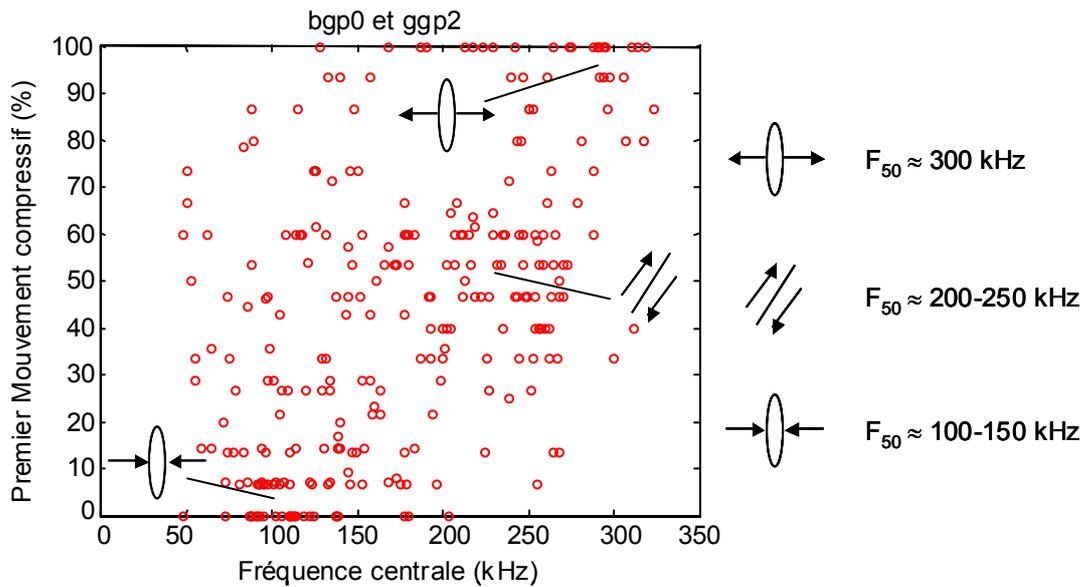


Figure 3.70 : Micromécanismes, premier mouvement et fréquence centrale des événements d'EA enregistrés au cours des essais de compression uniaxiale ggp2-MAV18 et bgp0-MAV18

3.5 Conclusion et perspectives

Les 5 essais de compression uniaxiale réalisés sur des arénites ferrifères de la couche grise et de l'intercalaire marneux de Tressange, et sur une micro-arénite, une arénite argileuse, issues également de l'intercalaire marneux, ainsi que sur une arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune nous ont permis d'estimer les processus microscopiques et macroscopiques de l'endommagement de ces roches au cours de leur sollicitation mécanique. Le dernier essai où un échantillon de la couche brune a été soumis à une sollicitation en compression triaxiale ($P_c = 5 \text{ MPa}$) permet d'esquisser les effets de la pression de confinement sur les mécanismes d'endommagement.

Ainsi grâce à l'analyse de concert des mesures macroscopiques indirectes de l'endommagement – modules élastiques (M_L , E_{apparent} et v_{apparent}), déformations permanentes, vitesses de propagation des ondes élastiques (V_p) et atténuation (par l'intermédiaire des amplitudes maximales A_m) – et des mesures microscopiques (elles aussi indirectes) que constituent les différents paramètres issus de l'analyse des émissions acoustiques – activité, énergie, fréquence centrale, mécanismes types (type E, M et C), exposant b_e –, deux mécanismes principaux d'endommagement ont été mis en évidence. Ils sont associés à deux comportements mécaniques différents dont un énoncé serait : les arénites ferrifères de la couche grise et de l'intercalaire marneux aux faciès semblables ont un comportement dilatant (manifestation d'une augmentation relative de volume au cours de la sollicitation), la micro-arénite, l'arénite argileuse de l'intercalaire marneux et l'arénite de la couche brune ont quant à elles, un comportement non-dilatant. La dilatance est la manifestation macroscopique de phénomènes microscopiques. L'endommagement des roches dilatantes naît de l'amorçage de microfissures ou de microfissures conjuguées au mécanisme purement extensif (Mode I ou type a, fig. 3.64). Ces microfissures se réuniraient par coalescence pour former des fractures macroscopiques naissantes qui se propageraient et scinderaient finalement l'échantillon. L'endommagement des roches non-dilatantes consiste en des micromécanismes différents, comme Escartin et. al (1997) ont pu l'observer sur des lames minces lors de leur étude de la déformation de serpentinites. Les microfissures qui se développent ont des mécanismes cisailants, leur coalescence conduirait à la formation des fractures macroscopiques dont la propagation s'accompagne finalement de la rupture de l'échantillon. Macroscopiquement, l'endommagement apparaît anisotrope dans les deux cas, les microfissures étant sub-verticales. L'essai de compression triaxial n'a pas permis, de par la très faible activité acoustique enregistrée, de préciser les effets de la pression de confinement sur les micromécanismes de l'endommagement anisotrope de l'arénite ferrifère non-dilatante de la couche brune.

Une corrélation entre le type de micromécanismes et la fréquence centrale des événements d'EA a été observée pour les essais MAV18 (bgp0 et ggp2) où le nombre important de

capteurs permet une détermination robuste des mécanismes de source. Les micromécanismes compressifs engendrent des EA basses fréquences (100 kHz), les micromécanismes en extension (ouverture de microfissures) produisent des EA hautes fréquences (300 kHz), enfin les micromécanismes cisailants génèrent des EA au contenu fréquentiel intermédiaire (200 kHz).

Il serait intéressant de multiplier les essais mécaniques pour chaque matériau étudié ici afin de confirmer nos hypothèses quant à leurs processus d'endommagement respectifs. Ces essais devront être en compression uniaxiale menée sur des échantillon instrumenté du plus grand nombre de capteurs (18 TPZ et 6 jauges de déformation) permettant une approche plus fine et plus robuste des phénomènes, et en compression triaxiale à différentes pression de confinement. Afin d'éviter les effets de la désaturation au cours de l'essai, nous proposons d'effectuer à l'avenir des essais sur échantillons secs ou en condition de saturation totale.

4

Etude de la microsismicité induite par l'envoyage d'un massif rocheux minier

4.1 Introduction

Au cours du chapitre précédent, nous avons exposé et discuté les résultats issus d'essais mécaniques et acoustiques réalisés au laboratoire. Ces derniers visaient l'étude de l'évolution de l'endommagement jusqu'à la rupture d'échantillons de roches du bassin ferrifère lorrain. Nous avons ainsi pu voir que l'endommagement – naissance, interaction, propagation de fissures, de fractures – pouvait s'exprimer par l'émission d'ondes élastiques transitoires se propageant au sein de l'échantillon de roche, ces ondes s'appelant « émissions acoustiques (EA) ». Des phénomènes ondulatoires similaires peuvent se manifester au sein de la croûte terrestre, ce sont les séismes. A une échelle intermédiaire, lorsque des ondes élastiques parcourent un massif rocheux, on parle de micro-séismes ou d'émissions sismo-acoustiques.

Dans les exploitations minières, tout comme le sont les EA pour un échantillon de roche sous contrainte, la microsismicité constitue une mesure indirecte de l'endommagement des ouvrages entourant les galeries. Cet endommagement est la conséquence de l'excavation qui crée des zones surcontraintes dans les massifs autour des galeries minières. Il se manifeste par une modification des propriétés physiques des ouvrages, par une fracturation (Figure 4.1), il peut dégénérer en rupture des massifs rocheux (piliers, toit et mur des galeries dans le cas d'une exploitation en galeries et piliers), on parle alors de coups de terrain ou « rockburst ».

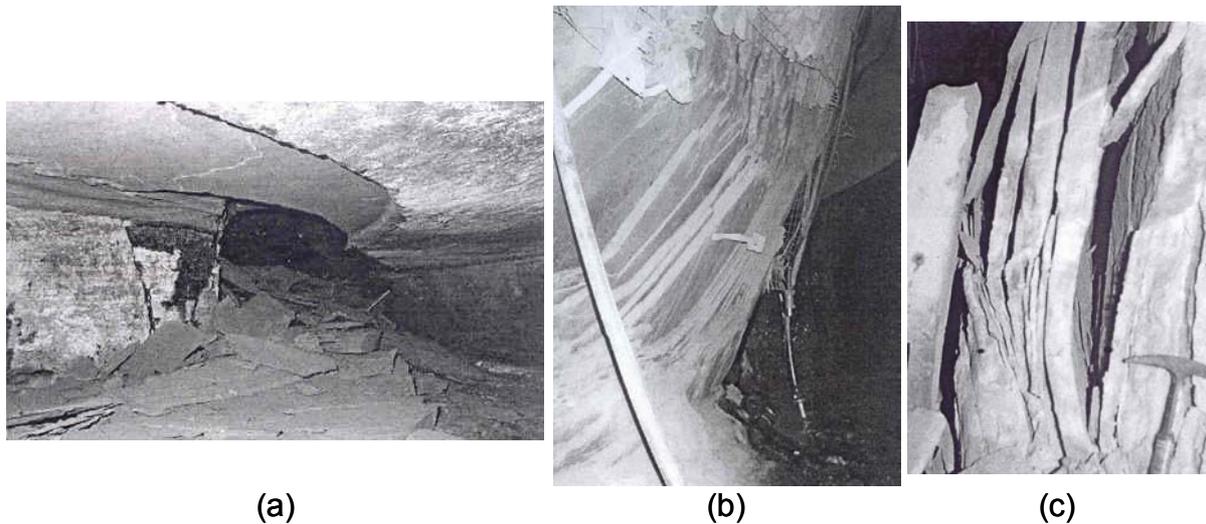


Figure 4.1 : Photos de délitement d'un toit (a) et d'un pilier (b et c) extraites de Szwedzicki (2003).

La microsismicité, par la localisation de ses sources, peut permettre de délimiter les zones surcontraintes (Senfaute et al., 1999), ou une zone endommagée (EDZ) autour des galeries minière (Young et Collins, 2001). Dans le contexte d'exploitations minières en activité, l'analyse de la microsismicité induite par l'excavation progressive permet de suivre la propagation du front d'endommagement autour de la galerie et de mieux quantifier les modifications des propriétés physiques du massif rocheux concerné (Cai et al., 2004) et ainsi de conforter les ouvrages de façon optimale. Les coups de terrain – événements microsismiques provoquant des dégâts souterrains – sont parfois synonymes de dommages aux personnes et aux engins et d'un ralentissement de l'exploitation minière, ils peuvent, de plus, se répercuter en surface, les dégâts s'étendant alors aux villes sus-jacentes (voir la figure 4.2 ci-après). L'auscultation microsismique doit permettre la prévention de ces dégénérescences ultimes (Senfaute et al., 2000). L'analyse des mécanismes de sources permettrait quant à elle de mieux comprendre les processus d'endommagement conduisant à ces ruptures brutales.



Figure 4.2 : Exemples de dégâts observés en surface dans le bassin ferrifère lorrain.

A notre connaissance, la grande majorité des études de la microsismicité minière sont réalisées dans des mines exploitées. De plus, on dénombre peu d'étude, *via* la microsismicité induite, des effets de l'ennoyage des ouvrages souterrains sur leur pérennité, selon nous, seuls Gendzwil et Prugger (1990) discutent d'un ennoyage accidentel lors de l'exploitation d'une mine. Nous avons eu l'opportunité de réaliser une auscultation microsismique au cours de l'ennoyage partiel du site pilote de Tressange (expérimentation Gisos). Notre objectif était de déterminer de quelle manière une telle écoute peut nous aider à mieux comprendre les phénomènes, notamment d'endommagement, résultant de l'ennoyage. Ainsi, dans ce chapitre, nous exposons tout d'abord le contexte général, c'est-à-dire la problématique des effondrements miniers dans le bassin ferrifère lorrain. Puis nous présentons le site expérimental, sa géométrie et sa géologie, ainsi que les étapes de son ennoyage. Nous décrivons ensuite l'auscultation microsismique qui a été menée, les résultats sont discutés. Enfin, une expérimentation dite de chute de blocs nous a permis d'aborder expérimentalement un phénomène conséquent d'un endommagement important, c'est-à-dire le décrochement de blocs au toit des galeries.

4.2 Le bassin ferrifère lorrain et la problématique des effondrements miniers

Le bassin ferrifère lorrain s'étend sur 120 km du nord au sud et sur 50 km d'ouest en est (figure 4.3). La formation ferrifère, aalénienne, d'une épaisseur de 30 à 50 m, communément nommée « minette de lorraine » en raison de sa faible teneur en fer (environ 30 %), a un pendage de l'ordre de 2° vers le sud-ouest (figure 4.4). Les couches les plus ferrifères ont été exploitées selon deux méthodes. On distingue l'exploitation totale où les vides souterrains ont

été soit remblayés soit remplis lors du foudroyage des ouvrages résiduels (dépilage), de la méthode d'exploitation partielle qui laissait des piliers destinés à supporter l'ensemble du recouvrement. La première méthode était pratiquée sous les zones inoccupées, les roches éboulées et foisonnées après exploitation totale, subissaient un tassement progressif qui se stabilisait peu de temps après (moins de 5 ans). La seconde méthode, dite d'exploitation partielle (en chambres et piliers abandonnés), pratiquée sous les villes, devait permettre de préserver les habitations et les infrastructures de manière pérenne.

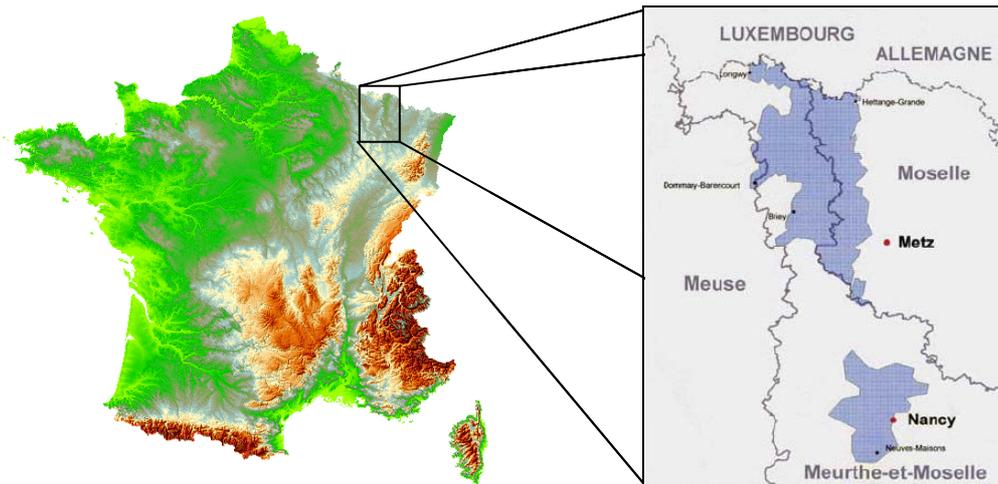


Figure 4.3 : Cartes de la France et du bassin ferrifère lorrain (sources respectives : IGN, GISOS).

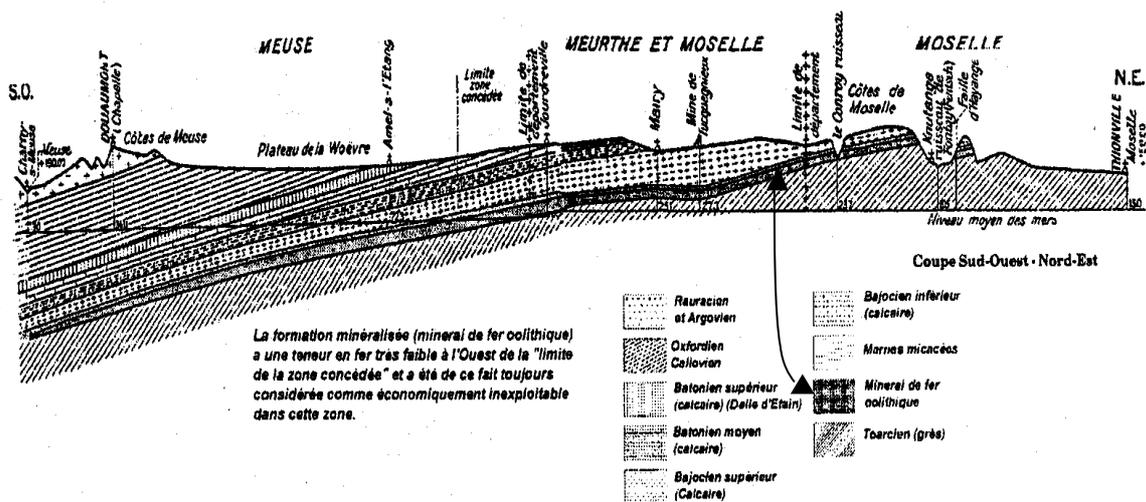


Figure 4.4 : Coupe géologique simplifiée du bassin ferrifère lorrain. La couche de minéral de fer oolithique affleure au nord-est dans la vallée de la Moselle, et plonge d'environ 2° vers le sud-ouest, la profondeur de la couche pouvant atteindre 300 m. Les morts-terrains (ou recouvrement) ont une épaisseur qui peut atteindre environ 150 m.

Des désordres importants en surface *i.e.* des effondrements, ont eu lieu dans ces zones consécutivement ou non à l'arrêt des exploitations et plus ou moins tardivement (Piguet et al. 1999), leur origine la plus courante étant la rupture des piliers abandonnés. Le dimensionnement des piliers porteurs effectué à l'époque (parfois avant 1960) ne tenait pas compte des effets du vieillissement des piliers, de l'évolution de l'endommagement initialement provoqué par l'excavation, ou encore de l'ennoyage (remontée du niveau des eaux) induit par l'arrêt du pompage d'exhaure qui accompagne la fin de l'exploitation. Les recherches menées dans le Gisois visent notamment à comprendre les mécanismes et à déterminer les précurseurs (figure 4.5) des mouvements de terrains conduisant aux affaissements et effondrements.

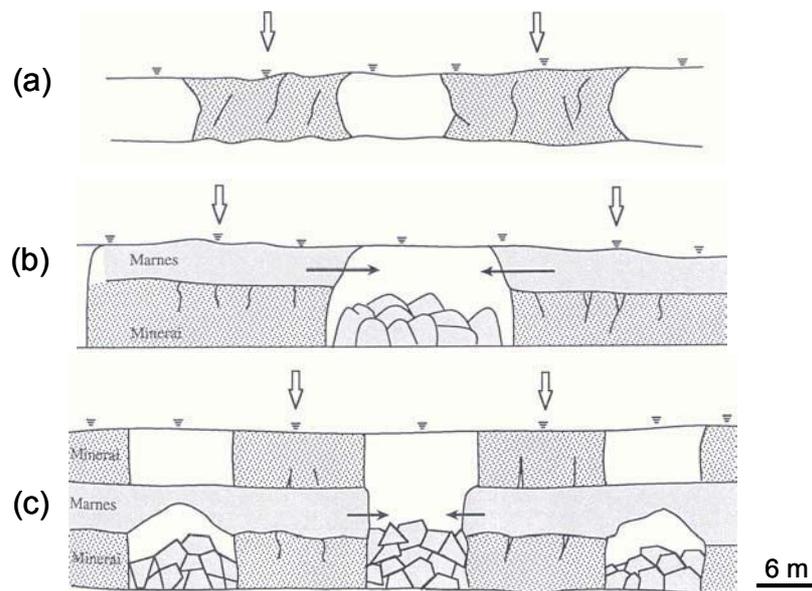


Figure 4.5 : Evolution locale possible de processus d'effondrement (Piguet et al. 1997). (a) Compression excessive des piliers conduisant à leur écrasement, (b) et (c) éboulement de l'intercalaire marneux (couche non-exploitée).

4.3 Présentation du site expérimental de Tressange et de son ennoyage

4.3.1 Introduction

Nous présentons tout d'abord, de manière sommaire, la géométrie et la géologie du site expérimental de Tressange. Son état de fracturation initiale, c'est-à-dire avant l'ennoyage, est ensuite décrit. Enfin, nous exposons le déroulement de l'ennoyage du site au cours duquel l'auscultation microsismique a eu lieu.

4.3.2 Géométrie et géologie sommaires

Le site expérimental est une partie restreinte (parallélépipède à base carré de 70 m de côté et 5 m de hauteur) du stot de Tressange – un stot est une zone partiellement exploitée ou non exploitée permettant la protection des infrastructures de surface – situé au nord du bassin ferrifère lorrain. La formation sédimentaire ferrifère est particulièrement épaisse dans cette région, elle atteint près de 65 m. Le pendage des couches est sensiblement plus élevé au niveau du site expérimental et orienté différemment par rapport à celui déjà évoqué pour l'ensemble des formations ferrifères, il est en effet d'environ 3° vers le sud-est. La méthode d'exploitation en chambres et piliers abandonnés qui a été employée à la verticale de la ville de Tressange concerne trois couches ferrifères. On distingue ainsi, de la plus profonde, soit environ 225 m, à la moins profonde, la couche brune, la couche grise, et la couche jaune sauvage (figure 4.6). Ces couches sont séparées par des intercalaires plus riches en argiles et en carbonates. D'une couche exploitée à l'autre, les piliers (d'environ 18 m de large et 28 m de long) sont assez bien superposés puisqu'il n'est observé qu'un décalage maximal d'environ 0,5 m. Le taux de défrètement, c'est-à-dire le rapport entre la surface exploitée et la surface totale, est de l'ordre de 36 %. L'expérimentation d'ennoyage qui a été menée de mars 2002 à août 2003 concerne principalement la couche brune ainsi que l'intercalaire marneux la séparant de la couche grise (figures 4.6 et 4.7). La lithologie de ces deux formations, déjà présentée au cours du chapitre 2, est rappelée dans le tableau 4.1. Notons que la stratification de la couche brune est irrégulière, au sens où elle n'est pas oblique régulière comme celle des autres formations du bassin ferrifère (Lopes, 2002). Les joints de stratification sont irréguliers et discontinus. Enfin elle se distingue des autres couches exploitées par sa forte teneur en silice et la présence de poches d'argiles noires.

Couche	Lithologie	Puissance approchée (m)
intercalaire grise-brune	arénite ferrifère	6 à 7
	micro-arénite	
	marnes inférieures	
brune	ferriarénite oolitique à ciment argileux noir	2,4

Tableau 4.1 : Lithologie et puissance des deux formations directement concernées par l'expérimentation d'envoyage. La variation lithologique de l'intercalaire selon son épaisseur est visible. L'arénite ferrifère est voisine de celle de la couche grise sus-jacente. Les marnes inférieures (niveaux argileux de l'intercalaire) ont une puissance proche de 1,4 m. D'après Lopes (2002).

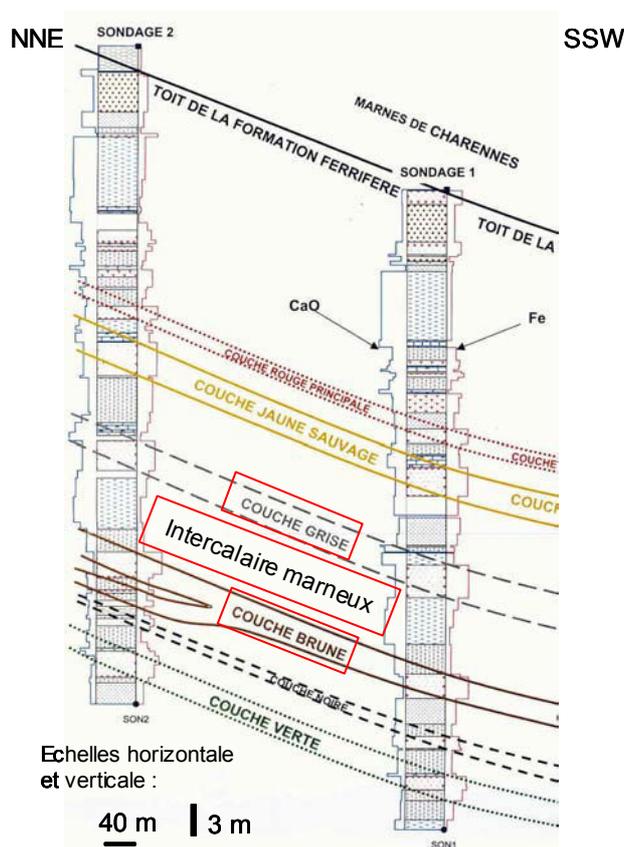


Figure 4.6 : Colonnes stratigraphiques issues de l'analyse réalisée par Lopes (2002) de sondages de l'exploitant (ARBED).

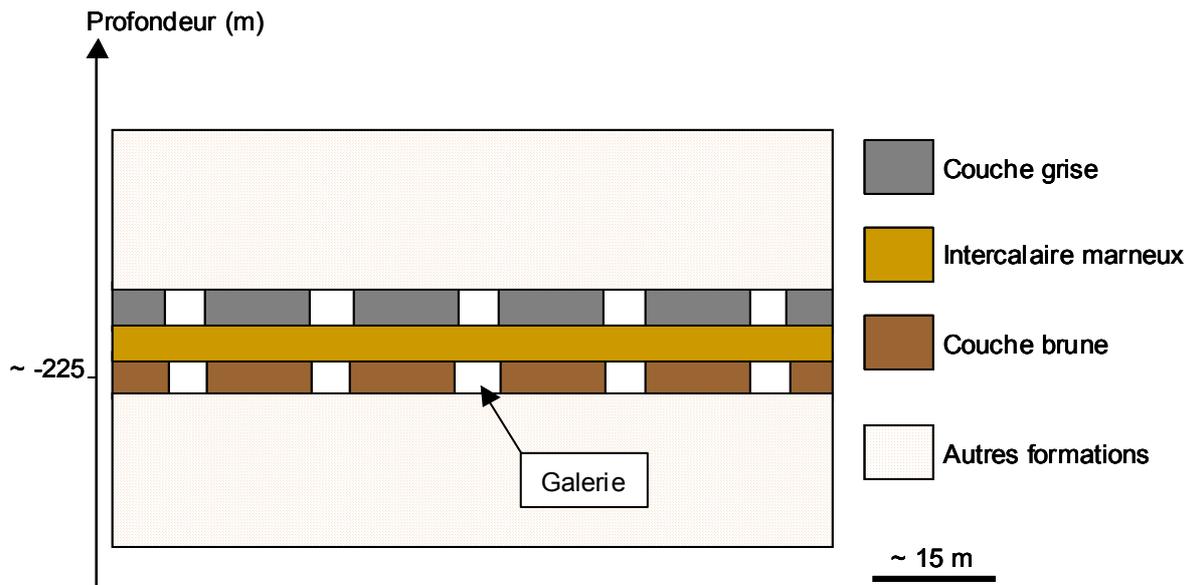


Figure 4.7 : Coupe schématisée (le pendage des formations ainsi que leur puissance ne sont pas pris en compte) de chambres et piliers au sein de deux couches de minerai, la couche grise et la couche brune. Ces deux couches exploitées sont séparées par un intercalaire marneux.

4.3.3 Etat de la fracturation avant l'ennoyage

L'état de la fracturation des piliers de la couche brune et de son toit (marnes inférieures de l'intercalaire grise-brune) et la densité du soutènement par boulonnage sont présentés sur la figure 4.8. On peut noter que les piliers de la couche brune sont peu fracturés. Des fractures parallèles au parement ont été observées en surface (40 premiers centimètres) sans doute dues à l'exploitation. Au-delà des 40 premiers centimètres, les discontinuités observées sont des fractures naturelles – discontinuités dont la formation n'est pas consécutive à l'excavation – subverticales d'orientation N13, elles sont souvent cicatrisées par des matériaux carbonatés. Le toit de la couche brune, soit la base de l'intercalaire grise-brune, apparaît bien plus dégradé, de nombreuses zones de décrochement ont été observées (figure 4.8), ainsi que des fractures. Le boulonnage dense (un boulon de 1,8 m de long par m²) indique l'existence d'une fracturation identifiée par l'exploitant.

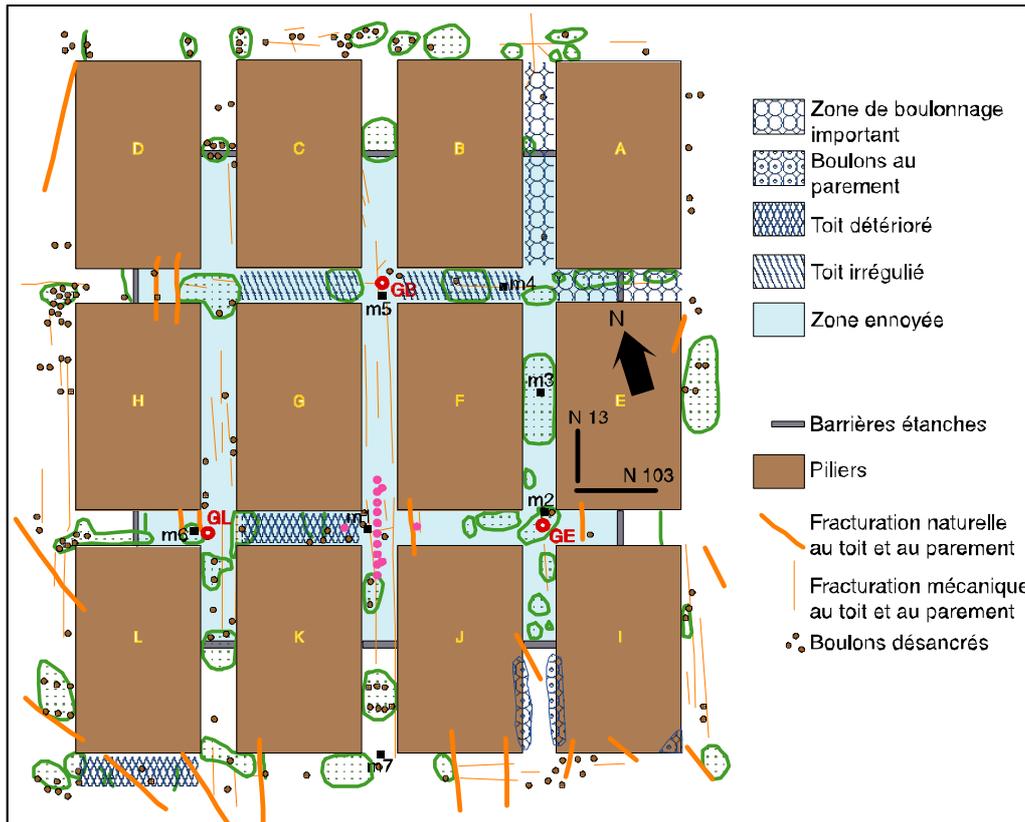


Figure 4.8 : Schématisation du site pilote de Tressange et de l'état de dégradation du parement et du toit de la couche brune, modifié d'après Al Heib (2000).

4.3.4 Ennoyage du site

La zone ennoyée est délimitée en couche brune par dix barrières étanches en béton maçonnées dans les galeries (figure 4.8). Deux piliers (G et F) de la couche brune sont entièrement ennoyés, dix autres ne le sont que partiellement. On peut subdiviser en trois phases principales l'ennoyage qui s'est déroulé pendant plus d'un an et demi (figure 4.9) : une première phase non-stationnaire de montée de l'eau dans la cavité, une seconde phase dite stationnaire où le toit de la couche brune est atteint (l'eau pénètre dans l'intercalaire grise-brune), et une troisième phase non-stationnaire de dénoyage. Le remplissage du site pilote (première phase) a duré 3 mois, il est considéré comme effectif lorsque l'eau atteint le toit de la cavité dans l'ensemble du site, les galeries suivant le pendage de la couche brune, le toit en aval (par exemple entre les piliers K et J, figure 4.8) a été atteint avant le toit en amont (entre les piliers B et C par exemple). Les ouvertures dans la couche brune ont pour hauteur 2,5 à 3 m, le toit est atteint au bout de presque 2 mois. Le niveau de l'eau qui pénètre notamment à l'intérieur de l'intercalaire grise-brune (figure 4.10), est maintenu constant durant environ 10 mois malgré de nombreuses fuites par des fractures du toit et du mur des galeries (Fabriol et

Hamm, 2004). Le dénoyage a duré un mois et demi. Il a débuté dès l'arrêt de l'alimentation, l'eau s'évacuant *via* les fractures existantes.

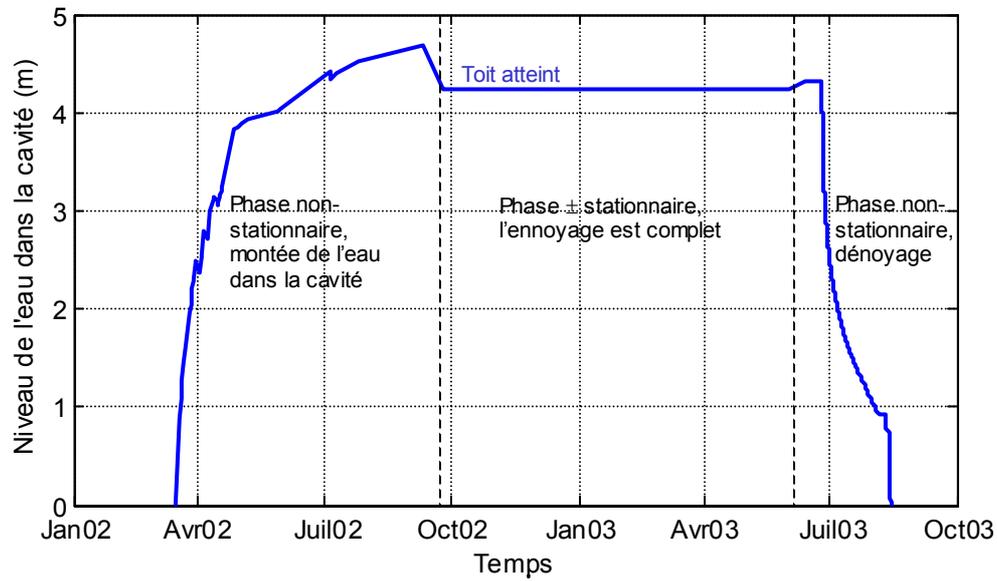


Figure 4.9 : Historique de l'ennoyage du site expérimental de Tressange.

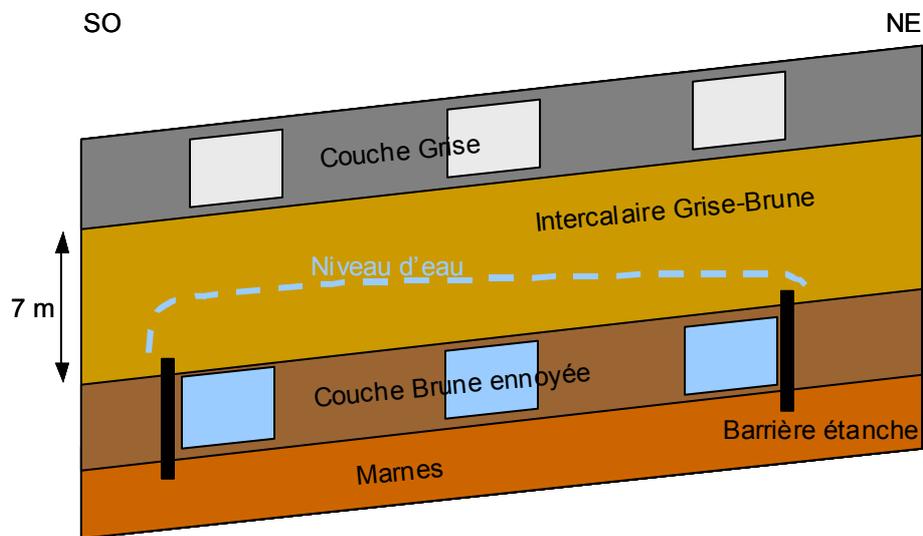


Figure 4.10 : Coupe schématique du site pilote ennoyé. L'eau pénètre dans l'intercalaire Grise-Brune.

4.3.5 Conclusion

Le site expérimental ainsi ennoyé visait à étudier l'influence de l'eau sur le comportement des ouvrages miniers abandonnés. De nombreuses mesures (hydro-chimiques, mécaniques, géophysiques) ont été effectuées avant, pendant et après l'ennoyage. L'une d'entre elles a consisté en l'écoute microsismique des éventuelles déformations du massif ennoyé.

4.4 Auscultation microsismique du site pilote de Tressange

4.4.1 Introduction

L'auscultation avait pour objectif de suivre l'évolution de l'endommagement des ouvrages soumis à un ennoyage partiel (dans le sens où il ne concerne qu'une seule couche du stot).

Dans un premier temps, nous décrivons l'instrumentation microsismique du site. Dans un second temps nous présentons les résultats du suivi sismo-acoustique. Ceux-ci sont, dans un troisième temps, discutés et mis en relation avec des mesures de convergence et des observations effectuées sur le site avant, pendant et après l'ennoyage.

4.4.2 Présentation de l'instrumentation microsismique du site

La chaîne de mesures sismo-acoustique du site pilote de Tressange est constituée de :

- un réseau de trois stations tridirectionnelles de type géophone. La sensibilité de ces capteurs est maximum pour des signaux aux contenus fréquentiels compris entre 40 Hz et 1.5 kHz. Les trois stations ont été installés dans des sondages situés dans l'intercalaire entre les couches grise et brune (figure 4.11). Le réseau, de par sa géométrie, couvre l'intercalaire et les piliers ennoyés (les piliers F et G notamment).
- un boîtier d'acquisition où l'interface Analogique/Digitale permet le conditionnement de signaux au contenu fréquentiel compris entre 0,1 et 2300 Hz avec une résolution en amplitude de 16 bits et une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Ce boîtier amplifie les signaux captés par les géophones de 60dB.
- un micro-ordinateur qui permet de stocker les données et de les transmettre au laboratoire de Nancy grâce à un modem.

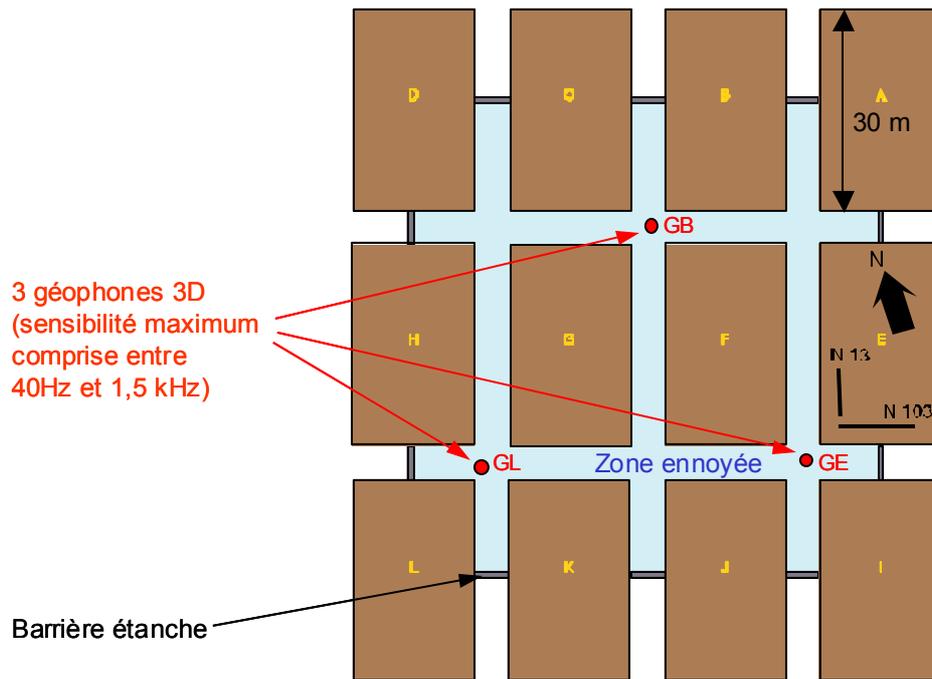


Figure 4.11 : Géométrie du réseau de géophones au sein du site expérimental.

Avant la mise en place opérationnelle du système de surveillance (début mars 2002), une série de tests a été effectuée et a permis d'identifier quelques dysfonctionnements du système. L'enregistrement d'une série de coups de masse effectués après l'installation des capteurs dans les sondages a montré que certaines voies des stations géophones ne fonctionnaient pas. Plus précisément, l'anomalie a été identifiée au niveau des voies horizontales de deux stations 3D. La figure 4.12 présente un exemple des signaux de coups de masse enregistrés par les trois stations de mesure, l'absence de signal sur des voies horizontales est clairement observée. Ces stations ont sans doute subi un dommage lors de leur transport ou lors de leur installation (chocs importants, *etc.*). Un problème de conception des sondes est aussi envisageable. Ces dysfonctionnements impliquent de grandes difficultés dans le traitement des données et particulièrement pour la localisation des événements. Sur chacune des stations de mesure 3D, le capteur vertical présente un bon fonctionnement. Les traitements et interprétations des données ne se feront donc que sur les signaux enregistrés par le capteur vertical (voie z) de chacune des trois stations de mesure. Nous notons également que l'orientation même des sondes au moment de leur mise en place, n'est qu'approximative car elle a été effectuée par rapport aux galeries, la présence de minerai de fer rend parfois hasardeuse l'utilisation d'une boussole.

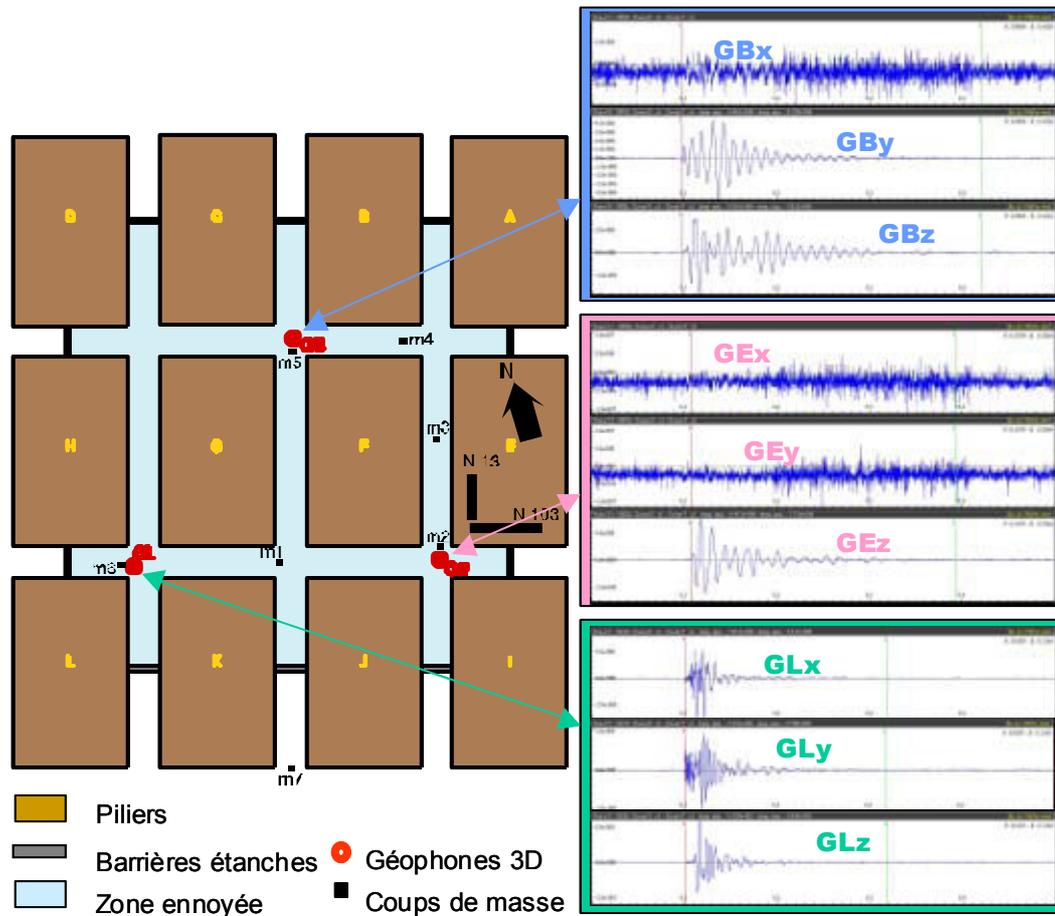


Figure 4.12 : Dysfonctionnements des stations géophones identifiés suite à une série de « coups de masse » réalisés aux points m_i ($i = 1$ à 6).

4.4.3 Activité microsismique enregistrée : présentation des résultats et de leur analyse

a) Les différents types d'événements enregistrés

Nous avons tout d'abord identifié deux catégories de sources générant des enregistrements microsismiques : les interventions sur le site et les pompes à eau. Les interventions sur site, particulièrement les passages de véhicules, génèrent des sources responsables du déclenchement du système et donc l'enregistrement d'événements. Les signaux associés à ce type de source présentent une fréquence maximale comprise entre 100 et 200 Hz. Comme nous le verrons plus loin, ces signaux (figure 4.13a) peuvent être facilement confondus avec des signaux microsismiques induits par les déformations du site. Cependant, les interventions au fond de la mine ne se réalisent qu'entre 06h00 et 13h00. Etant donné que la séparation des événements par reconnaissance de la signature était très délicate et pour éviter toute confusion

avec des événements concernant les instabilités, il a été décidé de ne traiter et interpréter que les enregistrements effectués hors de la tranche horaire 06h00-14h00. Trois pompes à eau sont situées à environ 3 km du site expérimental. Il a été vérifié que le démarrage et le fonctionnement des pompes ne génèrent pas d'enregistrements microsismiques. Aucun événement n'a été enregistré lors des arrêts et démarrages des pompes. Nous n'avons pas identifié de corrélation entre les événements sismo-acoustiques enregistrés et le fonctionnement des pompes.

Des événements microsismiques associés à des phénomènes extérieurs au site expérimental de Tressange ont également été enregistrés. Il s'agit de :

- tirs de carrières qui ont été effectués dans une carrière située à 6 km du site. Les événements microsismiques associés ont été enregistrés par le réseau de géophones. Ce sont des signaux basses fréquences (de l'ordre de 30 Hz, figure 4.13b) enregistrés sur des durées relativement importantes.

- deux séismes ayant affecté la région : le séisme d'Aix-La-Chapelle le 22 juillet 2003 à 07h45 et le séisme de Saint Dié dans les Vosges le 22 février 2003 à 21h41. Ce dernier séisme a été localisé dans la région de Rambervillers. Les signaux enregistrés (figure 4.13c) sont très basses fréquences (de l'ordre de 10 Hz). Le séisme a ainsi été enregistré pendant 32 secondes.

Enfin, d'autres événements microsismiques ont été identifiés comme des événements locaux sans doute induits par des déformations dans le site expérimental. Ces événements sont issus d'une sélection, après l'analyse de toute source parasite possible (activité humaine). Ce sont des événements courts (figure 4.13d) avec un contenu fréquentiel variable, entre environ 50 Hz et 1.5 kHz pour les fréquences d'amplitude maximale. 134 événements ont ainsi été enregistrés entre mars 2003 (début de la mise en eau) et le 13 août 2003 (fin du dénoyage). La suite de cette étude est consacrée aux traitements et interprétations de cette dernière catégorie d'événements.

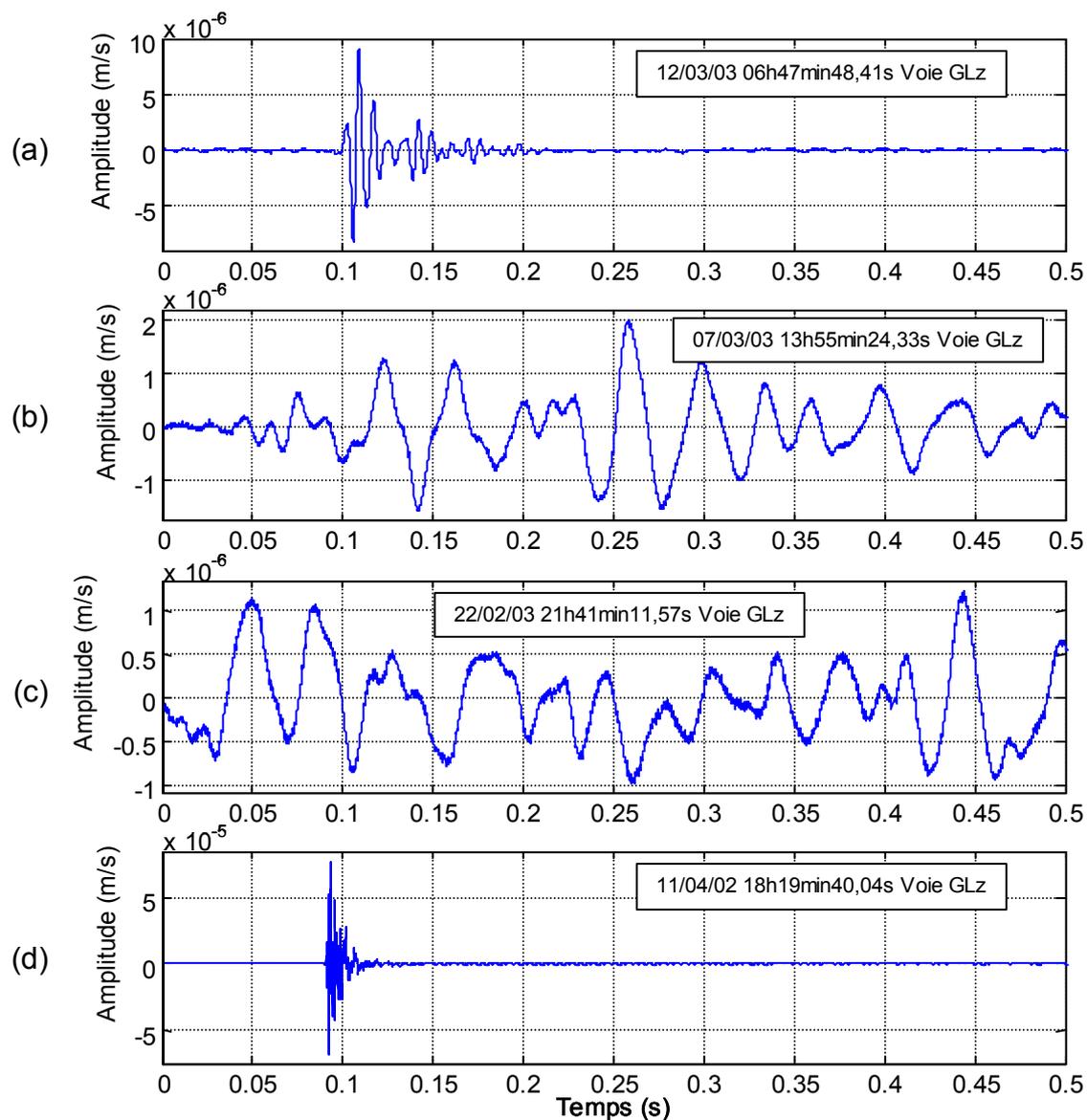


Figure 4.13 : Signature temporelle d'événements dus à : (a) une activité humaine, (b) des tirs de carrière, (c) un séisme (séisme de Saint Dié d'une magnitude de 5,4 sur l'échelle de Richter), (d) des instabilités du massif rocheux du site expérimental.

b) Corrélation entre l'activité sismo-acoustique et le régime hydraulique

Pendant les périodes d'envoyage et de dénoyage du site pilote de Tressange, 134 événements ont été enregistrés. Environ 65 % d'entre eux ont eu lieu durant le dénoyage du site (tableau 4.2 ci-après). La première phase de surveillance, avant toute mise en eau, d'une durée très restreinte, n'a comporté qu'un seul événement.

Phases	Durée de la surveillance microsismique	Nombre d'événements enregistrés	Activité hebdomadaire moyenne
Avant envoi	8 jours	1	1
Envoi	102 jours	45	~ 0,7
Dénoyage	40 jours	88	12,3
TOTAL		134	~ 1,8

Tableau 4.2 : Répartition des événements microsismiques enregistrés pendant la surveillance du site pilote de Tressange.

La figure 4.14 présente l'évolution de l'activité microsismique totale enregistrée par les géophones pendant toute la période de surveillance du site. Le comportement de l'activité sismo-acoustique peut être subdivisé en plusieurs périodes. Ces dernières sont corrélées avec les phases du régime hydraulique. En effet :

- une première évolution du nombre d'événements dès que l'envoi a atteint une hauteur d'eau voisine de 2 m (la hauteur maximale atteinte est de l'ordre de 4,5 m), le premier événement se produit 15 jours après le démarrage du remplissage en eau, le premier avril 2002. Dans cette phase, l'activité sismo-acoustique augmente de façon graduelle parallèlement à la montée de l'eau dans la cavité ;
- l'activité microsismique s'affaiblit ensuite, les événements microsismiques apparaissent dispersés dans le temps. La cavité est alors entièrement remplie d'eau, le niveau augmente néanmoins encore un peu jusqu'à une stabilisation (phase suivante);

- de début octobre 2002 à fin juin 2003, lorsque l'ennoyage est complet (l'eau a atteint son niveau maximal ainsi maintenu durant 10 mois), on observe une augmentation sensible de l'activité sismo-acoustique, elle comporte notamment un palier qui est constitué de 7 événements, c'est-à-dire que les événements sont proches temporellement (du 27 janvier au 5 février 2003). Le palier est suivi d'une activité acoustique plus dispersée ;
- la dernière phase (du 25 juin au 14 août 2003) correspond à la période du dénoyage du site. Elle est caractérisée par une activité sismo-acoustique importante, les événements se succèdent rapidement. Toutefois nous n'avons pas décelé de périodicité dans leur occurrence.

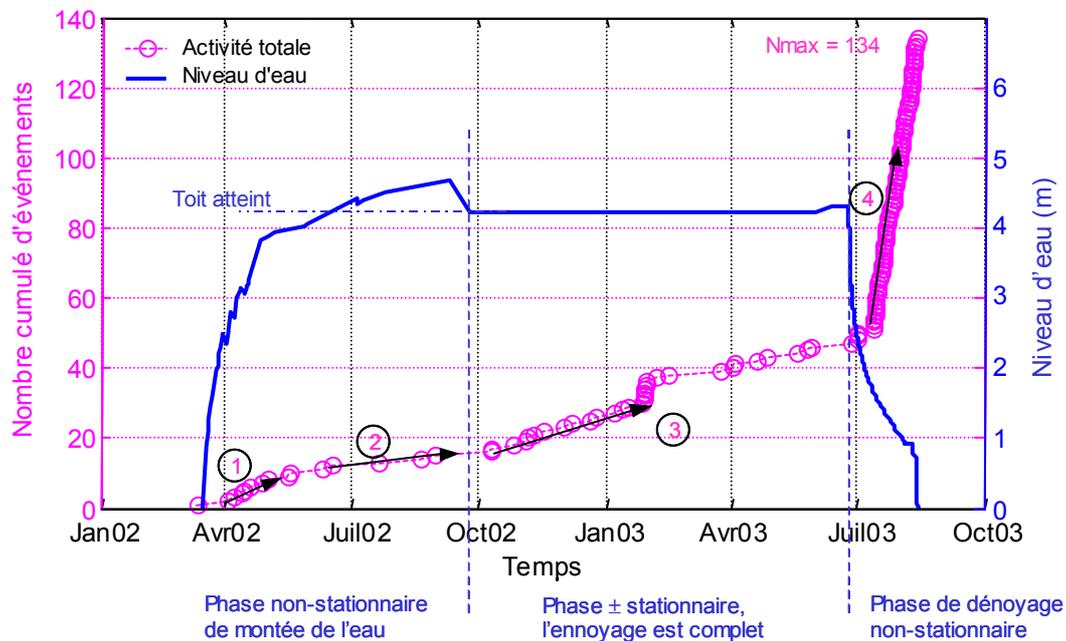


Figure 4.14 : Activité sismo-acoustique totale (nombre cumulé d'événements en fonction du temps) enregistrée pendant toute la période de surveillance du site expérimental sur les géophones, et niveau d'eau par rapport au sol de la cellule ennoyée. L'évolution de l'activité sismo-acoustique peut être subdivisée en 4 phases majeures.

c) Classement des événements

L'ensemble des événements microsismiques ainsi enregistrés durant l'expérimentation du site pilote, soit au total 134 événements, se divisent en deux classes selon qu'ils aient été enregistrés par une seule station géophone ou par les trois. On nommera la première classe, classe S, la seconde, classe T.

On dénombre 109 événements de classe S enregistrés par la station GL ou par la station GB. Cette dernière station n'a cependant enregistré que 2 événements. La classe T (stations GL, GB et GE) compte, quant à elle, 25 événements sismo-acoustiques. La figure 4.15 ci-après illustre cette répartition.

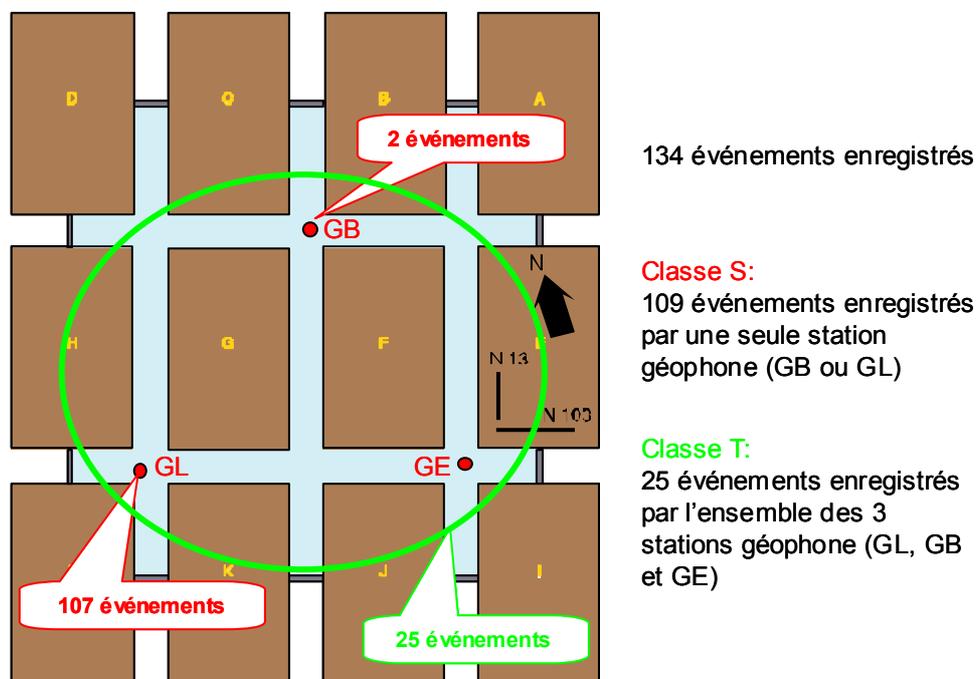


Figure 4.15 : Répartition de l'activité sismo-acoustique selon les stations de mesure et classes d'événements.

L'activité microsismique suivant les deux classes d'événements identifiées (classe S et classe T) est représentée sur la figure 4.16, elle est exprimée comme précédemment en nombre cumulé d'événements en fonction du temps. On observe que durant la montée de l'eau dans la cavité, la classe T est prédominante. Elle est pratiquement absente durant le dénoyage du site (phase 4 de l'activité microsismique) où les événements microsismiques enregistrés par une seule station sont nombreux (88 événements, cf. tableau 4.2). Autrement dit, les événements de classe S ont essentiellement été enregistrés durant le régime hydraulique non-stationnaire du dénoyage, alors que les événements de classe T se manifestent plus particulièrement pendant la phase de mise en eau de la cavité (on compte une dizaine d'événements enregistrés à la fois sur les trois stations géophones). La phase, dite stationnaire, du régime hydraulique (phase 3 de l'activité sismo-acoustique) a été accompagnée d'activités microsismiques de classe S et de classe T similaires (hormis le petit palier pour la classe S très ponctuel).

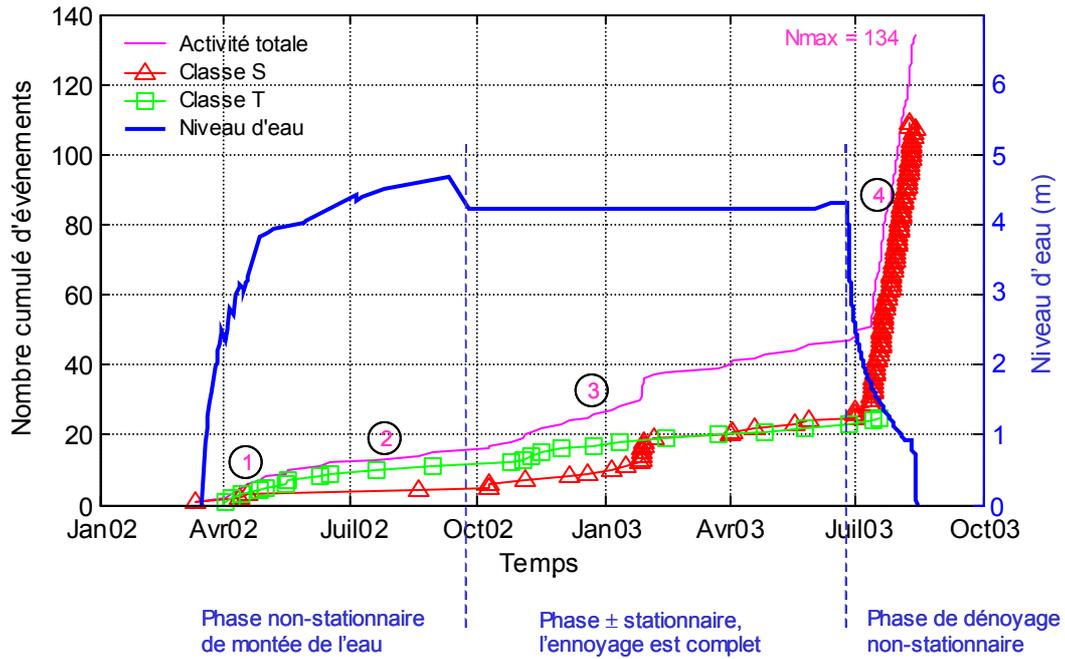


Figure 4.16 : Evolution temporelle (durant toute la durée des expérimentations) des nombres cumulés des événements de classe S (enregistrés sur GL ou GB), des événements de classe T (enregistrés sur GL, GB et GE), et niveau d'eau à l'intérieur de la cellule ennoyée. L'activité totale est aussi représentée.

Les signatures temporelles des événements de classe S paraissent différentes de celles des événements de classe T (figure 4.17). Les événements n'ayant été enregistrés que sur GL ou GB sont courts et impulsifs. Leur contenu fréquentiel est plus élevé que celui des événements de classe T. Ces derniers ont une signature temporelle plus longue.

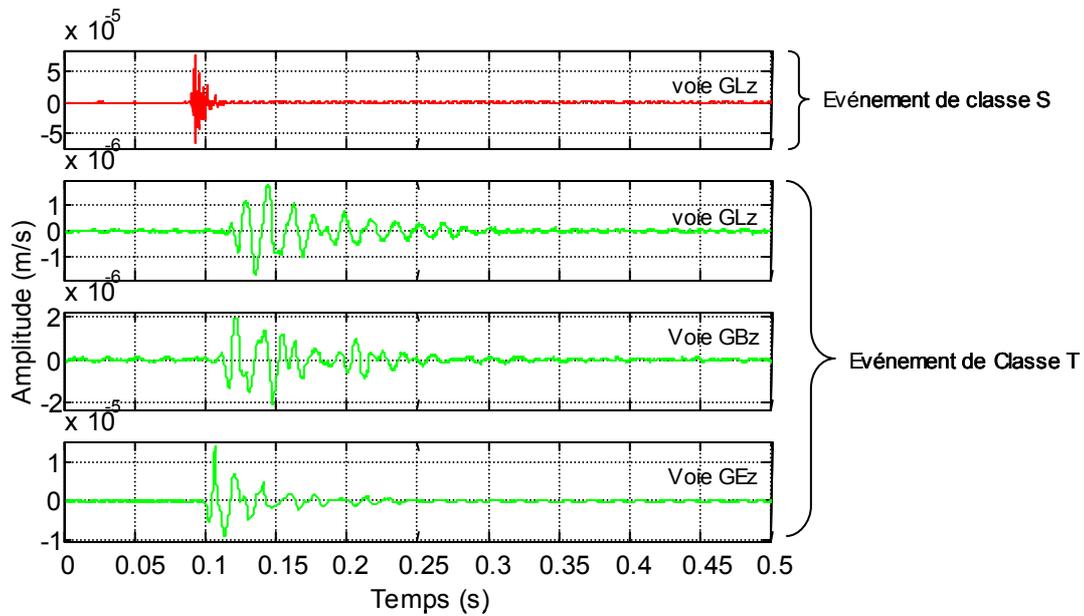


Figure 4.17 : Exemple de signatures temporelles d'événements de classe S et de classe T enregistrés durant la phase de montée de l'eau dans la cavité.

d) Analyses énergétique et fréquentielle des événements microsismiques

L'analyse énergétique et fréquentielle a consisté, en premier lieu, en l'observation des évolutions temporelles de l'énergie du signal puis du contenu fréquentiel des événements microsismiques. Puis, en second lieu, à chaque événement a été associé un couple de paramètres simples énergétique et fréquentiel. Nous présentons tout d'abord succinctement les deux principaux paramètres utilisés qui nous ont parus pertinents ainsi que les méthodes de leur détermination.

Paramètres énergétique et fréquentiel employés et méthode de leur détermination

La première arrivée de l'onde pour chaque événement microsismique est pointée manuellement ainsi que la fin de l'événement lorsqu'elle est identifiable sur la fenêtre temporelle (de 0,5 s). Le pointé manuel a été ainsi réalisé sur les voies verticales (z) des stations géophones du réseau de surveillance. L'énergie du signal de chaque événement microsismique est déterminée entre les deux pointés. Elle s'exprime par l'expression suivante :

$$E_z = \sum_i^N V_i^2 \cdot \Delta t, \quad (4.1)$$

E étant l'énergie du signal reçu sur la voie z d'un géophone (GL, GB, ou GE), V_i l'amplitude mesurée en m/s à chaque pas de temps Δt , et N le nombre de point d'échantillonnage. L'énergie du signal nous a paru plus représentative de la taille d'un événement que son amplitude maximale. L'amplitude maximale est en effet une mesure ponctuelle sur une fenêtre d'enregistrement de 0,5 s alors que l'énergie est une mesure plus globale.

Le contenu fréquentiel de chaque événement est quant à lui déterminé, pour chaque voie, après apodisation (la fonction utilisée, voir l'annexe A, a déjà été employée lors de l'analyse des essais de laboratoire) entre les deux pointés par Transformée de Fourier rapide (FFT). Nous avons considéré la fréquence correspondant à l'amplitude maximale du spectre d'énergie du signal.

Taille des événements durant l'expérimentation d'ennoyage

La figure 4.18 présente l'énergie du signal cumulée des événements en fonction du temps selon leur classe et la station (voie z en particulier) qui les a enregistré. On constate que, toutes classes confondues, les événements les plus énergétiques se sont produits durant la phase de montée de l'eau dans la cavité. Le second événement de la classe T apparaît particulièrement fort sur la station GL, l'énergie du signal associée sur GB ou GE est beaucoup plus faible. L'analyse des temps d'arrivée de cet événement sur chaque voie nous indique que la station GL est la première à l'avoir enregistré. Concernant la classe S, ce sont le deuxième et le troisième événement qui sont les plus énergétiques. Leur énergie du signal est toutefois inférieure à celle de l'événement de classe T précédemment évoqué. Le reste des événements paraît d'énergie moindre quelle que soit la classe. On observe toutefois quelques événements de classe S un peu plus forts qui précèdent la brève salve de 7 événements de la fin janvier déjà évoquée lors de la description de l'activité sismo-acoustique associée à la phase dite stationnaire du régime hydraulique. Les nombreux événements de classe S enregistrés durant le dénoyage ont des énergies faibles.

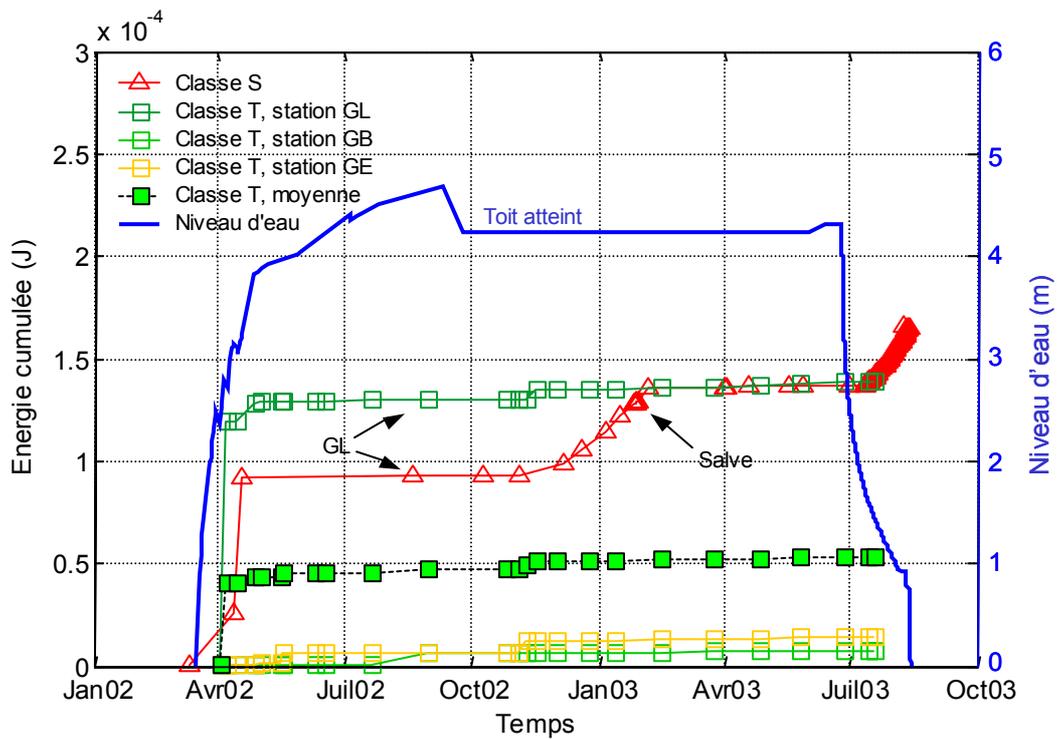


Figure 4.18 : Energie microsismique (du signal) cumulée selon la classe des événements et selon la station pour la classe T.

Contenu fréquentiel des événements microsismiques

Nous analysons ici les résultats de l'analyse fréquentielle des événements, leur contenu fréquentiel étant caractérisé par la fréquence d'amplitude maximale. La figure 4.19 présente des exemples de spectres déterminés pour des événements de classe S (a) et de classe T (b).

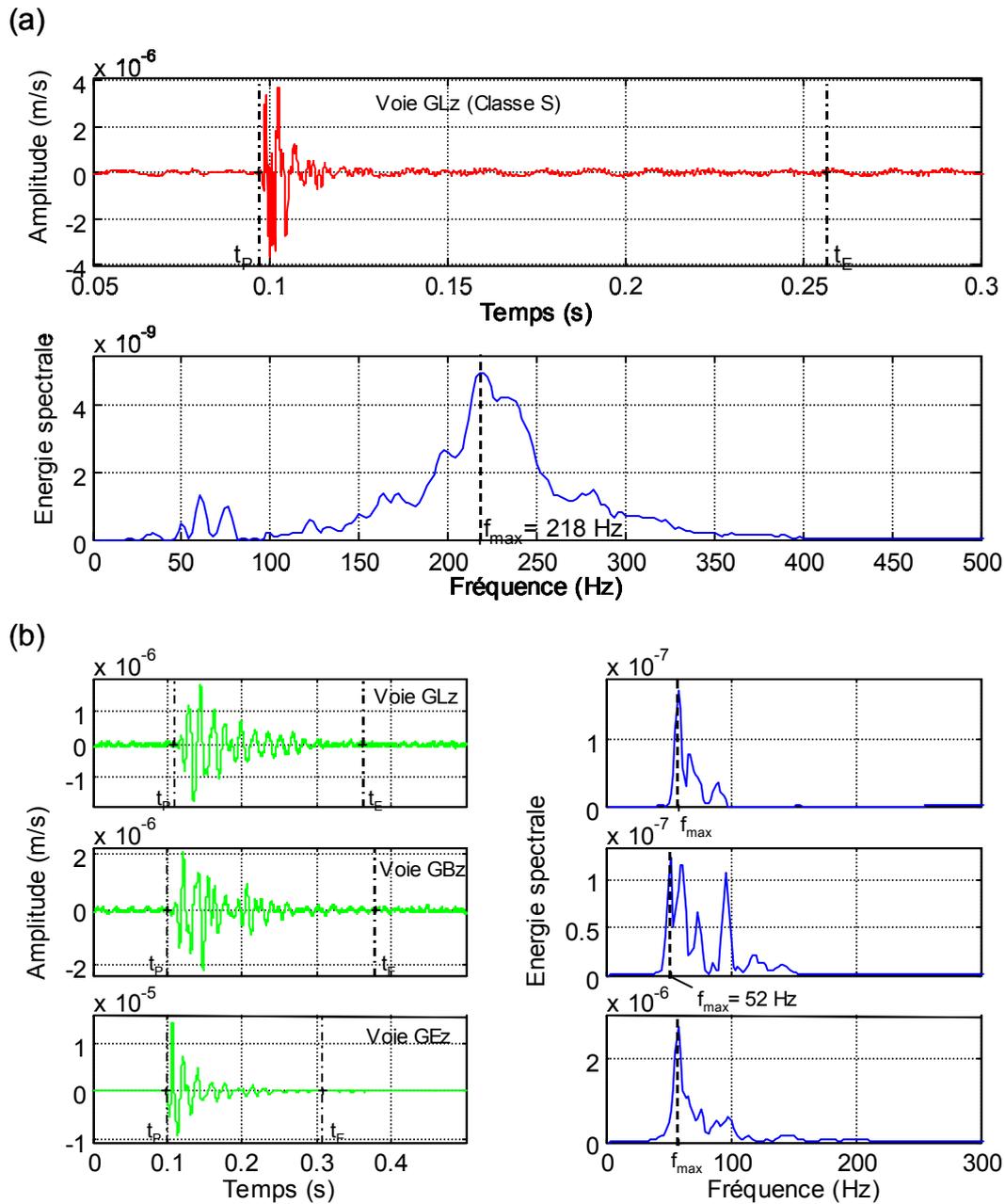


Figure 4.19 : a) Signatures temporelle et spectrale (en bas) d'un événement de classe S. b) Signatures temporelles et spectrales (à droite) d'un événement de classe T.

Il apparaît que les événements de classe S ont, dans l'ensemble, une f_{\max} de l'ordre de 200 Hz (figure 4.20 ci-après), hormis l'événement le plus énergétique – sa f_{\max} est de l'ordre de 1500 Hz – et quelques événements enregistrés durant la phase où la cavité est entièrement remplie d'eau, ainsi que celui apparu avant toute mise en eau, dont la f_{\max} est inférieure à 100 Hz.

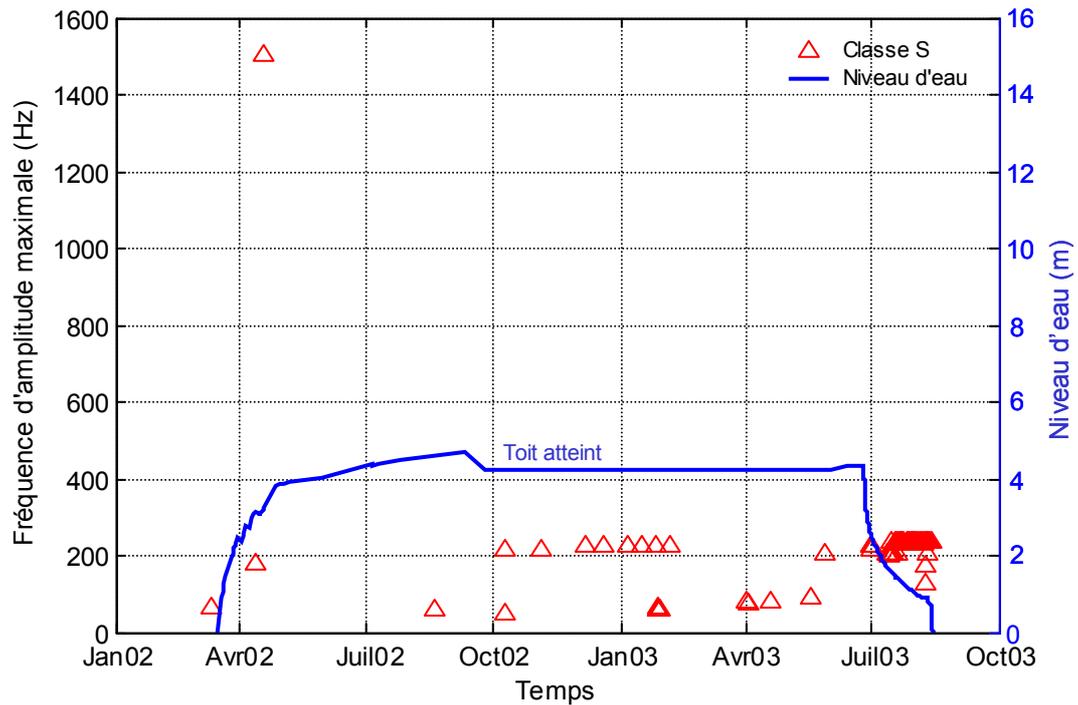


Figure 4.20 : Fréquence d'amplitude maximale des événements de classe S (enregistrés majoritairement par la station GL) en fonction du temps et niveau de l'eau dans la cavité.

Les événements de classe T présentent des f_{\max} inférieures à 200 Hz (figure 4.21), si ce n'est l'événement le plus énergétique (f_{\max} légèrement supérieure à 1000 Hz). On ne décèle pas de corrélation entre le contenu fréquentiel (plus particulièrement la f_{\max} , cette observation a également été vérifiée pour la fréquence centrale des événements) et les différentes phases de l'expérimentation d'envoyage, ceci quelle que soit la classe des événements (figures 4.20 et 4.21).

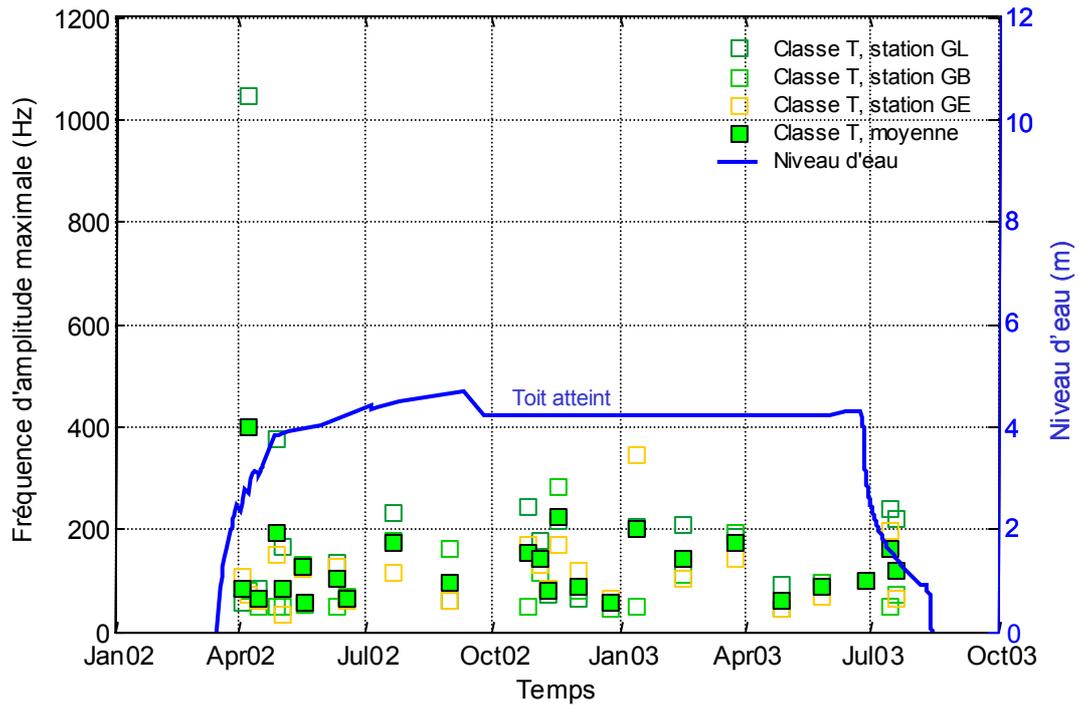


Figure 4.21 : Fréquence d'amplitude maximale des événements de classe T (enregistrés par les trois stations géophones) en fonction du temps et niveau de l'eau dans la cavité.

Caractérisation des événements par le couple (f_{\max} , E)

La figure 4.22 présente la caractérisation des événements enregistrés par un couple de paramètres simples c'est-à-dire par la fréquence d'amplitude maximale (en abscisse) et l'énergie du signal (en ordonnée). Les deux classes d'événements ont des énergies comprises dans un même intervalle. La fréquence d'amplitude maximale semble plus discriminante. En effet la classe T englobe des événements dont les fréquences d'amplitude maximale sont inférieures à celles des événements de la classe S, quelle que soit la station de mesure considérée.

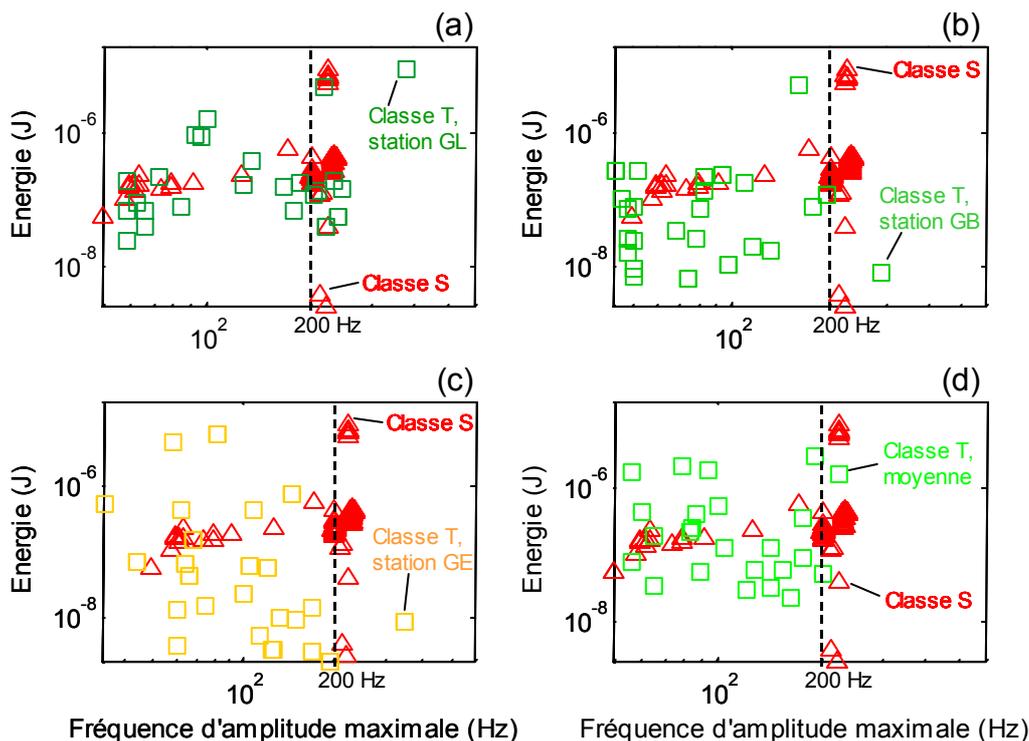


Figure 4.22 : Caractérisation de chaque événement par le couple (f_{max}, E) selon leur classe.

4.4.4 Discussion

Une importante activité microsismique a été enregistrée pendant toute la durée des expérimentations d'envoyage et de dénoyage du site pilote de Tressange. Deux classes principales d'événements ont été identifiées.

- une classe d'événements (classe S) enregistrés par une seule station géophone, principalement par le capteur GL. Les signaux de ces événements sont courts (de l'ordre de 0,05 s) et impulsionnels. Leur contenu fréquentiel apparaît assez élevé et supérieur à 200 Hz ;
- une deuxième classe d'événements (classe T) enregistrés par l'ensemble du réseau de géophones, soit par les trois stations GL, GB et GE. Les signaux sont longs (de l'ordre de 0,5 s), le contenu fréquentiel est basse fréquence, c'est-à-dire inférieur à 200 Hz.

Les événements les plus forts (énergie du signal la plus élevée) ont été uniquement enregistrés durant la montée de l'eau dans la cavité du site, toutes classes d'événements confondues. Si les deux classes d'événements précédemment décrites sont présentes dans toutes les phases de l'envoyage, les événements de classe S ont été toutefois, en majorité, enregistrés durant la phase de dénoyage (figure 4.23). Cette série d'événements sans périodicité se caractérise par des signaux aux allures très proches.

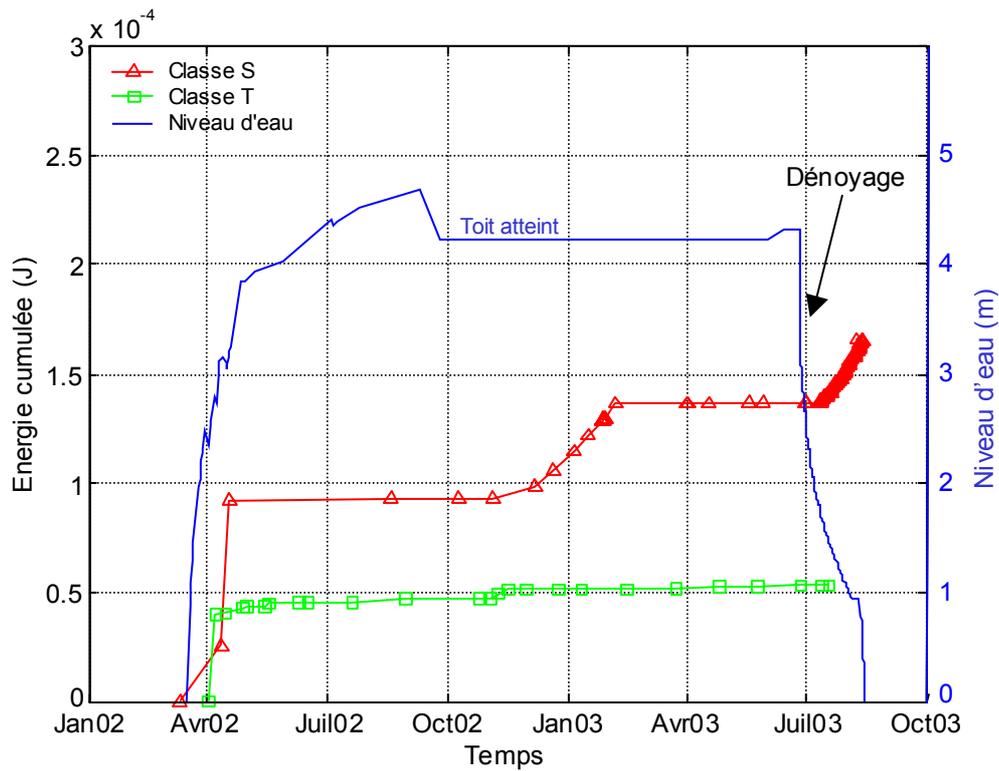


Figure 4.23 : Energie du signal microsismique cumulée selon la classe des événements et niveau de l'eau dans la cavité.

D'autres mesures ont été réalisées, il s'agit notamment de mesures de déplacements. Ces mesures sont ponctuelles, elles ont été effectuées grâce à des cannes de convergence et des extensomètres positionnés entre le mur et le toit de la couche brune. Une rapide convergence des galeries a été observée pendant la phase de montée de l'eau dans la cavité (figure 4.24). Elle a été suivie d'une légère divergence pendant la phase où le site est entièrement ennoyé. Enfin, pendant le dénoyage, une rapide convergence a également été mesurée.

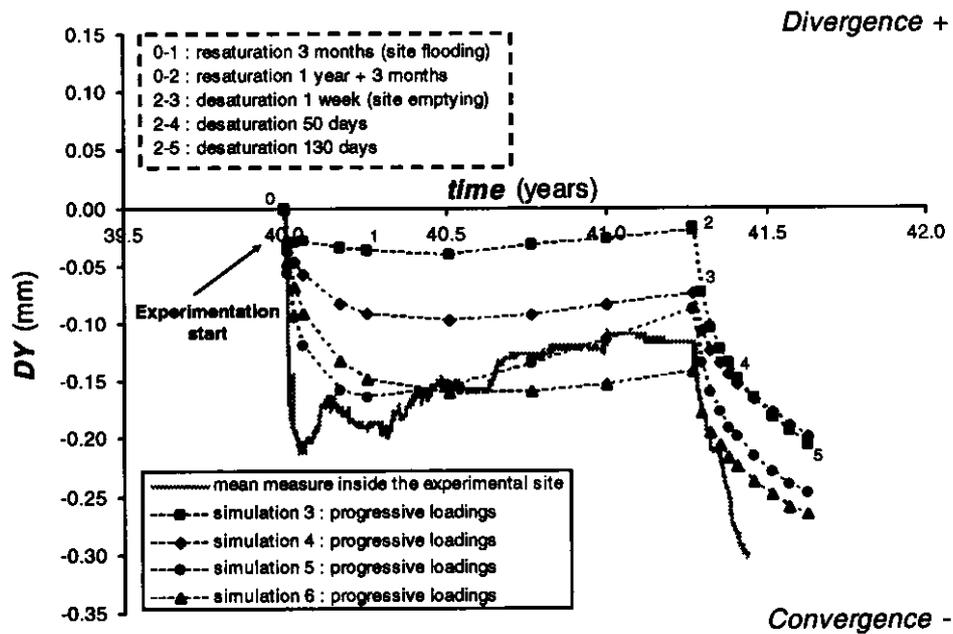


Figure 4.24 : Mesure moyenne de convergence et simulations numériques réalisées par Grgic et al. (2006).

Grgic et al. (2006) ont réalisé une modélisation hydromécanique de l'ennoyage et du dénoyage du site expérimental de Tressange. Leurs simulations numériques 5 et 6 modélisent bien les mesures moyennes de convergence (figure 4.24). Ils attribuent la première convergence rapide à la dilatation des roches du mur de la couche brune. La légère divergence des galeries est expliquée par l'expansion des piliers. La convergence rapide pendant le dénoyage serait due à la contraction du toit et des piliers.

Les observations directes n'ont pu être effectuées, bien entendu, qu'avant tout ennoyage et juste après le dénoyage. L'état de la zone d'expérimentation en couche brune avant l'ennoyage est exposé sur la figure 4.25. Nous observons ainsi que les carrefours où sont situées les stations géophones présentent de nombreuses détériorations, le secteur du capteur GL est particulièrement affecté par des fractures naturelles et des détériorations du toit, une zone assez importante de « toit détérioré » est aussi identifiée dans le secteur. Schoumacker et Homand (2003) ont pu réaliser des observations directes juste après le dénoyage du site. La plupart des blocs tombés se situent dans les secteurs identifiés avant l'ennoyage comme étant des « décrochements au toit » (secteurs au toit des galeries où les blocs étaient tombés naturellement ou par la purge lors de la mise en sécurité des galeries). Les constatations effectuées après le dénoyage montrent que la quantité des blocs tombés (tas des blocs identifiés au sol) n'est pas particulièrement plus importante près du capteur GL, secteur avec une activité sismo-acoustique importante. Les tas des blocs les plus importants se situent vers le capteur GE (figure 4.25). Les blocs identifiés sont pour l'essentiel constitués de petits morceaux.

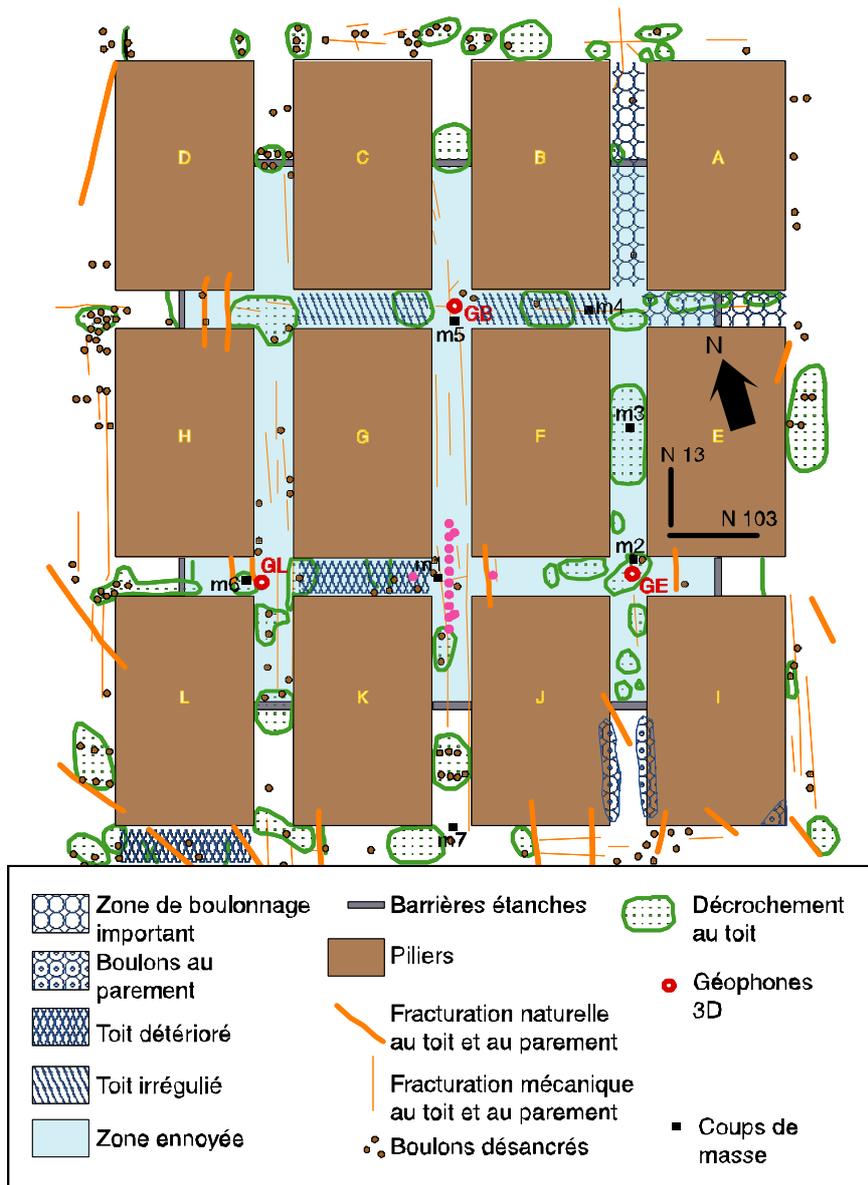


Figure 4.25 : Etat des lieux de la zone d'expérimentation en Couche Brune avant l'ennoyage, d'après Al Heib (2000).

L'activité acoustique enregistrée durant le dénoyage est toute différente de celle enregistrée jusque là. Pendant l'ennoyage l'activité reste faible mais présente les événements les plus forts alors que pendant le dénoyage, l'activité est très soutenue, les énergies des signaux enregistrés restant faibles. Il apparaît que le régime hydrique joue un rôle dans la microsismicité enregistrée. Grgic et al. (2006) montrent, par leur simulations hydromécaniques du site, que la phase d'ennoyage induit des contraintes extensives transitoires dans le toit et le mur des galeries pouvant conduire à des ruptures.

Nous devons rester très prudent face à nos résultats car ils peuvent certes comprendre une microsismicité induite par l'ennoyage mais également une microsismicité induite par l'excavation (ce que l'on peut appeler la microsismicité intrinsèque aux ouvrages miniers). Il paraît illusoire de dissocier les deux types d'activité sismo-acoustique tant la durée d'écoute avant tout ennoyage fut brève (une quinzaine de jours). Toutefois il semble bien que le dénoyage soit à l'origine d'une activité importante particulière (très nombreux événements aux signatures temporelles similaires). Quant aux trois événements (classe S et T) les plus énergétiques, il semblerait qu'ils soient la conséquence de la montée de l'eau dans la cavité. Les sollicitations hydrauliques, du fait de l'ennoyage varient de 0,03 MPa (3 m d'eau au toit de la couche brune ennoyée) à 0,06 MPa (6 m d'eau au mur de la couche brune) lorsque le site est totalement ennoyé. Ce niveau est progressivement atteint après la phase de montée de l'eau dans la cavité. De telles variations de l'état de contrainte, même petites, peuvent être responsables de microsismicité induite si l'on considère que l'excavation impose un état de contrainte initialement proche de la rupture au niveau de fractures préexistantes cicatrisées. D'après McGarr et Simpson (1997) la microsismicité induite peut être due à des changements de l'état de contrainte et/ou de pression de pore. La pression de fluide croissant progressivement lors de la phase de montée de l'eau, la contrainte effective décroît, ce qui rend plus aisé des déplacements sur des fractures préexistantes, et la rupture, sur de telles fractures, de matériaux de remplissage cicatrisants peut expliquer des événements particulièrement forts. Une fois ces matériaux rompus le glissement sur les fractures ne s'accompagneraient que d'événements microsismiques plus faibles. Ceux-ci seraient les événements enregistrés durant l'ennoyage total lorsque l'état de contrainte et la pression de fluide ne varient plus. Le dénoyage constitue un nouveau changement d'état de contrainte et de pression de fluide, un peu un chemin inverse de celui rencontré lors de la première phase, ces variations nouvelles induisant une activité sismo-acoustique importante.

Tentons maintenant d'explicitier les deux classes d'événements enregistrés. La classe S, haute fréquence, est largement détecté par la station GL située à proximité de nombreuses fractures et détérioration de toit. Il semble que ces événements soient dus à des petits (signaux courts) déplacements brusques (signaux impulsions) sur des fractures préexistantes dans le secteur de cette station. Les événements de classe T seraient dus au rejeu de fractures situées dans la zone centrale du réseau de stations, rejeu qui incluerait des déplacements plus amples et plus lents que ceux évoqués pour les événements de classe S. De tels mécanismes provoqueraient des signaux aux fréquences plus basses moins atténués par le milieu de propagation et qui seraient ainsi captés par l'ensemble des stations du réseau. Il est risqué d'aller plus loin dans l'interprétation étant donné notre incapacité (due aux pannes de stations) à localiser les sources de ces événements. La faible quantité de blocs observée après le dénoyage, nous indique toutefois que les événements enregistrés seraient dus aux rejeux de fractures préexistantes et non à la chute de blocs.

4.4.5 Conclusion

L'auscultation microsismique de l'expérimentation d'ennoyage du site pilote de Tressange met en évidence une relation entre le régime hydrique imposé et l'activité microsismique. La montée de l'eau dans la cavité s'accompagne d'événements forts. Lorsque le niveau d'eau est stationnaire (le site est entièrement ennoyé), l'activité sismo-acoustique se maintient mais les événements sont faiblement énergétiques. Enfin, lors du dénoyage, l'activité microsismique est élevée, les événements sont petits. Deux classes d'événements ont été identifiées. Il semblerait que deux mécanismes différents en soient les causes respectives. Un déplacement rapide de petite amplitude sur des fractures préexistantes proches du carrefour de la station GL serait à l'origine des événements impulsifs (classe S). Les événements enregistrés sur les trois stations (classe T) seraient consécutifs de déplacements plus lents et d'amplitude plus grande sur des fractures préexistantes situées dans la région centrale du réseau de capteurs. Le rejeu supposé, sur des fractures préexistantes, serait dû aux variations de contrainte effective, ou de pression de fluide au sein du massif imposées par le régime hydrique durant l'expérimentation d'ennoyage du site.

4.5 Expérimentation de chute provoquée de blocs au toit de la couche ennoyée

4.5.1 Introduction

Le décrochement de blocs (décimétriques, métriques) au toit des galeries minières témoigne d'un endommagement localement important. Il peut être le signe précurseur d'un effondrement (Szwedzicki, 2001). La fracturation, sa naissance, sa croissance, conduisant au décrochement de blocs – soit un endommagement progressif – peuvent être à l'origine d'ondes microsismiques se propageant dans le massif rocheux. Afin de décrire et de comprendre ses processus, deux expériences de chute de blocs ont été menées, elles ont consisté à provoquer le décrochement de blocs à l'intérieur du site ennoyé, les ondes microsismiques émises lors de la fracturation étant enregistrées grâce à la chaîne de mesure sismo-acoustique du site. La conception de ces expérimentations a été réalisée par F. Homand (LaEGO). La mise en place et la réalisation de la partie mécanique (cf. le protocole expérimental) ont été effectuées par J.G. Gaillard (ANTEA).

Nous décrivons ci-après, dans un premier temps, le protocole expérimental établi durant la première expérimentation et adopté lors de la seconde. Précisons que cette dernière (dite GMbloc2) a eu lieu le 12 juin 2003 soit un peu moins de deux semaines avant le début du dénoyage du site de Tressange, et donc lorsque les galeries de la couche brune étaient encore totalement noyées. Dans un second temps, nous présentons les résultats mécaniques et les résultats issus de l'écoute microsismique. Ceux-ci sont, dans un troisième temps, discutés en relation avec les résultats obtenus lors de l'écoute de la microsismicité induite par l'ennoyage.

4.5.2 Protocole expérimental

a) Présentation du dispositif expérimental

Description du dispositif mécanique

Dans le cadre des expérimentations de chute de blocs, deux forages non-débouchants, GMbloc1 et GMbloc2 (figure 4.26), ont été creusés dans l'intercalaire grise-brune à partir du mur de la couche grise (d'où les deux premières lettres G et M signifiant respectivement Grise et Mur). Rappelons que la première expérience (forage GMbloc1) a permis d'affiner le protocole expérimental, et que nous nous concentrons ici sur la seconde expérimentation qui concerne le forage GMbloc2 (figure 4.26).

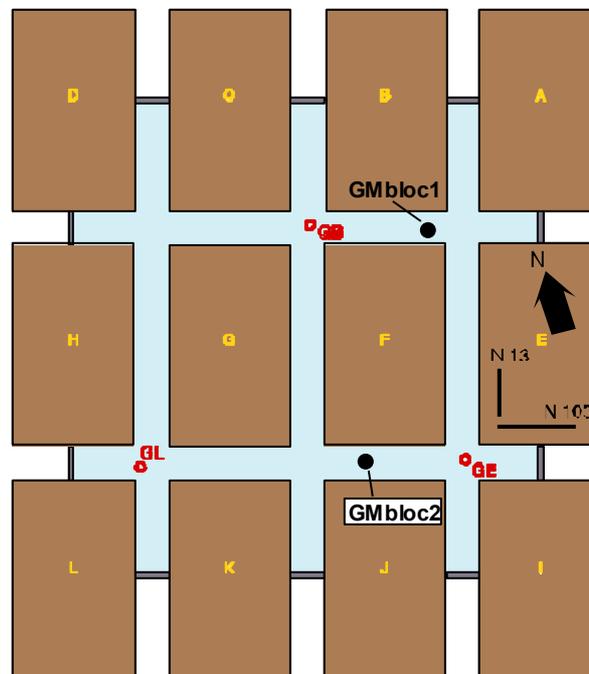


Figure 4.26 : Localisation au sein du site expérimental des forages GMbloc1 et GMbloc2 destinés à provoquer la chute de blocs. La géométrie du réseau de géophones tridirectionnels (GL, GB et GE) est également reportée.

Le fond du forage se situe à environ 0,50 m du toit de la cellule ennoyée en couche brune. L'expérimentation consiste à exercer une poussée sur le fond du forage afin de détacher des blocs du toit (figure 4.27). Le dispositif expérimental mécanique est constitué d'une colonne de réaction qui s'appuie sur le toit de la couche grise, d'un vérin activé par une pompe manuelle, et de tiges dans le forage (figure 4.28).

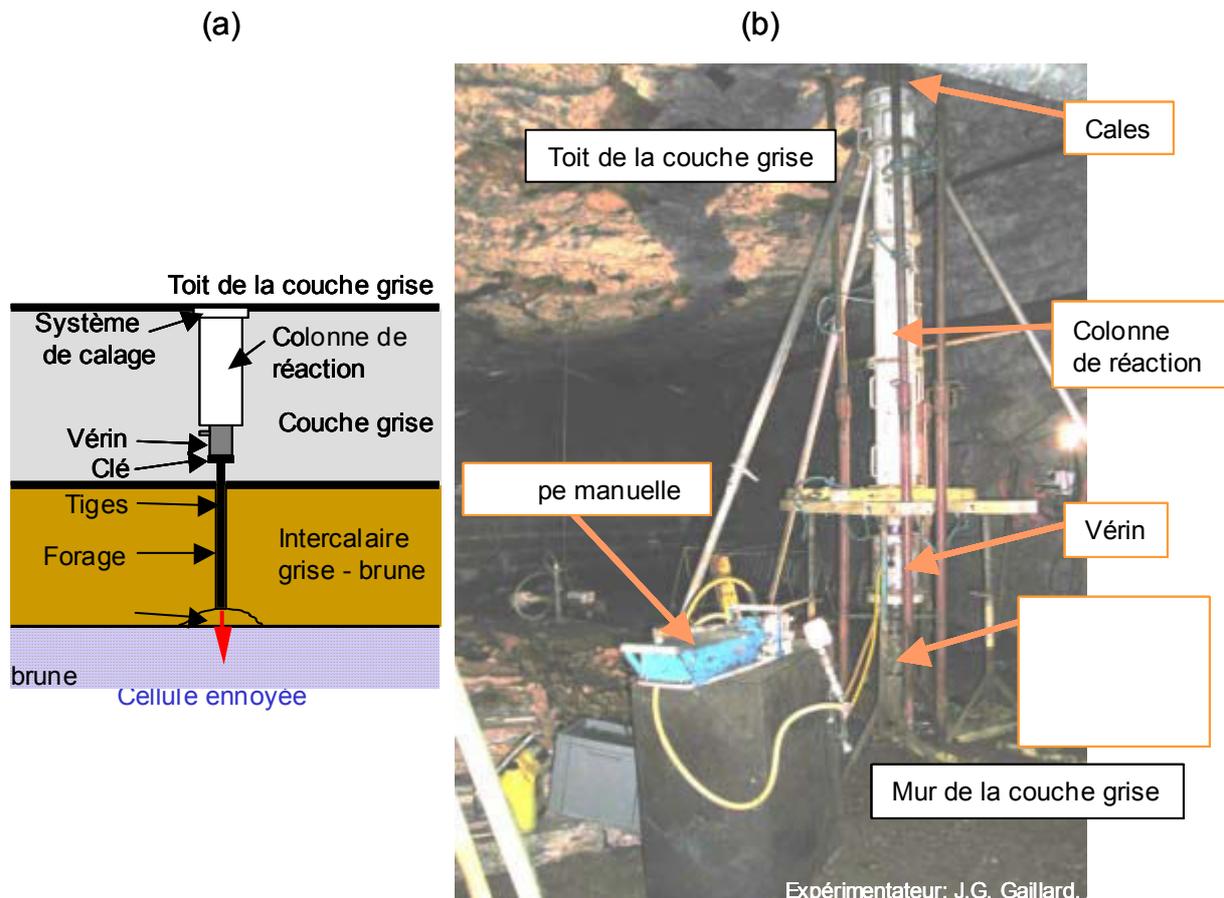


Figure 4.27 : a) Schéma du dispositif expérimental de l'expérience de chute provoquée de blocs, la clé permet de retenir les tiges (tubes en acier de 90 mm de section) lorsqu'elles transpercent finalement l'intercalaire. b) Photo du dispositif expérimental mis en place en couche grise au dessus de la cellule ennoyée.

Description du dispositif d'écoute microsismique

Le dispositif d'écoute est quasiment identique à celui utilisé durant l'auscultation de l'ennoyage du site (voir le 4.2). La seule différence concerne les capteurs de la chaîne de mesure. En effet, nous avons choisi de greffer un accéléromètre unidirectionnel (GXMb, figure 4.28) au réseau de géophones tri-directionnels (stations GL, GB et GE) déjà décrit. Cet accéléromètre particulièrement proche du forage GMbloc2, fait initialement partie d'un réseau d'accéléromètres (GXMa,b,c,d, BGTi et BKTi avec $i = 1$ à 5, figure 4.28) dédié à l'étude des

variations de vitesses de propagation des ondes à l'intérieur de l'intercalaire grise-brune au cours de l'envoyage. Les accéléromètres, dont GXMb, ont une bande passante fréquentielle plus large que celle des géophones (40 Hz à 1,5 kHz), leur sensibilité étant maximale entre 20 Hz et 2,5 kHz.

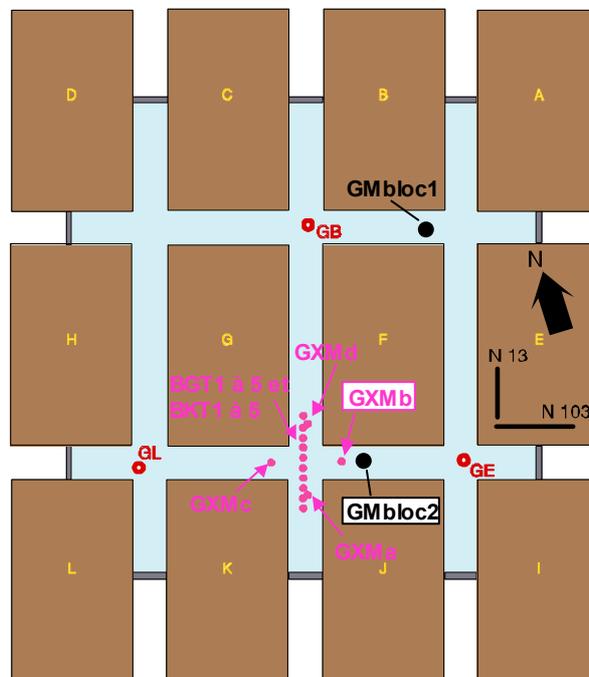


Figure 4.28 : Carte sommaire des réseaux de capteurs et emplacement du forage GMbloc2 au sein du site. On distingue le réseau de géophones 3D (GL, GB et GE) et l'accéléromètre GXMb faisant partie du réseau de 14 accéléromètres 1D (GXMa,b,c et d, BGTi et BKTi avec $i = 1$ à 5).

b) Déroulement de l'expérimentation (GMbloc2)

La figure 4.29 présente le chargement et l'enfoncement des tiges dans le forage en fonction du temps. Des démontages et recalages ont été nécessairement effectués durant l'expérimentation au fur et à mesure de l'enfoncement des tiges. Ainsi des déchargements succèdent aux chargements et permettent de caler à nouveau le dispositif mécanique. L'expérimentation de chute de blocs GMbloc2 a nécessité trois recalages donc trois déchargements. On distingue, sur la figure 4.29, quatre phases dont chacune comporte une période de mise en charge (augmentation de la force) effectuée avec des paliers de 2 minutes. Durant la phase 1, il a été nécessaire de réaliser un recalage (période matérialisée par un long palier sur la courbe d'enfoncement) car le vérin était en butée. Le chargement a repris en phase 2 durant laquelle la tige s'est enfoncée dans le forage. Un calage a de nouveau été nécessaire, d'où la décharge. Il en a été de même pour la phase 3 où un changement de vérin a également été opéré après déchargement (le vérin de 200 tonnes initial a été remplacé par un

vérin de 35 tonnes dont les dimensions étaient plus adaptées à la situation). Enfin, la dernière phase, ou phase finale, ne comporte pas de paliers, il a été décidé de remonter directement en pression. Après un enfoncement rapide, les tiges sont tombées en chute libre dans le forage, elles ont été retenues par une clé.

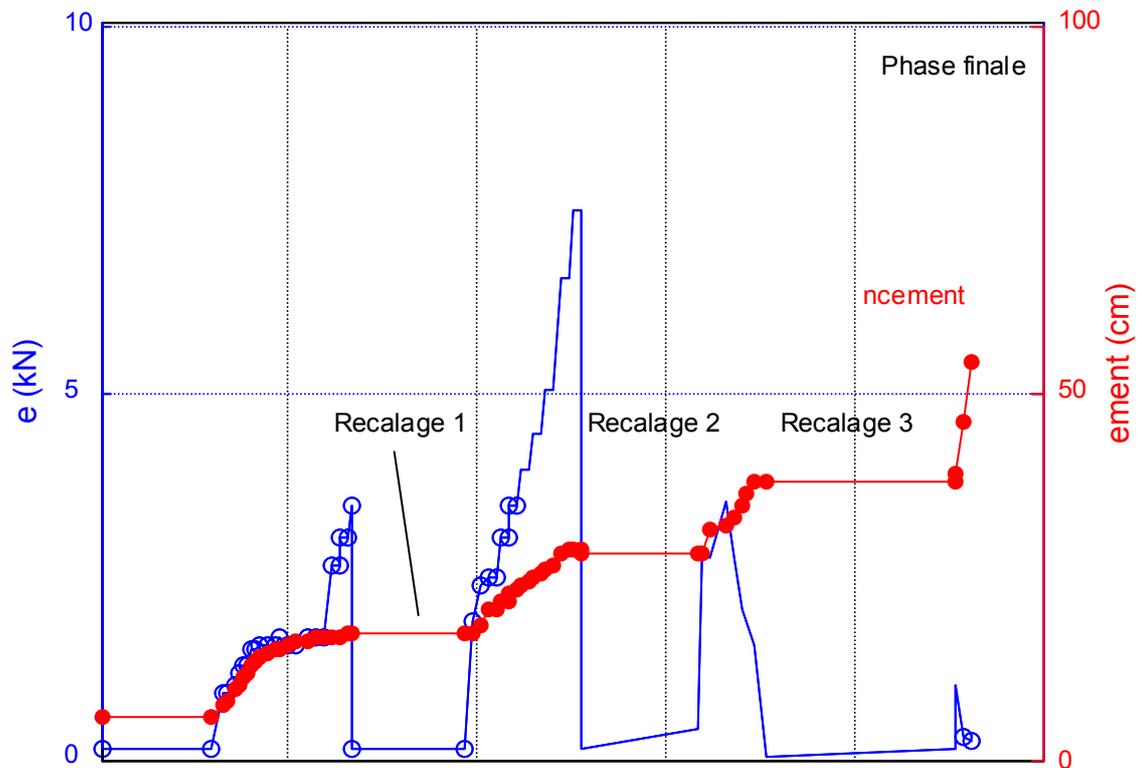


Figure 4.29 : Force appliquée par un vérin et enfoncement des tiges en fonction du temps.

Les démontages successifs et recalages de la colonne de réaction (figure 4.27) ont produit de nombreux événements. Afin d'éviter toute confusion entre ces événements dus à l'activité humaine et des événements significatifs de déformations du massif au fond du forage, nous n'avons pris en compte, dans cette étude, que les événements qui se sont manifestés durant les chargements (le fonctionnement de la pompe manuelle et du vérin ne provoquant pas de déclenchement du système d'acquisition sismo-acoustique). Ces événements constituent l'activité sismo-acoustique enregistrée.

4.5.3 Présentation et analyse des résultats

a) Résultats mécaniques

Ces résultats sont illustrés par la représentation de la force appliquée sur les tiges dans le forage en fonction de leur enfoncement (figure 4.30). Durant la première phase de l'expérimentation, l'enfoncement est important malgré une force appliquée relativement faible, il n'y a qu'une faible résistance du matériau. Par la suite, à la fin du chargement de la phase 1 et en phase 2, la pente de la courbe force-enfoncement augmente, le massif tend à plus résister à la force appliquée. Au-delà de la seconde phase, le comportement apparaît tout autre, la pente de la courbe étant négative. On assiste ainsi à une perte de résistance progressive (phase 3 et phase finale) du massif sous-jacent au forage jusqu'au stade ultime de la chute de blocs (figure 4.31b) dans la cavité ennoyée.

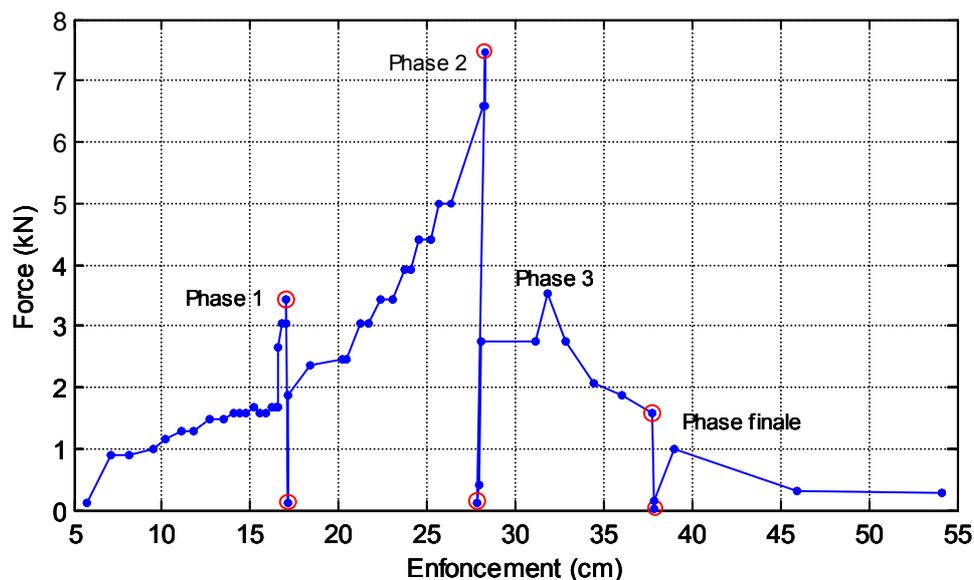


Figure 4.30 : Force appliquée en fonction de l'enfoncement des tiges. Les cercles rouges délimitent les déchargements pratiqués afin de recalibrer la colonne de réaction.

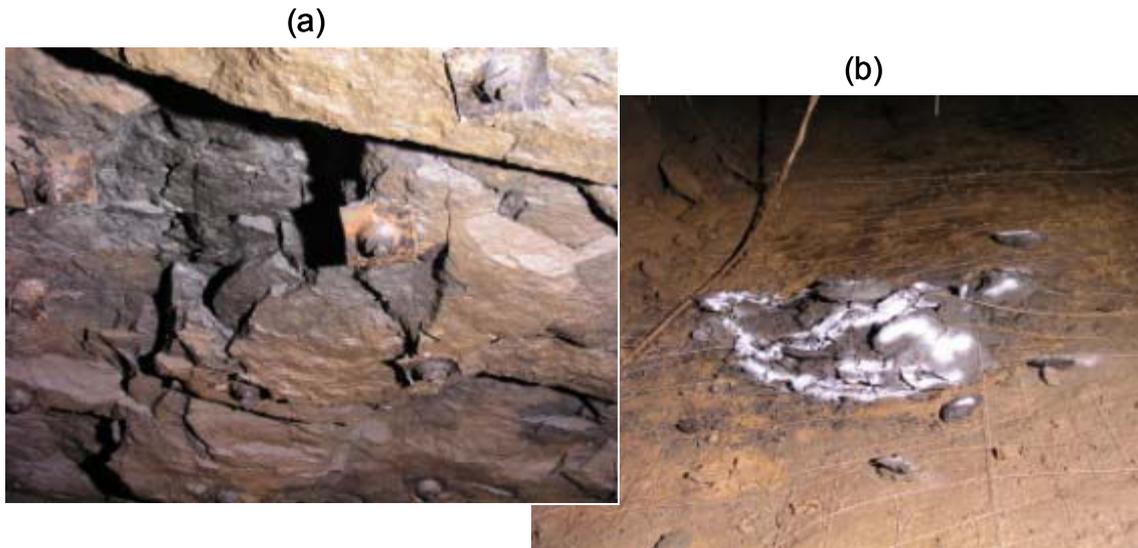


Figure 4.31: Observations faites sur le terrain après le dénoyage du site. a) Toit de la Couche Brune transpercé par les tiges lors de l'expérimentation de chute de blocs. b) Blocs sous-jacents à GMbloc2 (masse totale estimée à 500 Kg). D'après Schoumacker et Homand (2003).

b) Résultats de l'auscultation microsismique

Nous décrivons tout d'abord l'activité sismo-acoustique enregistrée durant les chargements. Puis, nous nous intéressons aux résultats issus des analyses préliminaires énergétiques et fréquentielles des événements microsismiques.

Description de l'activité sismo-acoustique

Nous avons identifié 10 événements, leur distribution temporelle est exposée sur la figure 4.32a ci-après. Chaque événement a été enregistré sur l'ensemble des réseaux de capteurs précédemment décrits. Cependant nous utilisons ici les enregistrements de l'accéléromètre GXMb situé au plus près du forage.

Le chargement de la phase 1 de l'expérimentation ne comporte pas d'événements microsismiques. L'activité apparaît lors de la deuxième phase où trois événements ont été enregistrés. La troisième phase et la phase finale comportent respectivement 4 et 3 événements. Les événements de la phase 2 et ceux de la phase 3, exception faite du dernier (septième événement, figure 4.33), sont caractérisés par une trace impulsive simple. Les 4 derniers événements (fin de la phase 3 et phase finale, figure 4.32) ont une signature temporelle qui comporte de petites salves dont l'occurrence n'est pas périodique et dont l'amplitude tend à devenir plus grande plus on approche de la rupture lors de la phase finale (figures 4.32 et 4.33).

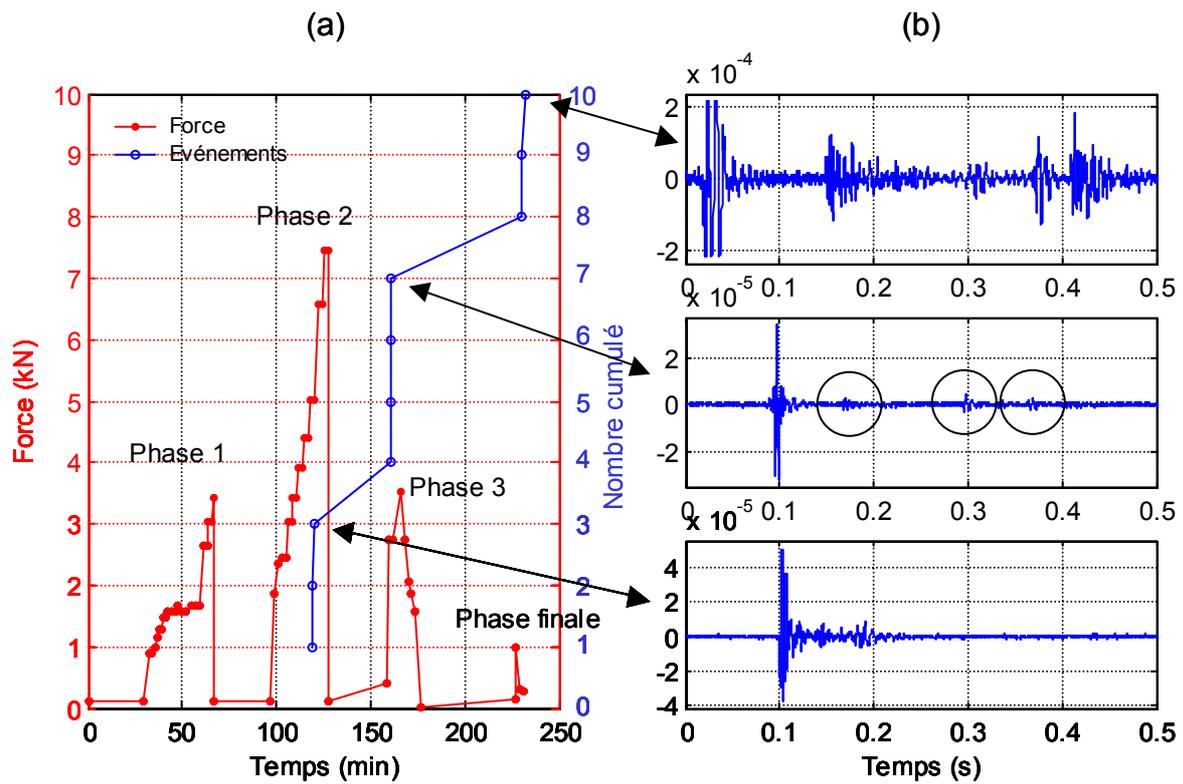


Figure 4.32 : a) Distribution temporelle des événements microsismiques et évolution de la force appliquée en fonction du temps. b) Exemples de signatures temporelles (fenêtre d'enregistrement de 0,5 s) observées sur l'accéléromètre GXMb.

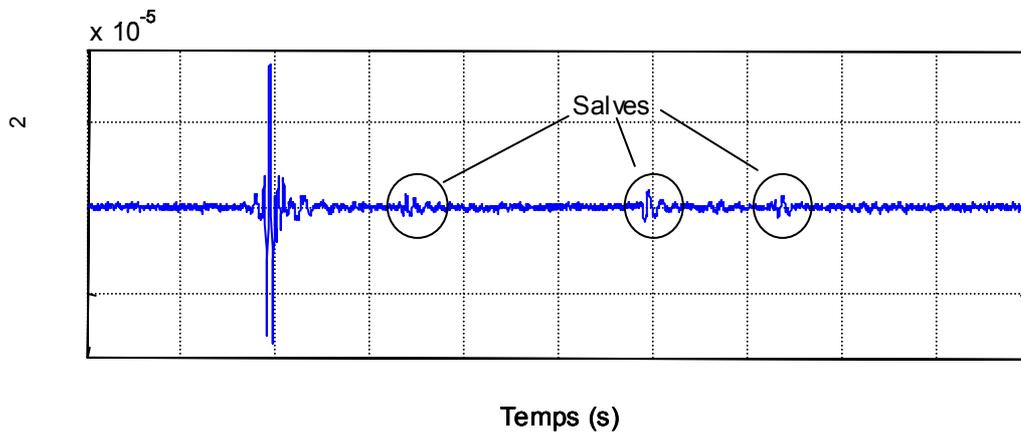


Figure 4.33 : Signature temporelle du septième événement, soit le dernier de la phase 3, enregistrée sur GXMb (fenêtre d'enregistrement de 0,5 s).

Analyse énergétique et fréquentielle

Les méthodes de détermination de l'énergie du signal et de la fréquence d'amplitude maximale sont identiques à celles précédemment employées. Seules les voies verticales des stations géophones (GL, GB et GE) sont utilisées. Les énergies et fréquences des 4 derniers événements sont calculées pour la première impulsion ou première salve de la fenêtre temporelle d'enregistrement.

La figure 4.34 présente ainsi l'évolution de l'énergie du signal de ces événements en fonction du temps pour chaque station géophone. Rappelons que l'énergie du signal est représentative de la taille de l'événement. Les événements de la phase 3 semblent être moins forts que ceux de la phase précédente. Les événements les plus énergétiques se manifestent durant la phase finale et plus particulièrement lors de la chute proprement dite des blocs et ce quelle que soit la station géophone.

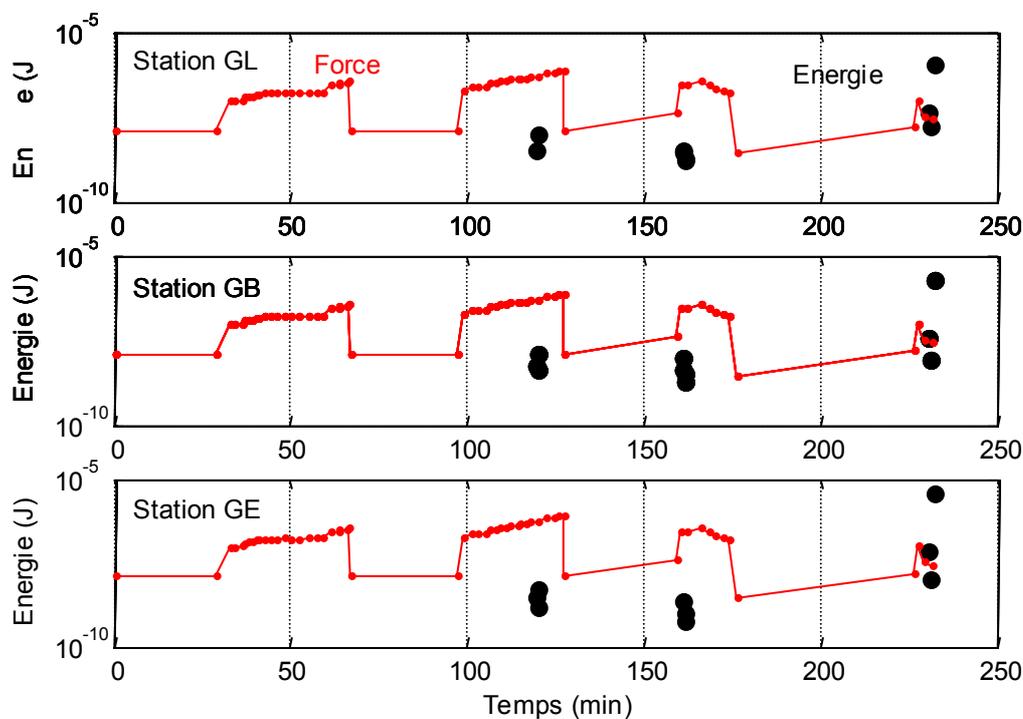


Figure 4.34 : Force appliquée et énergie du signal des événements pour chaque station géophone (de bas en haut, GL, GB et GE).

L'évolution temporelle de la fréquence d'amplitude maximale moyenne des événements est exposée sur la figure 4.35. Nous n'observons pas de corrélation significative entre les variations de cette fréquence (entre 50 et 200 Hz) et les phases de l'expérimentation.

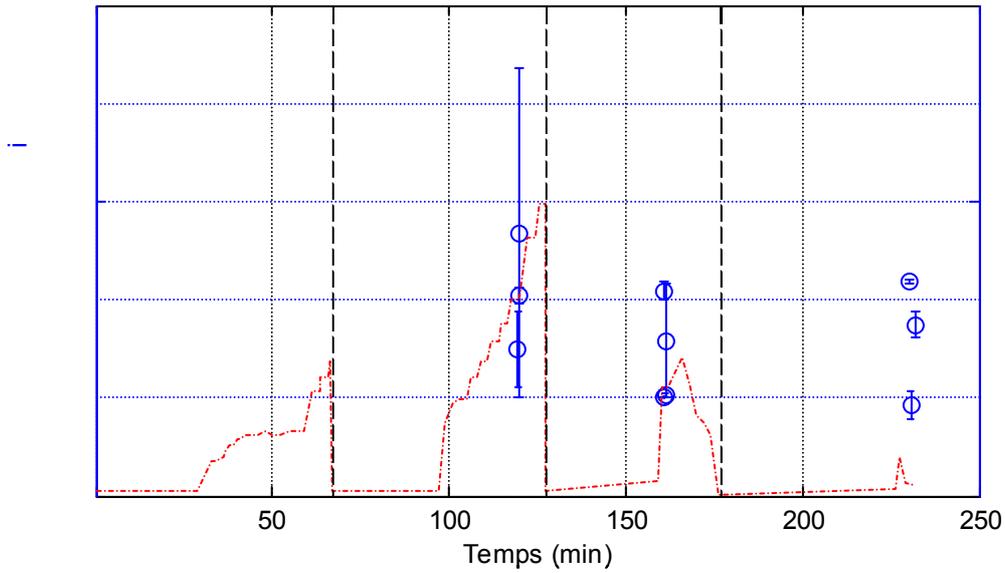


Figure 4.35 : Evolutions temporelles de la fréquence d'amplitude maximale moyenne et de la force appliquée.

4.5.4 Discussion et conclusion

Nous pouvons tenter un rapprochement entre la courbe contrainte-déformation décrite dans le chapitre 1 (figure 1.5 p14) et la courbe force-enfoncement (figure 4.36 ci-après) obtenue au terme de l'expérimentation de chute provoquée de blocs au toit de la couche brune.

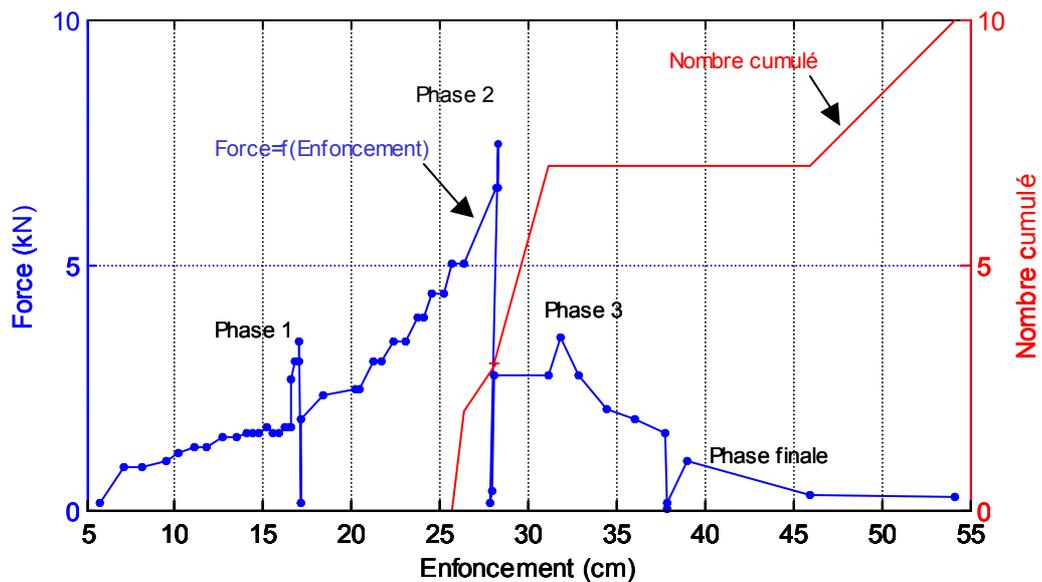


Figure 4.36 : Nombre cumulé d'événements microsismiques et courbe force-enfoncement.

La fin de la phase 2, la phase 3 et la phase finale correspondraient aux segments [BC] et [CD]. Plus précisément durant la phase 3, les fractures majeures se propageraient jusqu'au décrochement brusque de blocs lors de la phase finale. La croissance ou propagation de ces fractures serait à l'origine des événements enregistrés lors des phases 2 et 3, les événements de la phase finale étant associés au décrochement des blocs proprement dit. Toutefois étant donné la très grande proximité d'un boulon (voir figure 4.31a) au toit de la couche brune, nous devons rester très prudent quant à l'interprétation des derniers événements comportant plusieurs salves. Peut-être ces derniers résultent-ils plus du frottement de blocs le long du boulon que du décrochement ?

Pour conclure, la caractérisation des événements issus de cette expérimentation par le couple fréquence d'amplitude maximale-énergie du signal (soit f_{max} -E) exposée par la figure 4.37 nous amène à penser qu'ils sont voisins de ceux de classe T. Certes ils sont de bien plus faible énergie, mais cependant ils ont un contenu fréquentiel similaire à celui des événements de la classe T. Ainsi les événements de classe T et les événements de chute de blocs témoignent sans doute de mécanismes analogues à des échelles différentes.

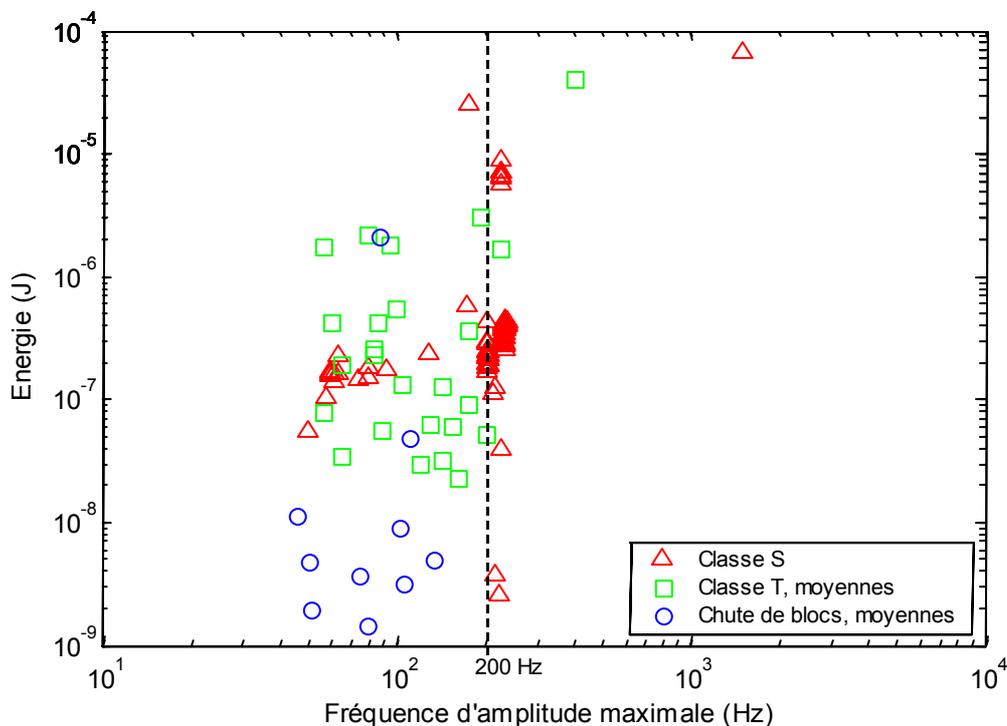


Figure 4.37 : Caractérisation des événements par le couple (f_{max} , E), f_{max} étant la fréquence d'amplitude maximale et E l'énergie du signal de l'événement.

4.6 Conclusion

Les résultats de l'auscultation microsismique de l'expérimentation d'ennoyage du site pilote de Tressange ont mis en évidence une relation entre le régime hydrique imposé et l'activité microsismique :

- la montée de l'eau dans la cavité s'accompagne d'événements forts (particulièrement énergétiques, par rapport à la plupart des événements enregistrés) ;
- lorsque le niveau d'eau est stationnaire (le site est entièrement ennoyé), l'activité sismo-acoustique se maintient mais les événements sont faiblement énergétiques ;
- enfin, lors du dénoyage, l'activité microsismique est élevée, les événements sont petits.

Deux classes d'événements ont été identifiées. Il semblerait que deux mécanismes différents en soient les causes respectives. Un déplacement rapide de petite amplitude sur des fractures préexistantes proches du carrefour de la station GL serait à l'origine des événements impulsionnels (classe S). Les événements enregistrés sur les trois stations (classe T) seraient conséquents de déplacements plus lents et d'amplitude plus grande sur des fractures préexistantes situées dans le secteur du réseau de capteurs. Le rejeu supposé, sur des fractures préexistantes, serait dû aux variations de contrainte effective, ou de pression de fluide au sein du massif imposées par le régime hydrique durant l'expérimentation d'ennoyage du site.

L'expérimentation de chute provoquée de blocs au toit de la couche brune ennoyée a permis de tester le réseau d'auscultation microsismique, l'ensemble de celui-ci ayant permis l'enregistrement d'événements associés aux déformations subies par le massif lors de l'expérience. L'analyse fréquentielle et énergétique de ces événements tend à montrer une similitude entre les événements associés à la chute de blocs et ceux de la classe T enregistrés lors de l'auscultation du site pilote ennoyé. Il semblerait que les événements de classe S et de classe T soient dus aux rejeux de fractures préexistantes induits par des variations de pression de fluide au sein du massif rocheux. Les événements de classe T peuvent être également dus à des mécanismes analogues à ceux conduisant à des chutes de blocs. La localisation des événements enregistrés au cours de l'expérimentation d'ennoyage permettrait de vérifier une telle hypothèse en confondant les résultats de cette localisation avec des observations directes de la fracturation.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons mis en oeuvre des essais mécaniques comportant des mesures indirectes macroscopiques et microscopiques de l'évolution de l'endommagement de roches du bassin ferrifère lorrain. Les mesures indirectes macroscopiques ont consisté en des mesures de modules élastiques (M_L , E_{apparent} et v_{apparent}), de déformations permanentes, de vitesses de propagation des ondes élastiques (V_p) et d'atténuation (par l'intermédiaire de l'amplitude maximale A_m). Les mesures indirectes microscopiques ont regroupé les différents paramètres issus de l'analyse des émissions acoustiques (activité, énergie, fréquence centrale, mécanismes de type E, M ou C). Ces mesures de l'évolution de l'endommagement ont été effectuées durant des essais de compression uniaxiale et des essais de compression triaxiale. Cinq essais de compression uniaxiale et un essai de compression triaxiale ont ainsi été menés sur des roches provenant de la mine de fer de Tressange.

L'analyse conjuguée des mesures macroscopiques indirectes de l'endommagement et des mesures microscopiques, a mis en évidence deux mécanismes principaux d'endommagement. Ils sont associés à deux comportements mécaniques différents. Les arénites ferrifères de la couche grise et de l'intercalaire marneux aux faciès semblables ont un comportement dilatant (manifestation d'une augmentation relative de volume au cours de la sollicitation), la micro-arénite, l'arénite argileuse de l'intercalaire marneux et l'arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune ont un comportement non-dilatant. La dilatance est la manifestation macroscopique de phénomènes microscopiques. L'endommagement des roches dilatantes naît de l'amorçage de microfissures ou de microfissures conjuguées au mécanisme purement extensif (Mode I). Ces microfissures se réunissent par coalescence pour former des fractures macroscopiques naissantes qui se propagent pour finalement fracturer l'échantillon. L'endommagement des roches non-dilatantes consiste en des micromécanismes différents. Les microfissures qui se développent ont des mécanismes cisailants, leur coalescence conduit à la formation des fractures macroscopiques dont la propagation s'accompagne finalement de la rupture de l'échantillon. Macroscopiquement, l'endommagement apparaît anisotrope dans les deux cas, les microfissures étant sub-verticales. L'essai de compression triaxiale n'a pas permis, de par la très faible activité acoustique enregistrée, de cerner les effets de la pression de confinement sur les micromécanismes de l'endommagement anisotrope de l'arénite ferrifère non-dilatante de la couche brune.

Une corrélation entre le type de micromécanismes et la fréquence centrale des événements d'EA a été observée. Les micromécanismes compressifs engendrent des EA basses fréquences (100 kHz), les micromécanismes en extension (ouverture de microfissures) produisent des EA hautes fréquences (300 kHz), enfin les micromécanismes cisailants génèrent des EA au contenu fréquentiel intermédiaire (200 kHz).

Nous avons eu l'opportunité d'analyser les enregistrements issus de l'écoute microsismique de l'ennoyage partiel d'un site minier (Tressange) ainsi que ceux provenant d'une expérimentation de chute provoquée de blocs au toit des galeries de la couche brune. Nous avons mis en évidence une relation entre le régime hydrique imposé et l'activité microsismique. Celle-ci apparaît soit particulièrement forte soit comprenant des événements très énergétiques (par rapport à l'ensemble des enregistrements) durant les phases non-stationnaires (montée de l'eau et dénoyage) du régime hydrique. Les événements microsismiques sont de deux types : les uns impulsionnels (classe S), les autres aux signatures plus longues et au contenu fréquentiel plus basse fréquence (classe T). Il semblerait qu'ils soient dus à des rejeux différents de fractures préexistantes, les rejeux étant probablement provoqués par des variations de contrainte effective, ou de pression de fluide au sein du massif rocheux. Les événements microsismiques enregistrés durant l'expérimentation de chute de blocs, ont des caractéristiques énergétiques et fréquentielles proches des événements de classe T. Ainsi, ces derniers peuvent également être la conséquence de mécanismes associés au décrochement de blocs au toit ou au parement des galeries.

Au regard des résultats *in situ* et compte tenu des conditions d'expérimentation très différentes (figure C.1), il nous paraît difficile d'établir une complémentarité entre les résultats obtenus au laboratoire et les résultats *in situ*. D'autant que le faible nombre d'essais mécaniques réalisés ne peut nous permettre de caractériser pleinement l'endommagement des matériaux des couches géologiques ennoyées (couche brune et intercalaire grise-brune). Des essais mécaniques où l'échantillon serait saturé d'eau permettraient une meilleure modélisation des conditions *in situ*. Il serait également intéressant de réaliser une expérimentation de compression *in situ* à une échelle intermédiaire, celle d'un mètre cube (à la manière d'André, 2004) où nous pourrions mesurer les contraintes appliquées et les déformations, et où un réseau de capteurs acoustiques pourrait être mis en place.

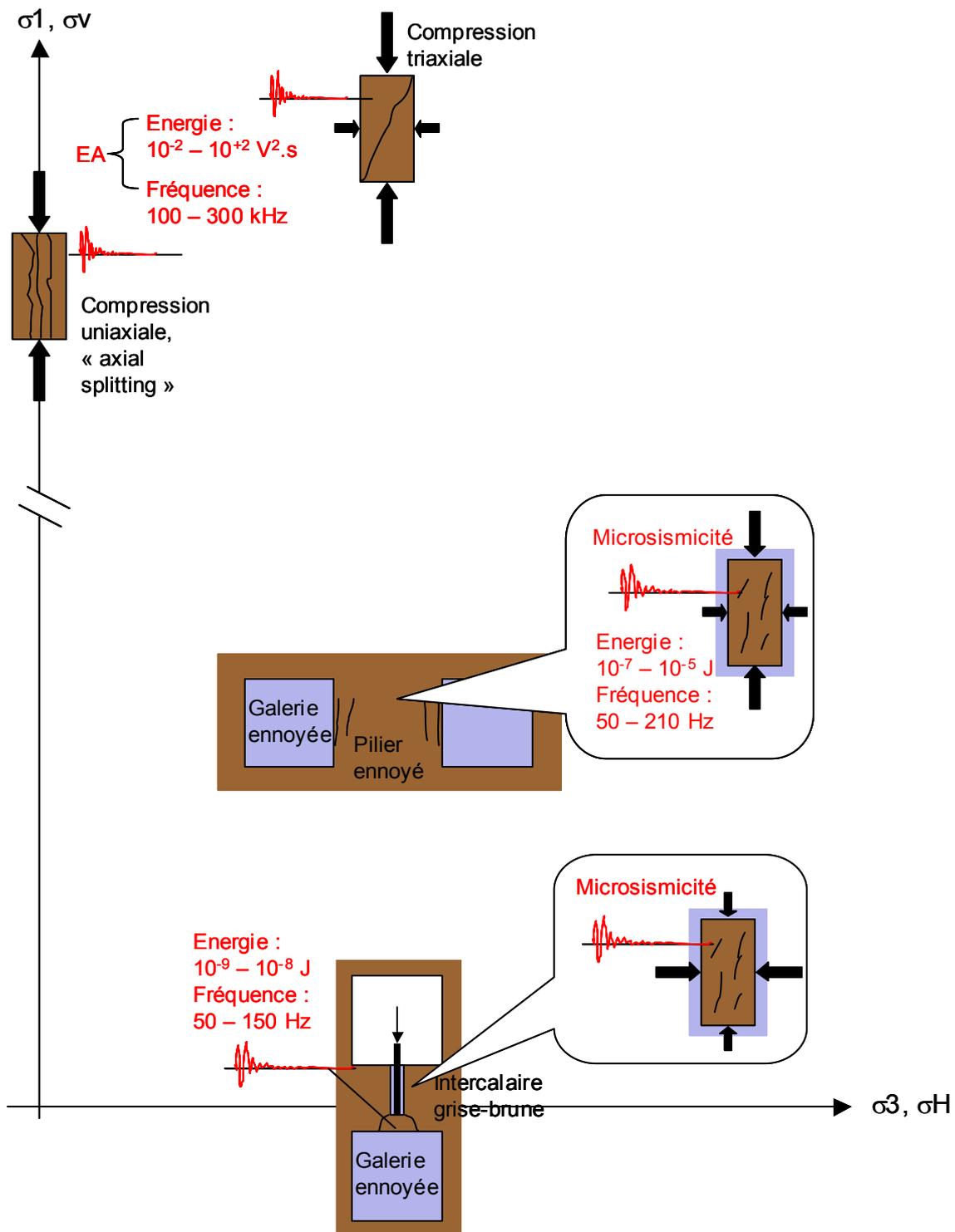


Figure C.1 : Diagramme illustrant les différentes expérimentations (essais de compression uniaxiale et de compression triaxiale, auscultation microsismique de l'ennoyage partiel d'un site minier, expérimentation de chute provoquée de blocs au toit d'une galerie ennoyée).

Concernant les résultats de notre étude de l'endommagement au laboratoire, une remarquable cohérence entre les différentes mesures a été observée. L'analyse des premiers mouvements des événements d'EA nous a permis d'aborder les micromécanismes des sources. La

localisation de ces dernières et la projection des sens du premier mouvement de l'onde P sur la sphère focale, serait à accomplir. Les mécanismes de sources seraient ainsi déterminés de manière plus robuste. La localisation permettrait de déterminer comment les sources sont spatialement distribuées, de manière diffuse ou plus localisée sur des discontinuités macroscopiques.

Bibliographie

- Al Heib M. (2000). Présentation du site pilote de Tressange (Moselle), Rapport GISOS. Réf. INERIS-DRS-00-25300/RN05, 41 p.
- Allen R.V. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *bulletin of the seismological society of america* 68(5): 1521-1532.
- Amitrano D. (1999). Emission acoustique des roches et endommagement, approche expérimentale et numérique, application à la sismicité minière, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 257 p.
- Amitrano, D. et J. Schmittbuhl (2002). Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band, *J. Geophys. Res.* 107, B12, 2375.
- Amitrano D. (2003). Brittle-ductile transition and associated seismicity: experimental and numerical studies and relationship with the b value. *J. Geophys. Res.* 108(B1): 2044.
- André E. (2004). Comportement hydromécanique d'un réseau de fractures dans une formation granitique. Expériences de l'échelle centimétrique en laboratoire, à l'échelle métrique dans la carrière du Mayet de Montagne, Thèse de doctorat, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, 296 p.
- Bourbié T., Coussy O. et Zinszner B. (1986). Acoustique des milieux poreux. Institut français du pétrole, Technip, Paris.
- Brace W.F., Paulding Jr. B.W. et Scholz C.H. (1966). Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.* 71(16): 3939-3953.
- Brady B.H.G. et Brown E.T. (1985). Rock Mechanics for underground mining. George Allen & Unwin, London.
- Cai M., Kaiser P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H. et Minami M. (2004). Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41: 833-847.

- Chow T.M., Meglis I.L. et Young R.P. (1995). Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite II. Ultrasonic tomographic imaging. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 32(8): 751-761.
- Couvreur J.-F. et Thimus J.-F. (1996). The properties of coupling agents in improving ultrasonic transmission. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 33(4): 417-424.
- Escartin J., Hirth G. et Evans B. (1997). Nondilatant brittle deformation of serpentinites: implications for Mohr-Coulomb theory and the strength of faults. *J. Geophys. Res.* 102(B2): 2897-2913.
- Evans A.G. (1979). Acoustic emission sources in brittle solids. *Fundamentals of Acoustic Emission*. K. Ono. Los Angeles, University of California: 209-227.
- Fabriol R. et Hamm V. (2004). Site pilote de Tressange - Suivi de l'eau, Rapport BRGM/RP-53118-FR, 60 p.
- Gendzwil D.J. et Prugger A. (1990). Seismic activity in a flooded Saskatchewan potash mine. *Rockbursts and Seismicity in Mines*. Fairhurst, Balkema: 115-120.
- Gerstenberger M., Wiemer S. et Giardini D. (2001). A systematic test of the hypothesis that the b value varies with depth in California. *Geophys. Res. Lett.* 28(1): 57-60.
- Glaser S.D. et Nelson P.P. (1991). System effects on AE waveforms from known sources. the Fifth Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Trans Tech Publications: 573-587.
- Goodman R.E. (1980). Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, New York.
- Grgic D. (2001). Modélisation du comportement à court et à long terme des roches de la formation ferrifère lorraine, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 269 p.
- Grgic D., Homand F. et Giraud A. (2006). Modelling of the drying and flooding of underground iron mines in Lorraine (France). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43: 388-407.

- Gutenberg B. et Richter C.F. (1954). Seismicity of the earth and associated phenomena. Princeton University Press, 2nd Edition, Princeton.
- Holcomb D.J. (1993). General theory of the Kaiser Effect. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30(7): 929-935.
- Homand F., Hoxha D., Belem T., Pons M.-N. et Hoteit N. (2000). Geometric analysis of damaged microcracking in granites. *Mech. of Materials* 32: 361-376.
- Jaeger J.C. et Cook N.G.W. (1979). Fundamentals of rock mechanics. Chapman and Hall, New York.
- Jouniaux L., Masuda K., Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Liu L. et Ma W. (2001). Comparison of the microfracture localization in granite between fracturation and slip of a preexisting macroscopic healed joint by acoustic emission measurements. *J. Geophys. Res.* 106(B5): 8687-8698.
- Katz O. et Reches Z. (2004). Microfracturing, damage, and failure of brittle granites. *J. Geophys. Res.* 109(B01206).
- Kemeny J. et Cook N.G.W. (1986). Effective moduli, non-linear deformation and strength of a cracked elastic solid. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 23(2): 107-118.
- Lahaie F. (2003). Mesures de contraintes dans un pilier et un intercalaire du site pilote de Tressange, rapport GISOS, Réf. INERIS-DRS-03-45917/RN03bis, 32 p.
- Lay T. et Wallace T.C. (1995). Modern global seismology. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Lei X., Nishizawa O., Kusunose K. et Satoh T. (1992). Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes. *J. Phys. Earth.* 40: 617-634.
- Lei X., Kusunose K., Rao M.V.M.S., Nishizawa O. et Satoh T. (2000a). Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring. *J. Geophys. Res.* 105(B3): 6127-6139.

- Lei X.-L., Kusunose K., Nishizawa O., Cho A. et Satoh T. (2000b). On the spatio-temporal distribution of acoustic emissions in two granitic rocks under triaxial compression: the role of pre-existing cracks. *Geophys. Res. Lett.* 27(13): 1997-2000.
- Lei X.-L., Nishizawa O., Kusunose K., Cho A., Satoh T. et Nishizawa O. (2000c). Compressive failure of mudstone samples containing quartz veins using rapid AE monitoring: the role of asperities. *Tectonophysics* 328: 329-340.
- Lemaitre J. (1996). A course on damage mechanics. Springer, Berlin.
- Lemaitre J. et Chaboche J.-L. (1988). Mécanique des matériaux solides. Dunod, 2nde édition, Paris.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A. et Sidorin A. (1991). Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature* 350: 39-42.
- Lockner D.A. (1993). The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30(7): 883-899.
- Lopes B. (2002). Etude de l'environnement géologique du site pilote de Tressange, Rapport BRGM-RP-51707-FR, 57 p.
- Mandelbrot B.B. (1975). Les objets fractals. Flammarion, Champs, 4^{ème} édition.
- McGarr A. et Simpson D. (1997). A broad look at induced and triggered seismicity. Rockbusts and seismicity in Mines. S.J. Gibowicz et S. Lasocki, Balkema: 385-396.
- Moore D.E. et Lockner D.A. (1995). The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *Journal of Structural Geology* 17(1): 95-114.
- Mori J. et Abercrombie R.E. (1997). Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California : Implications for rupture initiation. *J. Geophys. Res.* 102(B7): 15081-15090.
- Nishiyama T., Chen Y., Kusuda H., Ito T., Kaneko K., Kita H. et Sato T. (2002). The examination of fracturing process subjected to triaxial compression test in Inada granite. *Engineering Geology* 66: 257-269.

- Ohnaka M. et Mogi K. (1982). Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under triaxial compression and its relation to the fracturing process to failure. *J. Geophys. Res.* 87(B5): 3873-3884.
- Paterson M.S. (1978). Experimental rock deformation - The brittle field. Berlin Heidelberg, New York.
- Pettitt W.S. (1998). Acoustic emission source studies of microcracking in rock, Thèse de doctorat, Keele University, 225 p.
- Pickering G., Bulle J.M. et Sanderson D.J. (1995). Sampling power-law distributions. *Tectonophysics* 248: 1-20.
- Piguet J.P., Josien J.P. et Senfaute G. (1997). Surveillance par méthodes microsismiques du risque d'effondrement dans le bassin ferrifère lorrain, Rapport INERIS, 28 p.
- Piguet J.P., Josien J.P., Kouniali S., Bigarre P. et Vouille G. (1999). The contribution of rock mechanics for long term risk assessment and management in abandoned mines - The case of iron mines in Lorraine. *9th International congress on rock mechanics*, Paris, Balkema, 317-323.
- Placko D., Bildstein P., Journet B., Lepoutre F., Miller D., Nadi M. et Santander E. (2000). De la physique du capteur au signal électrique, Hermes Science.
- Reches Z. et Lockner D.A. (1994). Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *J. Geophys. Res.* 99(B9): 18,159-118,173.
- Rudajev V., Vilhelm J. et Lokajicek T. (2000). Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37: 699-704.
- Rummel F. et Van Heerden W.L. (1978). International Society for Rock Mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for determining sound velocity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15(2): 53-58.
- Satoh T., Nishizawa O. et Kusunose K. (1990). Fault development in Oshima granite under triaxial compression inferred from hypocenter distribution and focal mechanism of acoustic emission. *Tôhoku Geophys. Journ. (Sci. Rep. Tôhoku Univ., Ser. 5)*. 33(3,4): 241-250.

- Scholz C.H. (1968a). Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *J. Geophys. Res.* 73(4): 1447-1454.
- Scholz C.H. (1968b). Microfracturing and inelastic deformation of rock in compression. *J. Geophys. Res.* 73(4): 1417-1432.
- Scholz C.H. (1968c). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seism. Soc. AM.* 58(1): 399-415.
- Schoumacker L. et Homand F. (2003). Premières constatations après vidange du site pilote de Tressange, Rapport GISOS, réf. L.G.L.SOS.PSI.RPRE.03.0436.A.doc, 5 p.
- Senfaute G., Al Heib M., Josien J.P. et Noirel J.F. (1999). Detection and monitoring of high stress concentration zones by numerical and microseismic methods. *9th International Congress of Rock Mechanics*, Paris, Balkema, 1065-1070.
- Senfaute G., Abdul Wahed M., Piguet J.P. et Josien J.P. (2000). Technique d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrifère lorrain. *Revue française de géotechnique* 22: 57-62.
- Shibata M. (1984). A theoretical evaluation of acoustic emission signals - the rise-time effect of dynamic forces. *Materials Evaluation* 42(1): 107-120.
- Site internet du GISOS: <http://gisos.ensg.inpl-nancy.fr/>.
- Souley M., Al Heib M. et Thoraval A. (2002). Modélisation hydromécanique préliminaire d'envoyage d'un site dans le bassin ferrifère lorrain. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG). "Optimisation de l'insertion des ouvrages dans le sol et le sous-sol. Cédérom, Nancy, 8-9 octobre 2002, ISBN : 2-85555-055-6..
- Szwedzicki (2001). Geotechnical precursors to large-scale ground collapse in mines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38: 957-965.
- Szwedzicki T. (2003). Rock mass behaviour prior to failure. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40: 573-584.

- Tapponier P. et Brace W.F. (1976). Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13: 103-112.
- Weiss J. (1997). The role of attenuation on acoustic emission amplitude distributions and b-values. *Bull. Seism. Soc. AM.* 87(5): 1362-1367.
- Young R.P. et Collins D.S. (2001). Seismic studies of rock fracture at the Underground Research Laboratory, Canada. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38: 787-799.
- Yukutake H. (1989). Fracturing process of granite inferred from measurements of spatial and temporal variations in velocity during triaxial deformations. *J. Geophys. Res.* 94(B11): 15,639-615,651.
- Zang A., Wagner F.C. et Dresen G. (1996). Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure. *J. Geophys. Res.* 101(B8): 17,507-517,521.
- Zang A., Wagner F.C., Stanchits S., Dresen G., Andresen R. et Haidekker M.A. (1998). Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads. *Earth Phys. J. Int.* 135: 113-1130.
- Zang A., Wagner F.C., Stanchits S., Janssen C. et Dresen G. (2000). Fracture process zone in granite. *J. Geophys. Res.* 105(B10): 23,651-623,661.
- Zhao Y. (1998). Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35(3): 349-366.

Annexe A : fonction d'apodisation

Afin d'éviter une troncature trop brutale du signal entre les pointés de la première arrivée et de la fin d'événement, on utilise une fonction d'apodisation que l'on applique au signal tronqué entre les deux pointés précédents. Cette fonction d'apodisation ($A(t)$, figure A.1) est telle que :

- Si $t \leq t_p$,

alors

$$A(t) = 0$$

- si $t_p \leq t \leq 0,05t_F + 0,95t_p$,

alors

$$A(t) = \frac{6(t-t_p)^5}{0,05(t_F-t_p)^5} - \frac{15(t-t_p)^4}{0,05(t_F-t_p)^4} + \frac{10(t-t_p)^3}{0,05(t_F-t_p)^3}$$

- si $0,05t_F + 0,95t_p \leq t \leq 0,05t_p + 0,95t_F$,

alors

$$A(t) = 1$$

- si $0,05t_p + 0,95t_F \leq t \leq t_F$,

alors

$$A(t) = 1 - \left[\frac{6((t-t_p) - 0,95(t-t_p))^5}{0,05(t_F-t_p)^5} - \frac{15((t-t_p) - 0,95(t-t_p))^4}{0,05(t_F-t_p)^4} + \frac{10((t-t_p) - 0,95(t-t_p))^3}{0,05(t_F-t_p)^3} \right]$$

- si $t \geq t_F$,

alors

$$A(t) = 0.$$

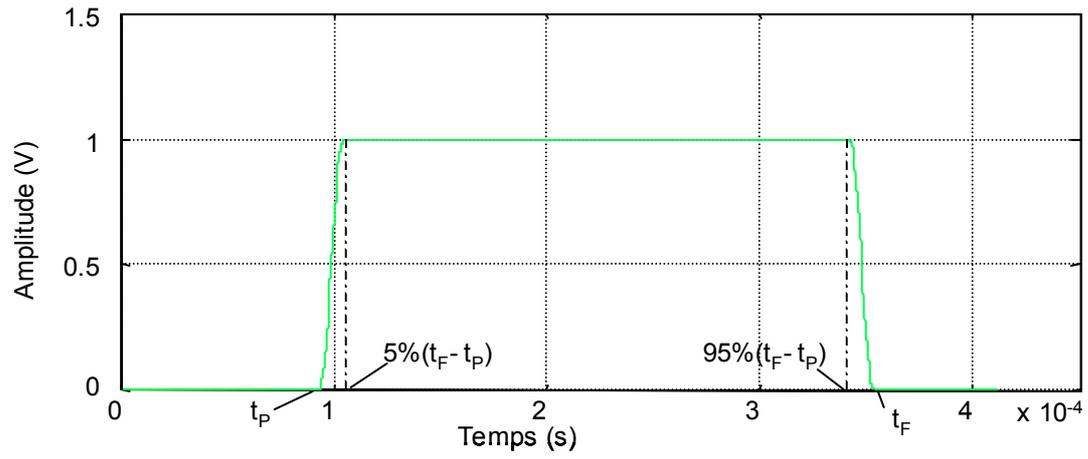


Figure A.1 : Représentation graphique de la fonction d'apodisation utilisée

Annexe B : premiers mouvements d'un événement d'EA

Rappelons que les capteurs acoustiques utilisés sont polarisés négativement. Ainsi, lorsque l'amplitude du premier pic est positive cela signifie que le premier mouvement est extensif ou en dilatation, lorsque cette amplitude est négative, le premier mouvement est compressif. Les figures B.1 et B.2 présentent les premiers mouvements d'un événement d'EA enregistré sur 15 TPZ lors de l'essai de compression uniaxiale ggp2-MAV18.

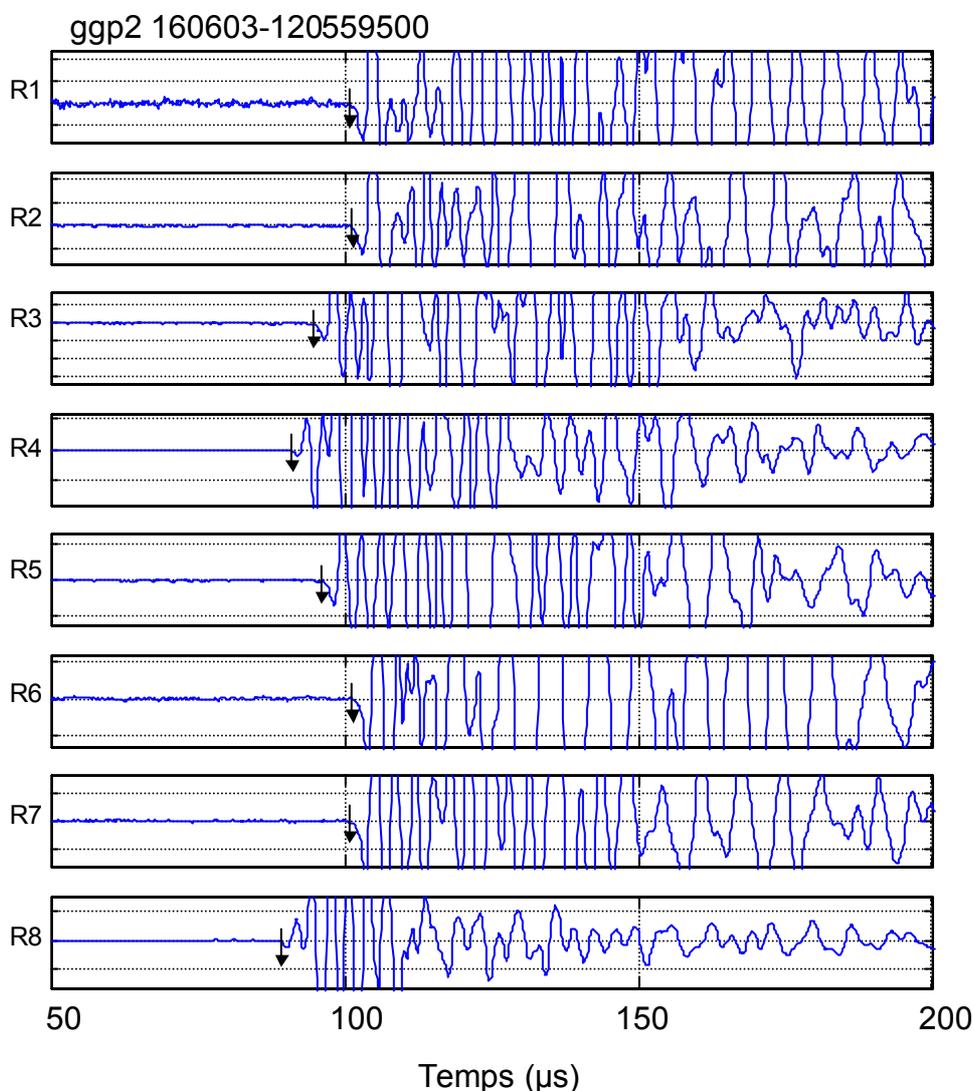


Figure B.1 : Formes d'onde enregistrées au cours de l'essai de compression uniaxiale ggp2-MAV18 sur les voies 1 à 8 et premiers mouvements d'un événement d'EA.

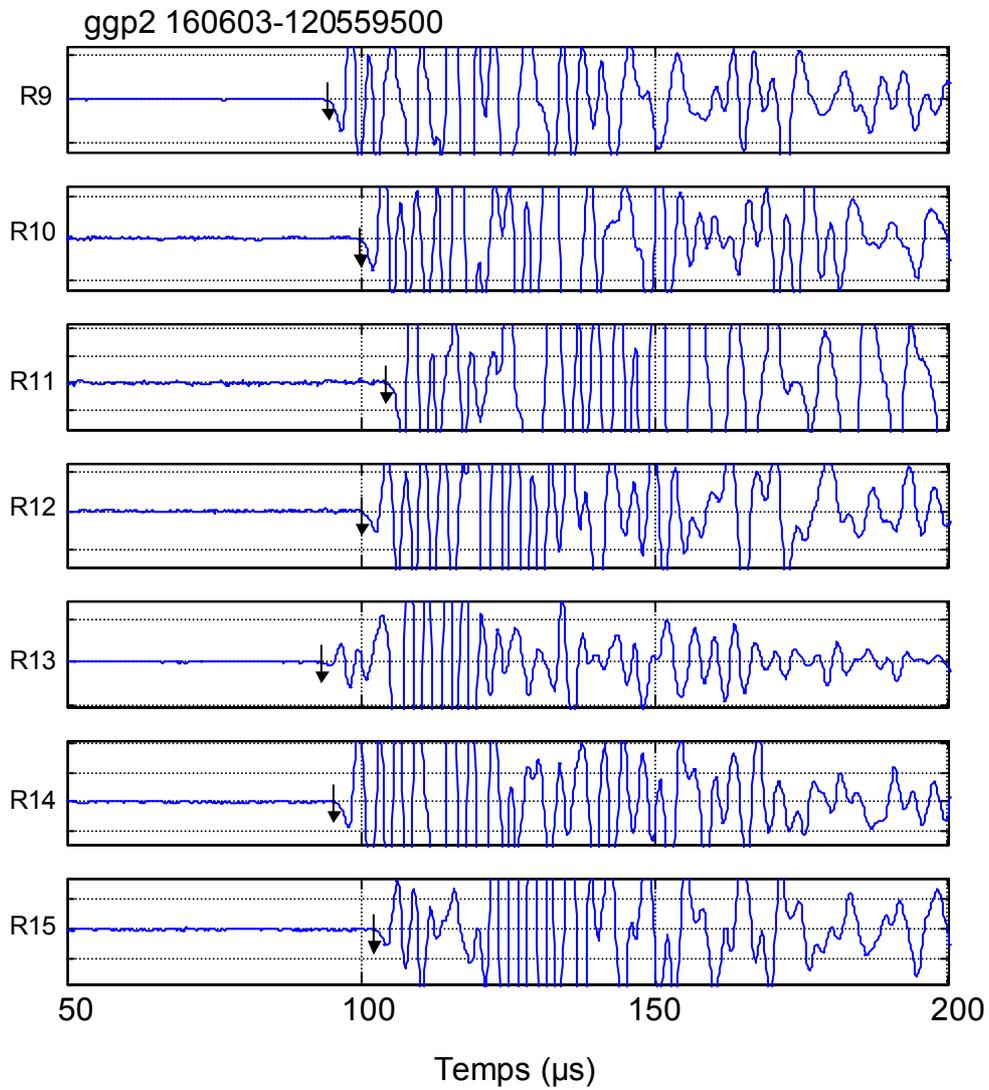
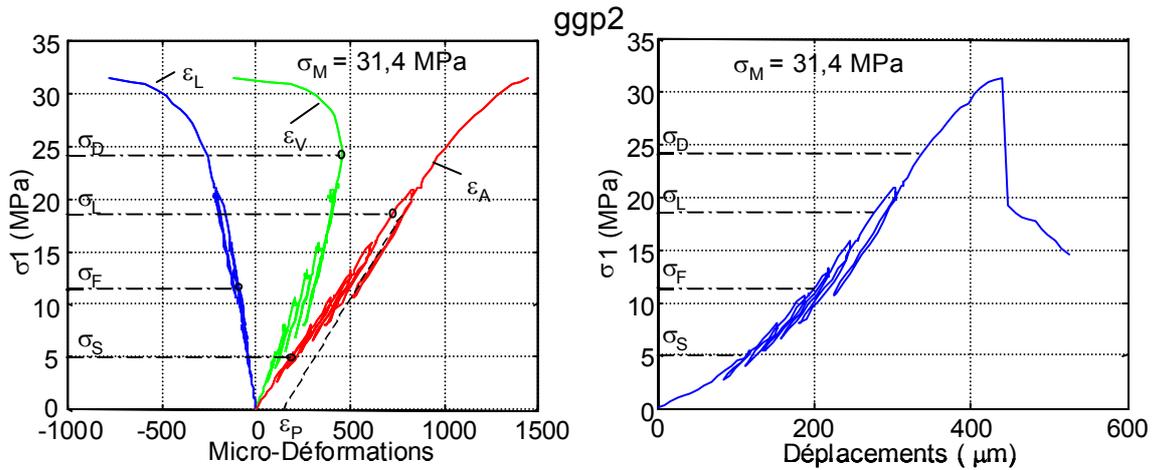


Figure B.2 : Formes d'onde enregistrées au cours de l'essai de compression uniaxiale ggp2-MAV18 sur les voies 9 à 15 et premiers mouvements d'un événement d'EA.

Annexe C : synthèse graphique des résultats

C.1 Compression uniaxiale d'une arénite ferrifère de la couche grise (ggp2-MAV18)

Résultats mécaniques



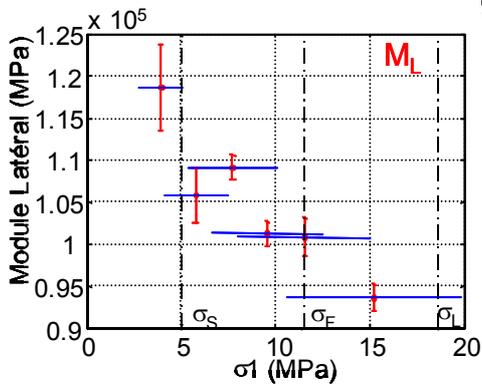
Cycles (déchargement-rechargement)
linéaires, réversibles,
hystérésis quasiment absente

Déformations permanentes (ϵ_p)

Dilatance

Comportement post-pic fragile

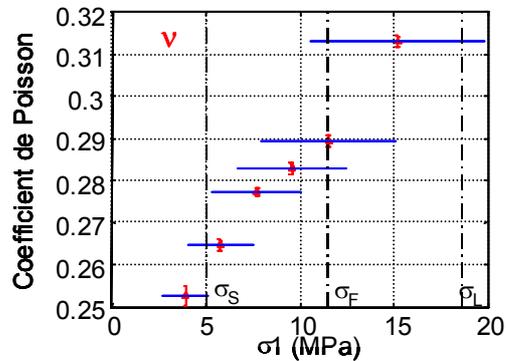
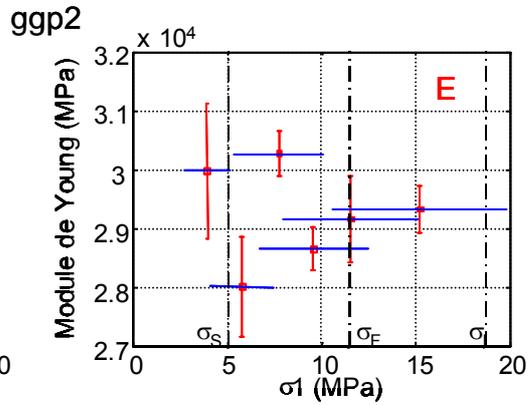
Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	5	16
σ_F	11,4	36,3
σ_L	18,6	59,2
σ_D	24,2	77
σ_M	31,4	100



M_L diminue

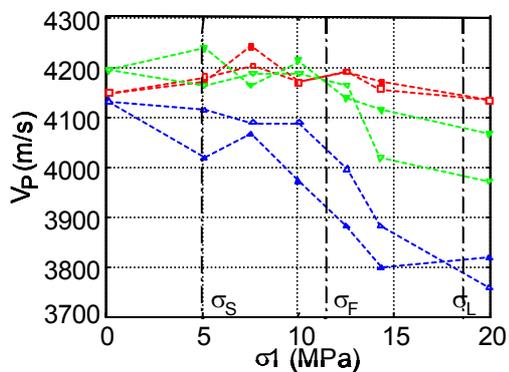
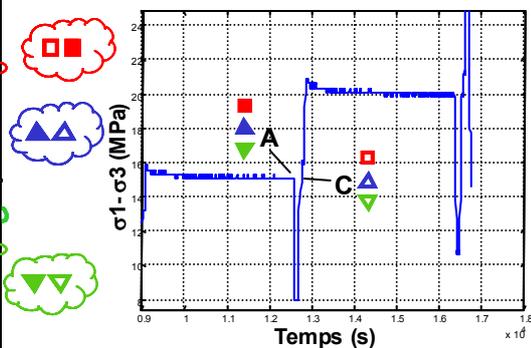
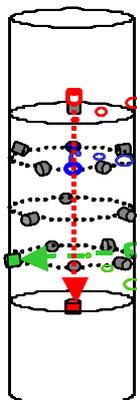
E fluctue

ν augmente



Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

ggp2



$$V_p(A_i) \approx V_p(C_i)$$

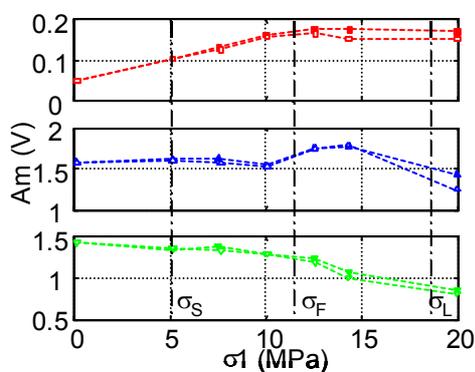
$$Am(A_i) \approx Am(C_i)$$

V_p axiale constante

V_p transversales diminuent

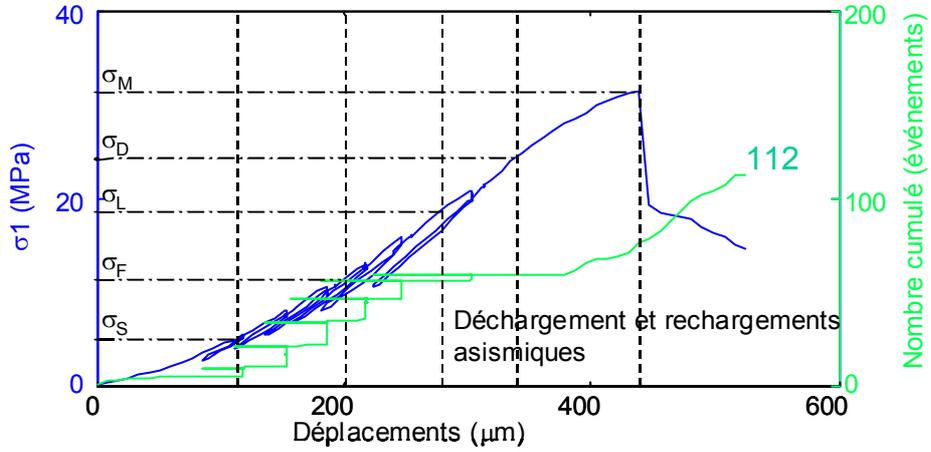
Am axiale augmente

Am transversales diminuent



Activité acoustique

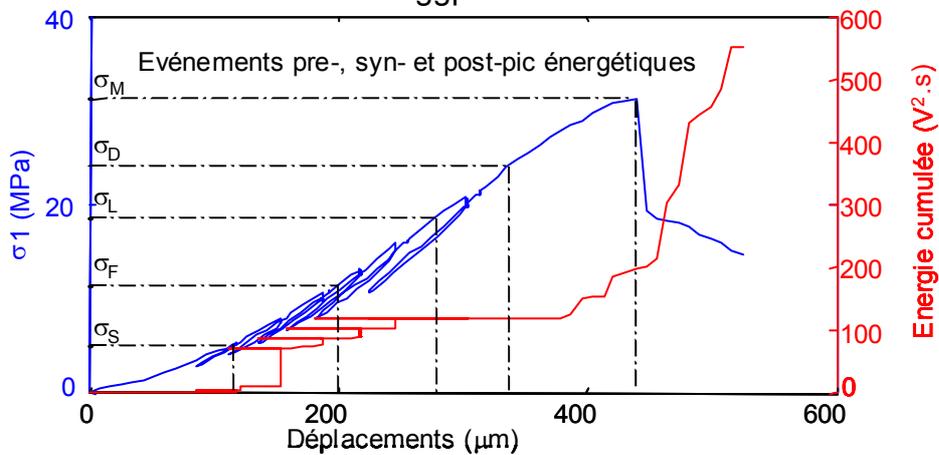
ggp2



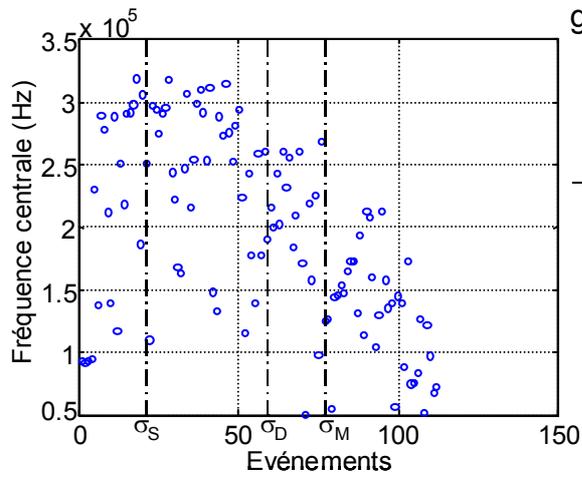
Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	% d'événements précédant le seuil
σ_S	5	21	19,7
σ_F	11,4	59	52,6
σ_L	18,6	59	52,6
σ_D	24,2	59	52,6
σ_M	31,4	77	68,7

Analyse énergétique

ggp2



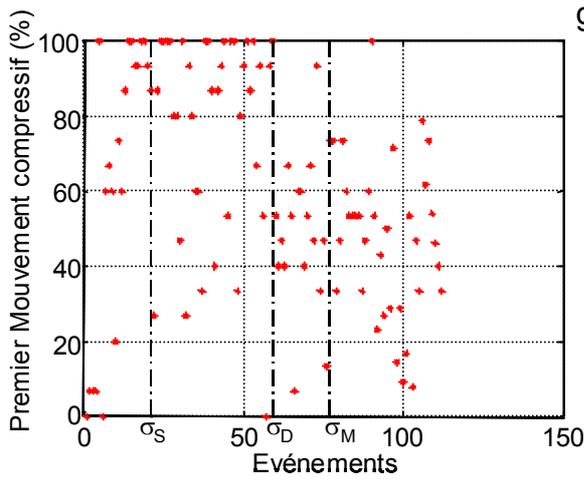
Analyse fréquentielle



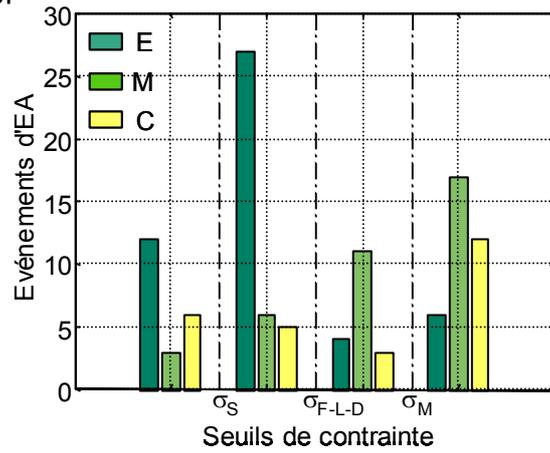
ggp2

Intervalle de contrainte (seuils)	Fréquence centrale maximale (kHz)
pre- σ_S	300
$\sigma_S - \sigma_D$	320
$\sigma_D - \sigma_M$	270
Post- σ_M	220

Analyse du premier mouvement

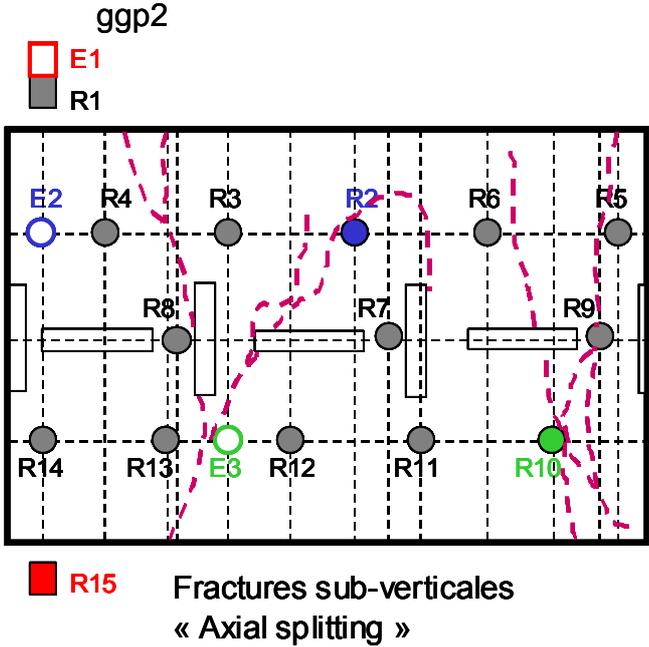
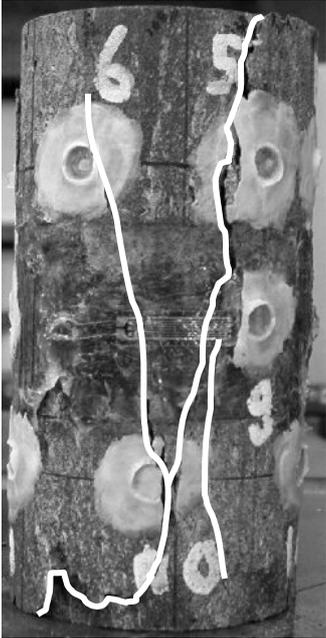


ggp2



Intervalle de contrainte (seuils)	Type de mécanisme majoritaire
pre- σ_S	extension
$\sigma_S - \sigma_D$	extension
$\sigma_D - \sigma_M$	mixte (cisaillement)
Post- σ_M	mixte

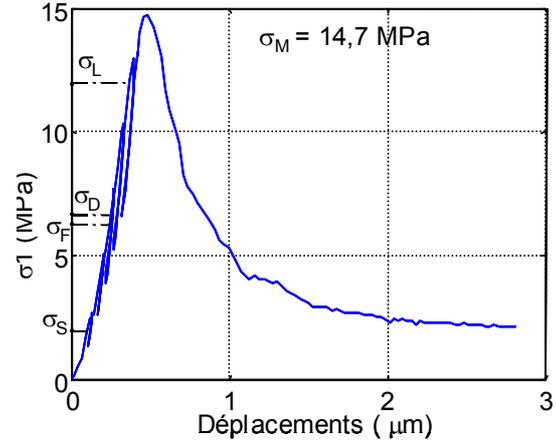
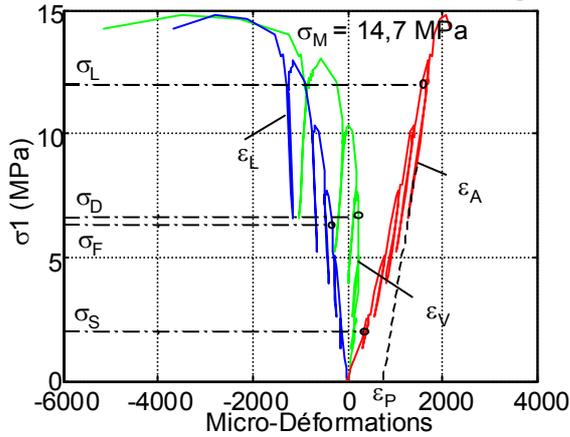
Observations macroscopiques



C.2 Compression uniaxiale d'une arénite ferrifère de l'intercalaire grise-brune (gm0203s1-MAV11)

Résultats mécaniques

gm0203s1



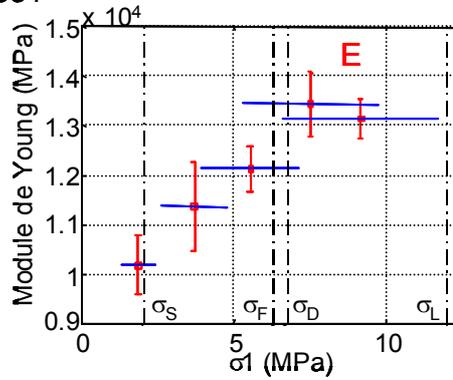
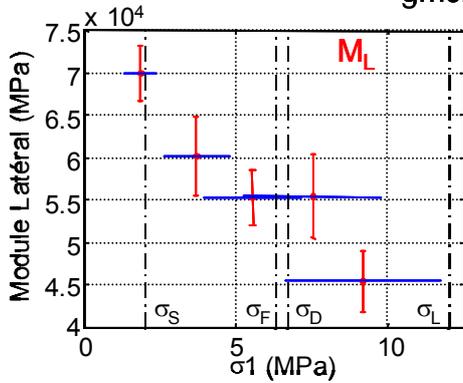
Cycles (déchargement-rechargement)
linéaires, réversibles,
pas d'hystérésis

Déformations permanentes (ϵ_p)

Dilatance

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	2	13,6
σ_F	6,3	42,8
σ_L	6,7	45,6
σ_D	12	81,6
σ_M	14,7	100

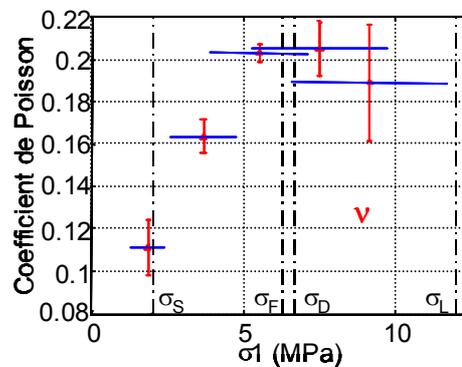
gm0203s1



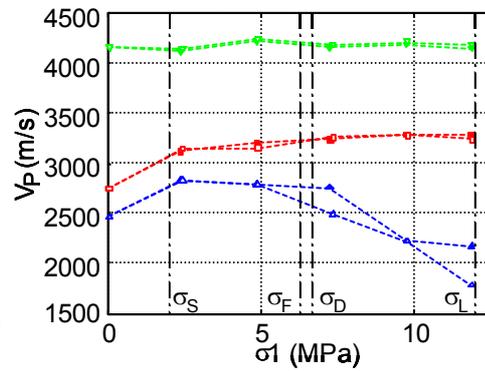
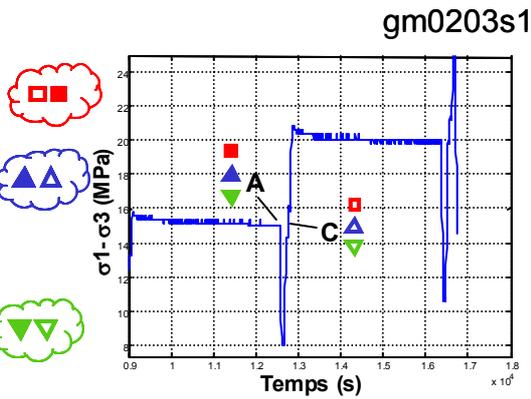
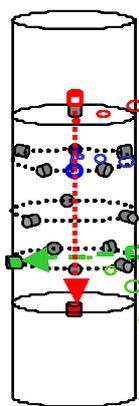
M_L diminue

E augmente

ν augmente



Vitesses de propagation des ondes P et atténuation



$$V_p(A_i) \approx V_p(C_i)$$

$$A_m(A_i) \approx A_m(C_i)$$

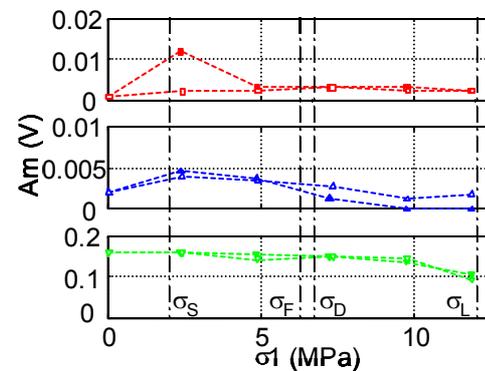
Vitesses hétérogènes

V_p axiale augmente

V_p transversale haute diminue

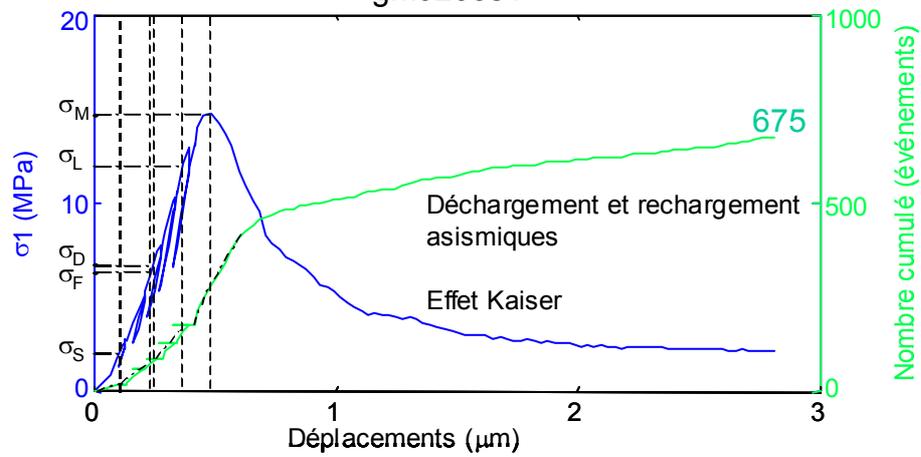
A_m axiale augmente très légèrement

A_m transversales diminuent



Activité acoustique

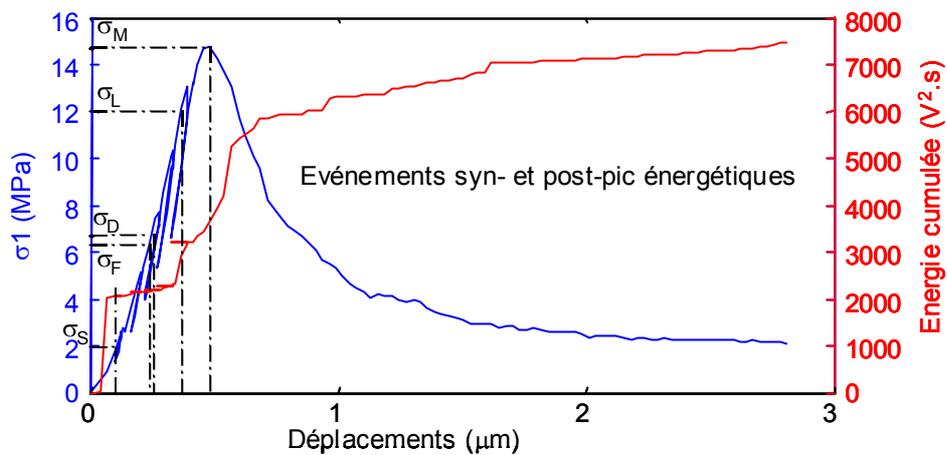
gm0203s1



Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	% d'événements précédant le seuil
σ_S	2	17	2,5
σ_F	6,3	75	11
σ_L	6,7	75	11
σ_D	12	161	24
σ_M	14,7	283	42

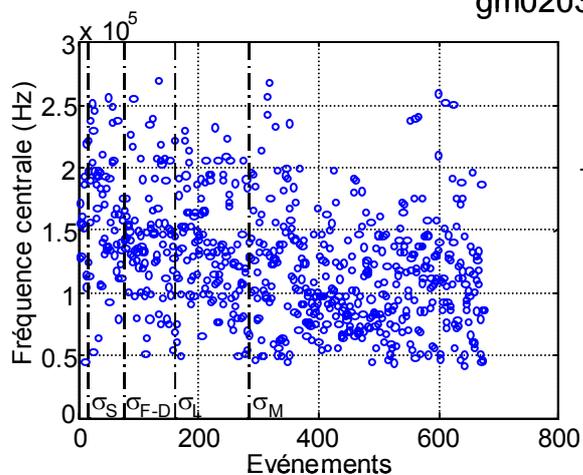
Analyse énergétique

gm0203s1



Analyse fréquentielle

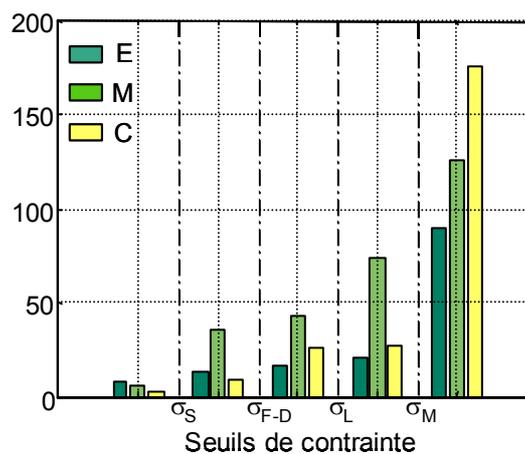
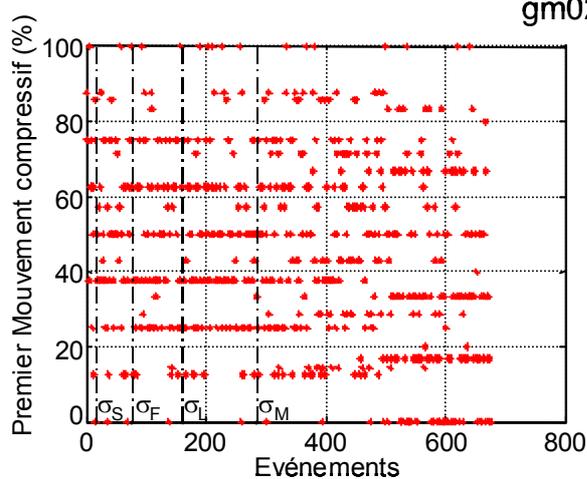
gm0203s1



Intervalle de contrainte (seuils)	Fréquence centrale maximale (kHz)
pre- σ_S	250
$\sigma_S - \sigma_{F-D}$	250
$\sigma_{F-D} - \sigma_L$	270
$\sigma_L - \sigma_M$	230
post- σ_M	200

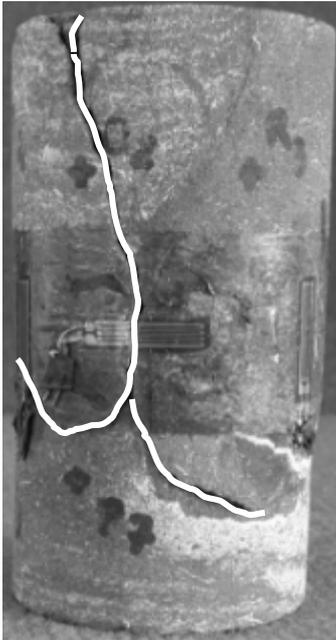
Analyse du premier mouvement

gm0203s1

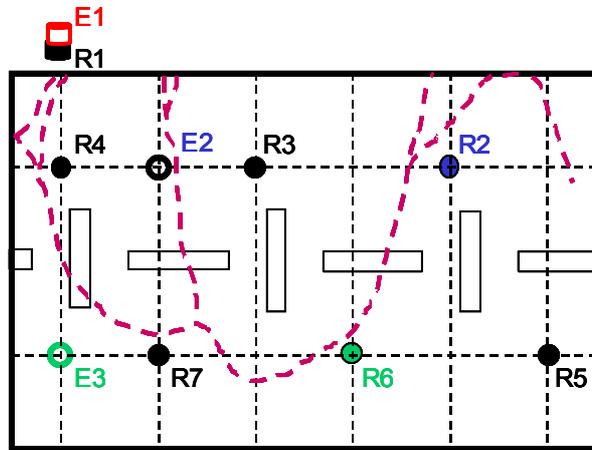


Intervalle de contrainte (seuils)	Type de mécanisme majoritaire
pre- σ_S	mixte (cisaillement)
$\sigma_S - \sigma_{F-D}$	mixte
$\sigma_{F-D} - \sigma_L$	mixte
$\sigma_L - \sigma_M$	mixte
post- σ_M	compression

Observations macroscopiques



gm0203s1



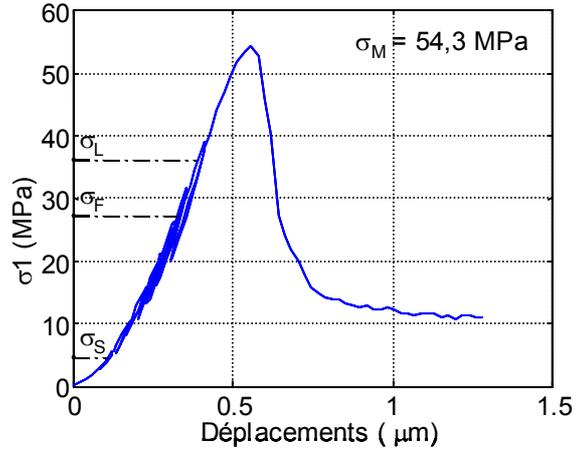
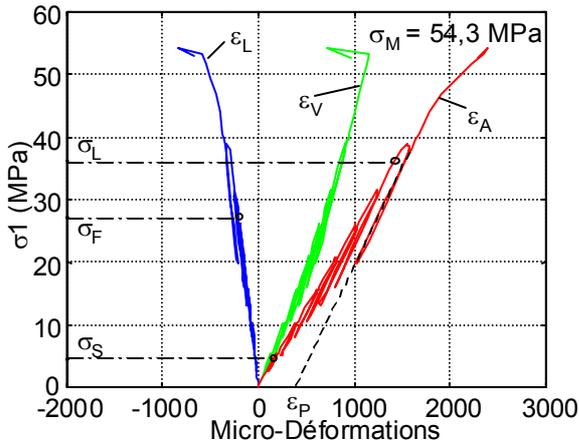
R8

Fractures sub-verticales dans la partie supérieure de l'échantillon

C.3 Compression uniaxiale d'une micro-arénite de l'intercalaire grise-brune (gm0203s2-MAV11)

Résultats mécaniques

gm0203s2



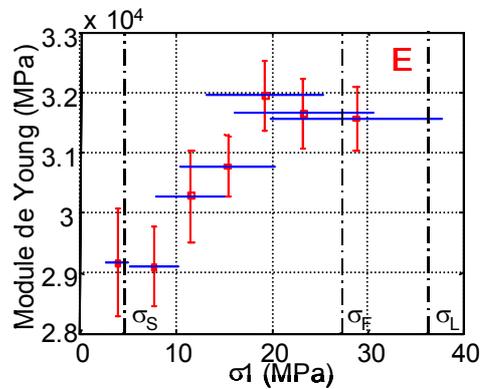
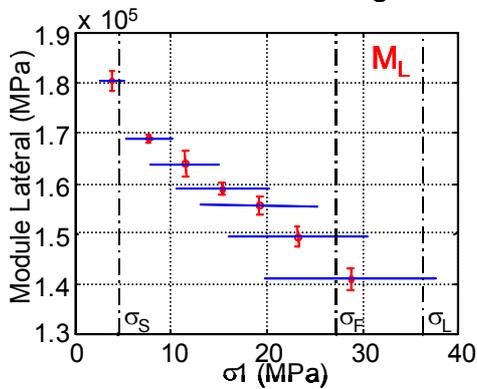
Cycles (déchargement-rechargement) linéaires, réversibles, hystérésis faible

Déformations permanentes (ϵ_p)

Pas de dilatace

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	4,5	8,3
σ_F	27,2	50
σ_L	36,2	66,7
σ_M	31,4	100

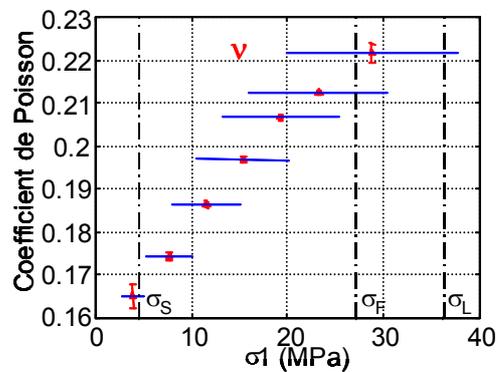
gm0203s2



M_L diminue

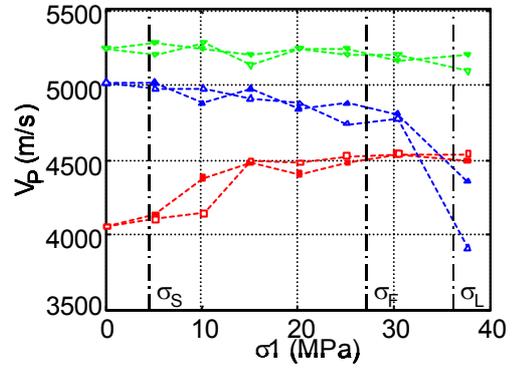
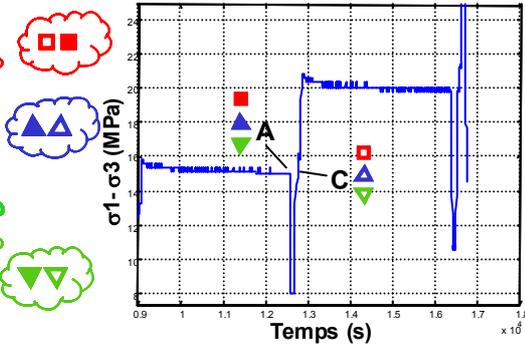
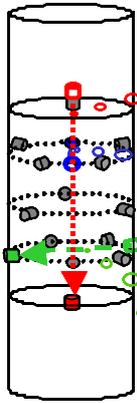
E augmente

ν augmente



Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

gm0203s2



$$V_p(A_i) \approx V_p(C_i)$$

$$A_m(A_i) \approx A_m(C_i)$$

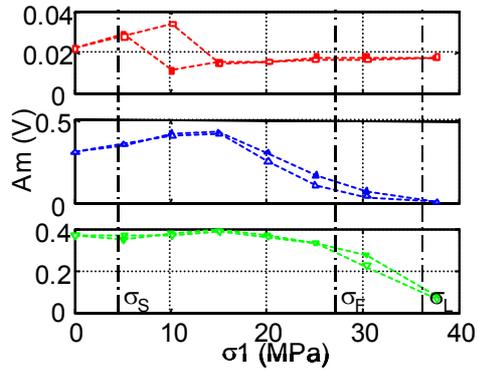
Vitesses hétérogènes

V_p axiale augmente

V_p transversales diminuent

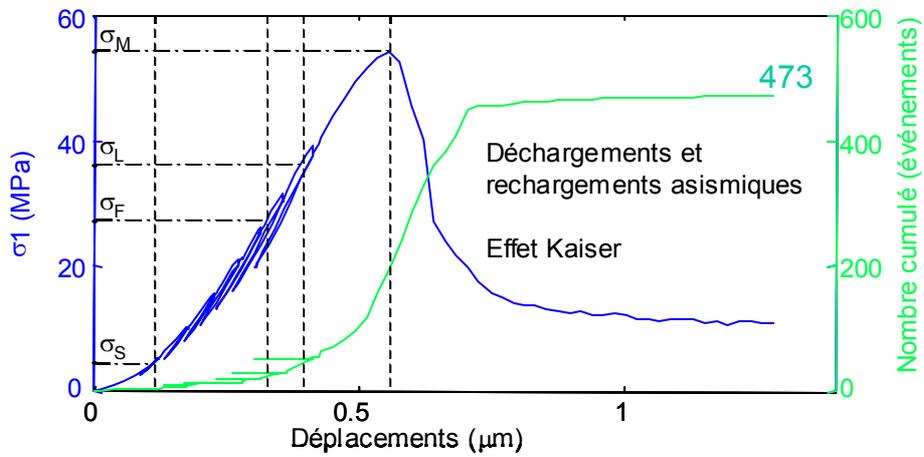
A_m axiale constante

A_m transversales diminuent



Activité acoustique

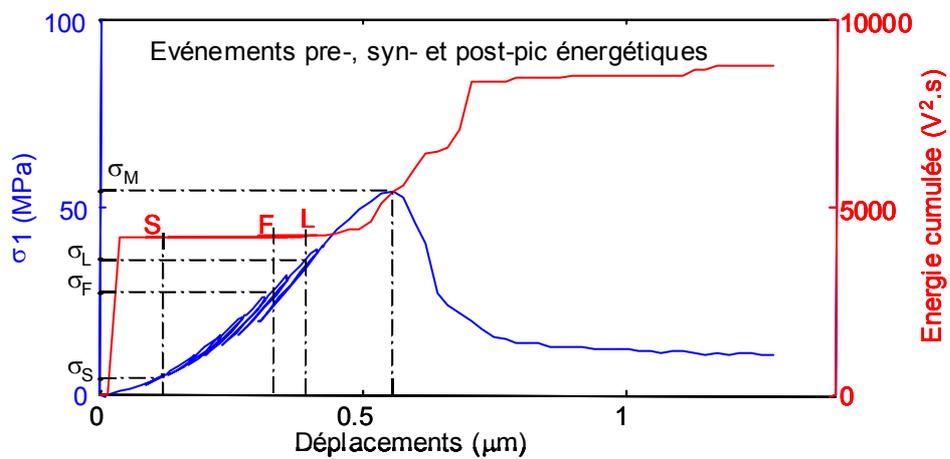
gm0203s2



Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	% d'événements précédant le seuil
σ_S	4,5	4	0,8
σ_F	27,2	24	5
σ_L	36,2	40	8
σ_M	54,3	193	41

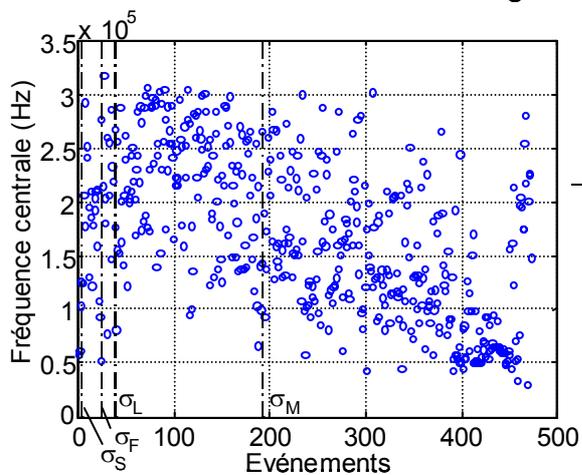
Analyse énergétique

gm0203s2



Analyse fréquentielle

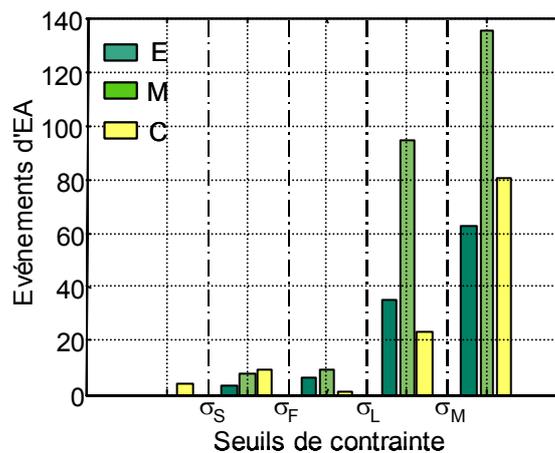
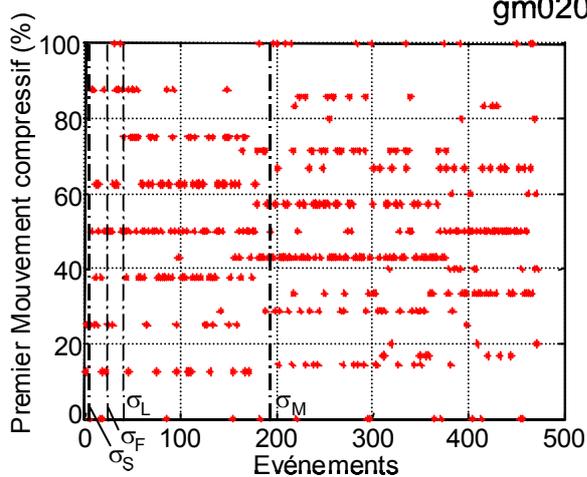
gm0203s2



Intervalle de contrainte (seuils)	Fréquence centrale maximale (kHz)
pre- σ_F	300
$\sigma_F - \sigma_L$	320
$\sigma_L - \sigma_M$	310
post- σ_M	300

Analyse du premier mouvement

gm0203s2

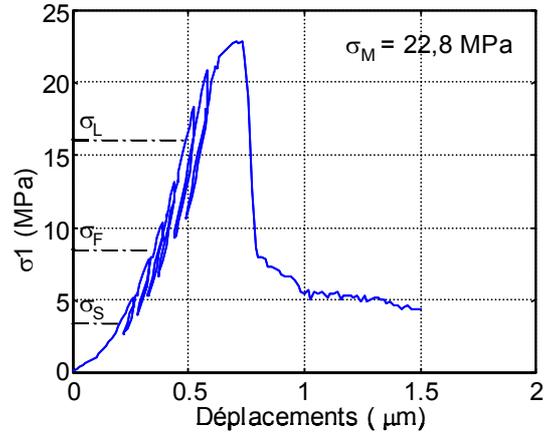
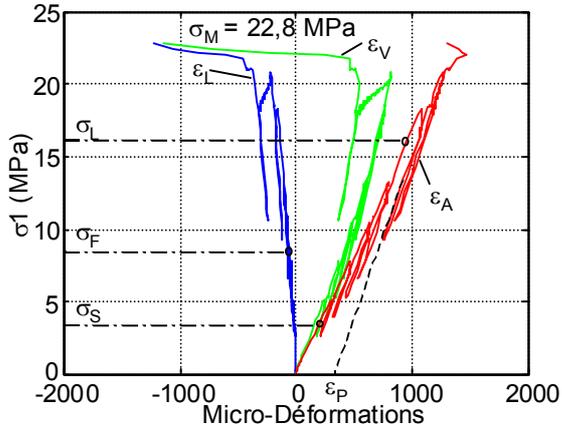


Intervalle de contrainte (seuils)	Type de mécanisme majoritaire
pre- σ_S	compression
$\sigma_S - \sigma_F$	compression
$\sigma_F - \sigma_L$	mixte (cisaillement)
$\sigma_L - \sigma_M$	mixte
post- σ_M	mixte

C.4 Compression uniaxiale d'une arénite argileuse de l'intercalaire grise-brune (gm0203s3-MAV11)

Résultats mécaniques

gm0203s3



Cycles (déchargement-rechargement) linéaires, réversibles, hystérésis très faible

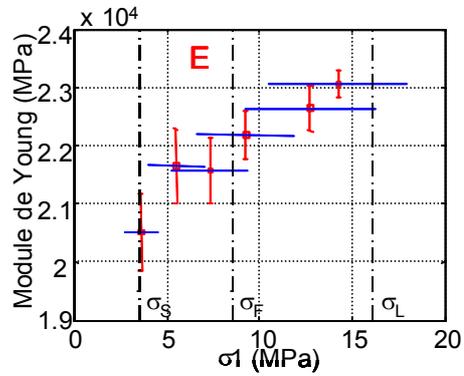
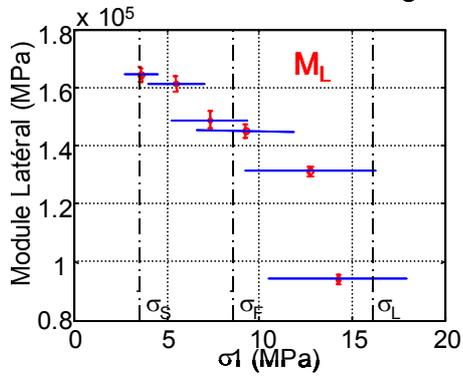
Déformations permanentes (ϵ_P)

Pas ou peu de dilatance

Comportement post-pic fragile

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	3,4	15
σ_F	8,5	37,3
σ_L	16,1	70,6
σ_M	22,8	100

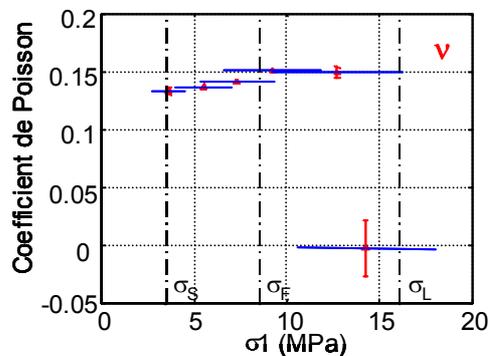
gm0203s3



M_L diminue

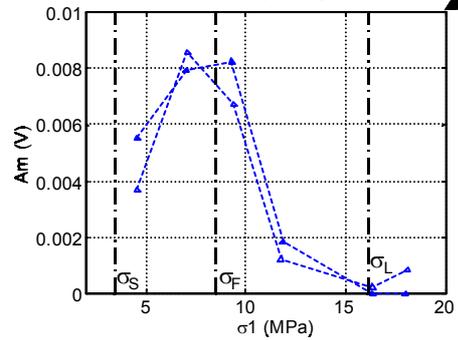
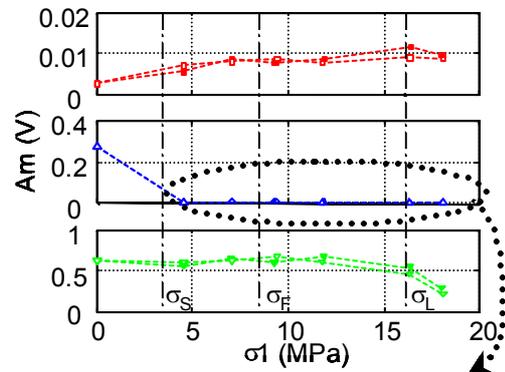
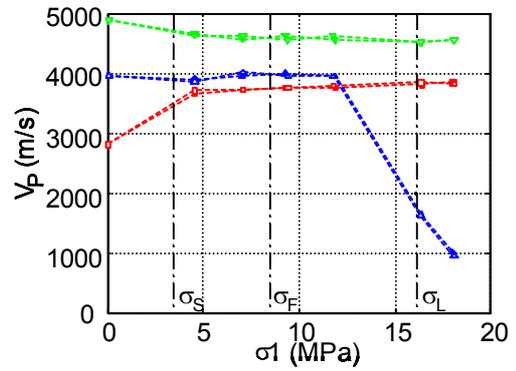
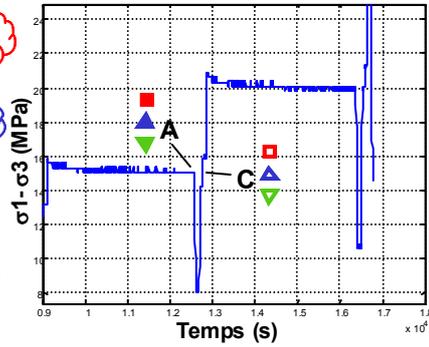
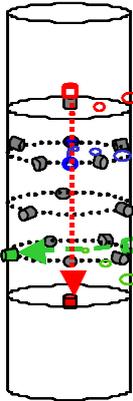
E augmente

ν augmente



Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

gm0203s3



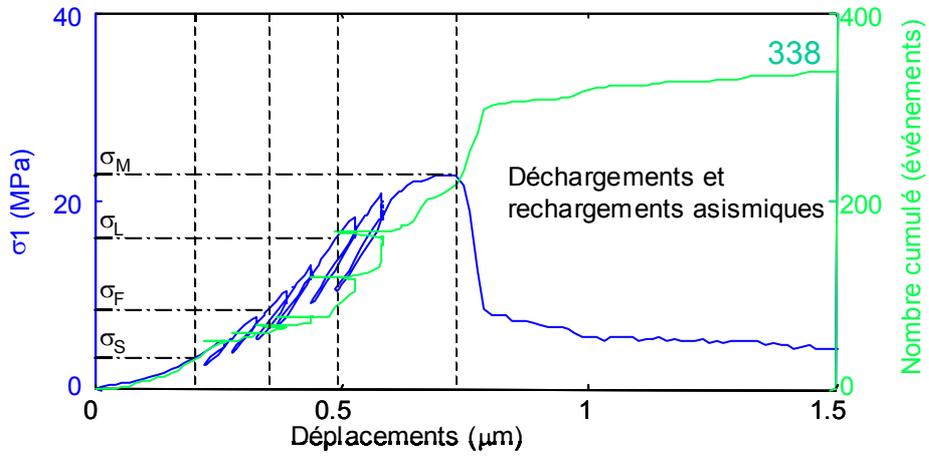
$$V_p(A_i) \approx V_p(C_i)$$

$$Am(A_i) \approx Am(C_i)$$

V_p axiale augmente
 V_p transversales diminuent

Am axiale constante
 Am transversales diminuent

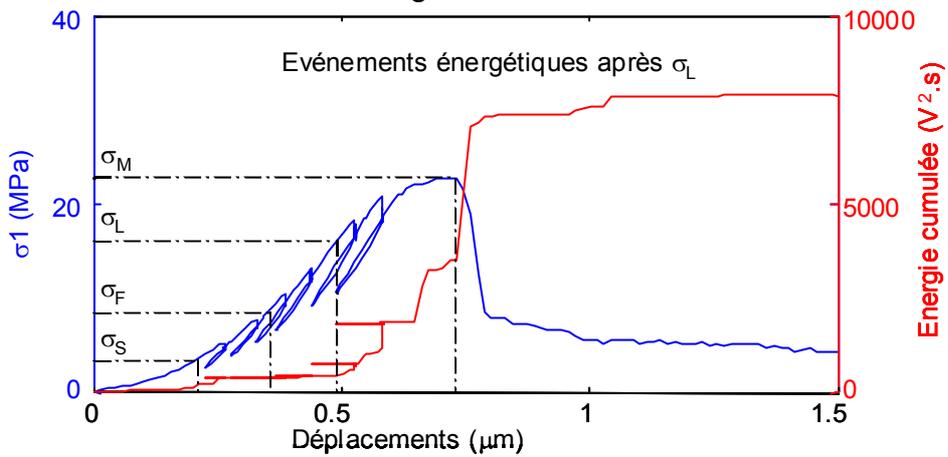
Activité acoustique gm0203s3



Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	% d'événements précédant le seuil
σ_S	3,4	29	8,5
σ_F	8,5	61	18
σ_L	16,1	88	26
σ_M	22,8	218	64,5

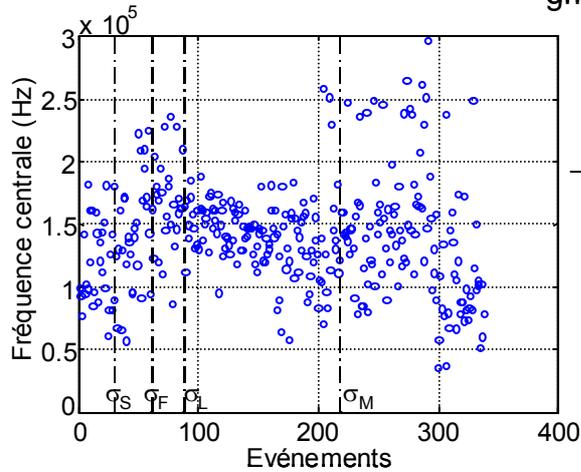
Analyse énergétique

gm0203s3



Analyse fréquentielle

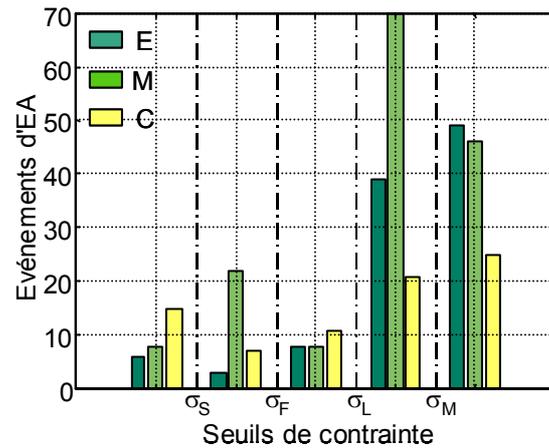
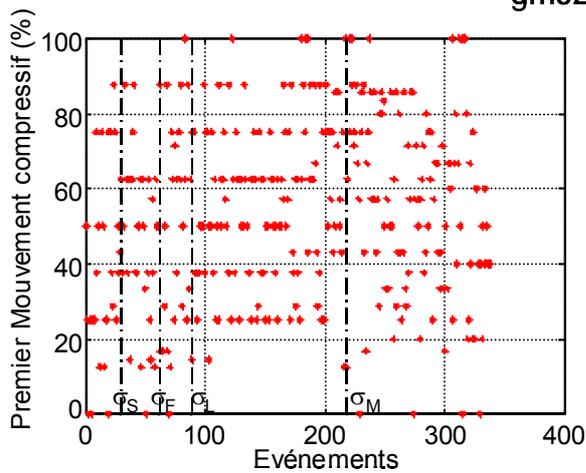
gm0203s3



Intervalle de contrainte (seuils)	Fréquence centrale maximale (kHz)
pre- σ_S	200
$\sigma_S - \sigma_F$	220
$\sigma_F - \sigma_L$	240
$\sigma_L - \sigma_M$	180
post- σ_M	250

Analyse du premier mouvement

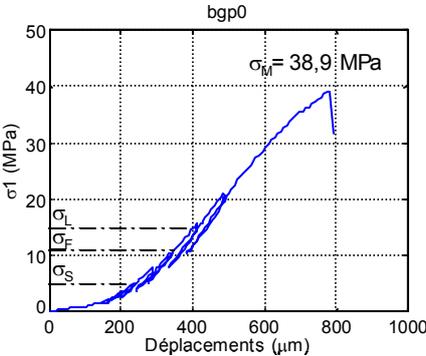
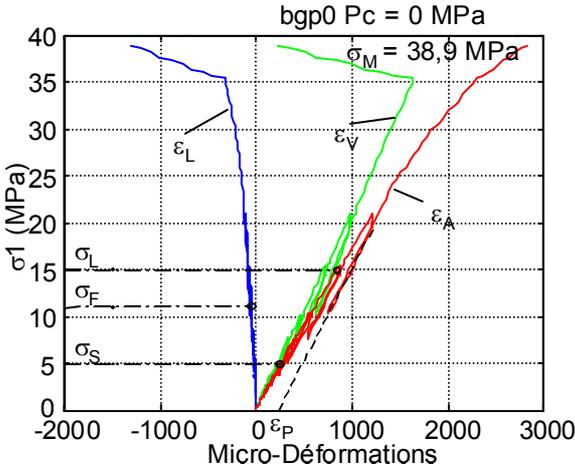
gm0203s3



Intervalle de contrainte (seuils)	Type de mécanisme majoritaire
pre- σ_S	compression
$\sigma_S - \sigma_F$	mixte (cisaillement)
$\sigma_F - \sigma_L$	compression
$\sigma_L - \sigma_M$	mixte
post- σ_M	extension

C.5 Compression uniaxiale d'une arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune (bgp0-MAV18)

Résultats mécaniques



Cycles (déchargement-rechargement)
linéaires, réversibles,
hystérésis très faible

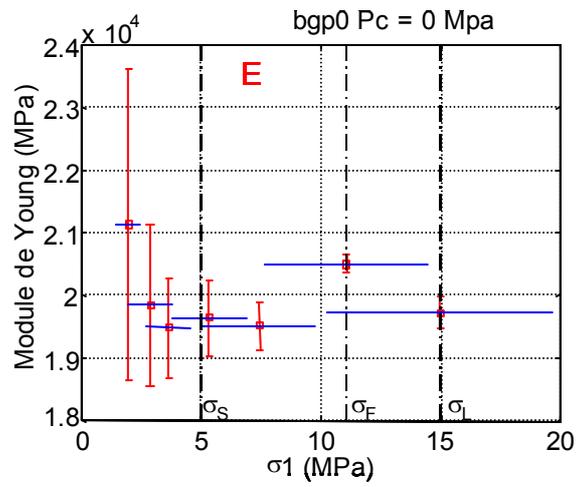
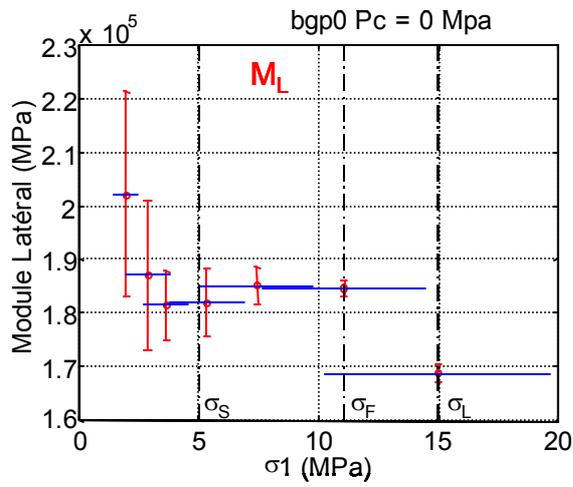
Déformations permanentes (ϵ_p)

Pas de dilatance

Comportement post-pic très fragile

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	5	12,8
σ_F	11	28,3
σ_L	15	38,5
σ_M	38,9	100

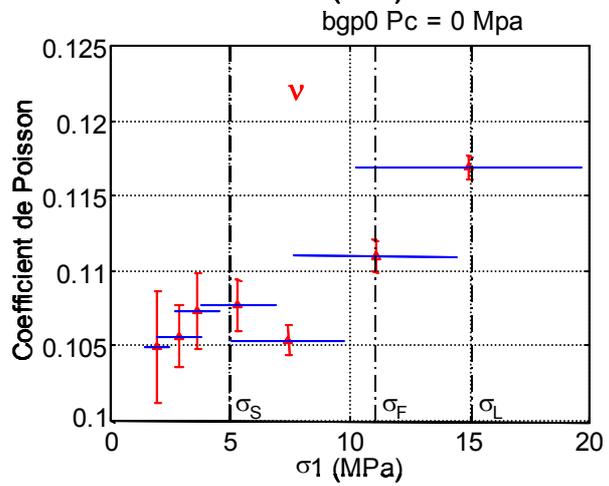
Résultats mécaniques (suite)



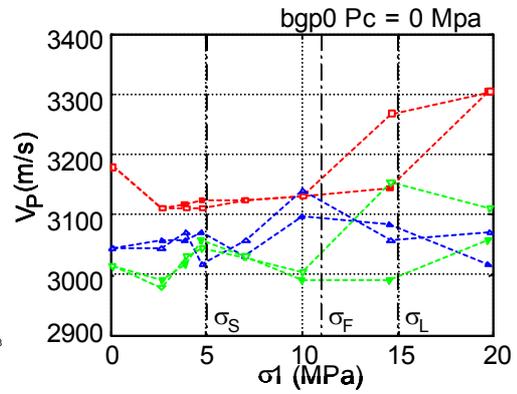
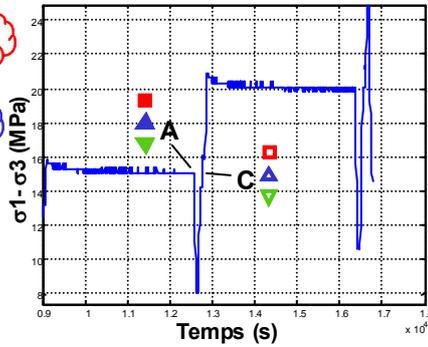
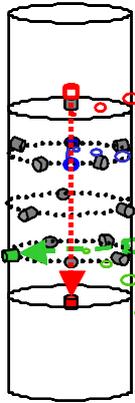
M_L diminue (suggestif)

E diminue (suggestif)

ν augmente



Vitesses de propagation des ondes P et atténuation



$$V_p(A_i) \approx V_p(C_i)$$

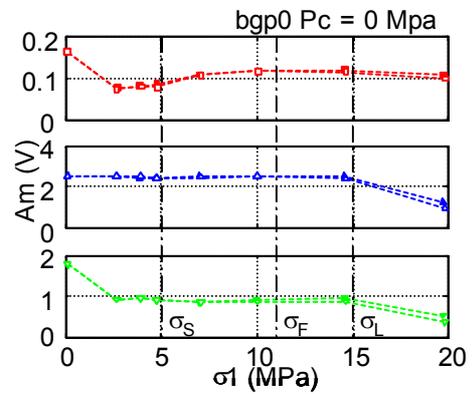
$$A_m(A_i) \approx A_m(C_i)$$

V_p axiale augmente

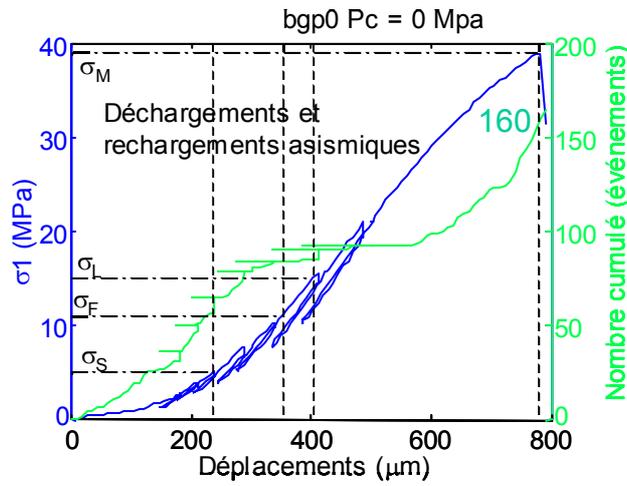
V_p transversales constantes

A_m axiale constante au-delà de σ_S

A_m transversales diminuent au-delà de σ_F

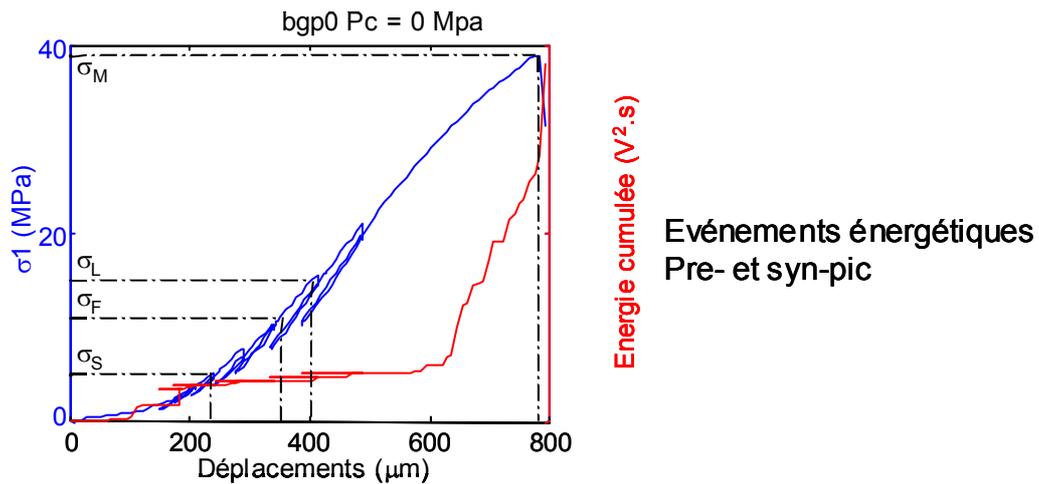


Activité acoustique

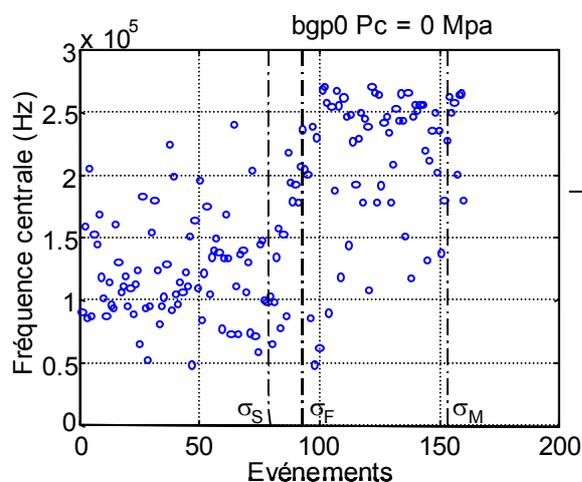


Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	% d'événements précédant le seuil
σ _S	5	79	49
σ _F	11	93	58
σ _L	15	93	58
σ _M	38,9	154	96

Analyse énergétique

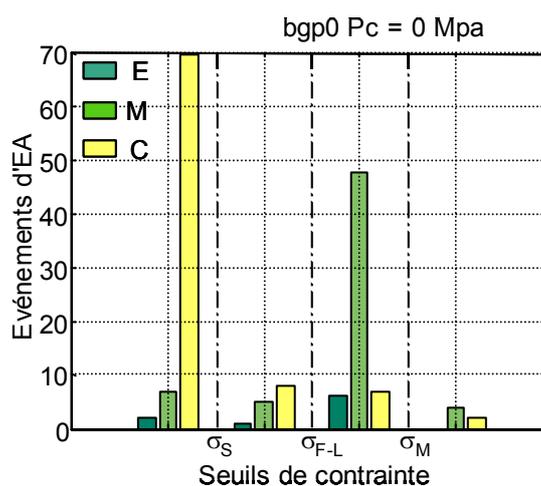
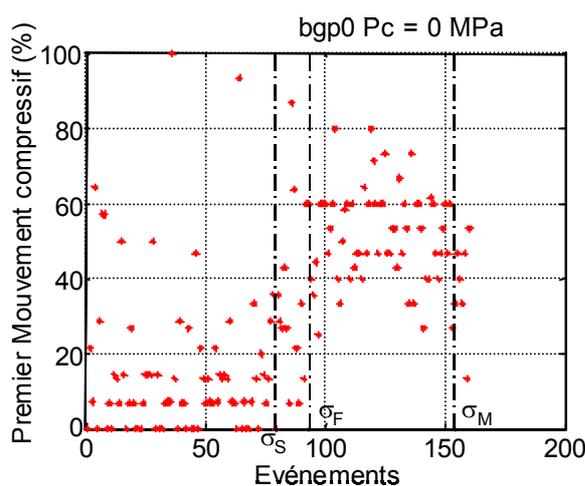


Analyse fréquentielle



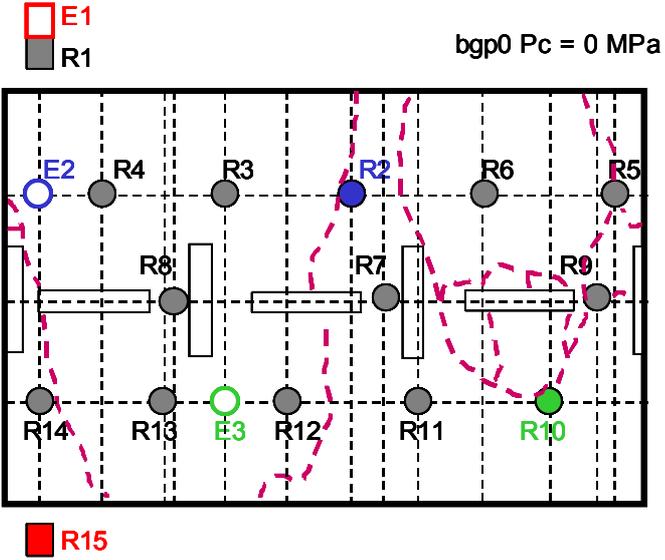
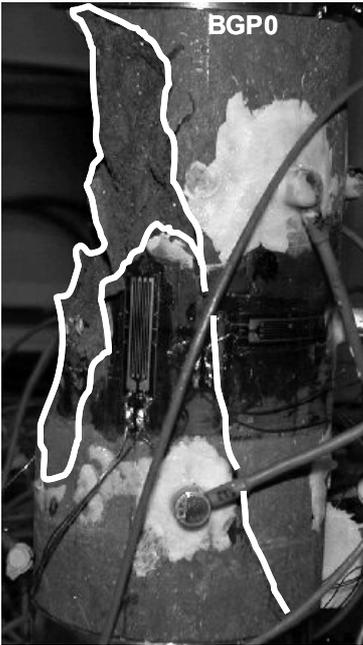
Intervalle de contrainte (seuils)	Fréquence centrale maximale (kHz)
pre- σ_S	240
$\sigma_S - \sigma_F$	220
$\sigma_F - \sigma_M$	270
post- σ_M	270

Analyse du premier mouvement



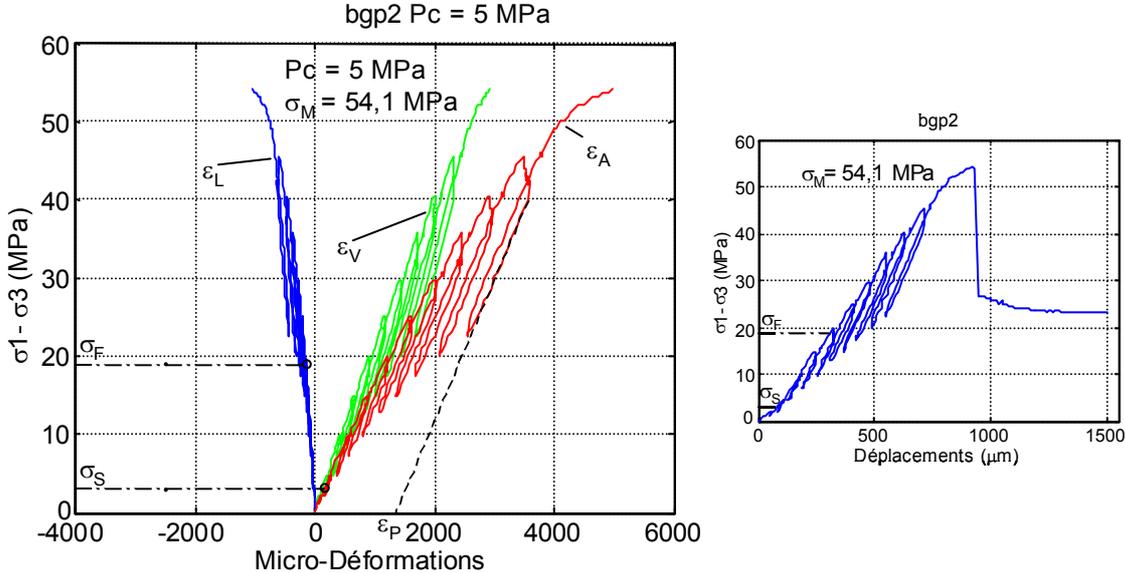
Intervalle de contrainte (seuils)	Type de mécanisme majoritaire
pre- σ_S	compression
$\sigma_S - \sigma_{F-L}$	compression
$\sigma_{F-L} - \sigma_M$	mixte (cisaillement)
post- σ_M	mixte

Observations macroscopiques



C.6 Compression triaxiale d'une arénite ferrifère à poches argileuses de la couche brune (bgp2-MAV11T)

Résultats mécaniques



Cycles (déchargement-rechargement)
linéaires, réversibles,
hystérésis peu marquée

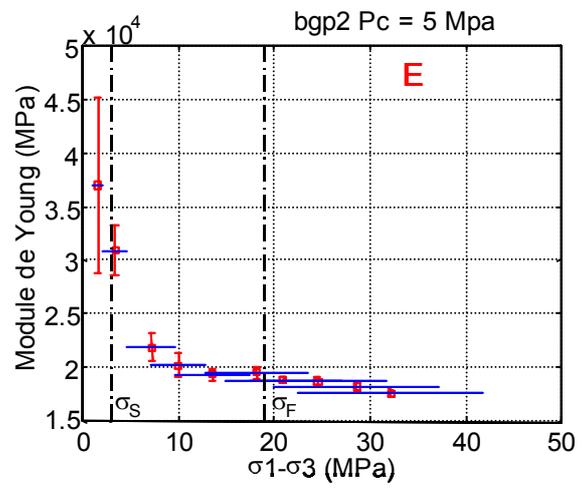
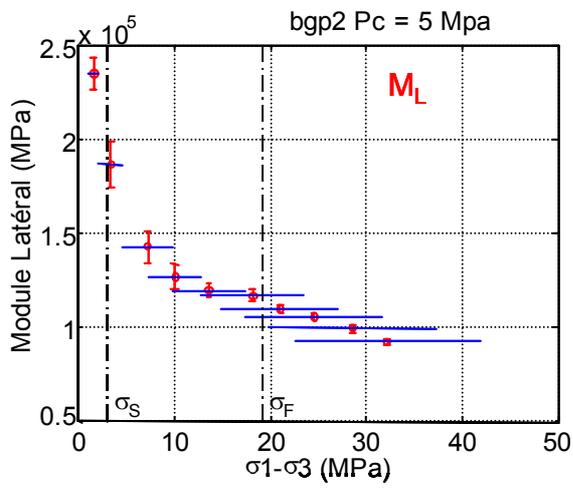
Déformations permanentes (ϵ_P)

Pas de dilatance

Comportement post-pic fragile

Seuils	Contrainte (MPa)	% contrainte maximale
σ_S	3	5,5
σ_F	119	35,1
σ_M	54,1	100

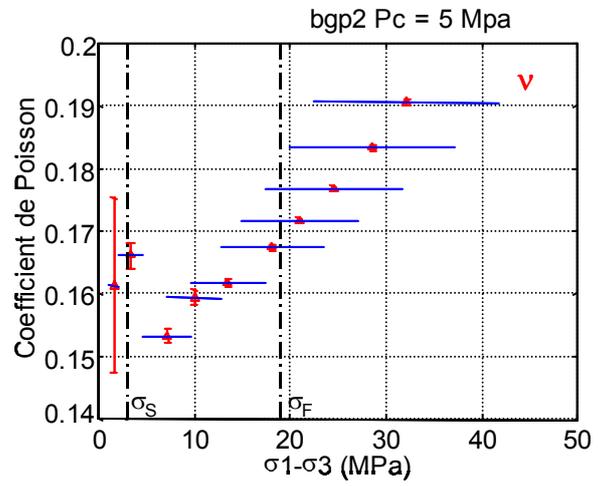
Résultats mécaniques (suite)



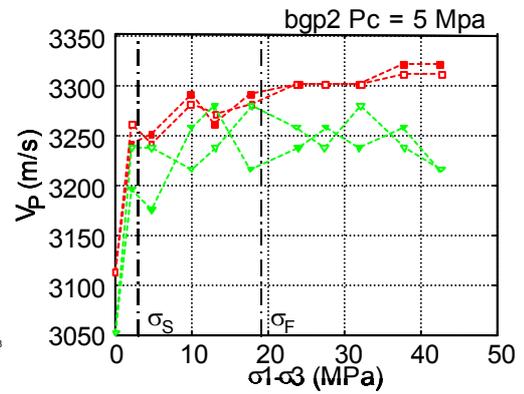
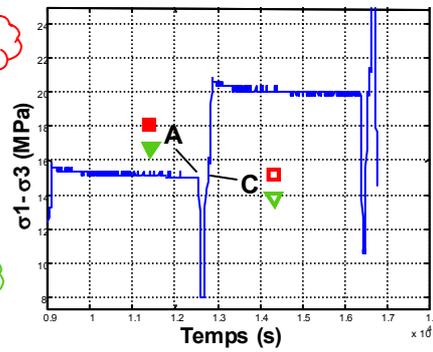
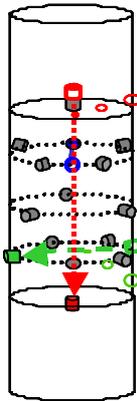
M_L diminue

E diminue

ν augmente



Vitesses de propagation des ondes P et atténuation

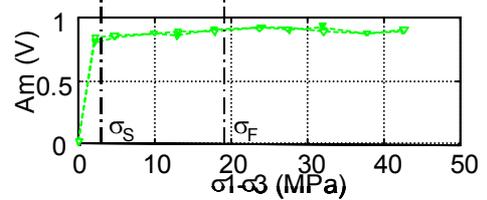
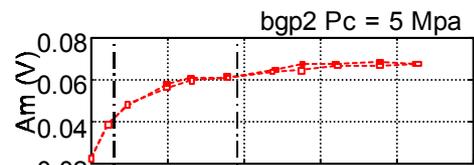


$$V_p(A_i) \approx V_p(C_i)$$

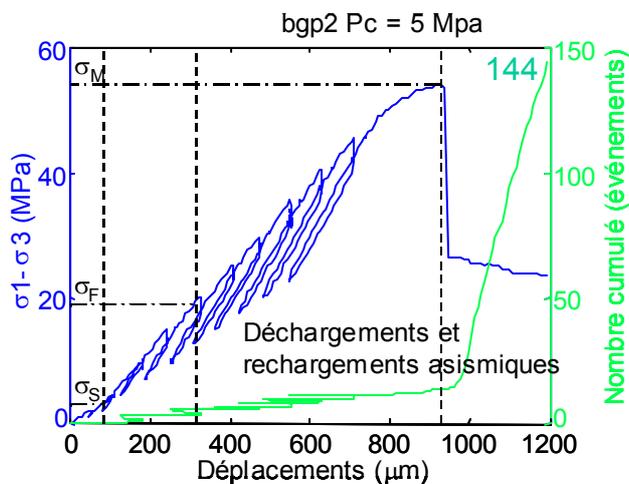
$$A_m(A_i) \approx A_m(C_i)$$

V_p axiale augmente
 V_p transversale fluctue

A_m axiale augmente
 A_m transversales constante

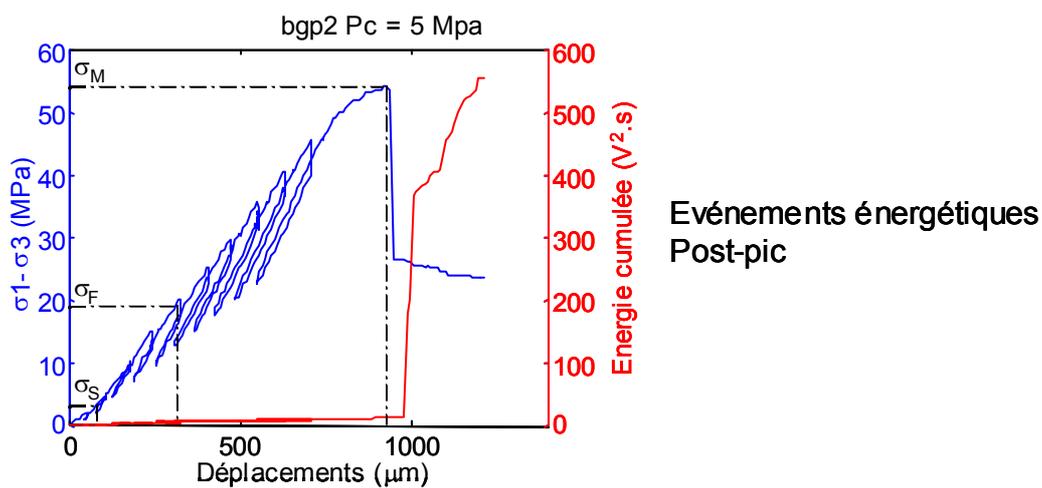


Activité acoustique

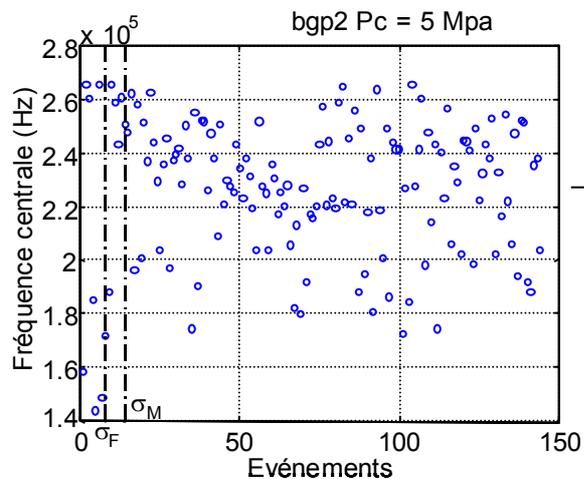


Seuils	Contrainte (MPa)	Nombre d'événements d'EA précédant le seuil	% d'événements précédant le seuil
σ _S	3	0	0
σ _F	19	8	5,5
σ _M	54,1	14	9,7

Analyse énergétique

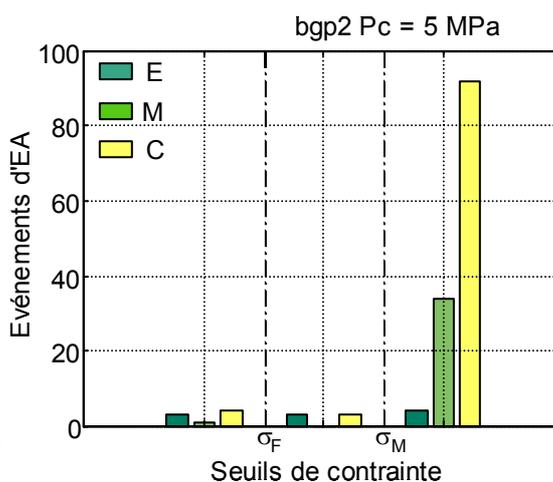
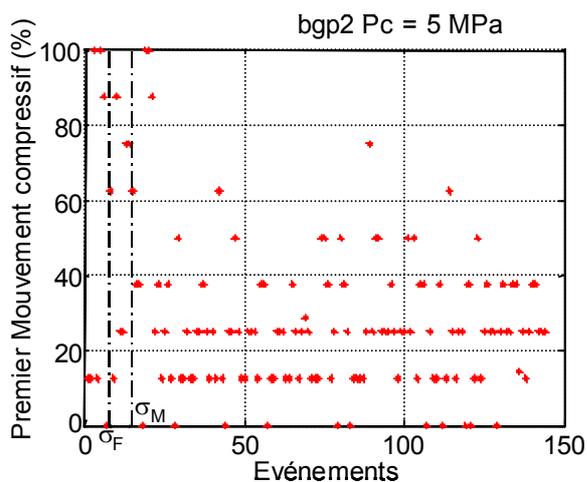


Analyse fréquentielle



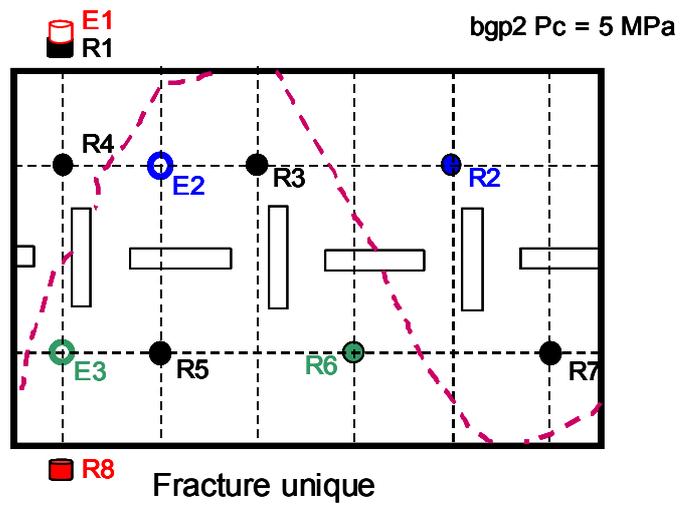
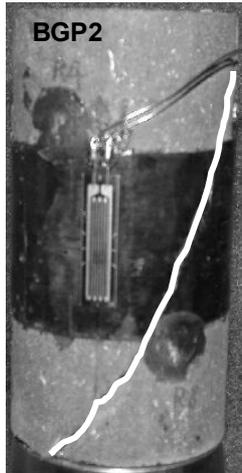
Intervalle de contrainte (seuils)	Fréquence centrale maximale (kHz)
pre- σ_F	270
$\sigma_F - \sigma_M$	270
post- σ_M	260

Analyse du premier mouvement



Intervalle de contrainte (seuils)	Type de mécanisme majoritaire
pre- σ_F	compression
$\sigma_F - \sigma_M$	compression, extension
post- σ_M	compression

Observations macroscopiques



AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Madame Maria ZAMORA, Professeur, Institut Physique du Globe de Paris

Monsieur Jean SCHMITTBUHL, Directeur de Recherche, Institut Physique du Globe de Paris

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur WASSERMANN Jérôme

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Étude expérimentale de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Génie civil - Hydrosystème - Géotechnique** »

Fait à Vandoeuvre, le 30 août 2006

Le Président de l'I.N.P.L.,

L. SCHUFFENECKER



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

Résumé

Afin de mieux comprendre les processus d'endommagement des roches sollicitées mécaniquement, nous avons mené une étude « micro-macro » de l'endommagement au sens où nous avons réalisé des mesures microscopiques et macroscopiques de son évolution durant un essai mécanique. Cette étude a ainsi comporté :

- des mesures de modules élastiques avant la rupture macroscopique ;
- des mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques et d'atténuation ;
- des mesures d'activité acoustique (événements d'EA).

De cette étude expérimentale, se dégagent les résultats suivants :

- Il existe une remarquable cohérence entre les trois types de mesures effectuées.
- L'endommagement de roches aux comportements macroscopiques différents découle de micromécanismes eux aussi différents. Pour des roches dilatantes, on observe des micromécanismes en extension (Mode I). L'endommagement de roches non-dilatantes résulte de micromécanismes en cisaillement.
- Une corrélation entre le contenu fréquentiel des événements d'EA et le type de micromécanismes est observée. Les micromécanismes en extension (Mode I) ont le contenu fréquentiel le plus élevé. Les micromécanismes en compression (fermeture de microfissures, de vides inter-granulaires) ont un contenu fréquentiel basse fréquence. Les micromécanismes de cisaillement ont un contenu fréquentiel intermédiaire aux deux précédents.

EXPERIMENTAL STUDY ON ROCKS DAMAGING FROM ACOUSTIC METHODS

Abstract

Our aim is here a better understanding of damage process of stressed rocks. We have therefore conducted a “micro-macro” study of the rock damage in the sense that we have realized microscopic and macroscopic measurements of its evolution during mechanical tests.

This study has consisted of :

- measurements of elastic modulus before the macroscopic rupture ;
- measurements of the velocity of elastic waves and attenuation ;
- measurements of acoustic activity (AE events).

This study led to the following results :

- Results from the three types of measurements are consistent.
- Damage of rocks which have different macroscopic behaviours follows from micro-mechanisms which are also different. For dilative rocks, we observe tensile micro-mechanisms (Mode I). For not dilative rocks, damage results from shear microscopic process.
- A correlation between micro-mechanisms type (compressive, tensile, shear) and the frequency of AE events is observed. Compressive microscopic process such as microcrack closure at low frequency. Tensile AE sources are high frequency. Shear micromechanisms are characterized by intermediate frequency.

Discipline : Mécanique des roches

Mots-clés : endommagement, émissions acoustiques, propriétés élastiques, vitesse des ondes P, atténuation, essai mécanique, minerai de fer.

LABORATOIRE ENVIRONNEMENT, GEOMECANIQUE & OUVRAGES

Rue du Doyen Marcel Roubault BP 40 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy