HAL
open science

Déformation et rupture dans les roches tendres et les sols indurés : comportement homogène et localisation

Pierre Bésuelle

To cite this version:

Pierre Bésuelle. Déformation et rupture dans les roches tendres et les sols indurés : comportement homogène et localisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1999. Français. NNT : . tel-00069471

HAL Id: tel-00069471

https://theses.hal.science/tel-00069471

Submitted on 17 May 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée par

Pierre BÉSUELLE

titulaire de l'Agrégation de Génie Civil

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

l'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
(arrêté ministériel du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

spécialité : Mécanique

Déformation et rupture dans les roches tendres et les sols indurés : comportement homogène et localisation

---

Date de soutenance : 23 Juin 1999

Composition du jury :

Président	M. René CHAMBON	Professeur à l'U.J.F., Grenoble
Rapporteurs	M. Jian fu SHAO	Professeur à l'E.U.D.I.L., Lille
	M. Jean SULEM	Directeur de recherche à l'E.N.P.C., Paris
Examinateurs	M. Jacques DESRUES	Directeur de recherche au C.N.R.S., Grenoble
	M. Yves GUÉGUEN	Professeur à l'E.N.S., Paris
Invité	M. Nasser HOTEIT	Chef de service DS/GM, ANDRA

Thèse préparée au sein du Laboratoire Sols Solides Structures de Grenoble
laboratoire mixte : U.J.F. - I.N.P.G. - C.N.R.S.

A mes Parents, Emmanuel, Sophie et Stéphane

Cela signifie qu'il est expert dans l'art de considérer les choses comme plus simples qu'elles ne le sont.

Le gai savoir. Friedrich Nietzsche.

Remerciements

Ce travail de thèse à été réalisé au sein du laboratoire Sols, Solides, Structures de Grenoble, et a été financé par une bourse AMN du Ministère de l'Education nationale, de la Recherche et de la Technologie.

Je tiens à souligner la profonde estime que j'ai pour le travail d'encadrement de Jacques Desrues. J'ai eut le plaisir d'apprécier la confiance et la pédagogie dont il a fait preuve à mon égard. Je l'en remercie très vivement.

C'était également un grand plaisir que René Chambon préside mon jury. Ses conseils et son intérêt au cours de ce travail m'ont été des facteurs stimulants.

Je remercie Messieurs Jean Sulem et Jian-Fu Shao d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Leur avis scientifiques ont été très fructueux pour moi, et leurs appréciations m'encouragent.

C'était un plaisir également qu' Yves Guéguen vienne représenter la communauté géophysicienne. Je le remercie profondément de m'avoir facilité la fin de ce travail de thèse au sein de son équipe de recherche.

Merci également à Monsieur Nasser Hoteit d'avoir accepté notre invitation.

Je n'oublis pas toute l'énergie qu'a mise Michel Küntz dans notre collaboration, elle a été extrêmement fructueuse pour moi. Merci à Suzanne Raynaud pour s'être investie sur mon travail, son apport m'a été très précieux. Quel dommage que la malchance ait suspendu ma collaboration avec Frédéric Mazerolle.

Merci à Bernard Rey, Antoine Miras, Alexandre Martin et Maurice Reveillet pour avoir débloqué quelques problèmes d'expérimentateur. Tous mes plus vifs encouragements vont à Pascal Charrier.

Je remercie également mes collègues de thèse, Gilles Armand, Stéphane Crochepeyre, Olivier Gay, Laurent Godard et Vincent Roger dont la bonne humeur a été un excellent soutien. J'ai apprécié aussi toute la sollicitude d'Yves Méheust et de Guy Simpson à l'ENS, avant le rush final.

Abstract

Strain localisation by shear banding in soft rocks and hard soils is studied experimentally and theoretically.

The experimental work concerns three different materials: a Vosges sandstone, a stiffer silty rock from Gard (France) and a soft marl. The first part of this work involves a description of a new triaxial cell and the development of an internal strains measuring device. Following this, a set of tests on a Vosges sandstone confined at pressures up to 60 MPa are presented. The study concerns the homogeneous behaviour of the rock in compression, extension and isotropic stress paths, the detection of the onset of strain localisation, the characterisation of the localisation pattern by a macroscopic observation, a X-rays CT measurement and by a quantitative microstructural analysis. The evolution of fracture from the initiation stage to the failure of the specimen is studied by using the false relief stereophotogrammetry in a silty rock from Gard, which is stiffer than the Vosges sandstone. For the Beaucaire marl (France), the normally consolidated behaviour is explored with measurements of the permeability during the deformation, in isotropic or deviatoric stress paths.

The theoretical work presents the new constitutive law CloE-Rock specifically developed for soft rocks, from the model of hypoplastic non linear incremental laws CloE. It takes into account a mean pressure dependency on the volumetric behaviour of the material. The identification of the law is made on the Vosges sandstone studied in the first part. A parametric analysis of an explicit criterion of bifurcation in localised mode is performed to calibrate the theoretical results in comparison with the experimental measurements of the critical stress and strain at the onset of localisation and the shear band's orientation. This step shows the philosophy behind using the constitutive law, which considers the observation of the localisation to provide a calibration of the law's parameters.

Keywords

Strain Localisation, Failure, Shear band, Bifurcation theory, Triaxial test, Theoretical model, Sandstone, Cohesive soil, X ray computed tomography, Fracture propagation, Stereophotogrammetry, Permeability test, Microstructure, Ductile fragile transition.

Table des matières

1 Introduction **7**

2 Localisation **11**
2.1 Cadre théorique 11
2.1.1 Bifurcation par localisation : généralités 12
2.1.2 Bifurcation par localisation : le cas de CLoE 14
2.1.2.1 Formulation du modèle 14
2.1.2.2 Critères de bifurcation 15
2.1.2.3 Recherche de solutions 16
2.1.3 Existence et unicité 17
2.2 Cadre expérimental 19
2.2.1 Détection par mesures de déformation 22
2.2.1.1 Mesures multiples 22
2.2.1.2 Mesures du champ de déformation 23
2.2.1.3 Mesures par tomographie aux rayons X 26
2.2.2 Détection par mesures soniques 27
2.2.3 Détection par observations microscopiques 30
2.3 Conclusion 33

I Observations Expérimentales 35

3 Installation expérimentale **37**
3.1 Description de la cellule triaxiale 37
3.1.1 Principe de l'essai triaxial 37
3.1.2 Cellule autonome 38
3.1.3 Générateurs de pression 43
3.1.4 Régulateurs électroniques 44
3.1.5 Acquisition des mesures 46
3.1.6 Logiciel de contrôle 47
3.1.7 Capteurs de mesure 48
3.1.8 Conclusion 48
3.2 Instrumentation de mesure de déformation 48

3.2.1 Motivation 48
3.2.2 Techniques existantes 50
3.2.3 Instrumentation développée dans notre étude 52
3.2.3.1 Capteur axial 53
3.2.3.1.1 Description 53
3.2.3.1.2 Etude théorique 56
3.2.3.1.3 Etalonnage 57
3.2.3.1.4 Comparaison avec une mesure externe . . . 58
3.2.3.2 Capteur radial 60
3.2.3.2.1 Description 60
3.2.3.2.2 Etude théorique 61
3.2.3.2.3 Etalonnage 61
3.2.3.3 Influence de la pression de confinement 63
3.2.3.4 Stabilité 63
3.2.4 Conclusion 64

4 Essais triaxiaux sur grès 67
4.1 Matériau 67
4.2 Méthodologie 69
4.2.1 Préparation 69
4.2.2 Anti-frettage 71
4.2.3 Montage 71
4.2.4 Pilotage de l'essai 72
4.2.5 Traitement des données 73
4.3 Résultats 74
4.4 Rôle de l'eau sur le grès 74
4.5 Essais de compression isotrope 76
4.6 Essais de compression déviatorique 79
4.6.1 Essais d'élancement 2 79
4.6.1.1 Essais uniaxiaux 79
4.6.1.2 Essais à faibles confinements 80
4.6.1.3 Essais à confinements intermédiaires 81
4.6.1.4 Essais à forts confinements 85
4.6.1.5 Evolution du comportement avec le confinement . . . 85
4.6.2 Essais d'élancement 1 90
4.6.3 Détection de la localisation 92
4.6.3.1 Principe de la détection 92
4.6.3.2 Résultats de la détection 100
4.6.3.2.1 analyse globale 100
4.6.3.2.2 analyse détaillée 104
4.6.4 Bandes de cisaillement 118
4.6.4.1 Observation générale 118
4.6.4.2 Evolution des angles de bande 119

4.6.4.3 Direction des déplacements 123
4.6.5 Comportement après localisation 125
4.6.6 Conclusion sur les essais de compression 127
4.7 Essais d'extension axisymétrique 133
4.7.1 Principe de l'essai 133
4.7.2 Forme des échantillons 133
4.7.3 Résultats 134
4.7.3.1 Réponse globale 134
4.7.3.2 Détection de la localisation 138
4.7.3.3 Bandes de cisaillement 139
4.7.4 Conclusion sur les essais d'extension 143
4.8 Essais pseudo-isotropes 145
4.8.1 Intérêt de ce chemin 145
4.8.2 Résultats 145
4.9 Analyse tomographique 148
4.9.1 Principe du scanner 148
4.9.2 Etudes existantes 150
4.9.3 Problème de la résolution 151
4.9.4 Calibration 153
4.9.5 Résultats 153
4.9.5.1 Bande de cisaillement dilatante 153
4.9.5.2 Bande de cisaillement contractante 156
4.9.6 Conclusion 157
4.10 Analyse microscopique 160
4.10.1 Méthodes 160
4.10.1.1 Techniques employées 160
4.10.1.2 Relation entre les mesures surfaciques et spatiales . . 160
4.10.2 Résultats 162
4.10.2.1 Description des échantillons 162
4.10.2.2 Analyse de la déformation 164
4.10.2.2.1 La fissuration 164
4.10.2.2.2 Evolution spatiale de la porosité 168
4.10.3 Conclusion de l'étude microscopique 168
4.11 Conclusion et discussion sur les essais triaxiaux 171

5 Essais de fracturation sur une siltite 177
5.1 Introduction 177
5.2 Matériau 178
5.3 Essais en compression simple 181
5.3.1 Dispositif expérimental 182
5.3.1.1 Instrumentation 182
5.3.1.2 Conditions d'essai 183
5.3.2 Résultats 184

5.3.2.1 Réponse globale 184
5.3.2.2 Précurseurs de la rupture 184
5.3.2.3 Mode de rupture 187
5.3.3 Conclusion 187
5.4 Rupture progressive sur parallélépipèdes 187
5.4.1 Techniques expérimentales 190
5.4.1.1 Rigidification de la presse 190
5.4.1.2 La stéréophotogrammétrie de faux relief 193
5.4.1.2.1 Principe de la méthode 194
5.4.1.2.2 Analyse des discontinuités 195
5.4.1.2.3 Précision des mesures 197
5.4.1.3 Préparation des éprouvettes 198
5.4.1.3.1 Géométrie 198
5.4.1.3.2 Instrumentation 198
5.4.2 Résultats 199
5.4.2.1 Expérience pamar1 200
5.4.2.1.1 Comportement mécanique 200
5.4.2.1.2 Cinématique de la fracturation 200
5.4.2.1.3 Champs de déformation 205
5.4.2.1.4 Saut de déplacement 208
5.4.2.2 Expérience pamar2 213
5.4.2.2.1 Comportement mécanique 213
5.4.2.2.2 Cinématique de la fracturation 214
5.4.2.2.3 Champs de déformation 216
5.5 Discussion et conclusion sur les essais de fracturation 218

6 Perméabilité et déformation : étude sur une marne 223
6.1 Matériau 223
6.1.1 Prélèvement 223
6.1.2 Caractérisation 224
6.1.3 Teneur en eau 224
6.2 Essais 226
6.2.1 Protocole 226
6.2.1.1 Préparation et mise en place 226
6.2.1.2 Compression 227
6.2.1.3 Perméabilité 229
6.2.2 Résultats 229
6.2.2.1 Consolidation 229
6.2.2.2 Ecrasement déviatoire 230
6.2.2.3 Mesures de perméabilité 231
6.3 Conclusion 234

Conclusion de l'étude expérimentale 235

II Études Théoriques 237

7 Modélisation **241**
7.1 Principe de CLoE 241
7.1.1 Forme de CLoE 242
7.1.2 Surface limite 242
7.1.3 Cohésion 244
7.1.4 Tenseurs constitutifs 244
7.1.5 Consistance 245
7.1.6 Chemins de référence 246
7.1.6.1 Compression triaxiale 246
7.1.6.2 Extension triaxiale 247
7.1.6.3 Compression isotrope 249
7.1.6.4 Essai pseudo-isotrope 250
7.1.6.5 Comparaison avec CloE Sols 250
7.1.7 Interpolations de la loi 251
7.1.7.1 Interpolation de A sur l'angle de phase 253
7.1.7.2 Interpolation de b' sur l'angle de phase 253
7.1.7.3 Interpolation de A sur le déviateur 254
7.1.7.4 Interpolation du module de cisaillement 255
7.1.8 Identification de la loi : principe 255
7.1.8.1 Surface limite 255
7.1.8.2 Triaxial de compression 256
7.1.8.3 Compression isotrope 257
7.1.8.4 Triaxial d'extension 257
7.1.8.5 Essai pseudo-isotrope 258
7.1.8.6 Module de cisaillement 259
7.2 Identification de CLoE sur le grès des Vosges 259
7.2.1 Identification de la surface limite 259
7.2.2 Identification en compression triaxiale 260
7.2.3 Identification en compression isotrope 262
7.2.4 Identification en extension triaxiale 262
7.2.5 Identification sur chemin pseudo-isotrope 265
7.3 Conclusion 266

8 Etude paramétrique du critère de bifurcation **267**
8.1 Influence de ω 268
8.2 Influence de l'angle de frottement 274
8.3 Influence des modules de décharge 280
8.4 Influence de la pente de dilatance 281
8.5 Influence conjuguée des modules de décharge en compression et de la pente de dilatance 284
8.6 Conclusion de la prospection paramétrique 284

Conclusion de l'étude théorique **289**

Conclusion générale et perspectives **291**

A Capteurs de déformation internes **295**
A.1 Etude théorique du capteur axial 295
A.2 Etude théorique du capteur radial 297

B Montage de préparation des échantillons **299**

C Détermination des angles des plans de cisaillement **301**

D Essais triaxiaux : résultats **307**
D.1 Essais triaxiaux de compression 307
D.2 Essais triaxiaux d'extension 346

E Principe des mesures de percolation **355**

Chapitre 1

Introduction

La prédiction de la rupture dans les matériaux demeure un enjeu important. Le domaine du génie civil est constamment confronté au problème de la rupture dans les géomatériaux, que ce soit dans les sols au sens large (sable, argile, roche) que dans les matériaux artificiels (béton ...). La première étude publiée au sujet de la rupture dans certains de ces matériaux est probablement l'essai de Charles-Augustin Coulomb de 1773.

La rupture se manifeste le plus souvent, en témoignent les modes de rupture des massifs naturels, par l'apparition d'une zone étroite dans laquelle se concentrent l'essentiel des gradients de déplacement.

Les travaux de recherche concernant ce domaine tendent à déterminer les conditions qui amènent un matériau à se rompre. Des théories ont été développées à cet effet, et des reconstitutions en laboratoire de rupture ont été mises au point.

L'approche expérimentale permet de mettre en évidence avec précision les modes de rupture. Les essais montrent que la rupture survient avec l'apparition de zones étroites, appelées encore *bandes de cisaillement* dans lesquelles la déformation, essentiellement de cisaillement, se localise. Les essais sur matériaux granulaires ont permis de très bien décrire le mécanisme de ces bandes étroites et d'épaisseur finie. Les essais sur roche mettent également en évidence ces bandes de localisation, comme l'illustre la figure 1.1 d'un échantillon de calcaire comprimé et présentant une organisation des zones de rupture en une série de plans, organisés de façon similaire aux bandes observées dans les sables (Desrues [56]).

La théorie de la bifurcation, initialement développée dans une approche dynamique (Hadamard [64], Thomas [143], Hill [72], Mandel [101]), puis développée pour une approche statique (Rice [122], Rudnicki et Rice [124], Rice [123]), prend en compte ces considérations expérimentales. Elle permet de prédire des conditions nécessaires pour que puissent exister de telles bandes de cisaillement. Elle considère l'existence d'une bande comme un problème de stabilité, dont la solution tient compte de la loi rhéologique du matériau.

Bien qu'initialement développée pour une argile surconsolidée, la théorie de la

FIG. 1.1 – *Exemple des surfaces de rupture observée après compression triaxiale à un confinement de* 60 MPa *sur un échantillon initialement cylindrique d'un calcaire d'Anstrude.*

bifurcation a essentiellement été appliquée aux matériaux granulaires (Darve [49], Desrues et Chambon [54] [36], Kolymbas [85], Vardoulakis *et al.* [150] [152]). Elle permet, outre la prédiction d'un seuil de bifurcation, de déterminer l'inclinaison des bandes de cisaillement par rapport aux orientations des sollicitations extérieures. Plus récemment, des applications sur des roches ont commencé à paraître (Chambon *et al.* [37], Sulem *et al.* [139], Vardoulakis *et al.* [151]).

La théorie de bifurcation, sur ce domaine, vient concurrencer la mécanique de la rupture (Ashby [4], Griffith [63], Horii [74], Nemat-Nasser [111], Scavia [129]). Cette dernière considère que la rupture dans les roches est due à l'existence d'une fracture, c'est à dire d'une discontinuité du matériau, à l'échelle macroscopique. Elle étudie les conditions pour qu'une fissure préexistante dans le matériau se propage.

Appliquer la théorie de la bifurcation nécessite une approche expérimentale et une approche théorique toutes deux menées en parallèle. De façon schématique, l'approche expérimentale doit déterminer les moments d'apparition de la localisation et l'inclinaison de ces bandes. L'approche théorique doit proposer une loi de comportement décrivant au mieux le comportement rhéologique du matériau et mettre en évidence un critère décrivant l'existence possible d'une bande de cisaillement.

Le travail présenté dans ce mémoire relève des deux aspects, une étude expérimentale de plusieurs roches, et une étude théorique sur la modélisation et l'analyse en bifurcation. Ma contribution a porté essentiellement sur les points suivants :

partie expérimentale :

- Mise en fonctionnement et développements finaux d'une cellule triaxiale haute pression (chapitre 3.1).

- Développement d'une instrumentation interne à la cellule, permettant des mesures de déformation axiale et radiale sur les échantillons de roche, de façon globale, nécessaires pour une étude du seuil de localisation (chapitre 3.2).

  Une large campagne d'essais sur un grès des Vosges, en faisant varier le confinement, l'élancement, sur plusieurs chemins de contrainte (compression isotrope, triaxiale, extension triaxiale, essais pseudo-isotrope). L'observation systématique du seuil de localisation et des structures de localisation a été faite (chapitre 4).

- Une analyse des échantillons rompus par la technique de tomographie aux rayons X (chapitre 4.9).

- Une étude de la propagation de fracture sur une marne raide (siltite du Gard) (chapitre 5).

- Une étude mécanique d'une marne argileuse tendre dans le domaine normalement consolidé, avec mesure de la perméabilité au cours des essais (chapitre 6).

partie théorique :

- Le développement d'une loi de comportement issue du modèle de loi CLoE, pour simuler le comportement du grès des Vosges (chapitre 7).

- L'étude paramétrique du critère de bifurcation explicite de la loi *CLoE Roche* (chapitre 8).

Chapitre 2

Localisation

2.1 Cadre théorique

La théorie de la bifurcation appliquée à la mécanique prévoit le passage d'une solution unique d'équilibre, où un seul champ de déformation peut être solution d'un problème aux conditions limites considéré, à l'existence de plusieurs solutions, voire une infinité pour ce même problème. Le flambement d'une poutre en compression simple suivant son axe illustre bien cette démarche. Sur un premier domaine de chargement, la poutre se déforme en compression simple, puis à partir d'une charge critique, on peut montrer qu'il peut exister également un mode de déformation avec flexion; il y a donc perte d'unicité de la solution d'équilibre.

Dans un cadre plus général, il est possible de distinguer une bifurcation diffuse, et à l'inverse, une bifurcation localisée. Dans ce dernier cas, on passe d'une solution d'équilibre unique homogène ou quasi-homogène à la possibilité d'existence d'une solution où le champ de déformation présente une zone de forte concentration de la déformation. Nous ne nous intéressons ici qu'à ce second mode de bifurcation, puisque c'est celui qui correspond le mieux aux observations expérimentales de la rupture fragile dans les géomatériaux.

On introduit alors la notion de bande de cisaillement. C'est une zone linéaire, d'épaisseur régulière et non nulle, dans laquelle la déformation de cisaillement est relativement forte par rapport à la déformation à l'extérieur. Il existe une discontinuité de la déformation aux frontières de cette bande, mais le champ de déplacement reste quant à lui continu.

Cette description des bandes de cisaillement est proche des modes de ruptures observés dans les matériaux granulaires, bien que, particulièrement pour ces matériaux, la déformation ne soit qu'un concept. Desrues [52], à partir de techniques optiques de visualisation et de mesure du champ de déformation lors d'essais de type biaxiaux, montre clairement que quand un échantillon approche de sa rupture, il se forme une ou plusieurs bandes où les déplacements relatifs des grains sont beaucoup plus forts qu'à l'extérieur. L'échantillon semble alors constitué de blocs rigides séparés par ces bandes qui absorbent tous les déplacement imposés aux extrémités de

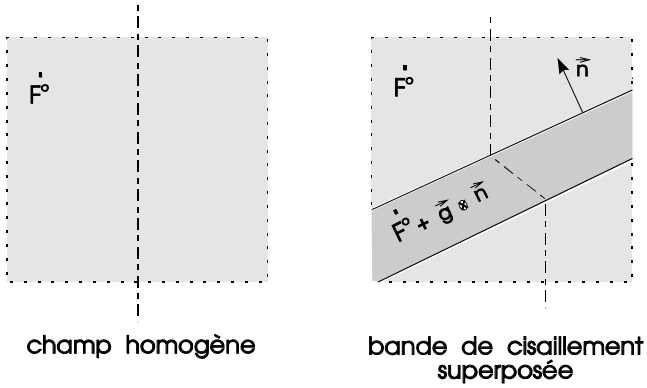


FIG. 2.1 – *Principe de superposition d'un mode de déformation en bande de cisaillement.*

l'échantillon.

2.1.1 Bifurcation par localisation : généralités

Les premiers travaux concernant le cadre quasi-statique sont marqués notamment par Rice [123], Rudnicki et Rice [124], Hill et Hutchinson [73], bien qu'ils découlent eux même de travaux sur la propagation d'onde d'accélération en milieu solide, du début du siècle (Hadamard [64]).

Rice considère un milieu homogène infini, non visqueux. A ce milieu est associé une solution fondamentale d'équilibre, basée sur un champ homogène de contrainte et de déformation. L'approche en bifurcation consiste à étudier l'existence possible d'une autre solution. Pour cela, il est fait une hypothèse sur cette deuxième solution, en introduisant une bande de cisaillement de longueur infinie, superposée au champ de déformation homogène (Fig. 2.1).

L'équilibre de cette solution doit répondre aux conditions de cinématique et de statique, tout en respectant la loi de comportement du matériau, tant à l'extérieur de la bande qu'à l'intérieur. Les développements qui suivent sont effectués en vitesse, le temps étant une indication du chargement ou de la déformation, mais ne joue pas un rôle significatif sur le comportement.

condition cinématique :

Si l'on note $\underline{L}^0$ le taux du gradient de transformation du champ homogène, alors dans la bande ce même taux (supposé homogène) s'écrira :

$$\underline{L}^1 = \underline{L}^0 + \vec{g} \otimes \vec{n}$$

Soit en notation indicielle :

$$L^1_{ij} = L^0_{ij} + g_i n_j \tag{2.1}$$

dans laquelle $\vec{n}$ est la normale à la bande et $\vec{g}$ est un vecteur a priori quelconque, mais qui est significatif de l'intensité et du mécanisme de déformation dans la bande

(cisaillement pur, ou avec ouverture ou fermeture de bande).

équilibre statique :
La condition d'équilibre statique locale, aux deux interfaces de la bande s'écrit :

$$\underline{\dot{\sigma}}^1.\vec{n} = \underline{\dot{\sigma}}^0.\vec{n}$$

Soit

$$\dot{\sigma}^1_{ij} n_j = \dot{\sigma}^0_{ij} n_j \tag{2.2}$$

avec $\dot{\sigma}^1$ et $\dot{\sigma}^0$ les contraintes de Cauchy, respectivement dans la bande et à l'extérieur, aux interfaces de celle-ci.

loi de comportement :
La relation constitutive relie la vitesse de contrainte à la vitesse du gradient de déformation. Cette relation est supposée être valide en dehors et aussi à l'intérieur de la bande de cisaillement. Si l'on considère $\overset{\nabla}{\underline{\sigma}}$ une dérivée objective du tenseur de contrainte de Cauchy, cette relation peut s'écrire :

$$\overset{\nabla}{\underline{\sigma}} = \mathcal{F}(\underline{L})$$

Cette dérivée objective peut être définie par exemple comme la dérivée de Jaumann. En terme de vitesse de contrainte de Cauchy, le relation précédente devient :

$$\underline{\dot{\sigma}} = \mathcal{G}(\underline{L})$$

Soit :

$$\underline{\dot{\sigma}}_{ij} = \mathcal{G}_{ij}(\underline{L}) \tag{2.3}$$

Si maintenant, on intègre la relation de comportement 2.3 dans la condition cinématique 2.1, puis dans l'équation d'équilibre local 2.2, on obtient la relation qui prévoit l'existence possible d'un mode de déformation localisé sous forme de bande de cisaillement :

$$[\mathcal{G}_{ij}(\underline{L}^0 + \vec{g} \otimes \vec{n}) - \mathcal{G}_{ij}(\underline{L}^0)] n_j = 0 \tag{2.4}$$

Dans le cas de lois de comportement linéaires en vitesse[1] , ou bien multi-linéaires accompagnées d'hypothèses de continuité ou de discontinuité (la bande appartient-elle au même domaine tensoriel de $\underline{L}$ que l'extérieur de la bande ?), le calcul peut être poursuivi pour amener à un critère de bifurcation de la forme $det(\vec{n}\, \underline{\underline{\mathcal{N}}}\, \vec{n}) = 0$, avec $\underline{\underline{\mathcal{N}}}$ le tenseur constitutif dans le domaine considéré telle que : $\underline{\dot{\sigma}} = \underline{\underline{\mathcal{N}}} : \underline{L}$.

1. On dit qu'une loi est linéaire en vitesse si la relation générale $\overset{\nabla}{\underline{\sigma}} = \mathcal{F}(\underline{L})$ se réduit à une relation linéaire $\overset{\nabla}{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{K}} : \underline{L}$ entre les tenseurs vitesse de contrainte et de déformation $\overset{\nabla}{\underline{\sigma}}$ et $\underline{L}$.

Ces développements ont fait l'objet de très nombreux travaux depuis une vingtaine d'années.

Pour les lois non-linéaires[2], qui ont l'avantage de permettre une meilleur description du comportement (Darve [48]), l'analyse en bifurcation nécessite a priori une exploration numérique à partir de la relation 2.4.

Les lois de comportement issues du modèle CLoE utilisé dans cette étude (Chambon *et al.* [36], [37]), bien que de type incrémentales non-linéaires, admettent cependant, grâce à leur formulation, un critère explicite présenté dans le paragraphe suivant.

2.1.2 Bifurcation par localisation : le cas de CLoE

Le modèle de lois CLoE, développé par Chambon et Desrues, s'éloigne de la classe des lois élasto-plastiques, courantes dans la domaine des géomatériaux. Il fait partie des lois incrémentales non-linéaires développés ces vingt dernières années (Bazant [7], Darve [47], Kolymbas [86]). Ce type de loi permet une plus grande souplesse.

CLoE utilise une surface limite qui définit le domaine de contrainte accessible. Bien qu'en pratique, la surface limite ne doit pas pouvoir être atteinte car on s'attend auparavant à une bifurcation d'équilibre du matériau suivie d'une régression de l'état de contrainte, il est néanmoins nécessaire de s'assurer de la cohérence du modèle sur la surface limite, interdisant toute sortie en dehors de cette surface.

Cette famille de lois repose donc notamment sur les idées fortes de **C**onsistance (ou cohérence) et de **Lo**calisation **E**xplicite (Chambon [34], [35]), d'où est issue son nom.

2.1.2.1 Formulation du modèle

L'équation constitutive de CLoE s'écrit :

$$\overset{\nabla}{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : (\underline{\dot{\varepsilon}} + \underline{b}' \, ||\underline{\dot{\varepsilon}}||) \tag{2.5}$$

avec : $\overset{\nabla}{\underline{\sigma}}$, la dérivée de Jaumann du tenseur de contrainte de Cauchy ; $\underline{\dot{\varepsilon}}$, la vitesse de déformation définie par la partie symétrique du gradient de vitesses de transformation : $\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(L_{ij} + L_{ji})$, et $\underline{\underline{A}}$ et $\underline{b}'$ des tenseurs du quatrième et deuxième ordre.

La vitesse de contrainte de Jaumann est définie à partir de la vitesse de la contrainte de Cauchy par la relation :

$$\overset{\nabla}{\underline{\sigma}} = \underline{\dot{\sigma}} - \underline{w\sigma} - \underline{\sigma w}^T$$

2. en vitesse, encore appelées lois incrémentales non linéaires.

Le tenseur du taux de rotation étant définie par la partie anti-symétrique du gradient de vitesses de transformation : $w_{ij} = \frac{1}{2}(L_{ij} - L_{ji})$.

En terme de contrainte de Cauchy, la transformation de $\overset{\nabla}{\underline{\sigma}}$ à $\dot{\underline{\sigma}}$ étant linéaire vis-à-vis de L, la relation 2.5 peut alors s'écrire :

$$\dot{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}} : \underline{L} + \underline{b}\,||\dot{\underline{\varepsilon}}||$$

Soit encore :

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}L_{kl} + b_{ij}\,||\dot{\varepsilon}|| \tag{2.6}$$

Avec :

$$D_{ijkl} = A_{ijkl} + \frac{1}{2}(\sigma_{il}\delta_{jk} - \sigma_{ik}\delta_{jl} + \sigma_{jl}\delta_{ik} - \sigma_{jk}\delta_{il})$$

δ étant le symbole de Kronecker. Et $b_{ij} = A_{ijkl}b'_{kl}$

2.1.2.2 Critères de bifurcation

Les développements des calculs ne sont pas effectués ici (cf. Hammad [69], Chambon *et al.* [36]), mais seulement une synthèse des critères obtenus.

Si l'on définit $\underline{\Lambda}$ le tenseur du deuxième ordre tel que :

$$\Lambda_{ij} = D_{ijkl}n_k n_l$$

$\underline{\Lambda}$ peut être défini comme le tenseur acoustique associé à $\underline{\underline{D}}$. Deux cas de figures se présentent :

1. Si $\underline{\Lambda}$ est inversible (son déterminant est alors non nul), on obtient un premier critère appelé critère de la norme :

$$\left|\left|\frac{1}{2}(\Lambda_{il}^{-1}b_{lk}n_k n_j + \Lambda_{jl}^{-1}b_{lk}n_k n_i)\right|\right| = 1 \tag{2.7}$$

   Ce critère est accompagné du fait que le rapport des vitesses de déformation de part et d'autre d'une des deux interfaces de la bande est infini ou nul, ce qui semble indiquer que l'extérieur de la bande est rigide lors de la bifurcation d'équilibre sous forme de bande de cisaillement.

2. Si $\underline{\Lambda}$ n'est pas inversible, on obtient un critère dit du déterminant :

$$\det(\underline{\Lambda}) = 0 \tag{2.8}$$

Les deux critères de localisation permettent de prédire la possibilité d'apparition d'une bande de localisation, dès lors que les deux tenseurs constitutifs $\underline{\underline{A}}$ et $\underline{b}$ sont

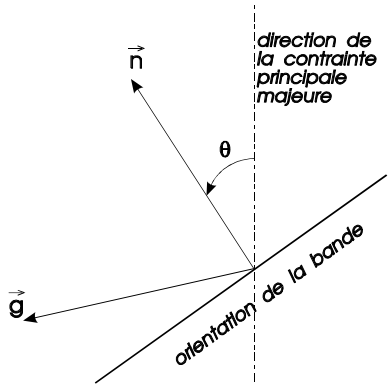


FIG. 2.2 – *Définition de l'angle d'inclinaison de bande θ.*

connus. Au cours du chargement en contrainte, l'existence pour la première fois d'un vecteur $\vec{n}$ vérifiant un des deux critères définit le point d'apparition de la localisation.

L'expérience acquise sur les sables et une roche tendre (Tillard [144]), montre que le critère de la norme est toujours vérifié avant le critère du déterminant. C'est pourquoi ce deuxième critère est dans la plupart des analyses en bifurcation sur une loi du modèle CLoE, laissé de côté.

2.1.2.3 Recherche de solutions

En faisant l'hypothèse que la normale à la bande $\vec{n}$ est perpendiculaire à la contrainte principale intermédiaire, ce qui expérimentalement est raisonnable[3], le critère de la norme 2.7 aboutit à une équation polynomiale du huitième ordre en $\tan\theta$, ou plus précisément du quatrième ordre en $\tan^2\theta$, θ étant défini comme l'angle entre la normale $\vec{n}$ et la direction de la contrainte principale majeure (Fig. 2.2) :

$$A_1.\tan^8\theta + A_2.\tan^6\theta + A_3.\tan^4\theta + A_4.\tan^2\theta + A_5 = 0 \tag{2.9}$$

Les coefficients A_1, A_2, A_3, A_4 et A_5 sont définis par les composantes des tenseurs $\underline{\underline{A}}$ et $\underline{b}$ (El Hassan [59]). Le polynôme, au début du chargement a une valeur négative. Il se rapproche de zéro au cours du chargement, en présentant un ou deux maxima (Fig. 2.3). Le critère sera vérifié quand un de ces maxima sera égal à zéro, l'angle θ sera alors défini de façon unique.

La recherche de solution de bifurcation consiste donc à détecter les maxima du polynôme et à vérifier leur valeur. Si, après un incrément de chargement, l'un des maxima est positif, on obtient alors une plage possible d'angle solution. Ce critère est très sensible au niveau de chargement. Entre deux incréments de chargement, un maximum du polynôme, qui semblait peu propice à vérifier le critère comparé à l'autre maximum, peut très rapidement augmenter et devenir positif. Il est donc nécessaire d'affiner le pas des incréments de chargement à l'approche de ce point de bifurcation pour obtenir l'angle correspondant le mieux à la solution.

3. en restreignant notre propos aux matériaux isotropes

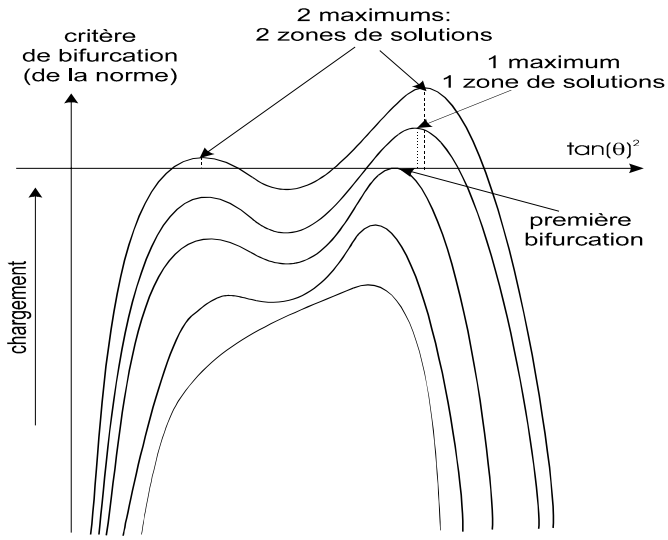


FIG. 2.3 – *Principe de l'évolution du critère de la norme en fonction de la tangente au carré de l'angle θ au cours du chargement progressif.*

Il peut arriver des cas où pour deux états de contrainte voisins, les solutions soient relativement éloignées. Ce sont les cas où les maximums du polynôme s'approchent simultanément de zéro, et où on passe de l'un à l'autre comme première solution. Ceci entraîne une discontinuité sur la solution en θ. Cela n'est pas satisfaisant physiquement, car on n'observe pas de tels sauts d'orientation dans les essais. Nous verrons les dispositions qu'il est possible de prendre pour éviter cet inconvénient.

2.1.3 Existence et unicité

Les travaux sur la bifurcation d'équilibre par localisation des déformations reposent sur l'hypothèse quant à la forme d'une seconde solution d'équilibre par rapport à la solution déjà existante. On suppose que cette solution se manifeste par une bande de cisaillement, depuis une solution homogène également supposée. D'autre part, les équations d'équilibre sont écrites localement, puisque le solide considéré est infini. On néglige alors les conditions aux limites "réelles" dans l'écriture des conditions d'équilibre.

Plus généralement, un problème de mécanique continue aux limites, dit bien posé ou idéal, doit répondre aux exigences d'existence, d'unicité et de continuité des solutions. Ce problème d'unicité, qui est plus global que la perte d'unicité (bifurcation) par localisation, conditionne la fiabilité d'un modèle à reproduire un comportement.

Dans le cadre de l'élastoplasticité, des travaux ont mis en évidence des conditions suffisantes d'unicité de solution, à l'échelle globale du problème, ou à l'échelle locale.

Des modes de bifurcation particuliers autre que la bifurcation par localisation,

comme la bifurcation diffuse, ou la perte de contrôlabilité qui traduit la perte de l'existence d'une solution homogène ou l'existence de plusieurs solutions homogènes, ont également fait l'objet de quelques travaux. Par exemple, El Hassan [59] donne une condition de perte de contrôlabilité sur une loi du modèle CLoE, sur un chemin de déformation plane. Des travaux numériques sur l'unicité et l'existence d'une solution ont été effectués par Crochepeyre [45]. Dans le cadre de la méthode des éléments finis, il utilise des algorithmes qui recherchent l'existence potentielle de plusieurs solutions.

Plus récemment, Chambon et Caillerie [39] ont établi, pour le modèle CLoE, dans le cadre de l'hypothèse des petites transformations, un théorème d'existence et d'unicité de la solution.

2.2 Cadre expérimental

Selon Paterson [118], le comportement jusqu'à la rupture d'une éprouvette de roche peut se classer en quatre étapes successives (Fig 2.4).

1. une première phase de fermeture de fissures préexistantes, élastiques ou non, impliquant une courbure de la courbe de contrainte orientée vers le haut, du fait de l'augmentation progressive de la rigidité.

2. une deuxième phase pendant laquelle le comportement est principalement élastique et linéaire, bien que des déformations non élastiques sont parfois observées, vraisemblablement du fait de glissement le long de fissures préexistantes.

3. le début de l'étape trois est accompagné de la dilatance volumique, d'une forte augmentation de l'émission acoustique et un chute des vitesses de propagation d'ondes. Les microfissures sont préférentiellement subaxiales, parallèles à la contrainte principale majeure, et réparties de façon relativement homogènes.

4. la quatrième phase commence au seuil de localisation, où les microfissures se concentrent sur une zone pour évoluer vers une macrofissure. Les microfissures peuvent être axiales ou inclinées pour fonctionner en cisaillement, et concentrées suivant une bande. Les fissures se relient entre elles, permettant la propagation de la macrofracture. Les déformations sont alors fortement inhomogènes.

Que ce soit dans le domaine de la mécanique des géomatériaux, ou de la géophysique, l'observation de l'apparition du mode de rupture a fait l'objet de nombreux travaux, et mobilisée de nombreuses technologies. A partir d'essais de laboratoire, ces techniques se concentrent sur les changements dans les modes de déformation. Soit par le passage d'une déformation homogène à une déformation inhomogène à l'échelle macroscopique, soit par le développement et la concentration de microfissures à l'échelle du grain (Santarelli [127]).

Les différentes techniques expérimentales peuvent être classées en trois grands groupes :

1. Les mesures de déformation

   Ces techniques comparent les déformations dans plusieurs directions et permettent d'observer un changement de l'évolution du champ de déformation, ou alors elles mesurent directement le champ de déformation et détectent la perte d'homogénéité. On retrouve alors :

   - la technique des mesures de déformation multiples, dans plusieurs directions.

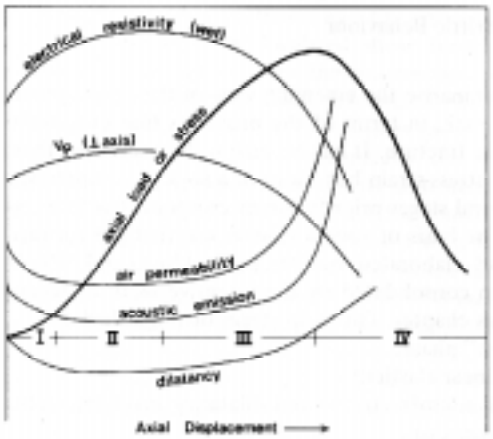


FIG. 2.4 – *Evolutions schématiques des différents paramètres expérimentaux aux cours du chargement d'une roche (d'après Paterson [118]).*

- la mesure du champ de déformation, en surface d'échantillon, par technique optique, ou par interférométrie laser.
- la mesure du champ de densité interne par absorption des rayons X, combiné à une technique de tomographie.

2. Les mesures soniques
   - la mesure des événements acoustiques, où l'on considère qu'une propagation et une initiation de microfissure libère de l'énergie sous forme acoustique, qui se propage à travers l'échantillon. La mesure des émissions, lorsqu'elle est faite à l'aide de capteurs multiples, permet en plus de localiser ces événements par une technique de tomographie.
   - la mesure de vitesse de propagation d'onde à travers l'échantillon. L'apparition d'une zone localisée induit une chute de ces vitesses, suivant leur orientation.
   - les mesures de résistivité électrique, de perméabilité, et des propriétés de transfert en général, sont également à ajouter à ce groupe par leur similitudes avec les mesures de propagation.
3. Les observations microscopiques

   L'observation nécessite la destruction de l'échantillon. Pour suivre l'évolution de l'organisation interne des fissures, il est nécessaire d'interrompre les essais à différents stades de chargement. L'observation se fait avec des microscopes optiques ou avec des microscopes électroniques à réflexion, transmission ou balayage.

Pour les différentes études, la localisation de la déformation, caractérisée différemment pour chacune des technologies, apparaît avant le pic de contrainte, entre

60 et 99 % d'après Santarelli. Le tableau 2.1 reproduit la synthèse effectuée dans [127], complétée par des études plus récentes. Les résultats sont dispersés, même pour une seule roche. Cela tient à la technique de détection, mais aussi à la qualité de l'essai, notamment aux conditions de frottement aux extrémités.

auteurs	roche	type	technique	loc.
Scholz (1968)	granite	U	émission acoustique	92 %
Friedman *et al.* (1970)	granite	U	microscope	99 %
	calcaire	U	microscope	99 %
Thill (1972)	marbre	T	vitesse d'ondes	95 %
Brady (1974)	marbre	T	microscope	95 %
	granite	T	microscope	95 %
Rao and Ramana (1974)	pyroxénite	U	vitesse d'ondes	78 %
	dunite	U	vitesse d'ondes	75 %
	serpentite	U	vitesse d'ondes	76 %
Hadley (1975)	granite	T	mesures de déformations	90 %
	gabbro	T	mesures de déformations	90 %
Liu and Livanos (1976)	granite	U	diffraction	92 %
Lockner *et al.* (1977)	granite	T	vitesse d'ondes	85 %
Sobolev *et al.* (1978)	granite		vitesse d'ondes	
		B	holographie	80 %
			microscope	
Soga *et al.* (1978)	granite	T	vitesse d'ondes	60 %
			holographie	
Krantz (1979)	granite	U	microscope	>87 %
Wong (1982)	granite	T	microscope	99 %
Yanagidani *et al.* (1985)	granite	U	émission acoustique	>83 %
			mesures de déformations	
Santarelli (1987)	dolomie	T	mesures de déformations	80-99 %
	grès		mesures de déformations	87-99 %
Ord *et al.* (1991) [1]	grès	B	mesures de déformations	90 %
Tillard (1992) [1]	marne	B	stéréophotogrammétrie	88-100 %
Millien (1993) [1]	grès	T	mesures de déformation	85-94 %
Haied (1995) [1]	grès [2]	T	mesures de déformation	74-88 %
Labuz *et al.* (1996) [1]	grès	B	mesures de déformations	
			émission acoustique	~ 99 %

TAB. 2.1 – *Résumé des études sur la détection de la localisation, selon Santarelli [127], complété par des études plus récentes. Le type d'essai est uniaxial (U), triaxial (T) ou biaxial (T). L'apparition de la localisation est exprimée en pour-cent par rapport à la contrainte au pic.*

[1] données sources différentes
[2] plaque rectangulaire

2.2.1 Détection par mesures de déformation

2.2.1.1 Mesures multiples

La méthode la plus simple est d'effectuer plusieurs mesures de déplacements ou déformations radiales dans des directions différentes. Hadley [65] a utilisé quatre paires de jauges de déformation radiales collées sur une section moyenne d'un échantillon de granite cylindrique sous confinement. A partir de ces mesures, il construit une ellipse par une méthode de moindre carrés, passant au mieux des valeurs mesurées, pour représenter l'allure de la section déformée. A partir de 90 % du chargement en contrainte, les points mesurés s'organisent de moins en moins bien suivant une ellipse, et l'auteur en déduit une perte d'homogénéité. D'autre part, dans le cas d'une rupture suivant un plan unique de cisaillement, l'ellipse d'anisotropie voit son grand axe perpendiculaire à la surface de rupture finale.

Dans un perspective similaire, Santarelli *et al.* [126] [127] utilisent des mesures de déplacements radiaux, sur une section à mi-hauteur d'un échantillon cylindrique, dans deux directions orthogonales. Ils utilisent des capteurs de type cantilever, travaillant en flexion. Lorsque la déformation radiale est homogène, les deux mesures doivent évoluer linéairement l'une par rapport à l'autre. L'évolution peut être différente si le matériau est anisotrope. Par contre, l'auteur considère qu'il y a début de localisation lorsque l'évolution comparée perd sa linéarité. Millien [106] a utilisée ce critère pour des essais triaxiaux sur un grès des Vosges à partir de jauges de déformation, en calculant l'écart type d'une régression linéaire de la comparaison des mesures sur des fenêtres de tailles croissantes. Haied *et al.* [66] [67], dans la suite des travaux de Kondo *et al.* [88] [89], utilisent aussi des jauges sur des parallélépipèdes de grès en compression triaxiale, suivant les trois directions de l'espace.

Dans un esprit similaire, Tatsuoka et Kim [141] comparent plusieurs mesures axiales sur un échantillon de marne. Ils utilisent les capteurs internes de mesure de déformation axiale globale sur l'échantillon (LDT). Au moment de la divergence des mesures axiales, il considèrent qu'il y a localisation des déformations. Ce moment arrive juste avant le pic de contrainte

Dans le cas d'essais biaxiaux, le déplacement des embases, libres de glisser latéralement, est mesuré et comparé aux mesures de déplacement sur l'échantillon directement. Ord *et al.* [115] observent un accélération du mouvement du plateau de l'embase avant le pic de contrainte et en déduit le point le localisation. Labuz *et al.* [93] observent aussi que la perte d'homogénéité de la déformation a lieu avant le pic, mais la propagation complète de la zone localisée n'arrive pas avant le pic de contrainte, tant que l'embase ne glisse pas. Viggiani *et al.* [155] comparent la différence de mesures de déplacements latéraux opposés sur un échantillon d'argile dans un biaxial, et observe une divergence de la mesure avant le pic de contrainte, accompagné d'une variation substantielle de la pression interstitielle localement au niveau de la bande de cisaillement.

2.2.1.2 Mesures du champ de déformation

Les méthodes établissent un champ de déformation observé en surface d'un échantillon. Pour cette raison, les échantillons doivent être en général prismatiques. La stéréophotogrammétrie de faux relief travaille directement sur des photographies de la surface de l'échantillon, tandis que l'holographie optique utilise des photographies de la projection de franges d'interférométrie renvoyées par la surface de l'échantillon.

Stéréophotogrammétrie de faux relief :

A partir de photographies à différents états de déformation, il est possible de mesurer les déplacements d'un semis de points de la surface de l'échantillon, et de l'interpréter pour obtenir une carte du champ de déformation dans le cas d'une déformation diffuse, ou des sauts de déplacements sur les lèvres des fissures. Une description est présentée dans le chapitre 5 (p. 193). Dans le cadre de la géomécanique, cette technique a été utilisée surtout sur les sables (Desrues [52], Hammad [69], Mokni [107]), mais aussi sur une roche tendre argileuse (Tillard [144]), sur un béton (Benaija [9]) et un grès (Benaija *et al.* [8]).

Les figures 2.5 représentent des mesures effectuées par Tillard [144] sur une marne du Plaisancien (appelée marne de Beaucaire). Pour indication, la résistance à la compression uniaxiale est de l'ordre de 1 MPa. Les six graphes supérieurs représentent l'essai MB03, la rangée du haut et celle du bas correspondent respectivement à des intervalles du chargement juste avant et juste après le pic de contrainte axiale. Les figures de gauches illustrent le champ de déplacement, dans lequel une fissure est observée à deux stade de propagation. Dans le chargement après pic, le champ de déformation s'est concentré dans un coin rigide délimité par les fissures. Le champ de la déformation illustré sur la colonne centrale indique que dans les deux stades de chargement, la déformation est concentrée, d'abord en forme de X, puis uniquement dans le prolongement des fissures, de façon plus concentrée. La colonne de droite donne la composante tangente du saut de déplacement le long des fissures observées à l'aide du stéréomètre. Ce déplacement à tendance à s'amortir à l'approche des pointes des fissures.

Sur les quatre graphes en bas de la page, un exemple de propagation de fissure est également présenté après avoir franchi le pic de contrainte axiale (essai MB24). On retrouve à gauche le champ de déplacement, et à droite le saut de déplacement le long des fissures. Le profil des fissures est volontairement décalé légèrement vers le bas pour éclaircir les figures. Les fissures sont multiples, organisées en échelon, et ne sont pas reliées entre elles. Le saut de déplacement est essentiellement tangent aux fissures, indiquant un fonctionnement cisaillant.

D'une manière générale, sur l'ensemble de ses essais, l'auteur observe que les fissures fonctionnent en cisaillement, pratiquement sans mode d'ouverture. L'apparition et la propagation des fissures sont précédées d'une zone de déformation intense et concentrée, avant le pic de contrainte, dans le prolongement des fissures, et aux

endroits que traverseront celles-ci au cours du chargement ultérieur.

Les dépouillements effectués sur un béton (Benaija [9]), en condition uniaxiale, montre que la déformation d'un échantillon au moment de la propagation de fissures, résulte d'un jeu de fissures axiales fonctionnant essentiellement en ouverture. L'ouverture est maximale dans la partie centrale des fissures et s'annule en tête de fissure.

Holographie optique :
Avec la méthode d'holographie optique, une source lumineuse éclaire la surface de l'échantillon, et les ondes réfléchies sont diffractées sur un écran. Les franges d'interférométries, de par leur forme et leur épaisseur, renseignent sur le champ de déformation (Spetzler *et al.* [137], Meyer et Spetzler [103]). Il est nécessaire d'avoir plusieurs photographies pour pouvoir reconstituer entièrement le champ sur une surface entière d'échantillon. Par contre, la méthode permet de visualiser en temps réel l'aspect de la déformation. La visualisation de la surface de l'échantillon oblige à avoir un piston transparent, ou d'appliquer la pression avec un fluide transparent.

La technique a été utilisée sur des roches, en condition de déformation plane (essai biaxial) (Sobolev *et al.* [136]), ou pour un état de contrainte triaxial vrai ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) (Spetzler *et al.* [138]). Pour ces deux études, le mode de rupture est observé, depuis la phase initiale homogène, jusqu'à la rupture finale avec une macrofissure traversant l'échantillon de roche, en l'occurrence une pyrophyllite, avec une porosité de quelques pour-cent. Le processus de destruction est similaire pour les deux chemins de contrainte, en voici un résumé, associé avec une observation de l'évolution des vitesses d'ondes élastiques (Fig 2.6):

1. durant la phase initiale (I), la déformation est homogène, les vitesses d'ondes augmentent.

2. au cours de la phase (II), la vitesse de propagation diminue et la déformation s'organise selon une croix rejoignant les coins de l'échantillon. Cette phase est supposée être associée à une microfissuration quasi-isotrope.

3. les vitesses réaugmentent dans la phase (III) et la déformation se concentre suivant une bande étroite.

4. le fracture macroscopique se forme dans la phase (IV), alors que la contrainte diminue par petits sauts. La macrofissure est précédée par une zone de déformation intense, dans son prolongement, et qui suit son développement. Dans cette zone, existent des fissures en échelon.

Les auteurs observent donc une concentration de la déformation avant l'initiation de la fissure, et que celle-ci, lors de sa propagation, est précédée par une zone étroite de déformation intense dans laquelle existent des fissures en échelons, qui par coalescence permettront à la macrofissure de se propager.

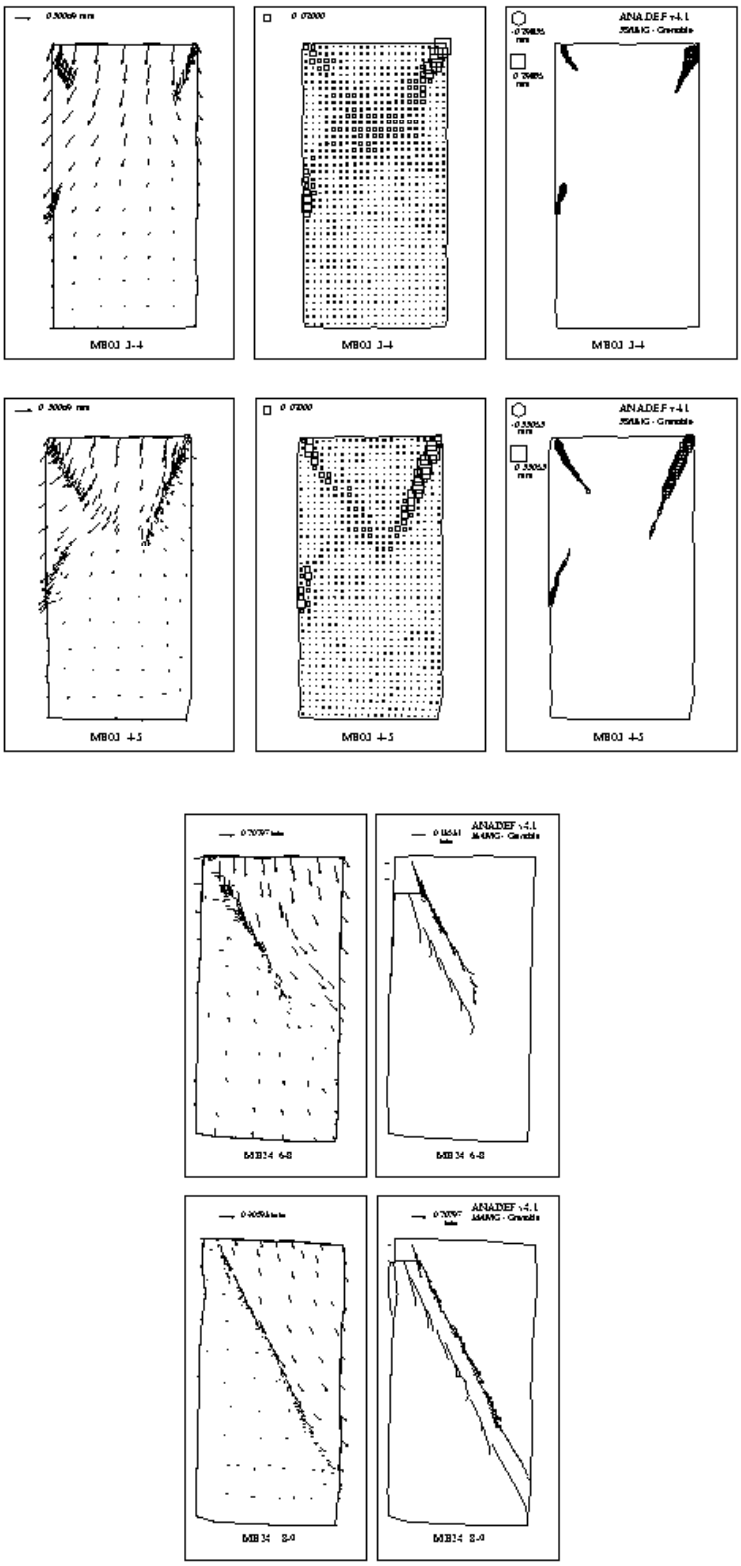


FIG. 2.5 – *Dépouillement stéréophotogrammétrique sur des échantillons de marne de Beaucaire, extrait de Tillard [144]. Le bloc du haut repésente, pour un même essai et à deux intervalles du chargement, le champ de déplacement, de déformation et le saut de déplacement sur les fissures. Le bloc inférieur représente pour un autre essai le champ et le saut de déplacement.*

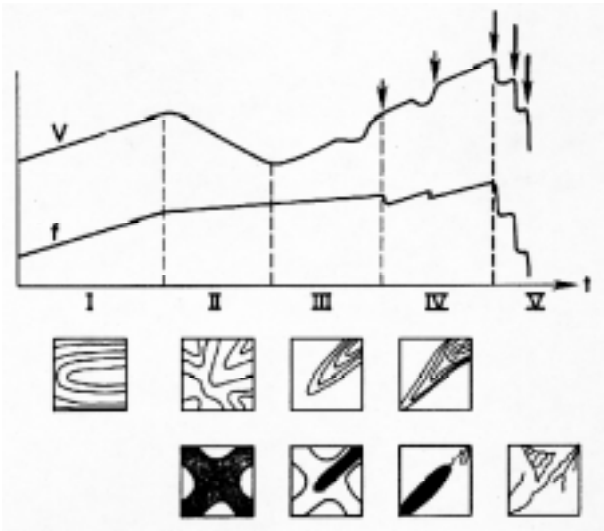


FIG. 2.6 – *Vue schématique de la rupture d'un échantillon prismatique de roche, selon Sobolev et al. [136]. Sur le graphe, les vitesses de propagations d'ondes et la force axiale sont représentés en fonction du temps. Les carrés supérieurs illustrent des hologrammes idéalisés, et les carrés inférieurs le développement des fractures macroscopiques.*

2.2.1.3 Mesures par tomographie aux rayons X

La tomographie au rayon X permet de reconstruire les caractéristiques ponctuelles d'absorptions du rayonnement à l'intérieur de l'échantillon. Ces mesures sont reliées directement à la densités du matériau dans la cas d'un matériau quasi homogène et sans fluide interstitiel. Une variation locale de porosité, résultant d'une localisation de la déformation peut alors être détectée. Une description plus détaillée du principe est donnée au chapitre 4.9 (p. 148). La technique pose des problèmes de résolution pour des matériaux à grains fins qui peuvent rendre délicates les mesures quantitatives.

Les études réalisées sur les roches concernent a priori essentiellement la rupture fragile : Vinegar *et al.* [157] sur le grès de Castlegate, Tillard [144] sur la marne de Beaucaire, Raynaud [121], Raynaud *et al.* [120] sur un calcaire crayeux d'Orgon. Pour les mesures effectuée en continu pendant l'essai, il est nécessaire alors d'avoir une cellule transparente aux rayons X, en alliage d'aluminium par exemple. De ce fait, les pressions de confinement sont souvent limitées (de l'ordre de 10 MPa). Sinon, les mesures sont réalisées après décharge de l'échantillon et sortie de la cellule.

Pour l'ensemble de ces études, il est possible de visualiser des zones étroites de dilatance, organisées suivant un plan incliné par rapport à l'axe de plus grande contrainte, formées avant le pic de contrainte. Vinegar *et al.* [157] montrent en plus que la dilatance qu'on observe habituellement à l'approche de la rupture ne concerne pas uniquement l'emplacement de la fracture, mais intervient également en dehors. Tillard [144] a observé en plus, sur la marne de Beaucaire, qu'entre le domaine

surconsolidé et le domaine normalement consolidé, dans un état intermédiaire, la localisation avait lieu selon des bandes contractantes.

2.2.2 Détection par mesures soniques

Ces techniques concernent l'évolution des vitesses d'ondes élastiques, de compression ou de cisaillement, à travers l'échantillon à différents stades de chargements, ou bien les productions d'événements acoustiques liés à l'évolution de la microstructure, et notamment aux naissances et propagations de microfissures.

Emissions acoustiques :

Les mesures d'émission acoustiques peuvent être utilisées dans plusieurs optiques. Les principales approches sont l'observation des émissions acoustiques par le comptage des événements dépassant un certain seuil, la localisation des sources d'émission (hypocentres) par des méthodes de tomographie, l'étude de la distribution statistique des amplitudes, des fréquences caractéristiques de chaque émission, et encore la détermination des mécanismes des sources d'émission.

La détermination des lieux d'émission est très intéressante pour l'étude de la localisation. Elle a donné lieu également à de nombreux travaux (Scholz [131], Yanagidani *et al.* [162], Lockner [100], Satoh *et al.* [128]). Toutes sont assez similaires dans la description des processus de propagation des lieux de concentration d'émission acoustique.

Si l'on considère l'étude de Lockner *et al.* [99] sur le granite de Westerly et le grès de Berea, on peut résumer le processus en trois étapes principales (Fig. 2.7) :

1. dans le granite, la microfissuration est initialement uniformément distribuée, et associée à la dilatance du matériau. Par contre, dans le grès, les lieux d'émissions acoustiques sont regroupés rapidement dans des zones encore assez diffuses, et ce assez tôt dans le chargement (étapes -a,b,c,d-).

2. à l'approche du pic, dans le granite, une zone de nucléation se forme sur la surface de l'échantillon. Ce site évolue rapidement vers une macrofracture naissante, en se propageant à travers l'échantillon. Dans le grès, les zones de concentration jouent ce rôle de nucléation, et les émissions s'organisent selon une structure relativement plane (étapes - e,f,g-).

3. les fractures dans le granite et le grès se propagent avec une intense émission acoustique. Les lieux d'émissions sont regroupés autour des fractures, dans une zone étroite de 1 à 5 mm d'épaisseur pour le granite, et d'environ 10 mm dans le grès (étapes -h,i-).

L'étude de l'évolution de la fréquence des émissions acoustiques nous renseigne également sur le mécanisme de microfissuration. Scholz [131] avait déjà observé, à

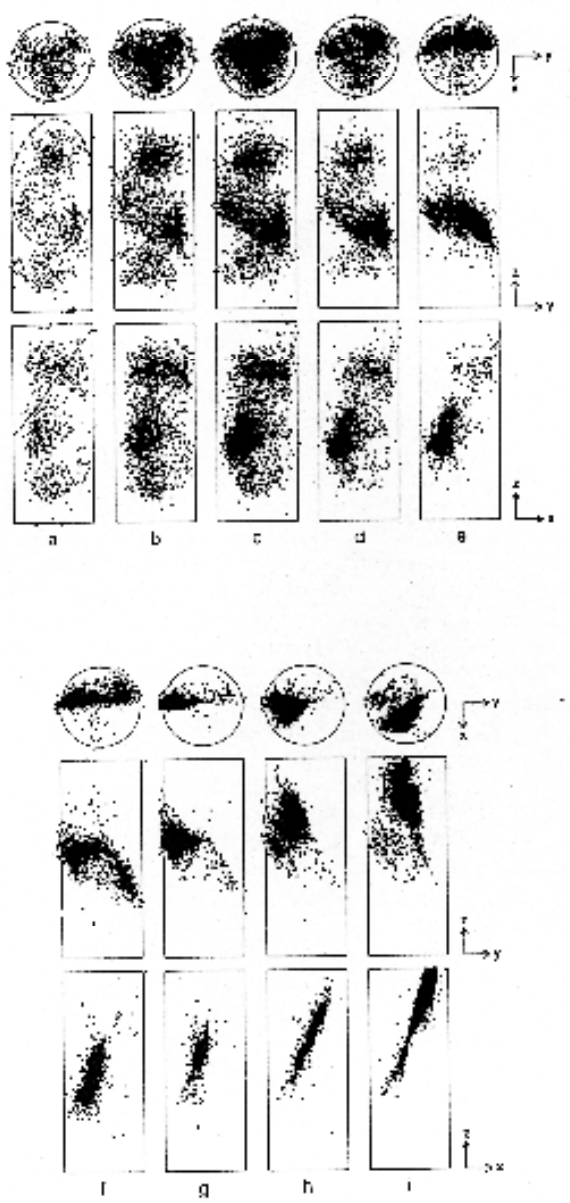


FIG. 2.7 – *Exemple d'évolution incrémentale des hypocentres dans un grès de Berea, $\sigma_3 = 50\ MPa$ (Lockner et al. [99]). Les colonnes présentent l'évolution à différents stades de chargement (-c- au pic, -d- avant la rapide chute de contrainte), alors que les rangées présentent différentes projections.*

partir du profil temporel de l'émission d'un événement acoustique, qu'il existait des émissions à basses fréquences (type II) et des émissions à plus hautes fréquences (type I). Des études plus récentes montrent, malgré la difficulté de telles mesures, qu'il est important d'effectuer les mesures sur une large bande de fréquence. Au cours d'un chargement uniaxial d'un échantillon (andésite et granite), Ohnaka et Mogi [112], en étudiant justement la fréquence d'émission, sont amenés à distinguer cinq phases lors du chargement :

1. une première étape où il existe des émissions acoustiques à des contraintes inférieures à 10 % de la résistance à la rupture. Ces émissions ont une faible fréquence, et s'accompagne d'une compaction de l'échantillon, elles sont attribuées à la fermeture de fissures préexistantes de faible élancement ($\sim 10^{-3}$) et très inclinées par rapport à la direction de contrainte majeure.

2. les émissions sont très faibles lors de la deuxième étape, les fissures susceptibles de pouvoir se fermer le sont déjà, et les concentrations de contrainte à l'échelle microscopique ne sont pas suffisantes pour générer de nouvelles fissures.

3. pendant l'étape trois, de 30 à 40 % jusqu'à 90 à 98 % de la résistance ultime, les émissions augmentent de façon croissante, du fait des nouvelles fissures. L'étape commence avant la dilatance, contrairement à Scholz [132]. Les événements à faibles fréquences et ceux à hautes fréquences augmentent de façon identique.

4. jusqu'à environ 100 % de la contrainte maximum, le taux d'émission augmente très rapidement, mais les basses fréquences augmentent plus vite que les plus fortes fréquences. Deux phénomènes concomitants peuvent expliquer cette différence. D'une part, les fissures se propagent et se relient entre elles, pour former de plus grosses fissures. Le mécanisme de coalescence devient prédominant sur les mécanismes individuels, de ce fait, les événements à basses fréquences, associés à de plus grosses fissures, prédominent. D'autre part, la dilatance due aux microfissures change le coefficient d'atténuation de la roche, et les plus fortes fréquences sont moins bien transmises vers les capteurs acoustiques.

5. dans l'étape finale menant à la rupture brutale, les hautes fréquences deviennent très prédominantes. Cela s'explique par le rôle de nucléation que jouent les capteurs acoustiques sur la surface de l'échantillon. De nouvelles fissures s'y créent et vont rejoindre la macrofissure.

Ces études d'émissions acoustiques nous renseignent donc sur la disposition des événements, et sur leur concentration, ainsi que sur le mécanisme de coalescence de fissures, pour former une fissure à l'échelle macroscopique. On sait que les microfissures se concentrent en bandes, à partir de zone de nucléation plus ou moins diffuses et précoces suivant la roche, avant d'aboutir à une fracture, et que autour d'une fracture, la fissuration reste intense.

Notons cependant que Labuz *et al.* [93], sur un essai biaxial sur un échantillon de grès percé d'un trou central, observent une concentration d'événements acoustiques suivant une zone quasi linéaire, qui est plus inclinée par rapport à la direction principale majeure de contrainte que la fissure qui se forme ultérieurement. Il y là peut-être une interaction entre le trou qui joue le rôle de point de nucléation, et les coins de l'échantillon ou il existe également une inhomogénéité du champ de contrainte.

Propriétés de transfert :

Les mesures de vitesses d'ondes élastiques à travers la roche, au cours des essais de laboratoire, peuvent être regroupées parmi les mesures de propriétés de transfert du matériau. Celles-ci sont sensibles notamment à l'anisotropie de l'orientation des microfissurations. A l'approche du pic de contrainte, au moment de la localisation, les mesures manifestent souvent des accélérations dans leur évolution, avec par exemple une plus grande atténuation des vitesses d'ondes (Lockner *et al.* [98]), une augmentation de la perméabilité (Keaney *et al.* [83]), une augmentation du coefficient de couplage électrocinétique (rapport du potentiel électrique dû à l'écoulement d'un fluide dans une roche poreuse sur la surpression de fluide) (Jouniaux et Pozzi [82]). Ce sont des indicateurs intéressants de la localisation. Même si ces techniques nous renseignent peu sur le phénomène de localisation comme le font les techniques précédemment exposées, elles ont l'avantage de pouvoir être appliquées facilement in-situ, et peuvent être précieuses pour les prédictions de tremblement de terre, ou les problèmes liés aux prélèvements pétroliers.

2.2.3 Détection par observations microscopiques

La détection de la localisation par les techniques d'observations microscopiques sont très lourdes, car elles nécessitent pour chaque stade de chargement étudié, d'interrompre l'essai et de détruire l'échantillon. Par contre, ce sont des outils puissants pour décrire les mécanismes de déformation plastique et le phénomène de localisation. Les observations peuvent se concentrer sur différents aspects tels que l'évolution du nombre des fissures, l'étude statistique de leur orientation et de leur longueur, et l'évolution de celles-ci avec la contrainte moyenne, la répartition des fissures dans l'espace à l'intérieur d'un échantillon, la classification de leur forme.

Les nombreuses études montrent que la rupture fragile dans une roche s'accompagne d'une localisation des microfissurations. Au début du chargement, les microfissures induites par la contrainte semblent réparties aléatoirement, devenant de plus en plus intenses et concentrées à l'approche de la contrainte de rupture (Kranz [90]). Les fractures à l'échelle macroscopique résultent du développement, des interactions et de la coalescence d'une multitude de microfissures. Ces processus de microfissurations dépendent eux des concentrations de contrainte locales à l'échelle du grain. Leur développement est donc influencé par les hétérogénéités locales tels que par exemple les pores, les contacts entre grains, les surfaces de ces grains, les plans de

clivages de certains minéraux, et la présence des microfissures voisines.

Si l'on considère le granite de Westerly, qui a été étudié de façon intense par plusieurs auteurs, les travaux de Tapponnier et Brace [140] par exemple nous renseignent sur les différentes sources d'initiation des microfissures, et notamment l'importance du rôle joué par les biotites. Plus récemment, dans l'optique de décrire la localisation des microfissures dans ce même matériau, Wong [160] fournit une description détaillée de leur répartition spatiale depuis l'état initial sans chargement, où il existe très peu d'endommagement préexistant, jusqu'à la rupture ultime de l'échantillon en compression sous confinement. Les principales étapes en sont résumées ci-dessous :

- au début du chargement, et jusqu'à environ 80 % de la résistance au pic, les surfaces de grains, les fissures intragranulaires antérieurs mais cicatrisés, les plans de clivages de certains minéraux commencent à s'ouvrir, sans qu'un nombre significatif de fissures intragranulaires ne se soient initiées.

- à environ 90 % du pic de contrainte, les surfaces de grains sont fissurées. Des fissures intragranulaires existent. Elles sont très effilées, faiblement inclinées par rapport à la direction de contrainte majeure principale, se sont initiées aux points de contact entre grains, sur les fissures déjà existantes ou le long des pores. Certains grains présentant un clivage comme les grains de feldspath voient la présence de multiples fissures parallèles, selon leur propre orientation.

- à proximité du pic de contrainte, les grains de quartz sont fissurés par des séries de fissures subaxiales et rapprochées, dont certaines traversent le grain. Dans les grains de feldspath, les fissures très inclinées ont progressé. Les fissures en surface de grains forment un réseau continu, et d'autre part, des fissures intergranulaires sont observées.

- Sur les échantillons étudiés juste après le pic de contrainte, les micromécanismes se sont concentrés dans des zones étroites de localisation. Des fissures coplanaires, à $15 - 45^o$ par rapport à la contrainte de compression, sont interrompues par les séries de fissures subaxiales formant des colonnettes dans les grains de quartz et de microcline. Certaines fissures issues de surfaces de grains fonctionnent en cisaillement. L'auteur interprète le rôle que peuvent jouer les fissures axiales en série, comme un rôle de barrière pour les fissures inclinées, fonctionnant en cisaillement. Certaines de ces barrières se rompent et se relient avec les fissures de cisaillement voisines, en permettant alors à celles-ci de se propager vers d'autres barrières. Par ce mécanisme de répétition, il se forme une zone localisée. Les fissures en cisaillement se propagent en broyant certaines irrégularités par un mécanisme de gouge, diminuant la résistance au frottement.

En observant l'importance de la porosité sur la résistance de plusieurs grès, Dunn *et al.* [58] ont montré un rôle similaire des fissures intragranulaires et subaxiales,

formant une barrière pour des fissures issues de surfaces de grains, et ce pour des grès à très faible porosité (moins de 3 %). Le mécanisme est différent pour des grès plus poreux. Il ne semble pas y avoir de fissures fonctionnant en cisaillement.

L'étude de Menéndez *et al.* [104] sur le grès de Berea (porosité de 21 %) fournit une description du phénomène de localisation des microfissurations et du phénomène d'écoulement cataclastique en compression, phénomène également présent en extension (Zhu *et al.* [164]), lorsque la contrainte moyenne est élevée. Dans le cas de la rupture fragile avec formation de bandes localisées dilatantes, trois étapes principales peuvent être résumées ainsi :

- jusqu'au pic de contrainte, il existe très peu de fissures intragranulaires subaxiales en mode d'ouverture. La dilatance ne peut s'expliquer comme cela, contrairement aux roches cristallines à faible porosité comme le granite de Westerly. La dilatance est cependant accompagnée d'une forte émission acoustique (Lockner *et al.* [99]), qui laisse penser aux auteurs que les contraintes de cisaillement cassent les liaisons des grains au niveau de leur surface, permettant le glissement et la rotation de ceux-ci.

- à l'approche du pic de contrainte, des fractures intragranulaires subaxiales aux contacts des grains (fractures hertziennes) se développent dans des zones isolées, et non pas de façon homogène dans tout l'échantillon. La résistance en contrainte axiale diminue par un radoucissement en déformation.

- vers le palier en contrainte, les zones isolées de microfracturation se relient entre elles par coalescence, pour former une zone de localisation des microfissures. La densité des fissures y est très forte, et l'orientation de celles-ci est anisotrope. L'épaisseur est de l'ordre de $0,5\ mm$, soit environ trois grains.

Ord *et al.* [115], dans le grès de Gosford comprimé en condition biaxiale, avaient décrit un scénario assez proche : mouvements rigides des grains avant le pic, localisation des microfissurations, avec des fractures intragranulaires et intergranulaires à l'intérieur de la bande, et des fissures intergranulaires au voisinage proche de la bande, et ce juste avant le pic de contrainte. La bande localisée a une épaisseur de un à deux grains. Après la rupture, une fracture discrète s'est formée, et les grains sont très fissurés, sur une épaisseur de un à deux millimètres, soit quatre à huit grains.

Raynaud [121] sur la marne très argileuse de Beaucaire en compression triaxiale, met en évidence à partir d'un certain niveau de confinement, un mécanisme de rotation de grains, et la présence de bandes de localisation de l'endommagement. Il n'y pas de fissuration intragranulaire. Les grains dans les bandes, sont réorientés suivant la direction de ces bandes de cisaillement, à environ 45° de la direction de la contrainte de compression.

2.3 Conclusion

Les techniques expérimentales ont depuis une trentaine d'années amené à parler de phénomène de localisation avant la rupture dans les roches, comme cela avait été observé dans les métaux (bandes de Lüders). C'est en partie de ces observations qu'a été développée la théorie de la bifurcation (Rudnicki et Rice [124]).

Suivant le type de mesures, on parle de localisation de la déformation, des lieux d'émissions acoustiques ou des microfissurations. Le processus diffère légèrement suivant les roches, mais d'une manière globale, lors d'un essai de laboratoire, on retient qu'en début de chargement, les déformations sont homogènes. A partir d'un certain niveau de chargement, il se forme une zone où se concentrent les déformations, et dans lesquelles les microfissures sont plus denses qu'ailleurs. Ces lieux de concentration sont plus ou moins diffus, mais surviennent avant le pic de contrainte, ce qui entraîne une perte de l'homogénéité du champ de déformation qu'il est possible de détecter par la comparaison de mesures multiples. A partir de ces zones qui jouent le rôle de point de nucléation, se propage une bande de cisaillement. Dans les grès, c'est plutôt en se rejoignant par coalescence que les zones de concentration donnent naissance à une bande. A l'intérieur des bandes, les microfissurations sont intenses. Pour certaines roches, les bandes sont formées avant le pic de contrainte, et pour d'autres seulement après le pic, au moment d'atteindre un palier en contrainte. Mais d'une manière quasi-systématique, le pic de contrainte apparaît comme la conséquence de la perte d'homogénéité du champ de déformation et la formation d'une bande de cisaillement. Les fractures macroscopiques quand elles existent se forment dans de nombreux cas à l'intérieur des bandes de concentration, et peuvent souvent en être considérées comme l'aboutissement, par coalescence des microfissures.

La théorie de la bifurcation, interprète le pic de contrainte comme un problème de stabilité. Elle examine si, étant donné un champ de déformation associé à un champ de contrainte comme solution d'un problème aux limites, il peut exister un autre champ de déformation comportant une bande de localisation de la déformation, et vérifiant toutes les équations du problème (conditions aux limites, loi de comportement, équilibre en tout point). La similitude avec les observations expérimentales amène de nombreux auteurs à penser que la théorie de la bifurcation peut modéliser correctement la rupture fragile dans les roches (Chambon *et al.* [37], Sulem *et al.* [139], Vardoulakis *et al.* [151]), comme elle a déjà été utilisée pour les sables (Darve [49], Desrues et Chambon [54] [36], Kolymbas [85], Vardoulakis *et al.* [150]).

Cette théorie prévoit cependant l'apparition brutale d'une bande de cisaillement, alors qu'expérimentalement, on observe plutôt une propagation de la bande. Le point commun des deux approches est qu'à partir du seuil de localisation, la réponse du comportement expérimental n'est plus significatif du matériau mais devient une réponse structurelle, et ne peut plus être décrite en terme de loi de comportement homogène.

Première partie

Observations Expérimentales

Chapitre 3

Installation expérimentale

3.1 Description de la cellule triaxiale

3.1.1 Principe de l'essai triaxial

L'essai triaxial axisymétrique est un des essais classiques pour les mécaniciens des roches. Il permet d'explorer le comportement d'un matériaux à des contraintes moyennes variables, allant d'un essai uniaxial, sans pression latérale, à des confinements élevés correspondant à de grandes profondeurs terrestres. Il permet de reproduire le champ de contrainte que l'on peut supposer exister en première approximation dans le matériau in situ. Sur un échantillon de forme cylindrique circulaire, on exerce :

- une pression latérale identique dans les deux directions de l'espace correspondant aux directions radiales de l'échantillon ;
- une pression axiale indépendante de la précédente, supérieure dans le cas d'un essai de compression, inférieure dans le cas d'un essai d'extension.

Dans l'hypothèse où l'essai effectué est homogène, ce qui n'est possible qu'avant toute bifurcation, localisée ou diffuse, du matériau de l'échantillon, et ce qui implique d'autre part de prendre des dispositions expérimentales citées ultérieurement, les contraintes exercées de direction fixe correspondent aux contraintes principales. Pour cette hypothèse d'homogénéité seulement, le comportement structural de l'échantillon est représentatif du comportement intrinsèque du matériau.

Pour évaluer la réponse de l'échantillon, on procède à plusieurs mesures :

- de la pression de confinement σ_3 ;
- de la pression axiale ou du déviateur de contrainte, σ_1 ou $\sigma_1 - \sigma_3$;
- des déformations latérales dans deux directions perpendiculaires ε_2 et ε_3, identiques dans le cas d'un matériau orthotrope de révolution ;

- de la déformation axiale ε_1 .

Dans le cas général d'un essai triaxial classique, la pression de confinement est maintenue constante pendant l'essai de compression ou d'extension, et la pression axiale est pilotée, soit à vitesse imposée, soit à partir du déplacement du piston. Cette dernière solution permet alors d'atteindre la phase post-pic de la réponse de l'échantillon. D'autres types d'essais comme l'essai dit pseudo-isotrope font aussi évoluer la pression de confinement au cours de l'essai.

3.1.2 Cellule autonome

La cellule utilisée[1] est autonome, c'est à dire qu'elle contient son propre système de chargement axial, à l'opposé d'une cellule sous presse. Elle se divise en deux parties, une partie inférieure correspondant à la chambre de confinement, et une partie supérieure contenant le piston de chargement axial. La figure 3.1 présente le plan de principe de la cellule.

La partie inférieure est constituée de l'embase de la cellule (1) et de la chambre de confinement (2), étanches entre elles. La chambre est dimensionnée pour des pressions de confinement de 60 MPa. L'échantillon (3) repose lui même sur une embase (4), par l'intermédiaire d'un plateau élargi, insérée dans l'embase de cellule. Il reçoit sur sa tête une embase supérieure (5), reliée par un tuyau semi-souple à l'embase de la cellule. La conception de la cellule n'autorise pas une éventuelle rotation des embases inférieures ou supérieures autour d'un axe horizontal. L'échantillon est protégé de l'huile de confinement par une membrane Néoprène. L'embase de la cellule comprend plusieurs canalisations hydrauliques ; elles permettent la circulation :

- du fluide de confinement ;
- du fluide interstitiel en pied d'échantillon ;
- du fluide interstitiel en tête d'échantillon.

L'embase contient aussi le passage de fils pour un thermocouple vers une gaine (6) de protection rigide, immergée dans le fluide de confinement et deux passages électriques de 12 fils chacun, étanches, pour les instrumentations de mesures internes à la cellule.

La cellule inférieure est reliée à la partie supérieure par huit tirants (7). Le cellule complète peut ainsi se désolidariser en trois parties, la partie supérieure, la chambre de confinement et l'embase, afin de permettre la mise en place de l'échantillon.

1. L'installation décrite ci-après a été conçue et réalisée par la société Geodesign, à Roubaix en France, en réponse à un appel d'offre ouvert, sur un cahier des charges défini par nos soins. L'ensemble a coûté approximativement 830 000 francs soit 127 000 Euros, financés par le GdR 914 "Géomécanique des roches profondes" et divers contrats de notre équipe de recherche.

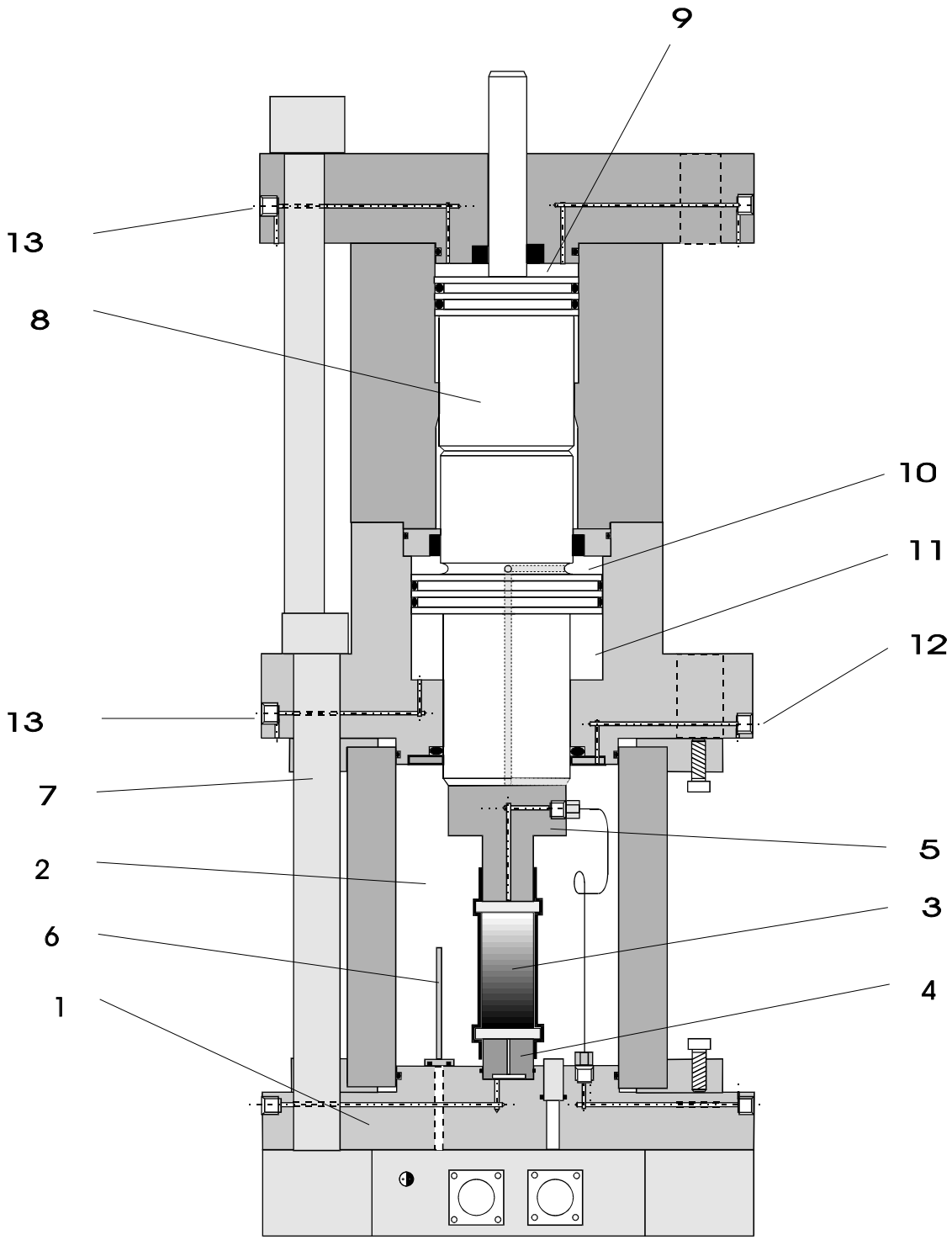


FIG. 3.1 – *Schéma de principe de la cellule autonome*

La cellule supérieure, qui contient le piston de chargement axial (8), comporte trois chambres de pression.

- la chambre supérieure (9), en tête de piston, dans laquelle est envoyée la pression qui va permettre d'écraser axialement l'échantillon.
- la chambre d'autocompensation (10), qui est reliée par un canal, à la chambre de confinement de la cellule inférieure. Ce dispositif permet de compenser l'effort exercé par la pression de cellule sur le piston, et qui tend à faire remonter ce dernier. Le piston est donc équilibré quel que soit la pression de cellule, ce qui fait que la pression envoyée dans la chambre haute du piston axial ne contribue qu'au chargement déviatoire de l'échantillon.
- la chambre basse du piston (11), qui sert à remonter le piston en fin d'essai, ou éventuellement pour des essais d'extension.

L'équilibre du piston grâce au dispositif d'autocompensation, est possible parce que les surfaces effectives du piston sur lesquelles la pression de cellule s'exerce sont égales. A partir de la figure 3.2, on a besoin d'avoir $S_2 = S_3$.

L'effet de la pression en tête de piston, est transmis jusqu'à l'échantillon, en étant multiplié par un rapport de surface. Soit S_4 la surface de l'échantillon, le coefficient multiplicateur est défini par : $S_1/S_4 = 4,5156$ dans le cas où le diamètre de l'échantillon est égal à 40 mm. Si l'on note p_1 la pression de fluide dans la chambre supérieure du piston axial, on peut déterminer la contrainte déviatoire appliquée sur l'échantillon par : $\sigma_1 - \sigma_3 = p_1 * 4.5156$. Pour un diamètre d'échantillon différent de 40 mm, on utilise alors la relation : $\sigma_1 - \sigma_3 = p_1 * 4.5156 * 1256.6/S_4^2$, les surfaces étant exprimées en millimètres carrés.

Les fluides de pression sont apportés à la cellule par plusieurs flexibles hautes pressions. Les connections hydrauliques sont faites avec des raccords coniques. Il existe un certain nombre de purges, la purge de la chambre de confinement (12), pour permettre le remplissage de la cellule et chasser l'air, les purges du piston (13 & 14), pour permettre l'évacuation de l'huile de la chambre morte du piston. Le réseau hydraulique de la cellule est représenté sur le figure 3.3 .

La cellule est prévue, de par ses embases, pour un échantillon proche de 40 mm de diamètre. La longueur de l'échantillon, dans le cas d'un essai d'élancement[2] 1, par exemple, peut être compensée en utilisant une embase inférieure plus longue. Le piston admet un déplacement relatif de 46 mm et son extrémité haute sort du chapeau supérieur de la cellule, afin de pouvoir mesurer son déplacement. Le diamètre intérieur de la chambre de confinement fait 140 mm, ce qui laisse un espace autour de l'échantillon de 50 mm. Le cellule peut travailler jusqu'à une température de 180^oC. Par mesure de sécurité, un "éclateur" de pression (constitué d'une membrane métallique tarée), monté sur une voie de sortie de la chambre de confinement, prévient toute surpression au delà de 70 MPa.

2. l'élancement est défini par le rapport de la hauteur sur le diamètre de l'échantillon

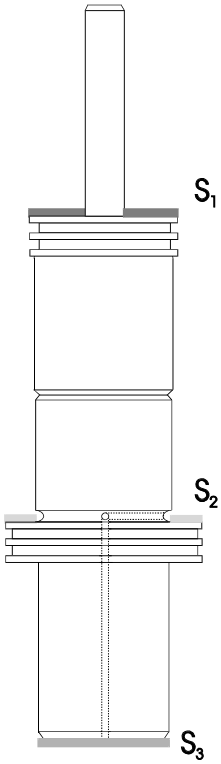


FIG. 3.2 – *Surfaces effectives du piston axial*

Rigidité de la cellule :

Nous entendons ici par rigidité de la cellule, le rapport inverse de l'allongement axial de celle-ci et des forces résultantes des différentes pressions de fluide qu'on applique. Notons que pour déterminer globalement la rigidité du système, caractérisant sa propension à rester stable en phase de rupture d'un échantillon, il faudrait prendre en compte également la rigidité du circuit hydraulique et celle du fluide de pression, et d'une manière générale, tous les composants capables d'emmagasiner et de relâcher de l'énergie élastique.

Il est utile de connaître la rigidité de la cellule quand le raccourcissement de l'échantillon est mesuré depuis l'extérieur de la cellule. Il faut dans ce cas déduire de la mesure du déplacement du piston, l'allongement de la cellule.

La mesure de rigidité de la cellule, vis-à-vis d'une part de la pression injectée en tête du piston axial, et d'autre part de la pression de confinement, a été établie en utilisant un échantillon en acier. La rigidité de l'échantillon fantôme a elle même été calculée à partir d'une mesure de déformations par jauges de déformations axiales et transversales. Le module d'Young est évalué à $E = 204,45\ GPa$ et le coefficient de Poisson à $\nu = 0,315$.

Si on note l la longueur de l'échantillon, alors son raccourcissement s'exprime par

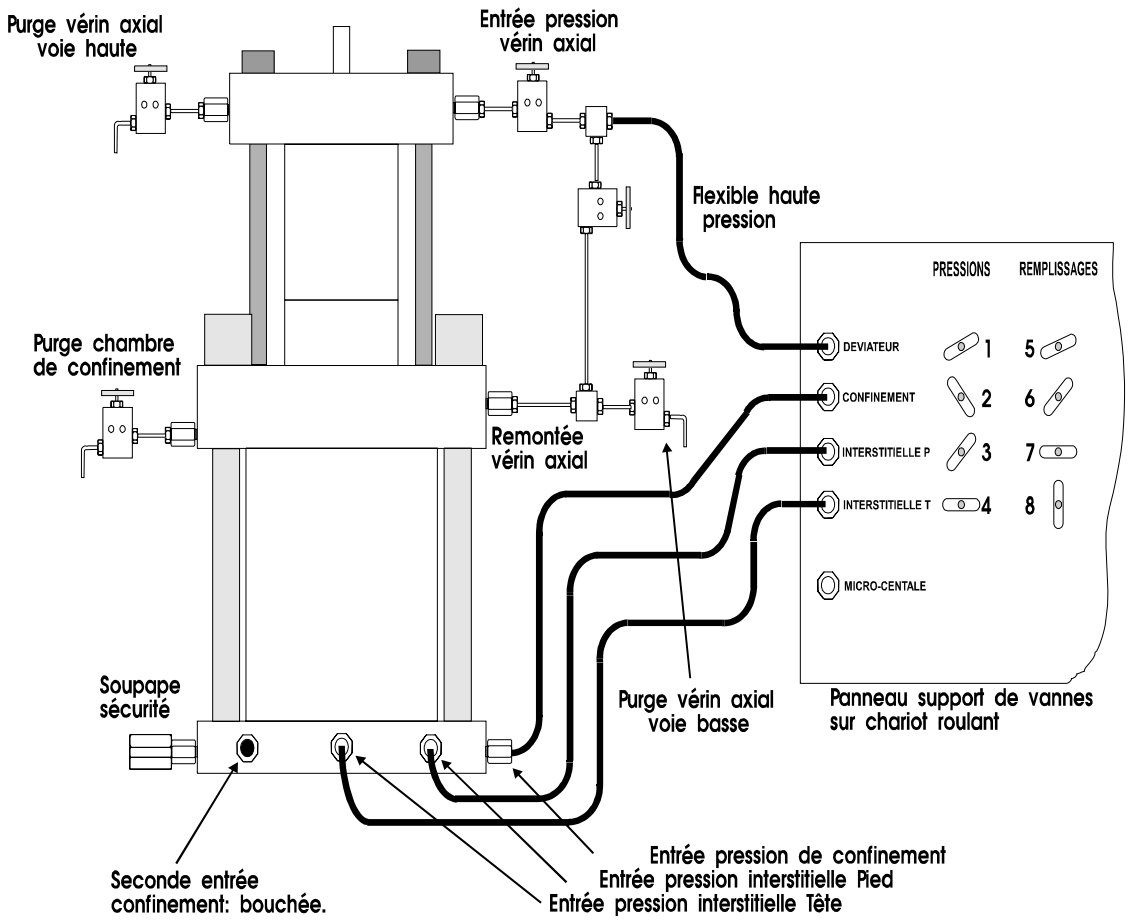
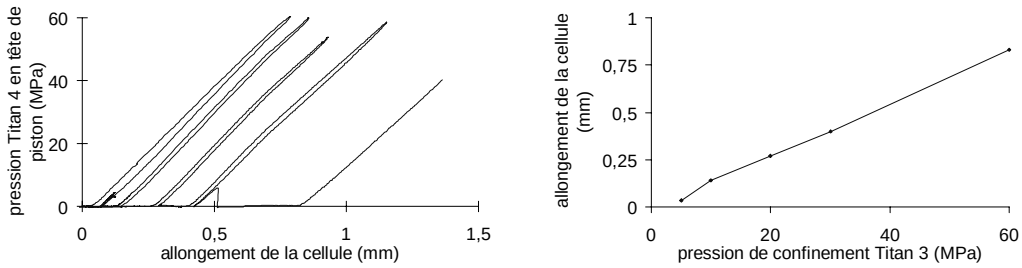


FIG. 3.3 – *Cellule triaxiale : schéma du réseau hydraulique*



(a) (b)

FIG. 3.4 – *Courbes d'étalonnage de la rigidité de la cellule : (a) cycles de chargements axiaux à différents confinements ; (b) allongement de la cellule à différents confinements*

la relation : $(l/E) \times (q - 2\,\nu\,\sigma_3 + \sigma_3)$, q étant le déviateur de contrainte. A partir de plusieurs cycles de chargement axial, à différents confinements, la mesure du déplacement du piston dont on déduit le raccourcissement de l'échantillon fantôme, fournit les réponses représentées sur les figures 3.4. L'allongement de la cellule vis-à-vis de la pression en tête de piston est assez linéaire, avec une légère irréversibilité pour les premiers cycles aux différentes pression de confinement, de même pour l'allongement de la cellule vis-à-vis de la pression de confinement. La cause d'irréversibilité doit être située au niveau des filetages des tirants de la cellule, et si l'on génère plusieurs cycles consécutifs, l'irréversibilité disparaît. Néanmoins, il est possible d'étalonner l'allongement moyen de la cellule Δ par la relation : $\Delta = 0,0125\times$ *pression en tête de piston* $+0,0142\times$ *pression dans la chambre de confinement* (pression en MPa et allongement en mm). La rigidité de la cellule par rapport à l'action axiale du piston sur l'échantillon, exprimée comme la force axiale exercée sur l'échantillon divisée par l'allongement de la cellule, est donc égale à $0,454\ MN/mm$.

3.1.3 Générateurs de pression

Les différentes pressions de fluide, huile ou eau, sont générées et asservies par quatre systèmes générateurs - régulateurs *Titan*[3] identiques. Les générateurs sont des pistons hydrauliques commandés en déplacement, et qui permettent une bonne souplesse et rapidité dans la régulation des pressions. La figure 3.5 présente les principaux composants d'un générateur.

Le piston du générateur est fixe et c'est le corps de la chambre de pression qui glisse le long de celui-ci. Le déplacement de l'alésage est réalisé, par l'intermédiaire d'une butée à billes, par un système vis - écrou à billes précontraint. Le mouvement de rotation de la vis est généré, à travers un accouplement élastique, depuis un moteur autosynchrone à double sens de rotation.

3. appellation du constructeur

Chaque générateur possède deux capteurs de proximité pour signaler les deux fins de course du piston. Ils possèdent aussi, par sécurité, en cas de dysfonctionnement des capteurs de proximité, deux butées mécaniques qui interrompent directement le mouvement du moteur. Un capteur de pression $0 - 60\ MPa$ est connecté en parallèle sur la sortie hydraulique de chaque générateur. Un "éclateur" de pression est placé par sécurité sur la sortie au cas où la protection électronique en pression ne fonctionnerait plus. Enfin, un capteur de position angulaire intégré au moteur permet de calculer le changement de volume de fluide à l'intérieur du piston. Le tableau 3.1 rappelle les principales caractéristiques des quatre générateurs.

générateur Titan	fluide	pres. max.	volume	vitesse max.	résolution
1 : interst. en pied	eau	60 MPa	120 cm3	0,91 cm3/s	0,1 mm3
2 : interst. en tête	eau	60	120	0,91	0,1
3 : confinement	huile	60	250	0,91	-
4 : piston axial	huile	150	250	0,91	-

TAB. 3.1 – *Caractéristiques des quatre générateurs Titan*

3.1.4 Régulateurs électroniques

Le mouvement des moteurs autosynchrones des générateurs est commandé par quatre régulateurs électroniques, d'une part au niveau alimentation en puissance, et d'autre part au niveau contrôle par variateur numérique. Les régulateurs travaillent à partir de signaux analogiques, provenant de capteurs de mesure :

- soit les capteurs de pression internes montés sur les générateurs,
- soit d'autres capteurs externes, de pression ou de types différents, comme c'est le cas, pour le Titan 4, du piston axial de la cellule, où un capteur de déplacement monté en tête de piston permet de procéder à un contrôle en déplacement de ce dernier.

Les régulateurs sont programmés pour imposer une consigne correspondant aux mesures des capteurs de contrôle. Les consignes possibles sont de trois types :

- un palier, la consigne reste fixe ;
- une rampe, à vitesse de montée ou descente constante ;
- une immobilisation complète du générateur.

Le régulateur gère la différence entre la consigne programmée et la mesure du capteur de contrôle, à l'aide d'un processeur en utilisant la technique du PID (Proportionnel, Intégral / Différentiel) avec une fréquence de 1000 Hz. La qualité de

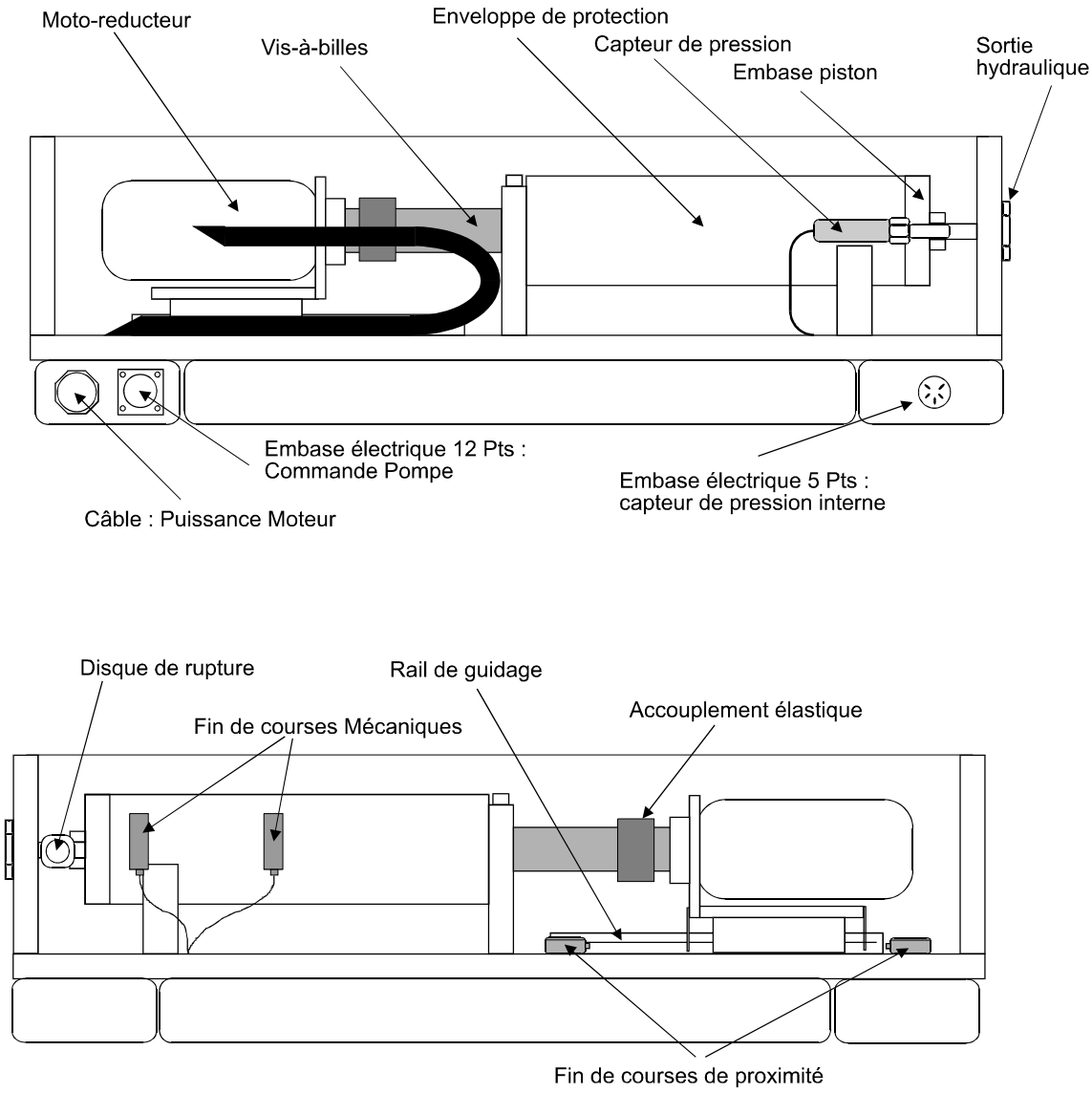


FIG. 3.5 – *Schéma de principe d'un générateur*

la régulation, qui peut être qualifiée schématiquement par le temps de réponse du système par rapport à un écart entre la consigne et la mesure du capteur, dépend de deux paramètres, Pb et Ti auxquels a accès l'utilisateur. Ces deux paramètres gèrent respectivement la réaction face à une différence instantanée de la consigne et du capteur, et une prise en compte temporelle de la réaction du système. L'objet ici n'est pas de présenter en détail la question technique de régulation. Cependant, les deux paramètres précédents sont dans notre cas établis empiriquement, compte tenu de la rigidité du système. Cette rigidité dépend entre autres du type et du volume de fluide dont on veut réguler la pression, de la rigidité de l'échantillon à tester et de la rigidité de la cellule. Plus les deux paramètres sont faibles, plus l'ensemble est réactif, mais une trop forte réactivité peut engendrer un phénomène d'oscillation autour de la consigne, stable ou instable.

La consigne imposée par le régulateur est calculée à partir d'un programme interne au régulateur, que peut modifier de façon directe l'utilisateur, ou indirecte par l'intermédiaire d'un ordinateur. Une fois que le programme est établi, le régulateur est indépendant, et travaille à sa vitesse spécifique.

C'est également le régulateur qui gère la sécurité de fin de course du piston, à partir des capteurs de proximité du générateur, et la sécurité en pression du générateur, avec un seuil limite maximum de 62 MPa.

La figure 3.6 présente la face interactive du régulateur. Sur l'écran de droite apparaît l'écran principal, sur lequel est affiché la mesure du capteur de contrôle et la consigne demandée. L'utilisateur peut agir sur les paramètres de régulation et sur le type et les paramètres du programme du régulateur par le clavier situé sous cet écran. Sur l'écran de gauche apparaît la pression mesurée par le capteur interne de pression. Sur le 3^{ieme} écran en bas à gauche, qui existe seulement pour les deux régulateurs de pression interstitielle, s'inscrit le volume de fluide expulsé par le générateur de pression. Des témoins de sécurité sont placés sur la droite.

3.1.5 Acquisition des mesures

La chaîne d'acquisition installée est de type *Vishay Micromesures*, avec un système 4270A pour le conditionnement de jauges de déformation, et un système universel 4280. Le système de conditionnement de jauges comprend 20 voies de mesure alimentées par une tension de 1 V à 10 V. Les jauges peuvent avoir une résistance de 120 Ω ou 350 Ω, montées en quart, demi ou pont complet. La plage de mesure est de $\pm$ 16384 $\mu\varepsilon$, avec une résolution de 1 $\mu\varepsilon$.

Une carte de mesure en tension et une carte de conditionnement de capteur de type LVDT sont implantées dans le système universel. La carte de tension possède une sortie de 2 V à 24 V et une entrée de 10 V, avec un gain variant de 0,1 à 10, pour une résolution de 32768 points de mesure. La carte LVDT a également une résolution de 32768 points.

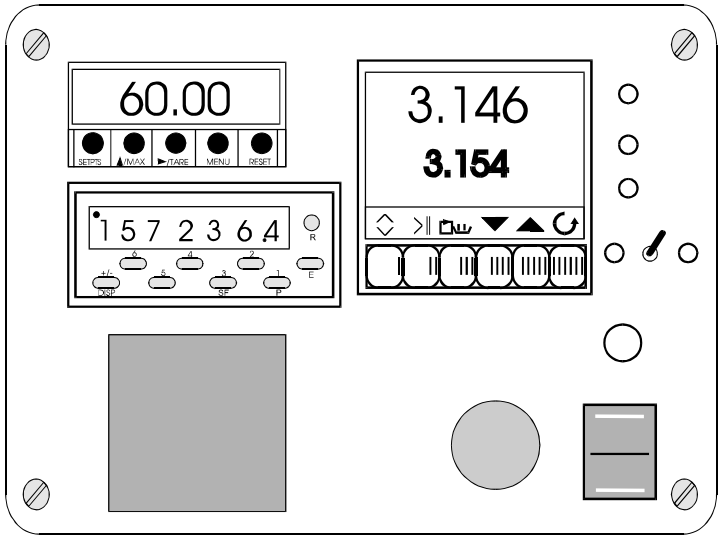


FIG. 3.6 – *Panneau de contrôle d'un régulateur*

3.1.6 Logiciel de contrôle

L'interface principale pour l'utilisateur de la cellule triaxiale est le logiciel de contrôle *Sestar*[4]. Il gère le dialogue avec les quatre régulateurs électroniques, avec la chaîne d'acquisition des mesures et réalise la sauvegarde informatique des différentes données.

Le dialogue avec les régulateurs se fait dans les deux sens, par l'intermédiaire du port sériel RS422.

- le logiciel reçoit les mesures du capteur de pression interne au générateur de pression, du capteur de régulation dans le cas où celui-ci est différent du capteur de pression, du capteur de volume expulsé par le générateur. Il reçoit également la consigne qu'impose le régulateur au générateur.

- Le logiciel envoie à chacun des changements de phase de l'essai programmés par l'utilisateur, le nouveau pas de programme au régulateur. Il bloque le système régulateur - générateur en cas de trop grande différence entre la consigne exigée par le régulateur et la mesure du capteur de contrôle.

Le phasage complet de l'essai peut être programmé à l'avance, ou au fur et à mesure par l'utilisateur. Deux cent cinquante six pas de programme peuvent ainsi être rentrés, contenant l'instruction pour chaque régulateur et la durée de la phase.

Le logiciel fait l'acquisition des différentes voies de mesure programmées de la chaîne d'acquisition, à fréquence définie par l'utilisateur, avec la possibilité de réaliser des moyennes d'acquisition pour établir la valeur d'une voie de mesure. Les coefficients d'étalonnage sont appliqués aux différentes mesures avant l'affichage et

4. appellation du constructeur

la sauvegarde informatique. Une interface graphique aide l'utilisateur dans le suivi de l'essai.

3.1.7 Capteurs de mesure

La pression de confinement autour de l'échantillon est mesurée par le capteur de pression interne de Titan 3. Le déviateur de contrainte est calculé à partir du capteur de pression interne de Titan 4, multiplié par le coefficient de rapport de surface présenté précédemment en 3.1.2. La variation de volume de l'échantillon, dans le cas d'un essai sur matériau saturé, est mesurée à l'aide des capteurs de volume internes aux régulateurs Titan 1 et Titan 2. Le raccourcissement axial est estimé à partir de la mesure externe à la cellule du déplacement axial du piston, par un LVDT $\pm$ 3 mm (Linear Variable Differential Transducer). Des mesures internes à la cellule, présentées dans le paragraphe 3.2 suivant sont utilisées pour effectuer les mesures de déformations axiales et radiales.

3.1.8 Conclusion

L'installation présentée, caractérisée par le principe d'une cellule autonome, sans presse, a l'avantage de sa légèreté d'installation, en comparaison avec une installation avec presse. La régulation des pressions est assez souple et permet un contrôle par plusieurs types de capteurs intéressante. On peut également noter la rapidité de la régulation des pressions, qui est due pour partie aux composants électriques et mécaniques des générateurs, et au principe de régulateurs indépendants du logiciel de contrôle.

L'installation devrait pouvoir évoluer sur plusieurs points :

- remplacement du convertisseur analogique - digital 12 bits de la chaîne d'acquisition par un convertisseur 14 bits, plus compatible avec la résolution des mesures par la chaîne d'acquisition ;
- intégration d'une carte digitale - analogique pour permettre une régulation des générateurs à débit de fluide constant à partir du capteur de volume intégré aux générateurs, ou bien une régulation à partir d'un signal obtenu par calcul de mesures de plusieurs capteurs à la fois, pour obtenir un chargement à vitesse de changement de volume ou de diamètre constante, par exemple.

3.2 Instrumentation de mesure de déformation

3.2.1 Motivation

La qualité des mesures de déformations axiales et radiales a un double intérêt dans le cadre de cette étude :

- réaliser les mesures des déformations dans l'échantillon les plus proches pos-

sibles des vrais déformations, dans le cadre de l'hypothèse d'homogénéité de l'essai ;

- permettre de détecter la perte d'homogénéité des déformations, caractérisées par l'apparition de bandes de cisaillement, afin de connaître le seuil à partir duquel la réponse du comportement de l'échantillon n'est plus représentative de la relation constitutive du matériau.

Sur le premier point, pour ce qui est des mesures externes à la cellule, qui sont des techniques relativement simples à mettre en œuvre, la déformation de la cellule pendant le chargement, discutée au paragraphe 3.1.2, même si elle peut être correctement étalonnée, perturbe nécessairement la mesure. Les différentes sources d'erreur des techniques externes sont selon Goto *et al.* [62] :

- la compliance de la cellule ;
- un basculement éventuel de l'échantillon au fur et à mesure du chargement ;
- les erreurs d'interface (bedding errors) entre l'échantillon et les embases inférieures et supérieures ;
- la non-uniformité du champs de déformation, notamment aux extrémités de l'échantillon, à cause du frettage, menant à une déformation en tonneau ;
- la localisation des déformations en bandes de cisaillement.

Le basculement de l'échantillon est rendu impossible puisque ses embases n'ont pas la possibilité de s'orienter (cf. §3.1.2). Les erreurs d'interface viennent d'une part de la qualité des deux surfaces des extrémités de l'échantillon, qui peut être améliorée par une bonne rectification, et d'autre part par le dispositif de lubrification interposé entre l'échantillon et les deux embases pour diminuer le frettage. On peut d'ailleurs s'attendre à ce qu'il existe encore un frettage résiduel, qui perturbera alors le champ de déformation au niveau des extrémités.

Cette voie des techniques de mesures externes est donc peu utilisée lorsque l'on veut procéder à des mesures de qualité, et une orientation est prise vers des techniques internes à la cellule. Dans ce cas on doit distinguer les mesures locales ou ponctuelles (représentée surtout par les jauges de déformation de petite taille collées directement sur l'échantillon) des mesures globales effectuées sur tout ou une partie de l'échantillon. Sur des matériaux de constitution homogène, la réponse des deux méthodes doit être très semblable, tant que le champ de déformation reste homogène. A partir du moment où l'on s'intéresse aussi à la formation des bandes de cisaillement à travers l'échantillon, les mesures locales sont soient détruites, soient pas directement influencées (cf. Fig. 3.7). La technique de mesure interne et globale est donc particulièrement intéressante dans ce cas.

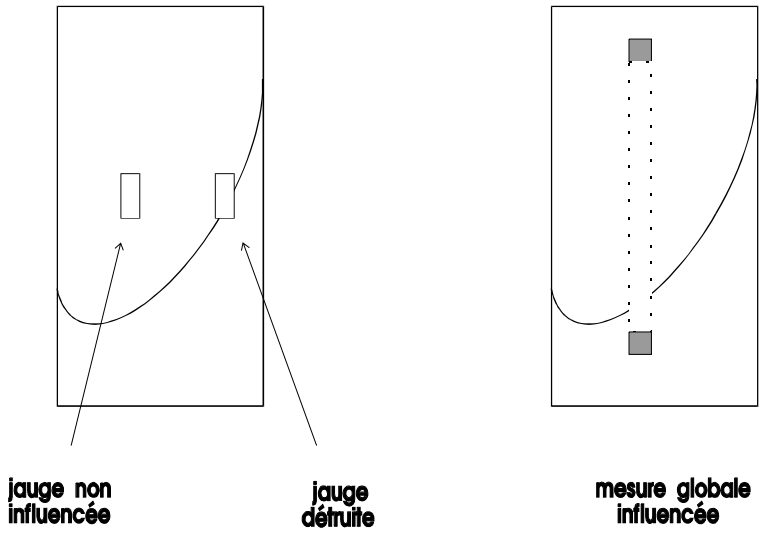


FIG. 3.7 – *Mesures de déformations internes : comparaison entre une mesure locale et une mesure globale à l'apparition d'une bande de cisaillement*

Sur le second point correspondant à la détection de la localisation des déformations à partir de capteurs de mesure de déformation, l'idée est de multiplier les mesures. Si l'on fait référence aux travaux de Hadley [65], Santarelli [126], [127], Kondo *et al.* [89], Millien [106], Haied [66], la localisation doit de manifester par une perte de linéarité de l'évolution d'une mesure radiale par rapport à une mesure radiale dans une autre direction. C'est à dire qu'au moment où apparaît la localisation, une direction radiale devient privilégiée par rapport aux autres. On a donc besoin d'avoir plusieurs capteurs radiaux, disposés selon différentes orientations radiales. On peut également avoir intérêt à multiplier les mesures axiales pour comparer leur évolution respective au cours de l'essai.

3.2.2 Techniques existantes

Les techniques de mesure de déformation internes et globales sur l'échantillon ont été développées essentiellement dans l'optique de mesures de rigidités d'échantillon en tout début de chargement axial, c'est à dire pour de faibles déformations, ce qui requiert des précisions en terme de déformation de moins de 10^{-5}.

Les mesures axiales que récapitulent Scholey *et al.* [130] sont toutes basées sur le principe de la mesure du déplacement relatif de deux points de la surface de l'échantillon, placés sur une même génératrice. Connaissant alors le déplacement de ces deux points et leur distance respective en début d'essai, on peut en déduire la déformation de l'échantillon entre ces deux points. C'est la technique de mesure du déplacement qui varie :

- mesure avec contacts :
  - avec LVDT

  - avec capteur d'inclinaison
  - avec capteur à effet de Hall
  - avec capteur à lame flexible LDT

- mesure sans contact avec capteur de proximité

Certaines de ces techniques sont également applicables pour les mesures de déformations radiales.

Le tableau 3.2 récapitule les principales caractéristiques de ces méthodes.

Les capteurs inductifs de type LVDT, dans le cas de mesures axiales, sont montés sur deux colliers, l'un en tête et l'autre en base de l'échantillon, et mesurent le déplacement relatif de ceux-là. Ces colliers sont fixés sur l'échantillon mais doivent permettre une dilatance radiale de celui-ci. De plus, la tige du capteur ne doit pas frotter sur le corps. La difficulté de cette technique est dans l'influence que peut avoir une déformation en tonneau ou un flambement de l'échantillon, sur la précision de la mesure comme sur la capacité du capteur à rester opérationnel. Par contre, ils offrent de larges possibilités quant à la course possible, la température d'utilisation et la pression du fluide de confinement (jusqu'à 70 MPa). Plus récemment, des attaches indépendantes pour les LVDT ont été développées. Elles sont collées sur la membrane, elles offrent une plus grande facilité de montage et plus grande légèreté. Si l'on considère les travaux récents réalisés avec des LVDT particulièrement sensibles par Cuccovillo et Coop [46], la résolution de la mesure est inférieure à 10^{-6}, en tenant compte des bruits.

L'emploi de capteurs d'inclinométrie est basé sur la déformation d'un triangle. Un des cotés du triangle est constitué d'une portion d'une génératrice de l'échantillon. Quand la longueur de celle-ci change au cours de l'essai, le triangle se déforme, entraînant un changement d'inclinaison de ses cotés, que mesure le capteur. Deux types de capteurs ont été utilisés. En premier, un capteur électrolytique (Burland et Symes [29] puis Jardine *et al.* [79]), formé d'une capsule partiellement remplie d'un électrolyte, dans lequel plongent trois électrodes. L'orientation de la capsule change le taux d'immersion des électrodes et leur réponse, d'où on en déduit une relation non linéaire entre l'orientation du capteur et le réponse du capteur. Par ailleurs, un capteur de type pendulaire (Ackerly *et al.* [1]), a été développé, constitué d'une masselotte suspendue par une lame flexible équipée de jauges. Ces deux techniques ont une très bonne résolution, et permette des mesures jusqu'à de grandes déformations. Il faut considérer pourtant que l'inclinaison éventuelle de la génératrice sur laquelle s'appuie le triangle de mesure, même sans changement de la distance entre les deux points d'appui, influence la mesure.

Les capteurs à effet de Hall fonctionnent sur ce principe électromagnétique (Clayton *et al.* [40]). Une différence de potentiel est générée perpendiculairement aux lignes de courant d'un conducteur placé dans un champ d'induction, et dépend de

la position du conducteur par rapport au champ. Leur résolution est intéressante mais leur course reste limitée.

Les capteurs à lame flexible LDT (Local Displacement Transducer) ont été développés au Japon par Goto *et al.* [62]. C'est une lame de bronze équipée de jauges de déformation, déformée en flambement entre deux crochets collés sur la membrane de l'échantillon. La déformation de l'échantillon crée un déplacement des deux crochets et modifie la déformée de la lame. On a une réponse du capteur non linéaire, en racine carrée du raccourcissement. De plus, la course est très limitée, ce qui rend la mise en place délicate. Par contre, la résolution est très bonne, et la mesure effectuée est bien la mesure du changement de la distance entre deux points de la membrane, et non pas entre deux supports comme c'est le cas des montages LVDT ; cela rend la mesure beaucoup moins sensible aux rotations de la surface de l'échantillon lors de processus de déformation en tonneau.

Les capteurs de proximités sont assez simples à mettre en œuvre. La tête du capteur qui forme un condensateur de capacité fixe, forme également à l'approche d'une surface métallique un condensateur dont la capacité dépend de la distance par rapport à la plaque. Ils nécessitent l'emploi d'une cible collée sur la membrane, et la mesure semble aussi devoir être affectée par les déformations en tonneau.

Une technique particulière aux mesures des déformations radiales existe aussi. De l'idée de Bishop et Henkel [18] d'un collier de mesure comprenant un système mesurant l'ouverture de l'anneau, la solution a évolué vers un cercle en lame métallique flexible équipée de jauges mesurant la déformation radiale dans une direction latérale à l'échantillon (Vuaillat [158], Kolymbas et Wu [87]).

capteur	résolution	course	pression [a]
LVDT	10^{-6}	selon capteur et problèmes d'alignement	70 MPa
inclinomètre	5.10^{-6}	$3,5.10^{-1}$	1.5 MPa
à effet de Hall	2.10^{-5}	1.5 à 7 mm	1 MPa
LDT	10^{-6}	10^{-2}	courantes en
proximité	$2.5.10^{-4}$ mm	2.5 mm	méca. des sols

TAB. 3.2 – *Capteurs internes existants : récapitulatif des caractéristiques, selon Scholey et al. [130]*

[a] pression de confinement maximum pour laquelle les capteurs ont été utilisés avec succès.

3.2.3 Instrumentation développée dans notre étude

Les capteurs axiaux et radiaux nécessaires pour notre étude devaient avoir une bonne résolution, avec une étendue de mesure importante, pour étudier le comportement de l'échantillon jusqu'à la rupture. Ils devaient aussi pouvoir travailler dans un fluide sous forte pression (jusqu'à 60 MPa). La technique du LDT pour les mesures

axiales semblait sur ce point intéressante, bien qu'elle offre une faible étendue de mesure. Garder le principe de la lame équipée de jauges de déformation, et changer la géométrie de cette lame a permis d'élargir cette étendue de mesure (Bésuelle et Desrues [14]). La technique de lame élastique équipée de jauges a été également utilisée pour les mesures de déformation latérale.

Dans l'instrumentation développée, le corps des capteurs axiaux et radiaux, comprenant la partie flexible, est en bronze UE9P (cuivre, étain et phosphore), à haute limite élastique (510 MPa). Ce matériau a l'avantage d'avoir un large domaine de déformation élastique ($\simeq 4.10^{-3}$), un faible module d'Young (120 GPa) relativement à celui de l'acier et une bonne résistance à la corrosion. La forme du corps d'épreuve offre un compromis entre la résolution et l'étendue de la mesure. Suivant le type de matériau étudié, cette forme, dans ses proportions, peut être modifiée, pour restreindre ou étendre l'étendue de mesure. La figure 3.8 présente le schéma de forme d'un capteur axial et la figure 3.9 celui d'un capteur radial. Les dimensions correspondent à celles qui ont été retenues pour mesurer les déformations d'un échantillon de grès, de hauteur 80 mm et diamètre 40 mm, au cours de l'essai triaxial, y compris après la rupture. La figure 3.10 montre les capteurs en situation, trois capteurs axiaux et quatre capteurs radiaux mis en place sur un échantillon dans la cellule triaxiale.

3.2.3.1 Capteur axial

3.2.3.1.1 Description Les deux crochets en forme de V sont collés directement sur la membrane. Les deux extrémités du capteur viennent se loger dans ces crochets. Lorsque les deux extrémités se rapprochent, le tronçon de la lame élastique équipé de jauges de déformation se déforme en flexion. Cela entraîne donc un changement de réponse des jauges. Lors de la mise en place de l'échantillon, le capteur est déjà légèrement comprimé, c'est-à-dire que les deux extrémités sont déjà rapprochées par rapport à leur position au repos. Cela permet au capteur de se maintenir en place du fait de sa propre réaction élastique, et de suivre les mouvements de raccourcissement ou d'allongement de l'échantillon. Les deux crochets sont collés sur la membrane en Néoprène avec une colle puissante (colle cyanoacrylate à base de silicone, *Loctite 480*, ayant une résistance au cisaillement de l'ordre de 30 MPa). Les deux extrémités du capteur ont une forme étudiée pour améliorer le positionnement du capteur sur les crochets. L'une des extrémités à une forme concave et l'autre une forme convexe. De cette façon, on rapproche le contact du capteur sur les crochets d'un contact isostatique en trois points.

Les quatre jauges de déformation sont positionnées de part et d'autre du tronçon fléchi du capteur. Si deux d'entre elles sont sur la surface étirée, les deux autres sont sur la surface comprimée. Les jauges sont montées en pont de Wheatstone complet. Ce sont des jauges *Vishay* de type N2A, à trame métallique en Constantan, avec un support polyimide laminé, particulièrement adaptées aux capteurs du fait de leur faible fluage. La grille fait 1,57 sur $1,57$ mm et a une résistance de 350 Ω. Les jauges

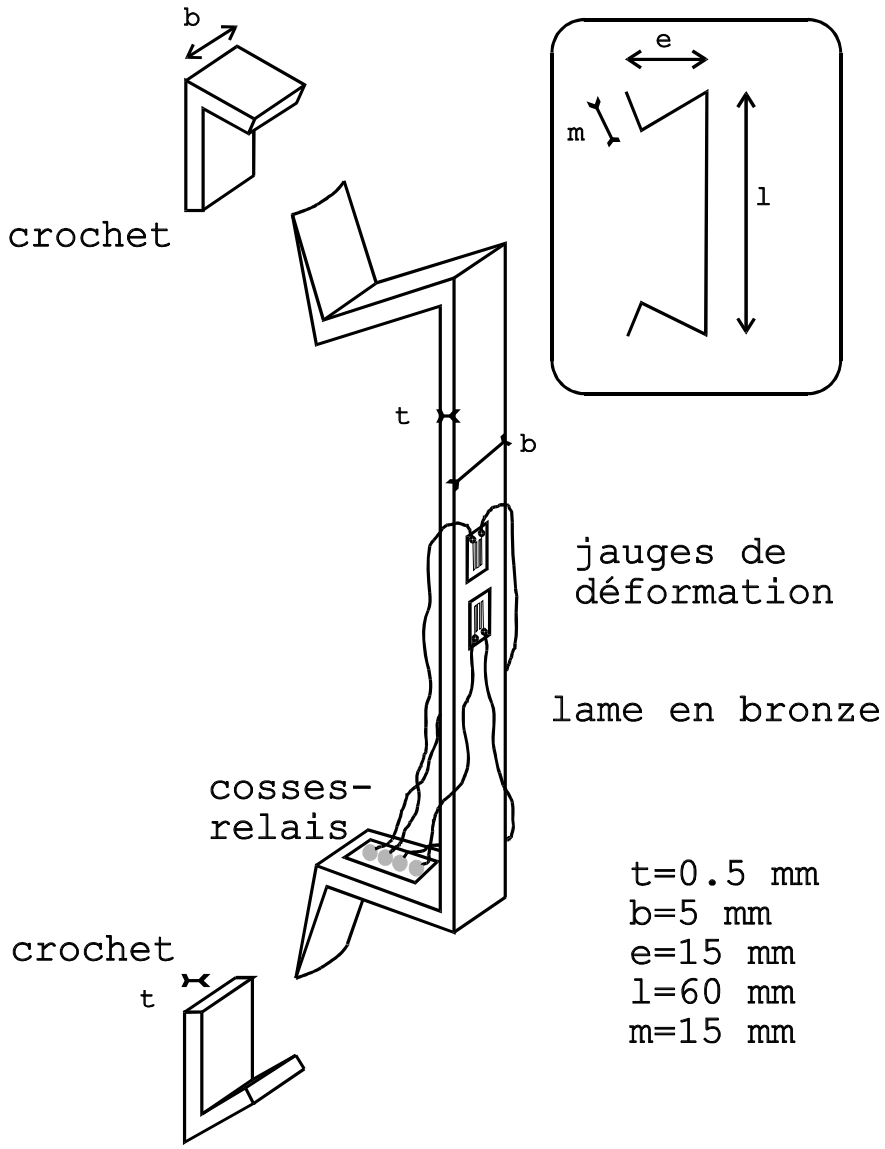


FIG. 3.8 – *Capteur interne de déformation axiale : schéma de forme et dimensions*

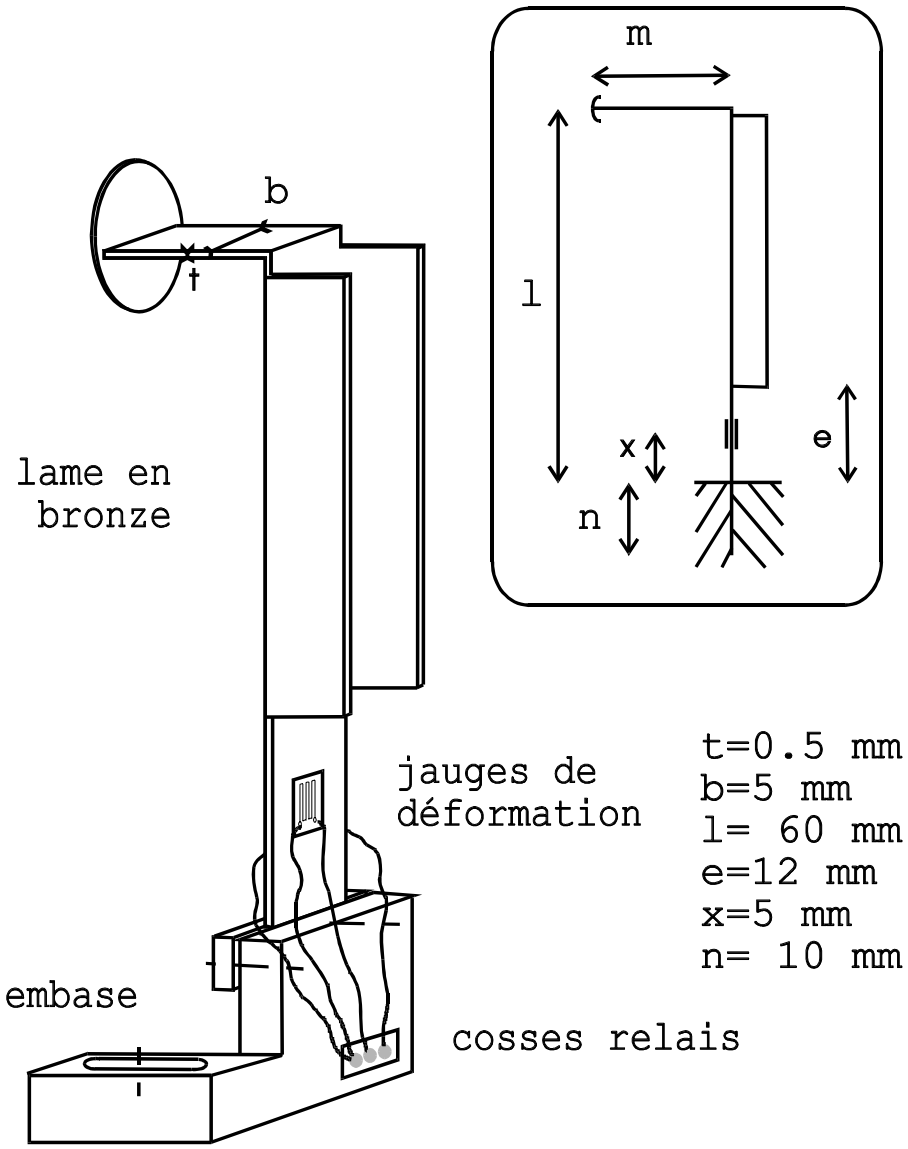


FIG. 3.9 – *Capteur interne de déformation radiale : schéma de forme et dimensions*

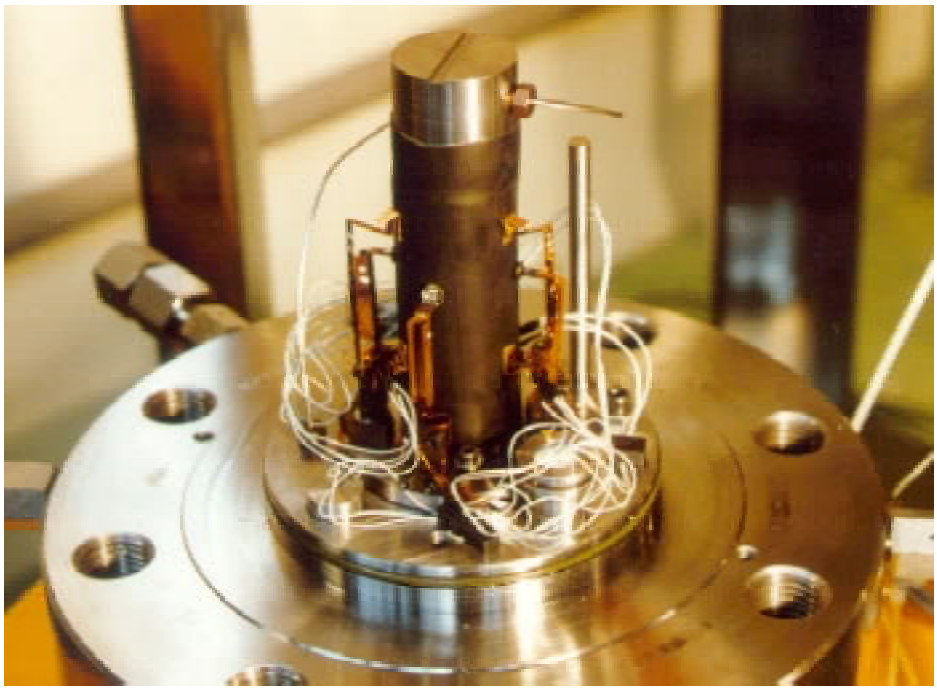


FIG. 3.10 – *Capteurs internes de déformation montés sur la cellule triaxiale*

sont collées sur la lame en bronze par une colle performante (*Vishay* M43B), qui ne nécessite qu'un faible film entre le support de jauge et le bronze ; elle est caractérisée par un faible fluage et une bonne résistance aux agressions chimiques. Cette colle doit être cuite en étuve pendant deux heures à 190^oC et recuite pendant également deux heures à 205^oC. Les jauges sont protégées sur leur face extérieure par cette même colle. Elles sont raccordées à des cosses relais par des fils fins de diamètre $0,13\ mm$. Le capteur est ensuite connecté sur les passe-fils étanches de la cellule par des fils à gaine en Téflon souples. La position des cosses est choisie pour perturber le moins possible le positionnement du capteur sur ses crochets, du fait du poids des fils électriques.

Le pont de Wheastone est conditionné par la chaîne d'acquisition décrite en 3.1.5. Il est alimenté par une tension de 1 Volt et la plage de mesure possible de signal de sortie est de $2,02\ mV$, compte tenu du gain utilisé. La résolution en tension est de $0,99\ \mu V$. La temporisation entre la lecture de deux voies successives de capteurs internes est limitée empiriquement à 0,1 seconde pour diminuer le bruit de la mesure. Dans ces conditions, le bruit est de l'ordre de la résolution de la mesure.

3.2.3.1.2 Etude théorique La relation théorique de la réponse du capteur est établie en annexe A et celle-ci n'est pas linéaire. Si l'on considère que Δ , le raccourcissement de la distance entre les deux extrémités du capteur reste faible, on peut effectuer un développement limité au premier ordre, on obtient alors une relation linéaire. La figure 3.11 montre la réponse théorique du capteur (relation complète)

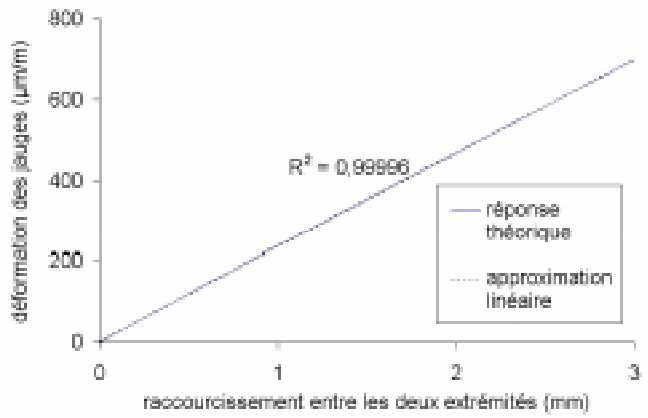


FIG. 3.11 – *Capteur interne de déformation axiale : réponse théorique et approximation linéaire*

avec les paramètres physiques réels, comparée à une approximation linéaire. L'erreur théorique commise reste inférieure à 0,3 %. La réponse peut donc être considérée à juste titre comme linéaire.

La pente de la droite précédente est de $0,23\ m^{-1}$. Le facteur de jauge est de 2,1 , donc la réponse électrique du capteur a une pente de $0,48\ \mu V/\mu m$. Compte tenu de la résolution en tension du système d'acquisition dans la configuration citée ci-dessus, le capteur offre une résolution en déplacement de 2 μm, soit une résolution en déformation, pour une distance initiale des deux extrémités du capteur de 60 mm, de $3,5.10^{-5}$. Ces valeurs théoriques indicatives sont vérifiées lors de l'étalonnage. La force maximale théorique exercée par le capteur sur les crochets est de l'ordre de 1,4 Newton.

3.2.3.1.3 Etalonnage L'étalonnage est effectué sur un banc de mesure comprenant une partie mobile pouvant glisser à l'aide d'une vis micrométrique. Son déplacement est mesuré avec un comparateur à aiguille de graduation 2 μm. Deux crochets sont collés, l'un sur la partie fixe, l'autre sur la partie mobile du banc, entre lesquels est placé le capteur à étalonner. La figure 3.12 (a) montre la réponse d'un capteur sur toute son étendue de mesure, et la figure 3.12 (b) montre sa réponse sur une partie limitée de son étendue de mesure. Les courbes représentent la réponse du capteur dans les deux sens de déplacement, et l'approximation linéaire possible par la méthode des moindres carrés. Cette réponse est d'une part bien linéaire, et d'autre part présente une très faible hystérésis, inférieure à 4 μm. L'étendue de mesure est d'environ 3 mm, bien que celle-ci comprend une marge de sécurité pour ne pas risquer de plastifier la lame flexible. Cela fait une étendue de mesure en terme de déformation, de l'ordre de 5.10^{-1}.

Le tableau 3.3 présente les pentes expérimentales des trois capteurs réalisés, et utilisés dans nos essais. Ces pentes sont très proches de la pente prévue par l'étude

théorique. Ce sont ces valeurs expérimentales qui seront utilisées pour l'interprétation des mesures pendant les essais.

capteur	pente (V(×1000) /mm)
rac 1	0,4881
rac 2	0,5393
rac 3	0,5030

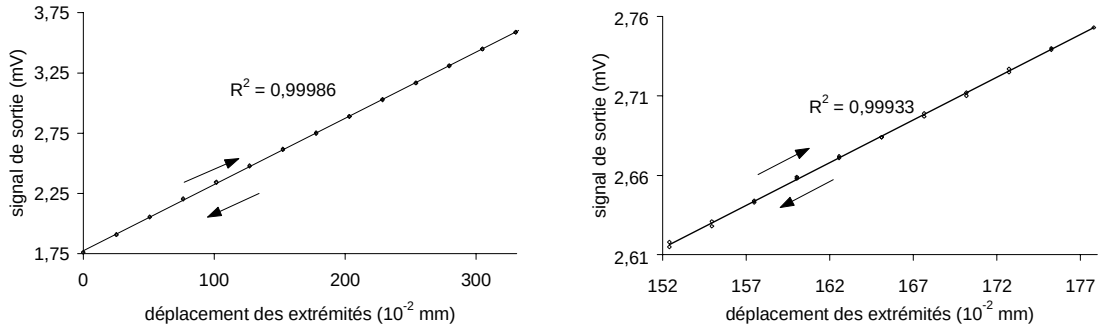
TAB. 3.3 – *Capteurs internes axiaux : pentes d'étalonnage*

Les crochets sont collés sur la membrane, et non pas directement sur l'échantillon. Si l'on fait référence à Jardine et Brooks [80], qui ont comparé une mesure de déformation utilisant des fixations collées sur la membrane avec une mesure avec jauges de déformation collées directement sur l'échantillon, le déplacement relatif de la membrane sur l'échantillon peut être négligé, du moins pour des déformations de l'ordre de $1,5.10^{-3}$. Ils font également référence à Gens [61], qui a montré à l'aide d'une mesure optique, que la membrane bougeait par rapport à l'échantillon seulement pour de grandes déformations. D'autre part, Goto *et al.* [62], lorsqu'ils considèrent la distance à prendre en compte pour obtenir une déformation à partir de la mesure de déplacement des capteurs LDT, évalue celle-ci à la distance séparant les deux milieux des surfaces collées des crochets. Ils font également l'hypothèse que la membrane ne bouge pas par rapport à l'échantillon.

Un étalonnage a été fait pour prendre en compte ces deux remarques. Une mesure de déformation axiale a été réalisée sur un échantillon en acier et sur un échantillon de Plexiglas, à l'aide des capteurs internes et de jauges de déformation collées sur les échantillons. A partir de ces mesures, la distance à prendre en compte pour obtenir une déformation à partir des capteur internes a été établie. Cette distance, représentée par la cote $k = 50\ mm$ de la figure 3.13, correspond bien à l'évaluation de Goto *et al.*, et confirme de ce fait que la membrane ne bouge pas par rapport à l'échantillon, du moins jusqu'aux déformations testées de $1,5.10^{-2}$.

Les capteurs dimensionnés à l'origine pour des échantillons de hauteur 80 mm, sont également utilisés pour les essais d'élancement 1. Le principe de développement de ces capteurs aurait voulu que soient fabriqués des capteurs aux dimensions adaptées, cependant pour des raisons de simplicité, seulement les crochets ont été modifiés, comme le représente la figure 3.14. Dans cette configuration, la valeur du coefficient k évoqué ci-dessus, passe, d'après des mesures expérimentales, de 50 mm à 18 mm. Lorsqu'il y aura rotation des surfaces sur lesquelles sont collés les crochets, l'effet sera amplifié du fait de la longueur des crochets et la mesure pourra en être perturbée. De même, le résolution de la mesure en terme de déformation est augmentée d'un facteur deux.

3.2.3.1.4 Comparaison avec une mesure externe Trois capteurs axiaux sont utilisés pour un essai classique sur un échantillon de grès rectifié. Ils sont dispo-



(a) (b)

FIG. 3.12 – *Capteur interne de déformation axiale : étalonnage sur toute l'étendue de mesure (a) ; sur une partie de l'étendue de mesure (b).*

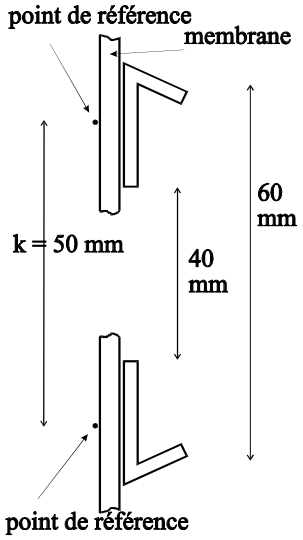


FIG. 3.13 – *Capteur interne de déformation axiale : points de références sur les crochets*

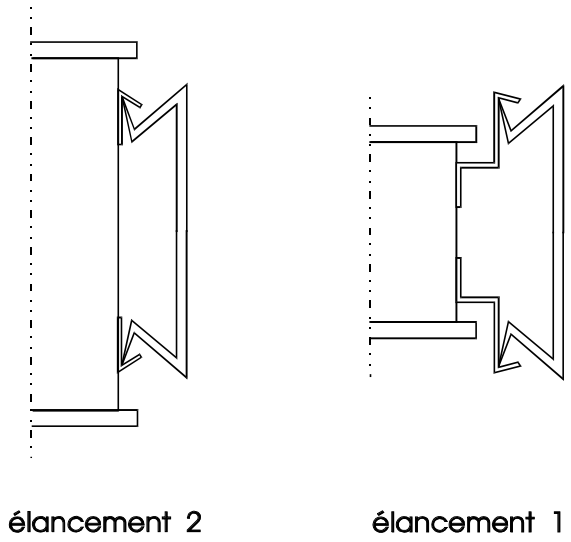


FIG. 3.14 – *Capteur interne de déformation axiale : dispositif pour les élancements de 1*

sés à 120° les uns des autres. Une déformation axiale moyenne est calculée à partir de ces trois mesures. Elle est comparée avec une mesure faite en dehors de la cellule, par un LVDT qui mesure le déplacement de la tête supérieure du piston par rapport au bâti de la cellule. L'allongement de la cellule, évalué par le coefficient de raideur présenté en 3.1.2 (p. 38), est déduit de cette mesure externe.

La figure 3.15 montre le déviateur de contrainte en fonction de la déformation "interne", "externe corrigée" et "externe non corrigée". Les mesures interne et externe corrigée par la souplesse de la cellule sont très proches l'une de l'autre. La différence est certainement à attribuer à la déformation au niveau de l'interface entre l'échantillon et les embases de la cellule. Par contre, la correction de la souplesse de la cellule, apparaissant par la différence entre les mesures externes corrigées et non corrigées, est importante et représente ici la plus grande partie de l'erreur d'une mesure externe.

3.2.3.2 Capteur radial

3.2.3.2.1 Description Le capteur radial comprend un partie verticale, se décomposant en deux tronçons. Le tronçon inférieur est souple et équipé de jauges de déformation, tandis que le tronçon supérieur est rigidifié par pliage, afin de concentrer la flexion du capteur dans le tronçon inférieur. La partie horizontale du capteur vient au contact de l'échantillon, par l'intermédiaire d'une coupelle semi-sphérique qui permet de conserver la qualité du contact au fur et à mesure de la déformation. Dans le même but, une feuille de Téflon est interposée entre la coupelle et la membrane de l'échantillon, pour diminuer le frottement qui ici est source de non linéarité de la réponse et source aussi d'hystérésis. Le capteur est pincé par le bas dans son embase, celle-ci est fixée sur un anneau qui est ajusté autour de l'embase inférieure

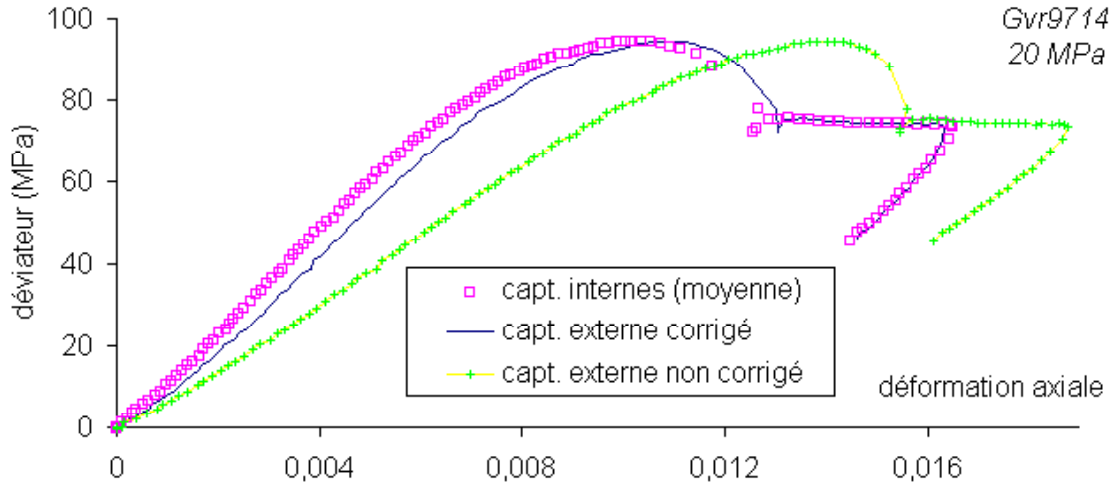


FIG. 3.15 – *Capteur interne de déformation axiale : comparaison avec une mesure externe corrigée par la souplesse de la cellule*

de l'échantillon.

L'équipement en jauges est identique à celui des capteurs axiaux, sauf que seulement deux jauges sont utilisées et montées en demi-pont de Wheastone.

3.2.3.2.2 Etude théorique La réponse théorique du capteur radial établie en annexe A est linéaire vis-à-vis du déplacement de la pointe du capteur. Dans le cas des dimensions établies sur la figure 3.9, la pente de la droite de la déformation des jauges par rapport à la déflexion de la pointe du capteur est de $0,76\ m^{-1}$, la pente de la réponse électrique est alors de $0,84\ \mu V/\mu m$. Compte tenu de la résolution de la chaîne d'acquisition du système de mesure, on a une résolution du capteur de l'ordre de $1,2\ \mu m$, soit une résolution en terme de déformation de 6.10^{-5}. La force maximale théorique que peut exercer le capteur sur l'échantillon est d'environ 1 Newton.

3.2.3.2.3 Etalonnage L'étalonnage est réalisé avec le même matériel utilisé pour les capteurs axiaux. L'embase du capteur radial est fixé sur le socle du banc de mesure et la pointe du capteur s'appuie sur la partie mobile. Une feuille de Téflon et une feuille de Néoprène sont interposées, pour se placer dans les conditions identiques à l'essai, et pour prendre en compte l'éventuel déformation de la membrane sous l'action du capteur. La figure 3.16 (a) représente la réponse expérimentale d'un capteur sur toute son étendue de mesure et la figure 3.16 (b) la réponse sur une partie de l'étendue de mesure. Les deux courbes sont obtenues dans les deux sens de déplacement et la droite tracée est l'approximation linéaire par la méthode des moindres carrés. La réponse est assez linéaire et le phénomène d'hystérésis faible, de l'ordre de 5 μm. Le tableau 3.4 donne les pentes d'étalonnage des quatre capteurs radiaux utilisés, qui sont prises pour l'interprétation des résultats d'essai. L'étendue

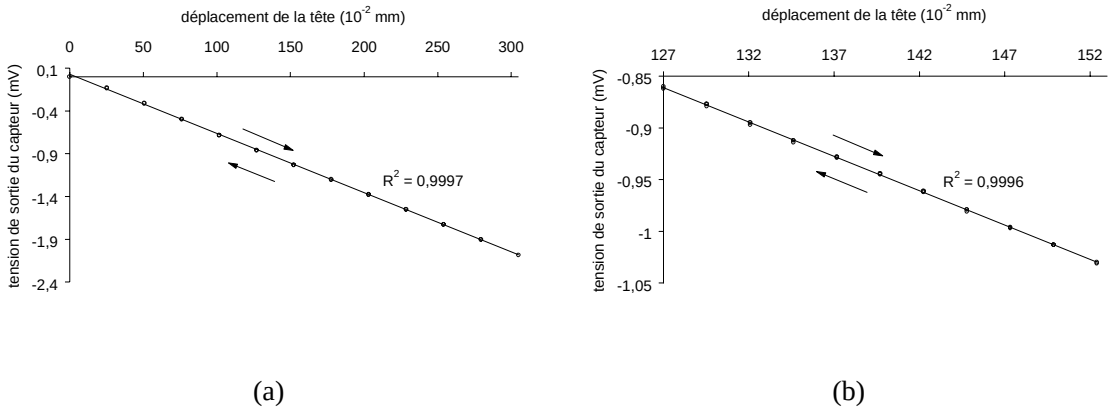


FIG. 3.16 – *Capteur interne de déformation radiale : étalonnage sur toute l'étendue de mesure (a) ; sur une partie de l'étendue de mesure (b).*

de mesure est de 3 mm, soit une déformation radiale de $1,5.10^{-1}$.

Ces pentes par la suite sont corrigées pour tenir compte du comportement de la membrane. Si l'on considère que le Néoprène possède un comportement isochorique, alors l'épaisseur de la membrane diminue au fur et à mesure que l'échantillon se dilate latéralement ou augmente lors d'un raccourcissement axial. Soit Δ le déplacement mesuré par le capteur, ΔR la variation de rayon de l'échantillon et e l'épaisseur de la membrane, on peut montrer que : $\Delta R \approx \frac{R}{R-e}\Delta$ dans le cas d'une dilatation radiale seule. Pour un échantillon de rayon 20 mm et une membrane d'épaisseur $0,8$ mm, le facteur correctif est de l'ordre de 1,04. Pour tenir compte du raccourcissement axial, il faut corriger la déformation radiale par le terme : $\frac{e}{R}\,\varepsilon_{axial} \approx 0,04\,\varepsilon_{axial}$.

capteur	pente (V/m)
rad 1	0,791
rad 2	0,806
rad 3	0,846
rad 5	0,695

TAB. 3.4 – *Capteurs internes radiaux : pentes d'étalonnage*

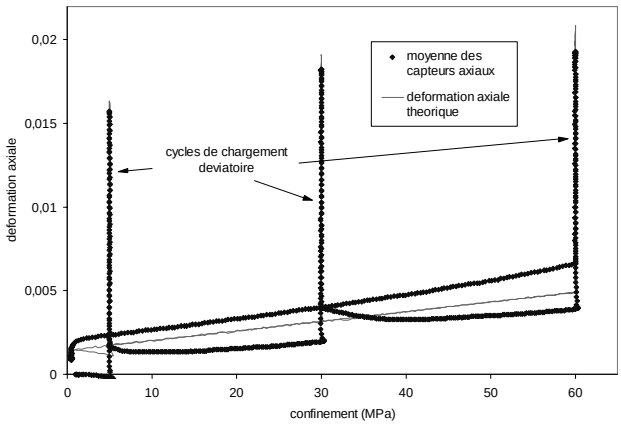


FIG. 3.17 – *Influence de la pression de confinement sur les capteurs internes : comparaison des mesures effectuées avec les capteurs axiaux et la réponse théorique pour un chargement isotrope, avec cycles déviatoriques, sur un échantillon d'acier.*

3.2.3.3 Influence de la pression de confinement

Les capteurs forment une structure composite, et au niveau des jauges de déformation, il existe une superposition de plusieurs matériaux : bronze, film support des jauges, colle entre les jauges et la lame, ainsi que par-dessus les jauges en protection. Le comportement de cette combinaison est difficile à évaluer a priori, et dépend des proportions des matériaux précités. Si l'on considère d'autre part l'ensemble composé du capteur, des crochets et de la membrane, il existe une incertitude également au niveau du positionnement des attaches et de la membrane, du fait des risques de pénétration de membrane dans la porosité ouverte. Des essais d'étalonnage effectués sur un échantillon en acier, supposé parfaitement élastique linéaire dans le domaine de contrainte étudié, dans les conditions d'essai normales, montre une influence de la pression du fluide de confinement dans lequel sont immergés les capteurs. Cette influence présente une non-linéarité et une non-réversibilité. Cette influence est donc difficilement étalonnable et limite la précision des mesures si la pression de cellule varie substantiellement. Les mesures des capteurs sont valides, avec les caractéristiques citées auparavant si la pression de cellule change peu. La figure 3.17 montre que c'est surtout l'alternance entre les chargements isotropes et les chargements déviatoriques qui est néfaste. Pour un chargement isotrope uniquement, les capteurs montrent une réponse raisonnable.

3.2.3.4 Stabilité

Les essais réalisés dans cette étude sont des essais assez rapides, il est cependant intéressant de connaître le comportement des capteurs en condition d'essai, vis-à-vis du temps. Dans ce but, les capteurs sont soumis à une légère compression, et une acquisition des mesures est réalisée sur 3 jours. L'évolution de la température

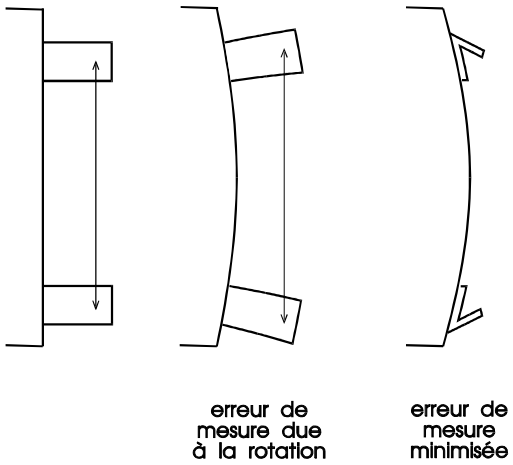


FIG. 3.18 – *Erreur de mesure avec des capteurs type LVDT due à la rotation des supports de capteur, comparée avec notre technique de mesure (mesure très près de l'échantillon).*

ambiante est également faite. Sur la figure 3.19 est représenté le suivi des capteurs axiaux, ainsi que celui de la température sur le graphe de "rac 1". La variation de la mesure est de l'ordre de quelques unités de résolution des capteurs, et ne présente pas le profil habituel d'une dérive. Il ne semble pas non plus y avoir une corrélation visible avec la température. L'amplitude de variation sur les trois jours se limite à 10 μm, ce qui représente en déformation $1,6.10^{-4}$.

Le suivi des capteurs radiaux sur la même période, en condition d'essai, est représenté sur la figure 3.20. L'évolution est typique d'une dérive, et montre un tendance à se stabiliser à la fin des trois jours. L'amplitude de la dérive semble être propre au capteur, elle de 14 μm pour "rad 3" et seulement de 3 μm pour "rad 5". Ce comportement des capteurs avec le temps laisse à penser qu'ils pourraient être encore améliorés lors de leur élaboration, notamment quant à la qualité du collage des jauges, mais aussi du choix des jauges et de la colle. Cette dérive est néanmoins très négligeable pour la durée des essais réalisés.

3.2.4 Conclusion

Les capteurs développés présentent des caractéristiques intéressantes parmi les différentes techniques déjà existantes. Le principe de mesure interne élimine les causes d'erreur de mesure inhérentes aux mesures externes. La technologie employée est simple à mettre en œuvre et d'un coût financier limité. Les capteurs peuvent travailler dans un fluide sous forte pression, jusqu'à au moins 60 MPa. Ils ont une réponse linéaire avec une faible hystérésis. L'étendue de mesure et la résolution sont un compromis sur la géométrie et les dimensions du capteur. Les capteurs utilisés ici, définis pour l'étude d'un matériau raide, ont une résolution en déformation de 3.10^{-5} et une étendue de mesure de 5.10^{-2} pour le capteur axial, et respectivement 6.10^{-5}

et $1,5.10^{-1}$ pour le capteur radial. De plus, le principe de mesure des capteurs axiaux rend celle-ci moins sensible aux erreurs dues à la déformation possible en tonneau de l'échantillon, du fait que le capteur est posé sur la membrane, à l'épaisseur du crochet de fixation près (Fig. 3.18). Le défaut de stabilité des capteurs est négligeable pour les durées d'essais effectués dans cette étude.

Ces capteurs, axiaux et radiaux, présentent un faible encombrement, ce qui permet d'en disposer plusieurs sur l'échantillon au cours d'un essai. La multiplication des mesures est en effet importante pour l'étude en bifurcation des déformations.

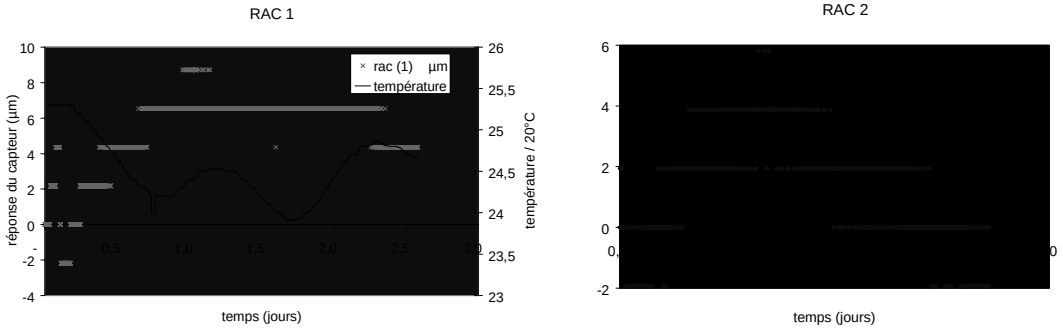


FIG. 3.19 – *Capteurs internes de déformation axiale : stabilité dans le temps.*

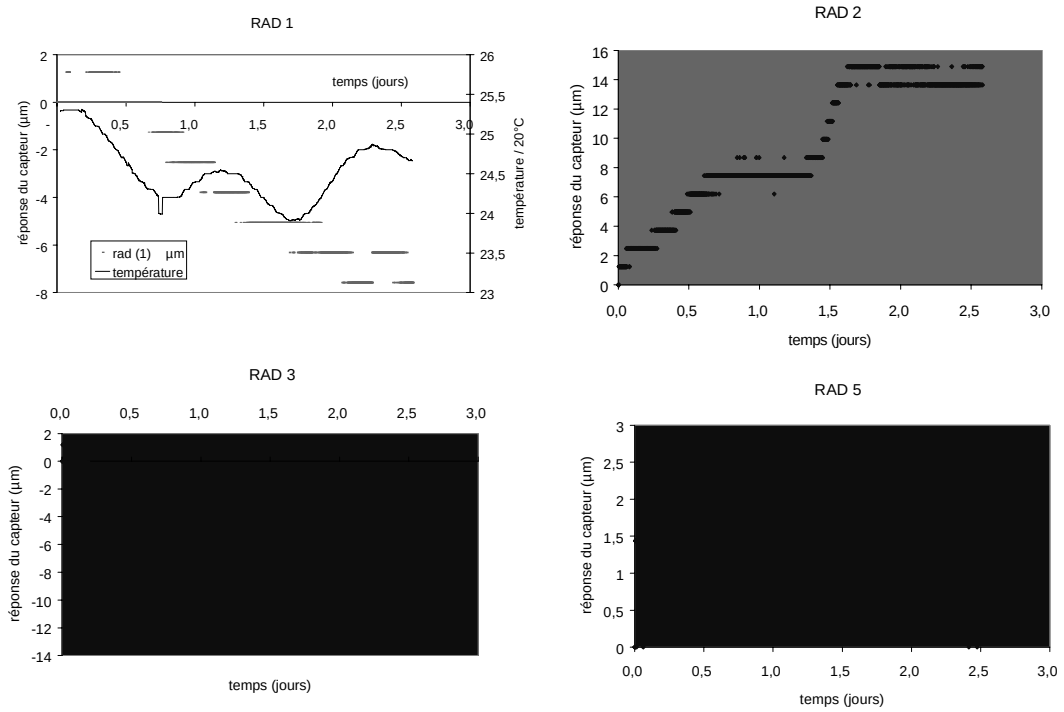


FIG. 3.20 – *Capteurs internes de déformation radiale : stabilité dans le temps.*

Chapitre 4

Essais triaxiaux sur grès

4.1 Matériau

Le grès a été choisi comme matériau d'étude pour sa structure qui se rapproche d'un matériau granulaire de type sable. C'est sur ce genre de matériau granulaire que nos études théoriques antérieures ont porté (loi de comportement incrémentale non-linéaire CLoE). Le grès est à ce titre une roche intéressante pour appliquer notre modèle de comportement et une analyse en bifurcation. Ce matériau est un assemblage de grains, dont les contacts sont cimentés après sédimentation par formation d'un ciment d'origine variable selon les cas. Plusieurs blocs de grès des Vosges ont été fournis gracieusement par la société Elf (Pau - France). Ces blocs sont cylindriques de diamètre d'environ 40 cm et de hauteur 110 mm.

Le grès est rouge, d'aspect grossier, avec une porosité appréciable à l'oeil nu, sans hétérogénéité ou litage visible. Il provient d'une carrière de Woustviller, sur le district de Sarreguemines, en Moselle.

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X, menée au laboratoire de géologie de l'Ecole Normale Supérieure, révèle une forte proportion de quartz, d'un peu de feldspath alcalin (microcline) et quelques traces d'argile (kaolinite) et de mica (Tab. 4.1).

composant	teneur
quartz	93 %
microcline	5 %
mica	1 %
kaolinite	1 %

TAB. 4.1 – *Composition minéralogique du grès, mesurée par diffraction aux rayons X.*

Vue au microscope optique, sur une lame mince parallèle au sens de carottage (provenant du premier bloc), la répartition des grains semble homogène, avec une

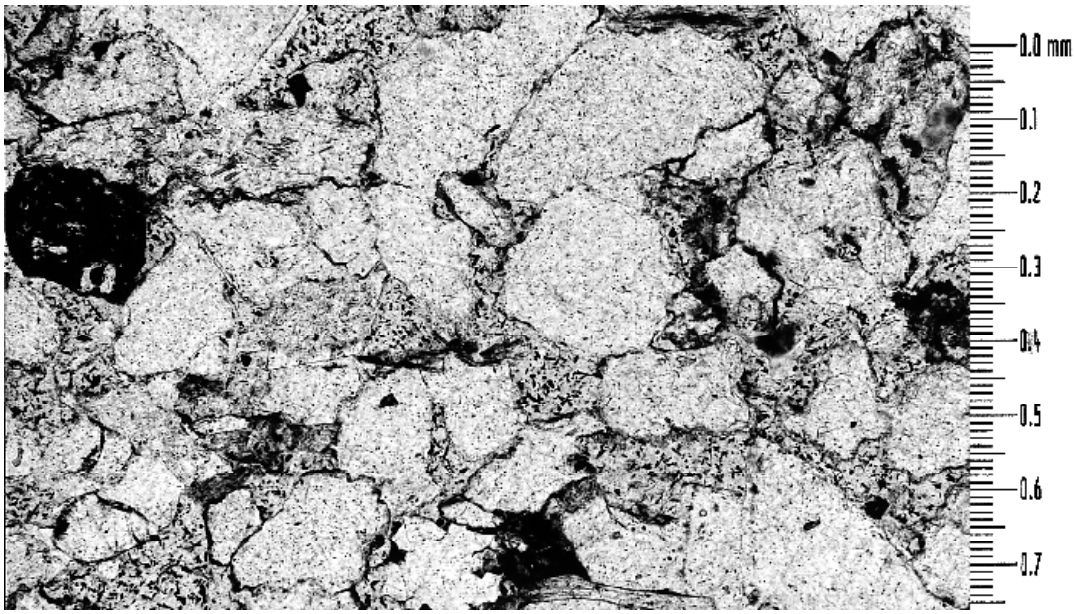


FIG. 4.1 – *Lame mince parallèle au sens de carottage sur le grès des Vosges, vue au microscope optique.*

granulométrie assez homogène. La taille des grains est en moyenne de l'ordre de $0,2\ mm$ (Fig. 4.1). Le ciment autour des grains est diffus. L'organisation des grains est d'allure isotrope. Les paillettes de micas sont cependant systématiquement perpendiculaires au sens de carottage du bloc. Ce qui laisse penser que la stratification du grès est restée horizontale. On observe également des stylolites de dissolution aux contacts subverticaux de grains, et des traces de recristallisation dans les directions horizontales, directions de contraintes secondaires (cf. Raynaud [121]). Ce matériau risque donc de présenter une anisotropie dans la direction verticale, éventuellement une simple orthotropie de révolution induite par un chargement lithostatique.

Le grès des Vosges présente de fortes variations, suivant les études menées, ce qui laisse penser que le *label* utilisé est peut être trop général. Si l'on considère les deux études Millien [106] et Ortega [116] menées sur un grès prélevé dans la carrière Rauscher à Adamswiller, à quelques années d'intervalle, la composition en quartz est respectivement de 44 % et 90 %, la porosité de 23 % et 19 %.

L'étude mécanique de Millien sur le grès précité montre par ailleurs un comportement mécanique de type orthotrope de révolution, avec un degré d'anisotropie faible et qui diminue avec le niveau de contrainte de confinement atteint. Cette étude montre que l'orientation du plan privilégié de la roche par rapport aux contraintes principales lors d'essais de laboratoire n'influence pas de façon notable l'orientation caractéristique des structures de localisation, mais par contre confirme que la normale aux plans de localisation est comprise dans un plan orthogonal au plan privilégié de la roche. Dans l'étude qui suit, la caractérisation mécanique du matériau a été réalisée à partir d'échantillons dont l'axe est perpendiculaire au plan privilégié

observé au microscope.

Densité, porosité :

Dans notre étude, la masse volumique de chaque échantillon est calculée à partir de la masse de l'échantillon après étuvage à 110^oC, divisée par le volume de l'échantillon considéré comme un cylindre parfait. Le volume est évalué à partir de la hauteur et du diamètre mesurés (cf. §4.2.1 pour le protocole). On distingue la masse volumique des deux blocs de grès qui ont été utilisés dans cette campagne. On distingue également la partie haute (1H) de la partie basse (1B) du premier bloc, dans lequel certaines carottes ont été coupées en deux pour réaliser des échantillons d'élancement 1. Ce sens du carottage n'a ici pas de signification géologique, c'est simplement un repérage de commodité. Le tableau 4.2 présente les valeurs pour chaque échantillon, ainsi que les moyennes calculées pour les différentes catégories.

La masse volumique moyenne du second bloc est légèrement supérieur à celle du premier bloc, ce qui montre l'existence d'une légère hétérogénéité dans ce grès. On ne connaît cependant pas la position relative des deux blocs avant prélèvement in-situ. Par contre, le premier bloc présente une hétérogénéité notable puisque la moitié supérieure de la tranche de grès a une densité supérieure à la moitié inférieure d'un peu plus de 1 %. Cette hétérogénéité doit être attribuée à un phénomène de litage, mais reste invisible à l'œil nu.

Certains échantillons ont été saturés sous vide. Ils ont été mis en dépression à l'air pendant une durée supérieure à quatre heures, avant d'être semi-immergés pendant deux heures puis immergés et mis à la pression atmosphérique. La forte perméabilité du grès permet de supposer que de cette façon, la porosité ouverte du grès est entièrement saturée. La porosité ouverte est alors évaluée par la relation : $\eta = \frac{Masse_{sature} - Masse_{sec}}{\gamma_w . Volume}$, γ_w étant la masse volumique de l'eau estimée à 10 g/cm^3. On obtient une porosité ouverte pour le premier bloc de 23,2 %, ce qui, en teneur en eau, représente 11,8 % lorsque le grès est saturé. Les mesures de porosité n'ont pas été faites sur le second bloc mais si on considère que la masse volumique du squelette est identique au premier bloc, alors la porosité est estimée à 21,6 %

4.2 Méthodologie

4.2.1 Préparation

Les blocs cylindriques de grès sont carottés parallèlement à l'axe du bloc avec un carottier diamanté de diamètre 40 mm en condition humide, sous jet d'eau. Ils sont ensuite découpés avec une scie diamantée à une longueur d'environ 84 mm. Après séchage, ils sont rectifiés par voie sèche, sur une rectifieuse radiale, avec une meule de type boisseau (abrasif en carbure de silicium, de grade tendre, de taille de grain 60, avec un agglomérant vitrifié à sec). Pendant la rectification, l'échantillon est serré

Echantillon	Gvr9701	Gvr9702	Gvr9703	Gvr9704	Gvr9705	Gvr9713	Gvr9714
Bloc	1	1	1	1	1	1	1
Masse volumique	1,96	1,96	1,94	1,96	1,95	1,96	1,97
Echantillon	Gvr9715	Gvr9716	Gvr9717	Gvr9718	Gvr9719	Gvr9720	Gvr9721
Bloc	1	1	1	1	1	1	1
Masse volumique	1,97	1,96	1,97	1,94	1,96	1,96	1,96
Echantillon	Gvr9723	Gvr9724	Gvr9725	Gvr9726	Gvr9738	Gvr9739	Gvr9740
Bloc	1	1	1	1	1H	1H	1H
Masse volumique	1,96	1,97	1,96	1,97	1,97	1,98	1,97
Echantillon	Gvr9741	Gvr9742	Gvr9744	Gvr9745	Gvr9743	Gvr9746	Gvr9747
Bloc	1H	1H	1H	1H	1B	1B	1B
Masse volumique	1,97	1,98	1,99	2,00	1,96	1,95	1,96
Echantillon	Gvr9748	Gvr9749	Gvr9750	Gvr9751	Gvr9727	Gvr9728	Gvr9729
Bloc	1B	1B	1B	1B	2	2	2
Masse volumique	1,96	1,95	1,95	1,95	2,01	2,01	1,99
Echantillon	Gvr9730	Gvr9731	Gvr9732	Gvr9733	Gvr9734	Gvr9735	Gvr9736
Bloc	2	1	2	2	2	2	2
Masse volumique	2,02	1,95	1,98	2,01	2,00	2,01	1,97
Echantillon	Gvr9737	Gvr9752	Gvr9753	Gvr9754	Gvr9755	Gvr9756	Gvr9757
Bloc	2	2	2	2	2	2	2
Masse volumique	1,99	2,02	2,01	2,01	2,00	2,00	2,00
Echantillon	Gvr9759	Gvr9760	Gvr9761	Gvr9762	Gvr9763	Gvr9764	
Bloc	2	2	2	2	2	2	
Masse volumique	1,98	1,99	2,02	2,01	2,01	1,99	

Masse volumique moyenne bloc 1	1,960
bloc 1H	1,982
bloc 1B	1,955
bloc 2	2,000

TAB. 4.2 – *Masses volumiques mesurées sur les différents échantillons. Pour le bloc 1, on différentie la partie haute 1H de la partie basse 1B correspondant uniquement au sens de carottage dans le bloc, les masses volumiques sont exprimées en* g/cm^3

sur un montage par un positionnement en V long (cf. annexe B). La rectification de la deuxième face est réalisée après retournement du montage d'usinage, dont les surfaces portantes sont elles même rectifiées. Chaque extrémité de l'échantillon est obtenue après une série de passes à profondeurs décroissantes, jusqu'à obtenir une hauteur proche de 80 mm.

Lors de ces opérations, l'orientation de l'échantillon par rapport au sens de carottage dans le bloc est repérée.

Le parallélisme des deux faces, contrôlé sur marbre à l'aide d'un comparateur mécanique gradué à 2 μm, respecte la norme ISRM [78] requise pour ce type d'essai triaxial sur roche (parallélisme de $\pm$ 0,01 mm).

Les dimensions de l'échantillon sont mesurées avant essai au pied à coulisse. La hauteur est estimée comme la moyenne de deux mesures de hauteur selon deux génératrices perpendiculaires, et le diamètre comme la moyenne de six mesures de diamètre effectuées sur deux génératrices perpendiculaires, à trois hauteurs différentes. La masse de l'éprouvette est mesurée sur une balance au centième de gramme, après séchage de l'échantillon dans une étuve ventilée à une température de 105^oC pendant une durée supérieure à 24 heures.

4.2.2 Anti-frettage

L'échantillon est positionné dans la cellule entre deux embases. Deux plateaux élargis de diamètre 48 mm s'interposent entre les embases et l'échantillon. Les plateaux doivent éviter les problèmes de bords qui existeraient si l'échantillon reposait sur une embase de même diamètre, du fait de la dilatation radiale de l'échantillon lors des essais. Réalisés en acier (acier 35NCD16), les plateaux sont durcis par une trempe thermique et un recuit puis rectifiés pour limiter le risque de rayures occasionnées pendant l'essai, et qui seraient dommageables pour la qualité de l'antifrettage.

Le contact de l'échantillon sur les plateaux est lubrifié par un corps gras. Cette mixture est obtenue par le mélange à 70^oC de vaseline non polarisée avec de l'acide stéarique en poudre, dans des proportions de masse égale. Ce mélange a été comparé par Labuz *et al.* [92] avec d'autres lubrifiants déjà utilisés en mécanique des roches (graisse au graphite, au molybdène, au tungstène, Téflon) et présente un coefficient de frottement nettement plus faible (cf. Tab. 4.3).

Le mélange est étalé avec une épaisseur de quelques dixièmes de millimètre sur chacun des deux plateaux élargis et sur les extrémités de l'échantillon avant sa mise en place.

4.2.3 Montage

Les crochets servant à la pose des capteurs de déformation axiaux internes sont collés plusieurs heures avant l'essai sur la membrane en Néoprène, afin d'assurer un

lubrifiant	coefficient de frottement
graisse au graphite	0,07
graisse au molybdène	0,12
double feuille de Téflon	0,05
mélange vaseline-acide stéarique	0,02

TAB. 4.3 – *Coefficients de frottement de quatre lubrifiants, sous une contrainte normale de* 5 MPa*, selon Labuz et al. [92].*

séchage complet de la colle. Cette membrane a une épaisseur de $0,8\ mm$. L'échantillon, enveloppé de sa membrane, est alors posé sur l'embase de la cellule puis recouvert de l'embase supérieure. Un vide partiel est appliqué à l'intérieur de l'échantillon pour bien plaquer la membrane et immobiliser l'échantillon sur l'embase. Les capteurs radiaux sont ensuite mis en place autour de l'échantillon, en les faisant glisser sur leur couronne, jusqu'à ce qu'un contact franc sur la membrane soit établi. Une feuille Téflon est posée entre les capteurs radiaux et la membrane. Les capteurs axiaux sont ensuite mis en place entre leurs crochets.

L'enceinte de confinement de la cellule est posée sur l'embase de la cellule, autour de l'échantillon, puis remplie d'huile. Cette partie inférieure de la cellule peut alors être assemblée à la partie supérieure par les huit tirants. Le remplissage de la chambre de confinement en huile est complété par l'intermédiaire d'une micro-pompe, la purge de la chambre est ensuite fermée. La montée en pression de l'huile de confinement est assurée dans un premier temps par la micro-pompe, le générateur Titan 3 prenant ensuite le relais. A ce moment, le piston de chargement axial est approché de l'échantillon à l'aide de la micro-pompe. La mise en contact avec l'échantillon est réalisée avec le générateur Titan 4, piloté manuellement par l'opérateur. Celui-ci enregistre à ce moment la pression mobilisée par le frottement du piston, nécessaire pour créer son déplacement et qui devra être soustraite à la pression mesurée pendant l'essai pour calculer le déviateur de contrainte appliqué sur l'échantillon.

Le capteur de type LVDT mesurant le déplacement du piston et permettant une régulation en déplacement est mis en place avant que l'essai de chargement axial ne soit contrôlé par le logiciel Sestar. Le LVDT est connecté, par l'intermédiaire d'un conditionneur, au régulateur. Celui-ci utilise la mesure du déplacement du piston pour piloter le générateur de pression.

4.2.4 Pilotage de l'essai

La montée en pression isotrope se fait à la vitesse de 1 MPa/min jusqu'au confinement désiré. Le chargement axial est réalisé à la vitesse de $0,05\ mm/min$ pour les échantillons d'élancement 2, et à la vitesse de $0,025\ mm/min$ pour les échantillons d'élancement 1, soit une vitesse de déformation de l'ordre de $6.10^{-4} min^{-1}$.

4.2.5 Traitement des données

Les déformations sur le grès à la rupture, dans la gamme de pression moyenne effective considérée, sont des déformations petites, au maximum de l'ordre du pourcent; par conséquent les déformations sont calculées par rapport à la dimension initiale de l'échantillon par la relation : $\varepsilon = (l - lo)/lo$. La contrainte axiale est évaluée également en prenant en compte la section de l'échantillon à pression ambiante. La convention de signe est empruntée à la mécanique des sols, à savoir que les contraintes de compression et les déformations contractantes sont choisies de signe positif. Le déviateur de contrainte est défini comme la différence entre la contrainte principale majeure et la contrainte principale mineure, soit $\sigma_{axial} - \sigma_{lateral}$ pour les essais triaxiaux axisymétriques de compression, et $\sigma_{lateral} - \sigma_{axial}$ pour les essais d'extension.

Les données enregistrées par le logiciel Sestar sont sauvegardées dans un fichier au format Excel. Un calcul postérieur calcule les contraintes à partir des pressions mesurées pendant l'essai. Les déformations sont calculées à partir des capteurs internes en prenant en compte le coefficient d'étalonnage de chacun des capteurs.

4.3 Résultats

Les parties 4.5 à 4.8 présentent les différents essais menés sur le grès des Vosges, qui peuvent se classer en quatre catégories : essais de compression isotrope, essais de compression triaxiaux, essais d'extension et essais pseudo-isotropes.

Les différents essais présentés dans cette partie sont récapitulés par le tableau 4.6, page 174. Pour faciliter la lecture, seulement les courbes de certains essais sont présentés dans cette partie. On retrouvera les courbes correspondants à chaque essai dans l'annexe D, page 307.

4.4 Rôle de l'eau sur le grès

L'eau a plusieurs effets sur un matériau de type sol ou roche. Le plus connu, surtout pour les sols peu perméables, est certainement l'effet mécanique. Pendant que ce type de matériau se déforme, l'espace des pores subit des transformations sur sa répartition dans le matériau et sur son volume général. L'eau qui s'y trouve, si elle n'a pas le temps de circuler du fait de la faible perméabilité du matériau, peut se trouver en surpression ou sous-pression, cela pouvant même conduire à un phénomène de cavitation. Lorsqu'il y a création de pores comme par exemple l'initiation et la propagation de fissures dans une roche, cela nécessite un apport en eau pour maintenir une pression interstitielle constante et homogène (cf. Brace *et al.* [25]). La vitesse de déformation joue alors un rôle important. L'eau a un effet mécanique également considérable dans les sols non-saturés, ou plus généralement lorsqu'il existe deux fluides différents en présence. La formation de ménisques dans une porosité très fine, entre les deux fluides et le squelette, provoque un phénomène de succion pouvant dépasser le MPa (cf. Delage *et al.* [51]).

L'eau a également un effet physico-mécanique. La présence de l'eau autour des cristaux diminue l'énergie libre de surface d'une roche. Elle diminue de ce fait la résistance à la propagation des fissures (cf. Morlier [109]), tel que le prévoit la théorie de Griffith modifiée.

Il existe aussi un rôle chimique de l'eau. Lajtai et Bielus [95] rappellent le processus de corrosion des silicates. L'altération des liens entre les silicates dépend de trois mécanismes : le transport d'agents réactifs vers le lieu de réaction, la réaction chimique et la fracturation des zones corrodées. L'eau peut jouer deux rôles importants dans ce processus, un rôle de diffusion des ions, alimentant la réaction chimique, dans ce cas, la corrosion serait contrôlée directement par la vitesse de diffusion. Et aussi un rôle plus direct de source abondante d'agents réactifs, dans ce cas la vitesse de corrosion serait contrôlée par la vitesse de réaction chimique elle-même. L'eau présente dans les porosités d'une roche a donc un effet majeur sur la vitesse d'altération.

On peut alors observer une baisse substantielle de la résistance en compression de la roche. Ballivy *et al.* [6] mesurent une chute de 15% sur un granite et de 40% sur un calcaire, entre l'état sec et l'état saturé, Coquard *et al.* [43] de 50% sur un

plâtre avec seulement 2% de teneur en eau. Spetzer *et al.* [138] constate une chute de 30 % de la résistance sur un pyrophyllite.

Une comparaison de la résistance en compression du grès des Vosges a été effectuée dans des conditions saturées en eau et des conditions sèches à l'air libre et sèches étuvées. Les deux premiers cas fournissent une résistance de l'ordre de 85% et 95% respectivement de la résistance en condition sèche étuvée. Ces résultats, en fonction du confinement, peuvent être visualisé sur le graphe 4.17, page 88. La majeure partie des essais qui suivent a été effectuée dans des conditions sèches étuvées.

4.5 Essais de compression isotrope

Lorsqu'une roche poreuse est soumise à une contrainte isotrope, son volume apparent diminue, de façon réversible et/ou irréversible. La porosité joue un rôle important dans le mécanisme de déformation. Il faut distinguer les pores, dont les dimensions dans l'espace sont comparables entre elles, et les fissures, ayant une dimension beaucoup plus faible que les deux autres.

Brace [26] propose de distinguer trois types de comportement (Fig. 4.2). Le type (I) correspond aux roches cristallines micro-fissurées à faible porosité. Pendant une première période, les fissures se ferment, et à partir d'un certain niveau de pression, le comportement est linéaire et élastique, correspondant au comportement élastique des cristaux. Pour des roches dont le type de porosité est plus diversifié que les fissures, et pour des porosités plus élevées (5 %), le module de chargement augmente de façon constante, et la déformation est en partie irréversible (II). Pour les roches plus poreuse (5 % et plus), le début du comportement est similaire au type (II), mais à partir d'une certaine pression, la déformation volumique augmente fortement (type III). Cette pression, appelée pression d'effondrement de pore, est accompagnée par une intense microfissuration au niveau des contacts entre grains et autour des pores (Shimada [134], Zhang *et al.* [163], Pellegrino [119]).

L'hystérésis, dans le cas (II), peut s'expliquer par une dissipation d'énergie lors du glissement des lèvres des fissures (Walsh *et al.* [159]). Le passage du type (II) au type (III) est une question de niveau de pression selon Zhang *et al.* [163]. Toute roche de type (II) soumise à une pression plus élevée devrait subir une intense microfissuration sous contrainte hydrostatique. Celui-ci a réaliser une série d'essais sur plusieurs grès, à des porosités variant de 5 à 35 %, et suggère que la pression de microfissuration est d'autant plus faible que la porosité ou la taille des grains sont élevées. Pour les quatre grès sur lesquels il a mis en évidence cette pression, elle varie entre 75 et 380 MPa.

Il existe donc une première phase de réduction du volume des pores où la structure interne se renforce du fait notamment de la fermeture de fissures préexistantes, puis une pression à partir de laquelle la structure de la roche se détruit par microfissuration des grains et effondrement des pores.

Les essais isotropes ont été effectués sur des échantillons d'élancement deux, saturés en eau. La variation de volume des pores est estimées par le volume d'eau expulsé. La pression interstitielle est maintenue constante à 2 MPa, et la pression hydrostatique augmente de 3 à 60 MPa. Trois cycles de chargement déchargement sont effectués à 20, 40 et 60 MPa. La courbe résultat pour un essai provenant du premier bloc est superposée avec la courbe d'un essai réalisé sans cycle sur un échantillon provenant du même bloc (Fig. 4.3). Le comportement correspond au type (II) exposé précédemment. Le module tangent augmente de façon continue, sans que la courbe n'atteigne de partie linéaire. Une partie des déformations sont irréversibles,

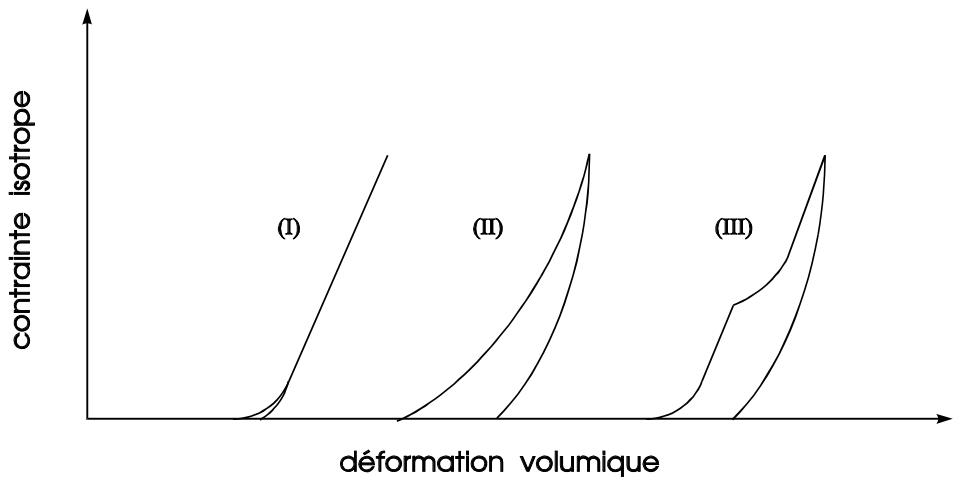


FIG. 4.2 – *Schéma de principe des trois comportements sous contrainte isotrope, selon Brace [26].*

et les cycles montrent une hystérésis. Il y a certainement un mécanisme de glissement sur des lèvres de fissures qui participe au mécanisme global. D'autre part, si on compare le premier cycle à 20 MPa avec l'essai réalisé sans cycle, les deux courbes se superposent bien. Par contre, les cycles à 40 et 60 MPa présentent des modules tangents de chargement supérieurs à ceux de l'essai sans cycle. Il y a donc un phénomène de renforcement du grès par les cycles. Autrement dit, l'échantillon, pris à une certaine pression hydrostatique, qui subit un déchargement puis un rechargement à la même pression, est moins compacté que dans l'état premier. Il serait d'ailleurs intéressant d'effectuer une série de cycles à même niveau de pression pour voir si cette tendance se poursuit pour les cycles suivants.

La déformation irréversible à chaque cycle est mesurée à la fin de ceux-ci. La figure 4.4 montre qu'elle a tendance à se stabiliser vers 60 MPa, conformément à Millien [106].

Si l'on considère le second bloc de grès, qui est plus dense que le premier, on constate que les modules tangents sont plus élevés tout au long de l'essai (Fig. 4.5). Il y a une forte dépendance du comportement isotrope par rapport à la porosité, alors que celle-ci passe de 23,2 % pour l'un à 21,6 % pour l'autre.

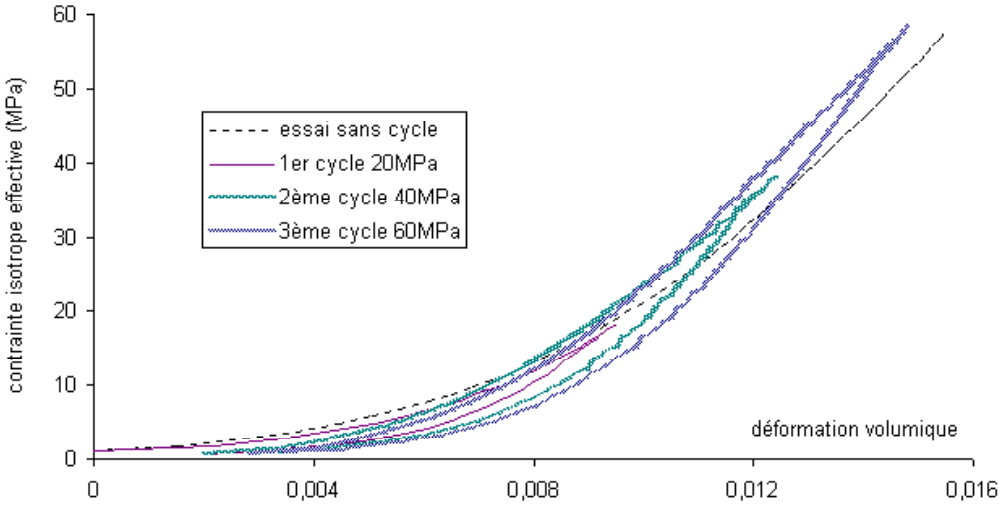


FIG. 4.3 – *Déformation volumique sur chemin de contrainte isotrope, pour deux échantillons du premier bloc, sans cycle et avec trois cycles.*

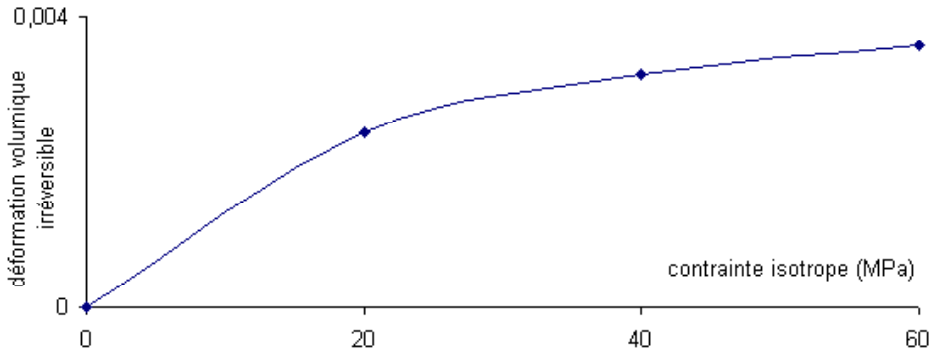


FIG. 4.4 – *Evolution de la déformation volumique irréversible sous contrainte isotrope.*

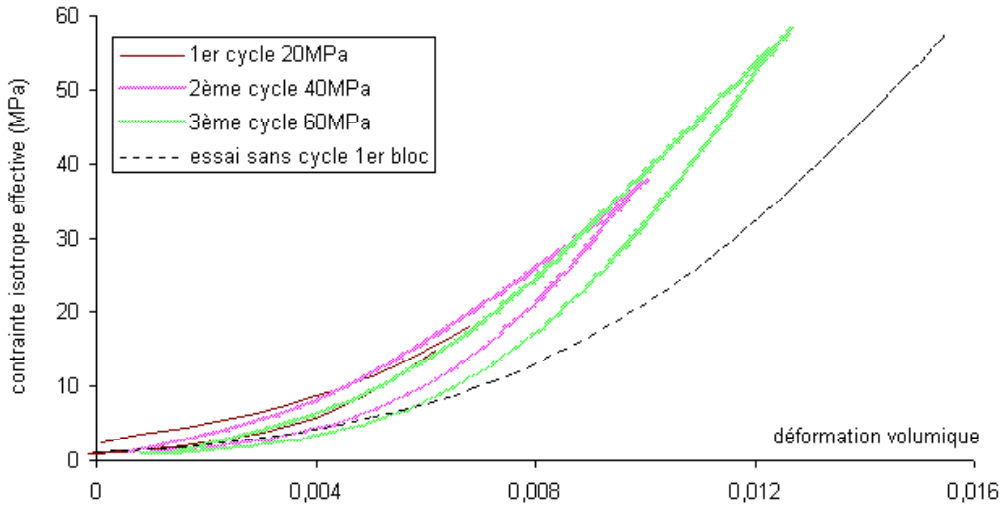


FIG. 4.5 – *Déformation volumique sur chemin de contrainte isotrope, pour un échantillon du second bloc, comparé à un essai sur un échantillon du premier bloc.*

4.6 Essais de compression déviatorique

Les essais ont été réalisés pour différents niveaux de contraintes latérales, allant de 0 à 60 MPa. Les échantillons avaient un élancement de deux ou de un. Les différents résultats sont présentés ici. La détection de la localisation est ensuite discutée ainsi que l'observation des bandes de cisaillement présentes après rupture des échantillons.

4.6.1 Essais d'élancement 2

4.6.1.1 Essais uniaxiaux

Ces essais ont été réalisés avec un confinement très faible de $0,1$ MPa pour plaquer la membrane et le système de mesure de déformation sur l'échantillon.

La courbe contrainte-déformation (Fig. 4.6) présente une première partie avec une concavité orientée vers le haut. Cette forme est attribuée de façon classique (Paterson [118]) au phénomène de fermeture des fissures dans l'échantillon, celui-ci devenant de plus en plus rigide quand les lèvres des fissures viennent en contact mutuellement. Pendant cette phase, la déformation volumique est contractante, avec une vitesse de contractance très faible à la fin.

La deuxième phase comporte une partie linéaire sur la courbe de contrainte. Comme on peut le voir sur la figure 4.7, où deux cycles de déchargement ont été pratiqués, la réponse est fortement non réversible, et présente une hystérésis. La déformation volumique passe d'un état faiblement contractant à un état fortement

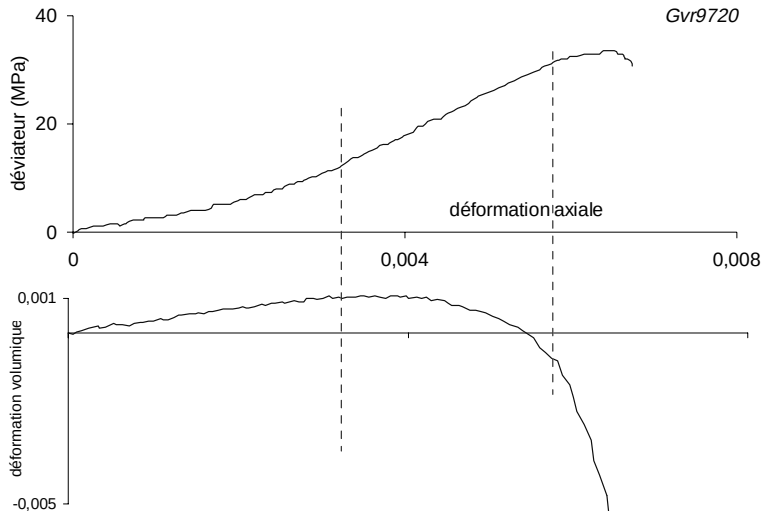


FIG. 4.6 – *Essai triaxial de compression, confinement de* $0,1\ MPa$.

dilatant.

Une troisième phase présente un fort infléchissement de la courbe de contrainte jusqu'à un pic de contrainte. La déformation volumique est toujours fortement dilatante. Il existe une petite phase post-pic, plus ou moins étendue suivant les essais, qui mène à une rupture brutale de l'échantillon, du fait du relâchement de l'énergie élastique stockée par le système de chargement (Fairhurst et Cook [60]).

4.6.1.2 Essais à faibles confinements

Ces essais (Figs. 4.8 et 4.9), entre 10 et 20 MPa de confinement, présentent encore une partie de courbe de contrainte avec une concavité orientée vers le haut, suggérant que des fissures restent ouvertes à la fin de la phase de chargement isotrope préalable. L'évolution de la contrainte est ensuite linéaire. Pendant toute cette partie, la déformation volumique est contractante puis atteint un maximum pour commencer à devenir dilatante dans le cas du confinement à 10 MPa. La fin du tronçon linéaire correspond assez bien avec la fin de la phase contractante pour les essais à 20 MPa.

Il suit une phase d'infléchissement de la courbe de contrainte jusqu'à un pic, accompagné d'une dilatance de l'échantillon. Le phase post-pic du comportement de l'échantillon commence par une décroissance de la résistance, soit progressive dans certain cas, soit brusque dans les autres cas, jusqu'à atteindre un palier de contrainte résiduelle. La déformation volumique mesurée n'est plus significative du comportement du matériau, mais est influencée par la réponse de structure de l'échantillon. Celui-ci présente en effet des surfaces de cisaillement après démontage, et l'évolution quasi linéaire de la courbe de *déformation volumique* suggère un fonctionnement en

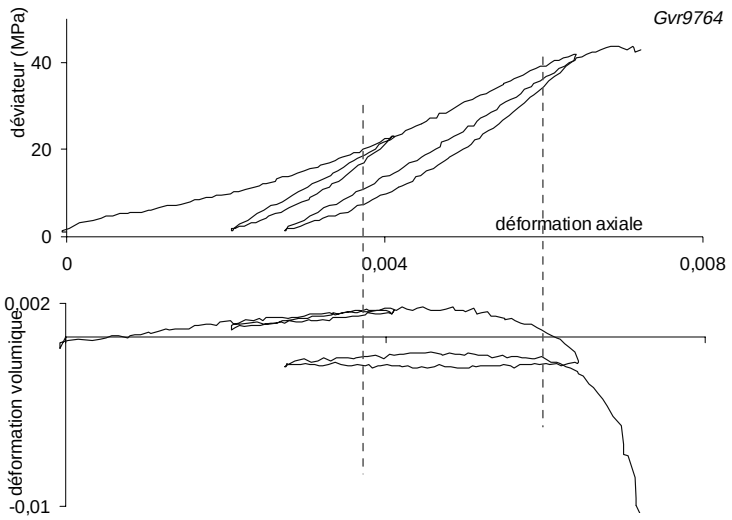


FIG. 4.7 – *essai triaxial de compression avec cycles, confinement de* $0,1\ MPa$.

blocs de l'échantillon, comme l'explique le paragraphe 4.6.5.

La figure 4.10 , où ont été pratiqués des cycles de déchargement - rechargement, montre que la phase linéaire de la courbe de contrainte est non réversible, l'échantillon présente des déformations plastiques. Les cycles forment des boucles indiquant la présence d'hystérésis. D'autre part, les modules sécants des cycles diminuent au fur et à mesure du chargement, cela étant susceptible d'être induit par un endommagement progressif de l'échantillon.

4.6.1.3 Essais à confinements intermédiaires

Aux confinements de l'ordre de 30 à 40 MPa, la courbe de contrainte (Figs. 4.11 et 4.12) est linéaire dès le début du chargement. La déformation volumique devient de plus en plus en plus contractante avec le confinement. Le point de déformation volumique contractante maximale intervient après la fin de la portion linéaire de la courbe de contrainte. Lorsque la contrainte est maximum, la déformation volumique est dilatante. Après quoi la contrainte axiale décroît pour atteindre un palier, de façon plutôt progressive, avec des cas plus brusques.

Les cycles de déchargement - rechargement de la figure 4.13 montre des déformations plastiques dès le début du chargement avec un endommagement du matériau que l'on peut observer par la diminution progressive des modules sécants des cycles. Le saut sur la courbe de déformation volumique visible au passage charge - décharge sur le dernier cycle est dû à un saut sur les capteurs radiaux. C'est un artefact de la mesure qui peut s'expliquer par l'effet néfaste du frottement au point de contact des capteurs radiaux et de la membrane.

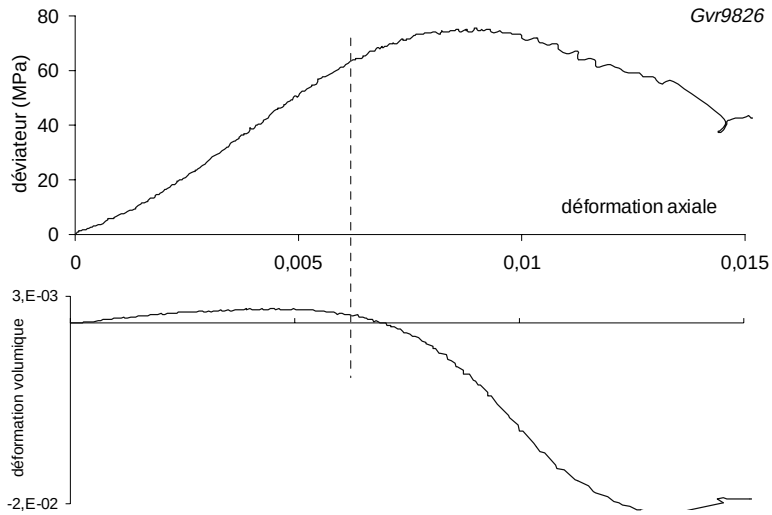


FIG. 4.8 – *Essai triaxial de compression, confinement de* 10 MPa.

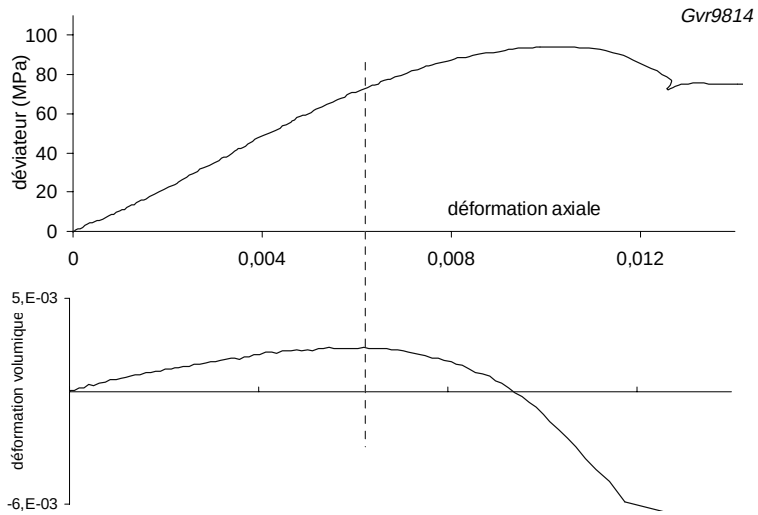


FIG. 4.9 – *Essai triaxial de compression, confinement de* 20 MPa.

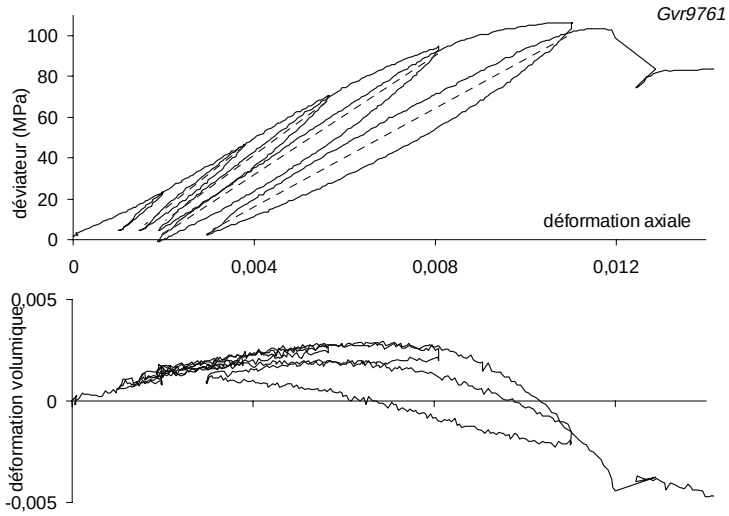


FIG. 4.10 – *essai triaxial de compression avec cycles, confinement de* 20 MPa.

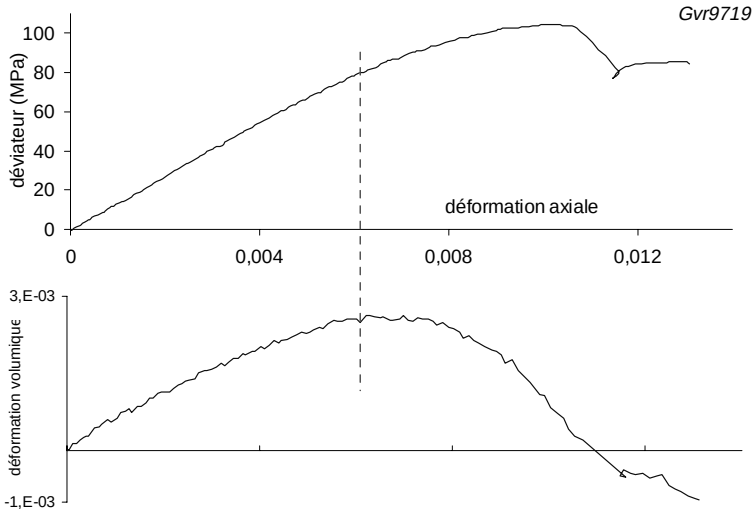


FIG. 4.11 – *Essai triaxial de compression, confinement de* 30 MPa.

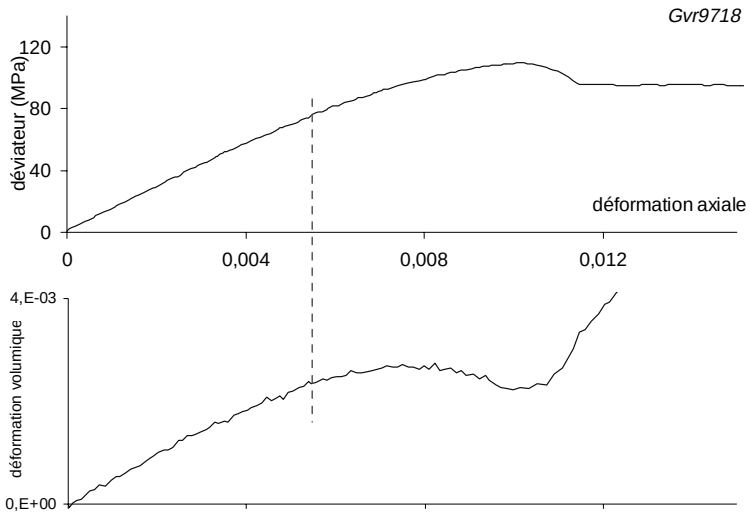


FIG. 4.12 – *Essai triaxial de compression, confinement de* 40 MPa.

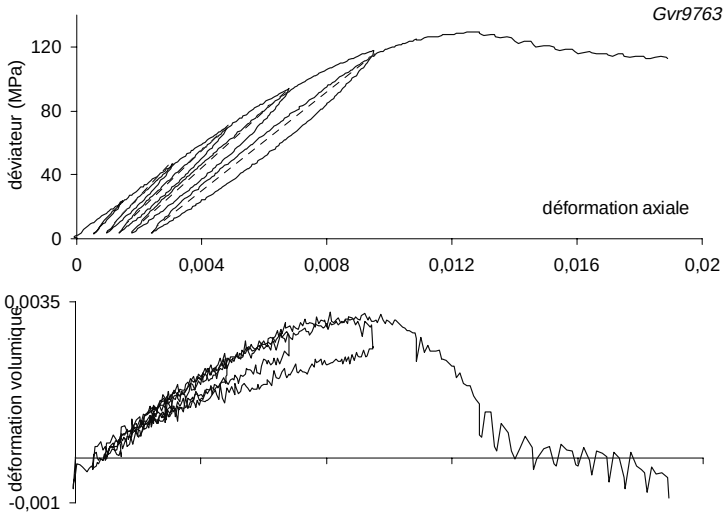


FIG. 4.13 – *essai triaxial de compression avec cycles, confinement de* 40 MPa.

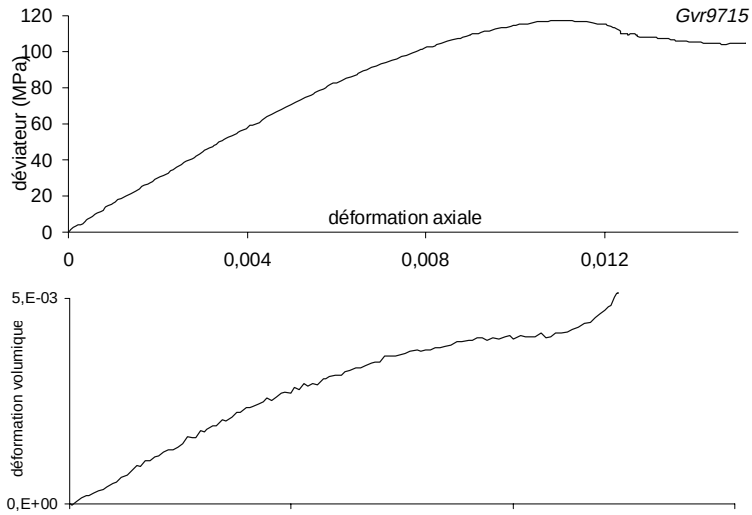


FIG. 4.14 – *Essai triaxial de compression, confinement de* 50 MPa.

4.6.1.4 Essais à forts confinements

Entre 50 et 60 MPa de confinement, la courbe de contrainte (Figs. 4.14 et 4.15) garde les mêmes caractéristiques que les essais à pression intermédiaire, une partie linéaire, un pic de contrainte, une contrainte résiduelle après rupture. Par contre, la déformation volumique est plus contractante que précédemment. On observe même, pour le confinement de 50 MPa, une absence de dilatance au pic de contrainte, et pour le confinement de 60 MPa, une contractance au pic.

Les cycles de déchargement (Fig. 4.16) montrent également des déformations plastiques dès le début du chargement, avec une réduction progressive du module sécant des cycles. L'hystérésis reste présente pendant ces cycles de déchargement.

4.6.1.5 Evolution du comportement avec le confinement

Des essais en condition saturée (la saturation se fait sous vide), en condition sèche à l'air ambiant et sèche étuvée ont été menés. Les essais sur le premier bloc sont distingués des essais sur le deuxième bloc. Pour chaque confinement, les essais en condition sèche étuvée ont été dupliqués. On représente sur le graphe 4.17 l'évolution du déviateur au pic des différents essais en fonction de la contrainte moyenne au pic (diagramme p, q).

D'une manière générale, la courbe enveloppe est fortement non linéaire. Il n'existe pas de portion où le déviateur limite augmenterait proportionnellement à la contrainte moyenne. Au contraire, la résistance déviatorique au pic du grès augmente de

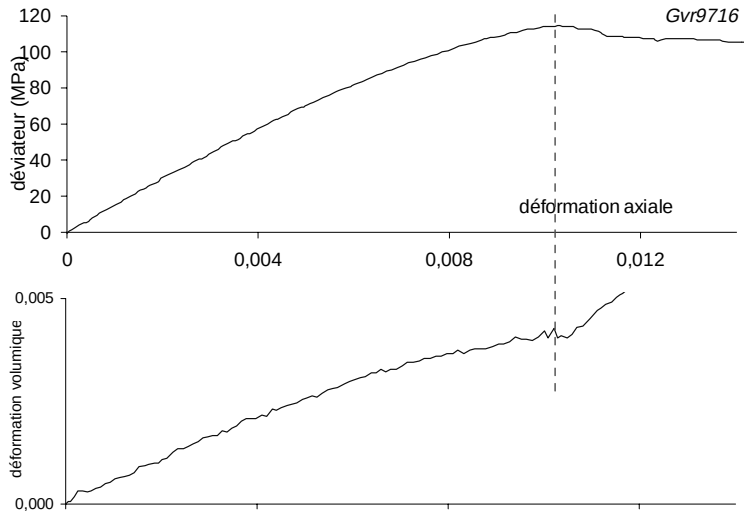


FIG. 4.15 – *Essai triaxial de compression, confinement de* 60 MPa.

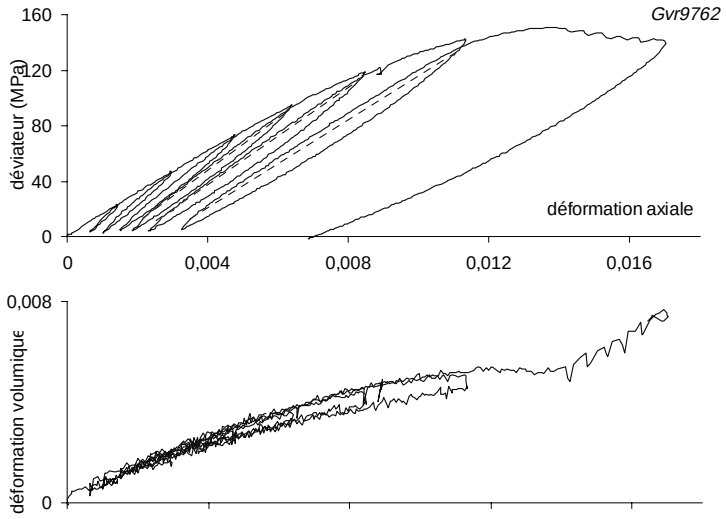


FIG. 4.16 – *Essai triaxial de compression avec cycles, confinement de* 60 MPa.

moins en moins par rapport au confinement. Entre un essai uniaxial et un essai à 10 MPa de confinement, le déviateur au pic augmente de 40 MPa. Entre 50 et 60 MPa (cas des essais secs), la courbe enveloppe présente un début de décroissance. Le déviateur au pic diminue donc avec la pression latérale au fort confinement, même si la contrainte axiale maximum continue elle à augmenter. Contrairement à Skempton [135] sur les roches, le grès n'atteint pas sa phase de comportement intrinsèque, où la courbe enveloppe deviendrait linéaire et croissante après une phase non linéaire correspondant à la réduction des pores.

Pour les différents types d'essais réalisés sur les échantillons provenant du premier bloc, la courbe enveloppe des essais saturés est nettement en dessous de la courbe des essais sur échantillons secs et étuvés. Cette différence, bien que faible en uniaxial, augmente avec le confinement. De manière globale, le déviateur en condition saturée représente environ 85 % du déviateur en condition sèche. Pour les essais en condition sèche à l'air libre, dont la teneur en eau est proche de 0,3 %, soit seulement 2,5 % de la teneur en eau maximum, la courbe enveloppe est également légèrement en dessous de la courbe enveloppe en condition sèche étuvée. Les déviateurs de l'une représentent environ 95 % des déviateurs de la seconde.

Quelques essais ont été effectués sur le second bloc, dont la masse volumique est légèrement supérieure à celle du premier bloc (cf. §4.1, p. 67), pour les confinements de 0, 20, 40 et 60 MPa. Les déviateurs limites de ces essais sont systématiquement au dessus des résultats du premier bloc. Une série d'essais à 60 MPa montre cependant une dispersion des résultats obtenus, supérieure à celle observée sur les duplications d'essais réalisées sur le premier bloc (Fig. 4.17 en haut à droite).

La comparaison des essais aux différents confinements est présentée sur la figure 4.18. Les courbes déviateurs - déformation axiale montrent une nette évolution lorsque l'on augmente la pression latérale, aux faibles confinements. La tendance est : plus le confinement augmente et plus l'échantillon présente un comportement rigide. Cependant, pour les plus forts confinements, de 30 à 60 MPa, les courbes sont proches les unes des autres dans la première moitié du chargement. Le tableau 4.4 fournit les modules tangents pour les différents confinement et confirme cela. L'infléchissement menant au pic est par contre moins précoce quand le confinement augmente. Les courbes à 50 et 60 MPa sont même quasiment superposables et par contre le pic intervient plus rapidement à 60 MPa.

La déformation volumique dépend également du confinement. Au début du chargement déviatoire, les pentes de déformation volumique sont sensiblement identiques et indépendantes du niveau de pression latérale. Après cette première partie contractante, la déformation volumique devient dilatante, mais cela est d'autant plus tardif que le confinement augmente. Et au fort confinement, il n'y a plus de dilatance globale observée, comme cela a déjà été dit précédemment.

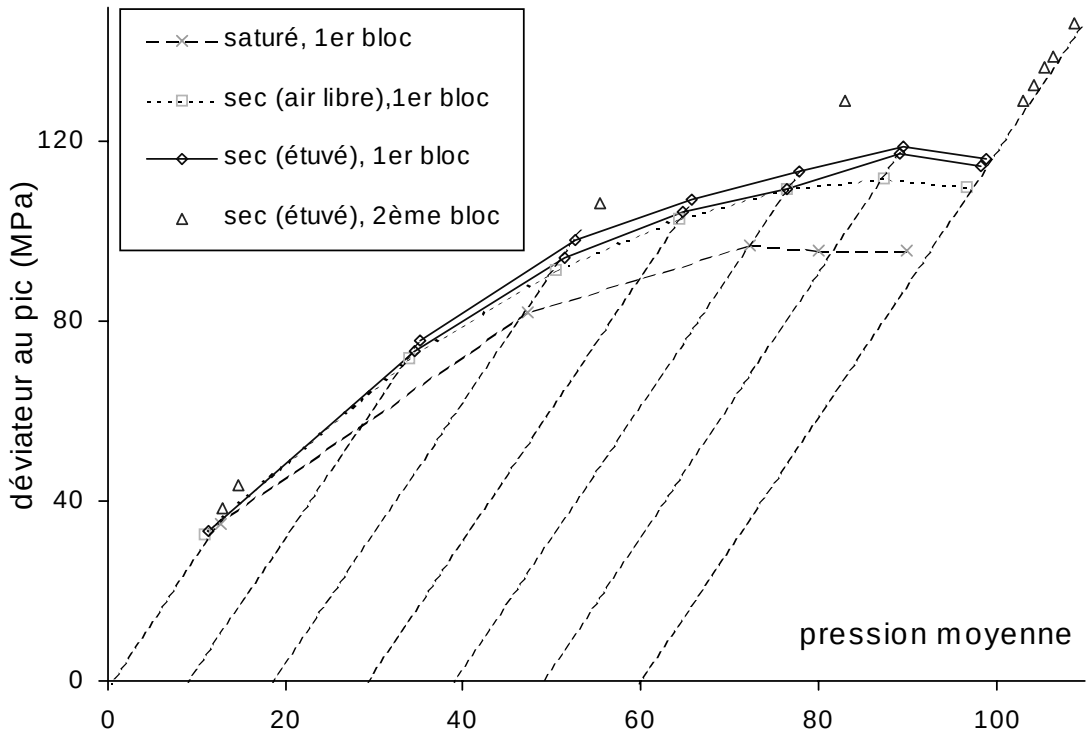


FIG. 4.17 – *Diagramme (q, p) des essais triaxiaux de compression, H/D=2, pour les deux blocs de grès.*

confinement (MPa)	0,1	10	20	30	40	50	60
module tangent (GPa) [a]	7,5	12,0	12,4	13,6	13,8	14,5	14,9

TAB. 4.4 – *Modules tangents des essais triaxiaux de compression.*

[a] Le module tangent est défini ici comme la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte - déformation axiale. Cette pente ne correspond pas à la pente initiale pour les essais à faible confinement mais à la pente après la phase de fermeture de fissures

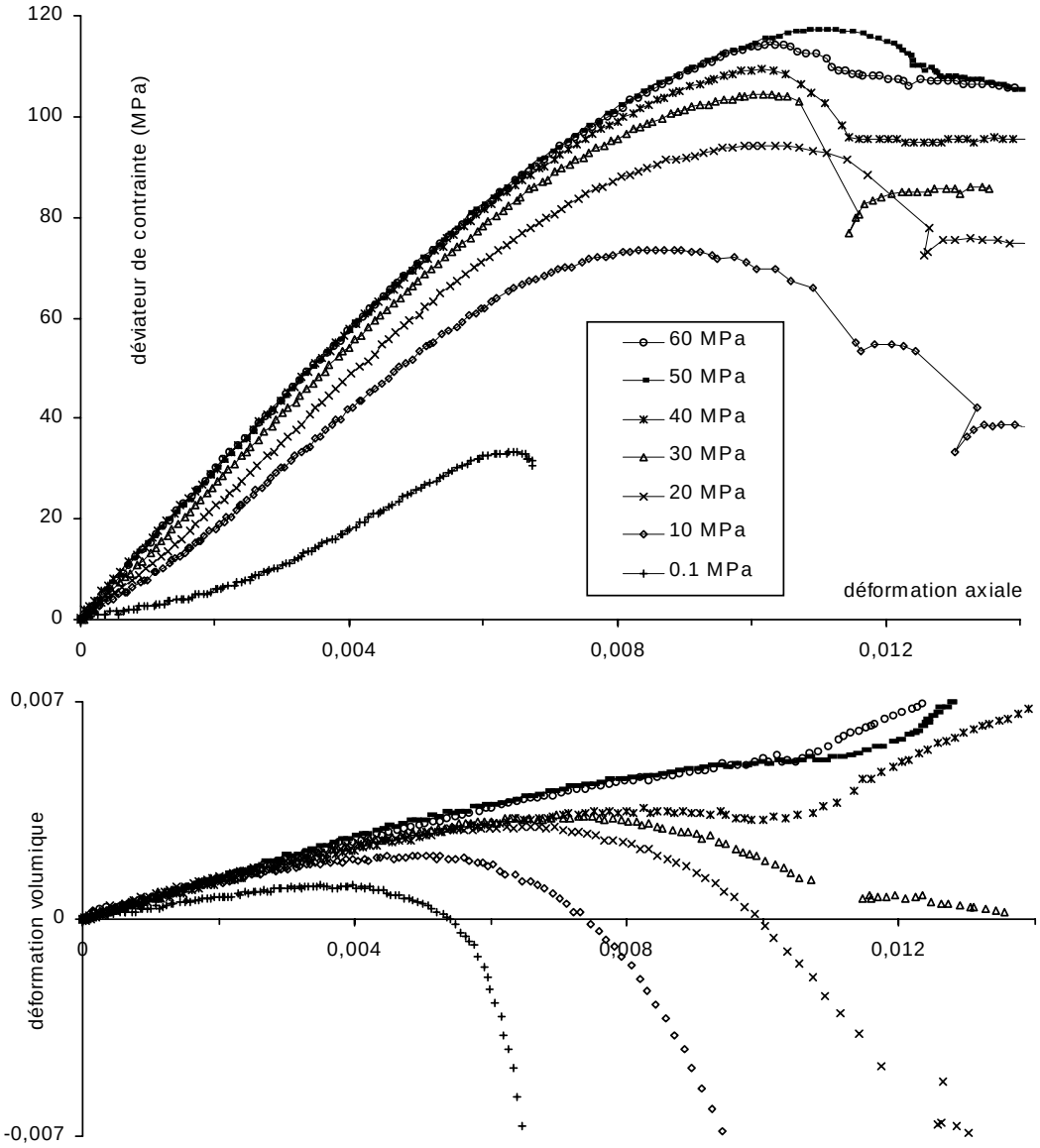


FIG. 4.18 – *Evolution des réponses contrainte déviatorique - déformation axiale et déformation volumique - déformation axiale, en fonction du confinement.*

4.6.2 Essais d'élancement 1

Les essais d'élancement ont été effectués avec les mêmes conditions de lubrification que les essais d'élancement 2. Une embase inférieure plus haute a remplacé l'embase d'origine pour compenser la différence de hauteur. Les capteurs axiaux sont également les mêmes et un dispositif présenté sur la figure 3.14 (page 60) permet de compenser la différence de hauteur. Ces crochets de fixation ont tendance a amplifier les effets de rotation de la surface de l'échantillon, ce qui peut dans certaines proportions fausser la mesure à l'approche du pic de contrainte.

Les différents essais aux différentes pressions de confinement sont présentés et comparés aux essais d'élancement 2 correspondants.

Essais uniaxiaux :

Sur la figure 4.19 sont tracés les essais uniaxiaux. Les symboles vides représentent les essais d'élancement 1 et les symboles linéiques les essais d'élancement 2. Malgré une légère dispersion, le début des essais sont très proches les uns des autres, tant sur les courbes de contraintes que de déformation volumique. Par contre à l'approche du pic, les échantillons courts divergent des échantillons longs. La courbe montre même une dilatance axiale, ce phénomène est uniquement un effet de la mesure locale du fait des crochets de fixation des capteurs axiaux et ne représente pas un éventuel comportement d'échantillon.

On peut noter que l'échantillon provenant de la partie haute du bloc 1 (la plus dense) admet une déformation axiale tout au long de l'essai plus grande que l'échantillon provenant de la partie basse (la moins dense), il en est de même pour l'aspect contractant de la déformation volumique.

Essais confinés :

Les essais aux différents confinements (Figs. 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24) se comparent aux essais d'élancement 2 de façon assez similaire. D'une manière générale, bien que les courbes de contraintes et déformations volumiques soient assez proches les unes des autres, les courbes de contraintes des échantillons courts sont plutôt en dessous de la réponse des échantillons longs. C'est à dire que la rigidité de ces échantillons est sensiblement plus faible. Il peut y avoir un effet de mesure à cela, les crochets de fixation des capteurs sont proches des extrémités de l'échantillon, plus qu'en élancement deux, alors que cette zone est perturbée par les défauts d'interface avec l'embase. Cela peut expliquer que les déformations axiales en élancement un sont plus fortes qu'en élancement deux. Il faudrait pour s'en assurer rapprocher entre eux les crochets de fixation.

L'évolution de la contrainte axiale est d'aspect plus linéaire par rapport à la déformation axiale. En terme de pic de contrainte, les échantillons courts se montrent systématiquement plus résistants. Les courbes de déformation volumique sont elles

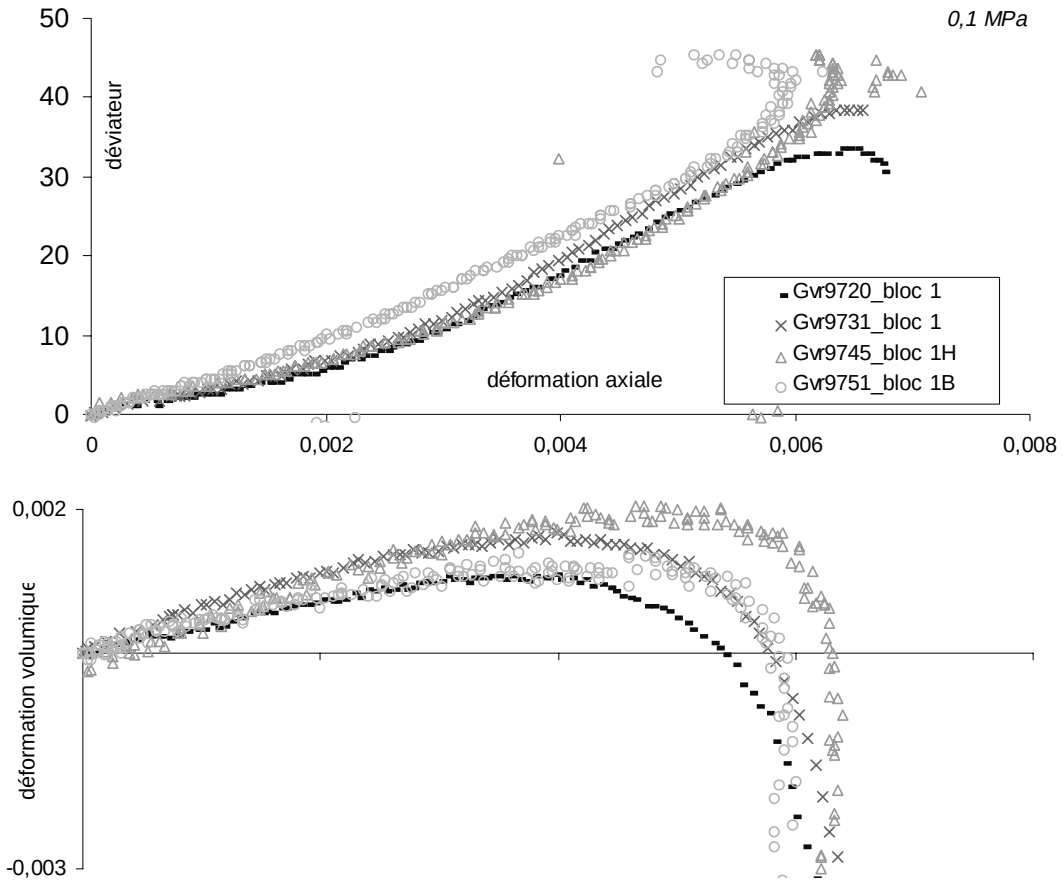


FIG. 4.19 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression uniaxiale.*

plus contractantes dans l'ensemble.

La partie haute peut être distinguée de la partie basse par une déformation axiale plus importante pour les différents confinements, et par une plus forte contractance. Il faut cependant tenir compte de la perturbation de la mesure axiale à l'approche du pic de contrainte mentionnées ci-dessus qui fausse l'allure des courbes dans cette zone.

Au confinement de $60MPa$ (Fig. 4.25), les essais sont comparés avec des échantillons du second bloc de grès. La densité de celui-ci reste légèrement supérieure à celle de la partie haute de premier bloc (cf. Tab. 4.2, p. 70), qui est elle même est plus forte que la partie basse. Le pic de la courbe de contrainte de l'échantillon provenant de la partie supérieure est au dessus des autres pics. Le pic de la courbe de contrainte de l'échantillon provenant de la partie inférieure se situe entre les essais d'élancement 2 sur le premier bloc et ceux sur le second bloc. La réponse en contrainte est donc influencée par les deux facteurs de densité d'échantillon et d'élancement. Une plus faible porosité ou un plus faible élancement ont tendance à augmenter la résistance de l'échantillon.

L'élancement est pris ici comme paramètre, mais on pourrait alors considérer que le facteur déterminant est la taille de l'échantillon, la variation de réponse serait un effet d'échelle plutôt que d'élancement. Ces résultats ne permettent pas de trancher, mais il possible de penser à une combinaison de ces deux effets. D'une part, plus un échantillon est petit, à élancement égal, plus il est considéré comme résistant (cf. la comparaison effectuée par Tillard [144]). D'autre part, le frottement de l'échantillon à ses extrémités, malgré la lubrification, a tendance à créer un confinement latéral induit supplémentaire dont l'effet est plus déterminant sur les échantillons faiblement élancés, ce qui est également en accord avec les mesures obtenues. De même, cet effet de frettage peut expliquer la plus forte contractance mesurée sur les échantillons courts, qui correspond à une plus faible dilatance radiale de l'échantillon.

Néanmoins, alors que sur les forts confinements aux élancements de deux, il n'existait pas de dilatance volumique incrémentale avant la rupture de l'échantillon, il existe une légère tendance à dilater pour les échantillons courts. Cette tendance est certainement a attribuer à la perturbation des mesures axiales à l'approche du pic, et qui rentrent en compte dans la déformation volumique.

4.6.3 Détection de la localisation

4.6.3.1 Principe de la détection

La détection de la localisation est effectuée à l'aide des capteurs internes décrits en 3.2. Trois capteurs axiaux sont disposés sur trois génératrices de l'échantillon, à 120° les uns des autres. Les capteurs radiaux, au nombre de quatre, sont disposés à 90° (Fig. 4.26). L'observation axiale est réalisée indépendamment de l'observation

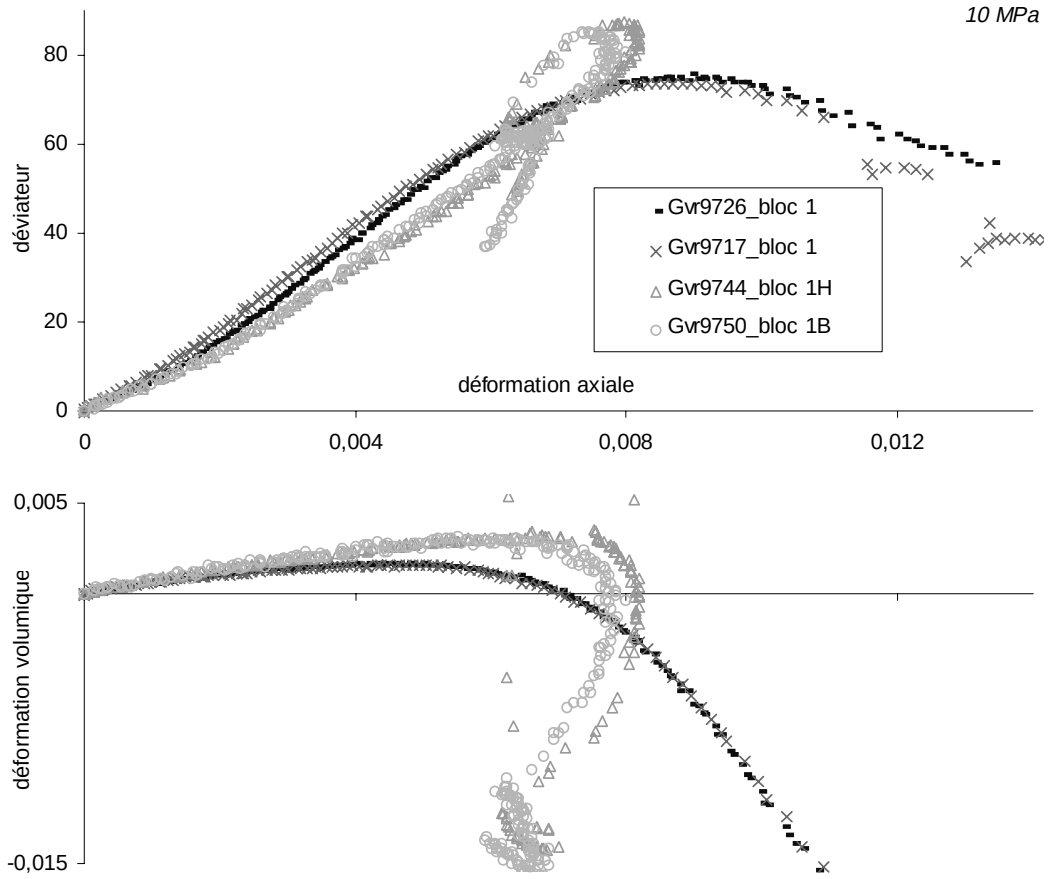


FIG. 4.20 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression à 10 MPa.*

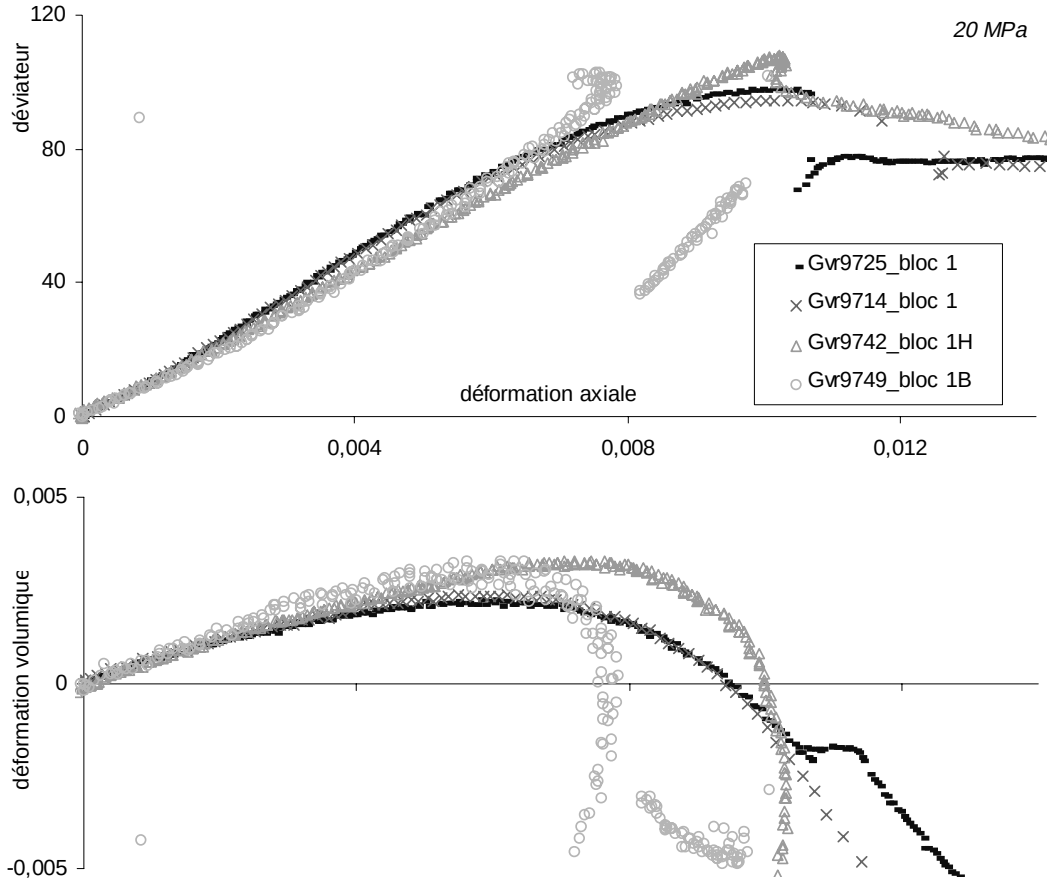


FIG. 4.21 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression à 20 MPa.*

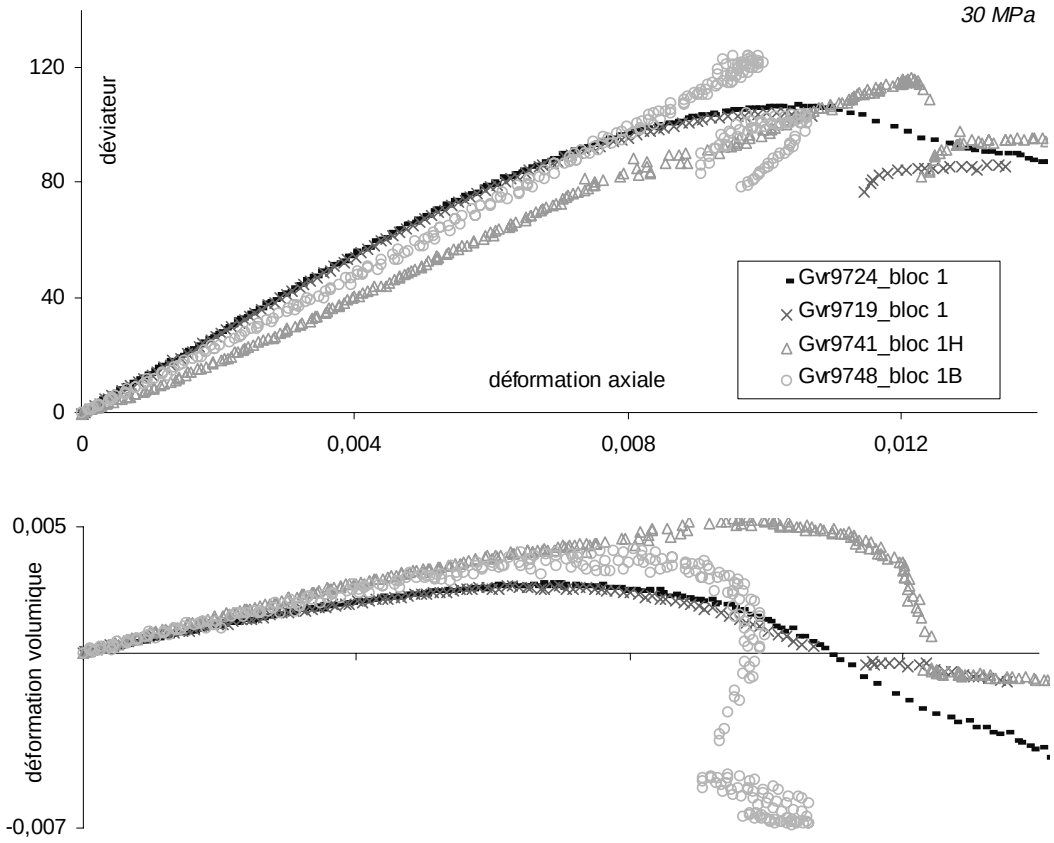


FIG. 4.22 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression à 30 MPa.*

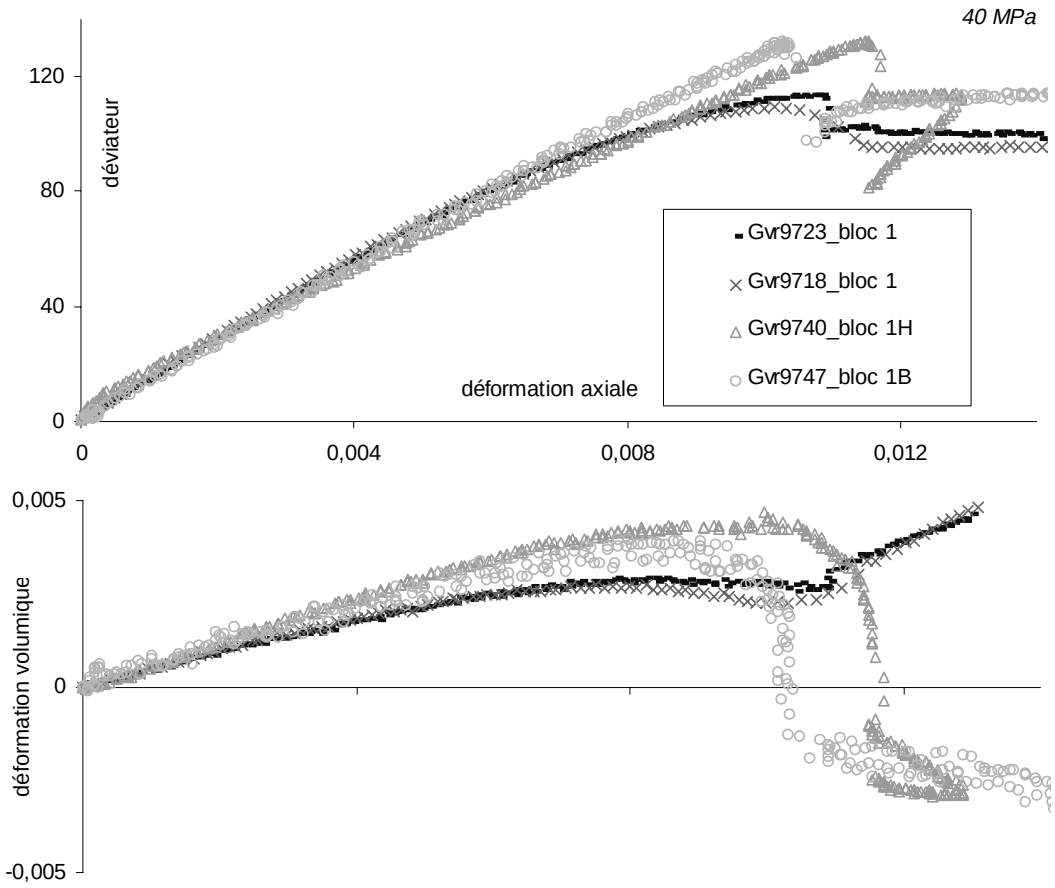


FIG. 4.23 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression à 40 MPa.*

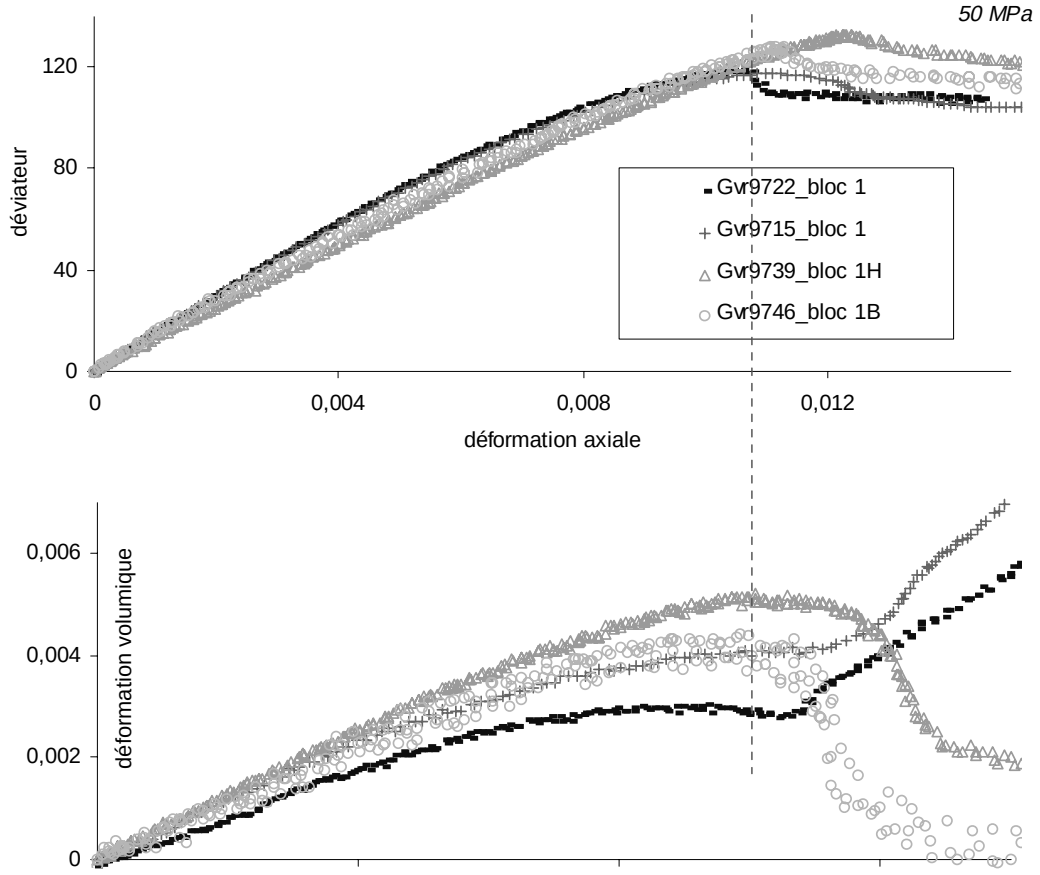


FIG. 4.24 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression à 50 MPa.*

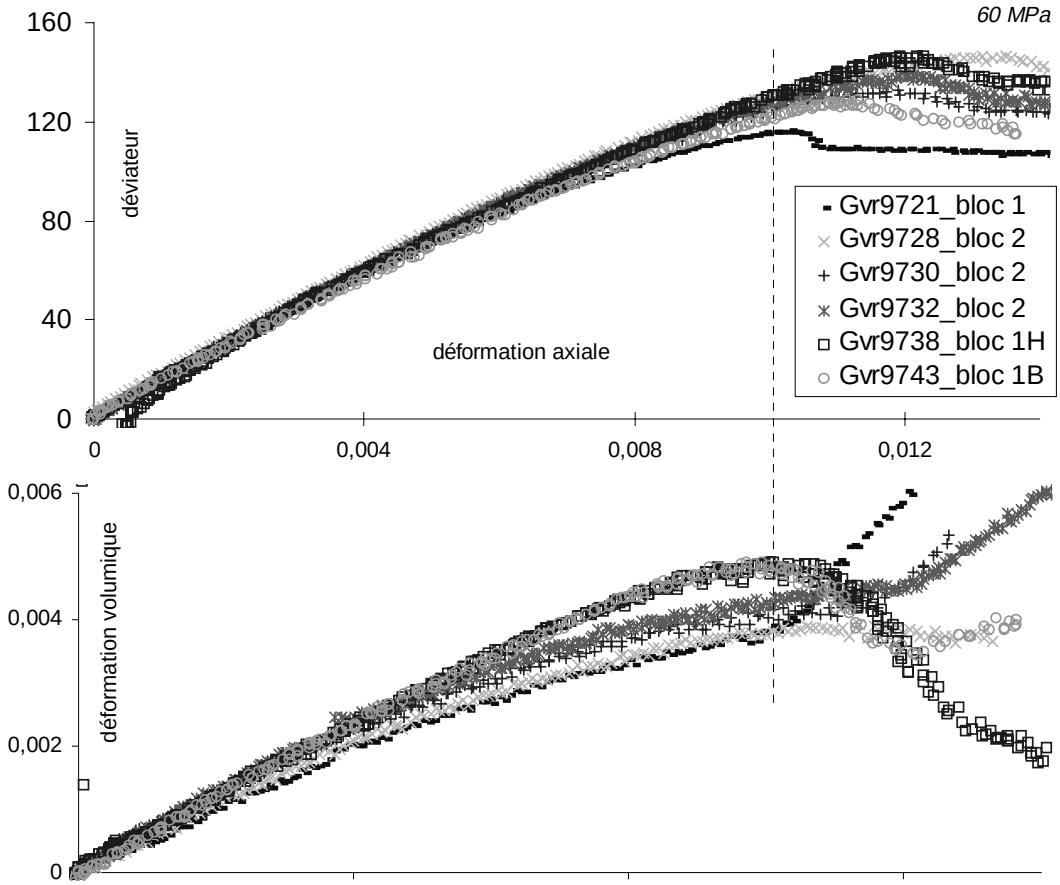


FIG. 4.25 – *Comparaison des essais d'élancement 1 avec les essais d'élancement 2, en compression à 60 MPa.*

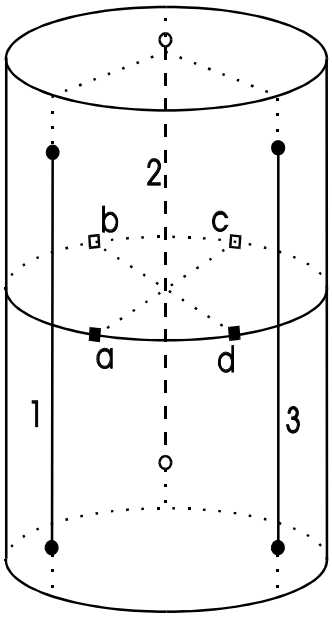


FIG. 4.26 – *Disposition des capteurs internes autour de l'échantillon. Capteurs axiaux 1,2 et 3, et capteurs radiaux a,b,c et d.*

radiale.

Détection axiale :

Lorsque l'échantillon se déforme de façon homogène, en tout point les déformations sont identiques. Les trois mesures axiales en périphérie de l'échantillon doivent être égales. Une perte de cette égalité est à attendre quand les déformations ne sont plus homogènes.

La déformation axiale moyenne est définie ici comme la moyenne des trois mesures. On observe tout au long de l'essai la différence de chacune des mesures avec cette déformation moyenne. Une différence absolue qui n'évolue pas lors du chargement implique que les trois vitesses de déformation sont identiques, à l'inverse, quand ces différences ne restent plus constantes, les déformations axiales sont nécessairement inhomogènes. Pour chaque essai sont tracées les trois courbes des différences des mesures des déformations axiales par rapport à la déformation axiale moyenne en fonction de cette dernière. Notons que les déformations utilisées ici sont les déformations axiales normalisées par la déformation axiale maximum au pic de contrainte déviatorique, afin de rendre les différents essais comparables. Ces trois courbes ne sont pas indépendantes les unes des autres car une courbe peut être déterminée à partir des deux autres.

Détection radiale :

Si l'on ne considère que deux capteurs diamétralement opposés, et donc une seule direction radiale, il est possible à partir de ces deux mesures de déterminer la varia-

tion de diamètre et le déplacement du centre de ce diamètre. Par convention, une mesure radiale est choisie positive quand le point de la surface de l'échantillon dont on mesure le déplacement bouge vers le centre de l'échantillon. Ainsi, la diminution du diamètre est obtenue en additionnant les deux mesures de déplacement, on divise alors par le diamètre initial pour obtenir une déformation. Le déplacement du centre du diamètre est obtenue en effectuant la demi différence des deux mesures. Le sens positif du déplacement est fixé arbitrairement par l'équation.

Si maintenant on considère les quatre capteurs, on détermine alors les variations de diamètre et le déplacement du centre de l'échantillon suivant deux directions radiales perpendiculaires. Pour un matériau orthotrope de révolution, tant que les déformations sont homogènes, les deux déformations radiales sont identiques, une différence apparaîtra lors de la perte d'homogénéité que l'on peut appeler également point d'apparition de la localisation (Santarelli [127]). Si le matériau présente une anisotropie, les mesures peuvent être différentes dans la phase homogène, mais cette différence doit être proportionnelle à la déformation globale. Par contre, au point d'apparition de la localisation, cette proportionnalité n'est plus respectée. Quand on trace la courbe d'évolution d'une des déformations radiales par rapport à l'autre, la phase homogène apparaît comme étant linéaire, jusqu'à l'apparition de la localisation. La pente de la phase linéaire est de un sur un pour un matériau orthotrope de révolution. Pour chaque essai, l'écart type de cette courbe par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine de la courbe a été calculée. L'analyse statistique est menée sur une succession de tronçons de tailles croissantes, partant tous de l'origine de la courbe. Si l'on tient compte du bruit des mesures, l'écart type doit être constant durant cette première phase linéaire, puis augmenter au moment de la localisation. Plus précisément, c'est l'écart type à partir des déformations radiales normalisées par la déformation radiale maximum au pic de contrainte axiale qui est calculé, afin que les différents essais soient comparables entre eux.

Lorsque l'on observe la position du centre de l'échantillon, à la hauteur des capteurs radiaux, on remarque que ce centre se déplace tout au long du chargement axial. Si l'on regarde l'évolution de la différence des déplacements dans les deux directions perpendiculaires, une phase linéaire de cette évolution indique que le centre se déplace toujours dans la même direction. Par contre si l'on perd la linéarité de cette courbe, c'est qu'il existe une rotation de la direction de déplacement du centre de l'échantillon. Cette courbe, normalisée par la variation de diamètre maximum au pic de contrainte axiale pour permettre la comparaison entre différents essais, est également tracée pour chaque essai.

4.6.3.2 Résultats de la détection

4.6.3.2.1 analyse globale

On présente ici les résultats dans leur ensemble avant de les détailler en fonction

du confinement dans le paragraphe suivant. Les événements révélateurs d'une éventuelle localisation de la déformation sont recherchés indépendamment sur les trois critères suivants, puis comparés :

- indicateur 1 : divergence des courbes des écarts des déformations axiales vis-à-vis de la déformation axiale moyenne, signifiant une perte de linéarité de ces courbes et donc une perte d'homogénéité du champ de déformation axiale (Fig. 4.27).
- indicateur 2 : divergence de la courbe de la différence des déplacements du centre de l'échantillon à sa mi-hauteur suivant deux directions orthogonales, correspondant à une rotation de la vitesse de déplacement de ce point central (Fig. 4.30).
- indicateur 3 : divergence de la courbe de l'écart type de la fonction déformation radiale par rapport à la déformation radiale perpendiculaire, révélatrice d'une perte de linéarité de cette fonction (Fig. 4.32).

Un graphe type des trois différences de déformations axiales (indicateur 1) est présenté sur la figure 4.27. Trois phases peuvent être distinguées. La première correspond à la mise en place de l'échantillon. Rappelons que les mesures sont effectuées directement sur l'échantillon. Cette première phase correspond à l'accommodation de la part de l'échantillon pour que ses deux extrémités soient dans un contact, qu'on peut qualifier de satisfaisant, avec les embases de la cellule. Elle est due au défaut du parallélisme des deux extrémités. L'amplitude de l'écart généré dans cette première phase pour l'ensemble des essais dépasse rarement $0,02\ mm$. Cette valeur est supérieure à la tolérance moyenne de parallélisme mesurée sur les échantillons, mais prend en compte aussi le défaut éventuel de parallélisme des deux embases de la cellule (défaut permanent ou dû au démontage et remontage successifs).

La deuxième phase présente des tronçons de courbes linéaires, parallèles à l'axe des abscisses. Les vitesses de déformation sont donc identiques pour les trois capteurs. Les déformations axiales sont bien homogènes à partir de la fin de la phase de mise en place. Si l'on observe l'ensemble des essais présentés dans l'annexe D, les courbes sont effectivement bien linéaires en général, mais pas toujours parfaitement parallèles à l'axe des abscisses. Cela signifierait que les trois vitesses de déformation seraient constantes mais différentes chacune d'entre elles. Ces écarts constatés sont cependant assez faibles, de l'ordre de quelques pour-cent de la déformation axiale moyenne et doivent plutôt être attribués à des petits défauts de positionnement des capteurs sur la génératrice de l'échantillon, ou à une évolution à long terme des pentes de calibration des capteurs axiaux internes (effectivement observée), qu'à un comportement significatif de l'échantillon.

La troisième phase débute au seuil de divergence des courbes. A partir de ce point, les trois courbes deviennent non linéaires et s'écartent fortement les unes des autres. Certaines mesures axiales deviennent prédominantes sur les autres. On a alors une perte d'homogénéité des déformations axiales (Fig. 4.28).

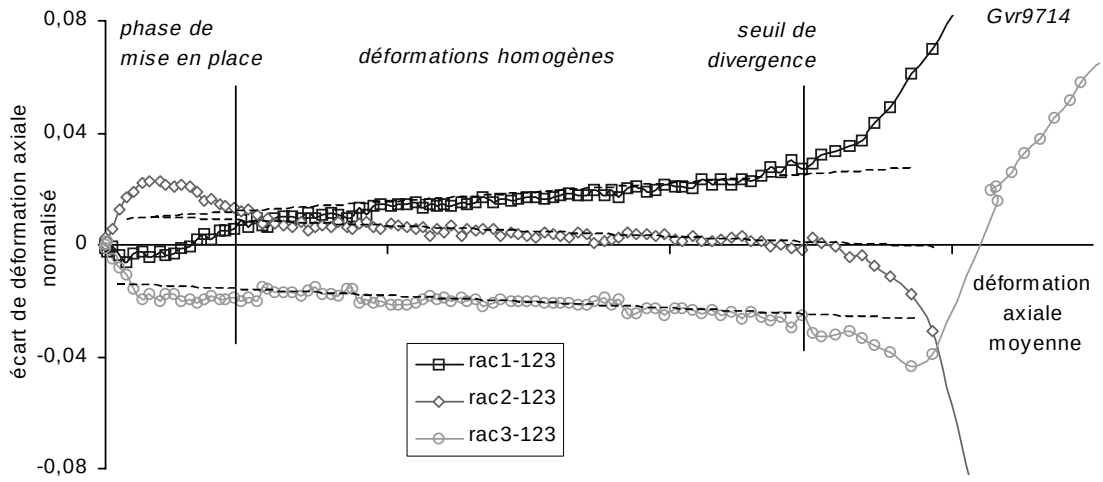


FIG. 4.27 – *Exemple d'évolution des écarts des déformations axiales par rapport à la déformation axiale moyenne.*

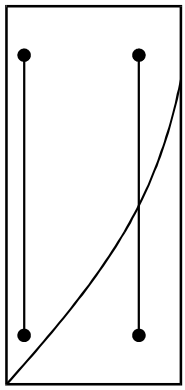


FIG. 4.28 – *Principe de la divergence des différentes mesures de déformation axiale, lors de l'apparition d'une bande de cisaillement.*

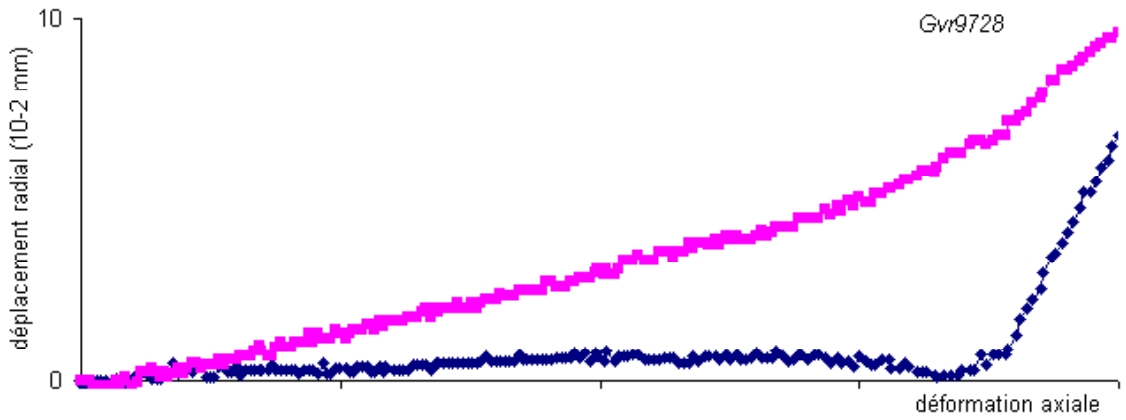


FIG. 4.29 – *Exemple d'évolution du déplacement du centre de l'échantillon dans les deux directions radiales orthogonales.*

Le graphe 4.29 montre le déplacement du centre de l'échantillon dans les deux directions radiales d'observation. Le centre se déplace tout au long de l'écrasement. Dans cet exemple, il ne se déplace que dans une des directions pendant la deuxième phase, la déformation étant symétrique dans l'autre direction. Puis le déplacement change de direction de déplacement brusquement au début de la troisième phase. Le graphe, qui est systématiquement étudié pour les différents essais, de l'évolution de la différence des déplacements du centre suivant les deux directions perpendiculaires, est présenté sur la figure 4.30. On peut distinguer également trois phases. La première de mise en place de l'échantillon, durant laquelle le centre n'a pas de direction de déplacement particulière. La deuxième phase est linéaire, pas nécessairement parallèle à l'axe des abscisses. Le centre a alors une direction de déplacement privilégiée. Une troisième phase où on perd la linéarité de la courbe, la direction privilégiée de déplacement est perdue. Le déplacement du centre représente quelques dizaines de pour-cent de l'augmentation de diamètre de l'échantillon au moment du pic.

La troisième observation concerne non plus les déplacements mais les déformations latérales orthogonales. Le graphe 4.31 présente un exemple d'évolution de ces deux déformations, l'une par rapport à l'autre. Le début de l'essai correspond à une phase linéaire, puis intervient une perte de linéarité. On observe d'autre part que la

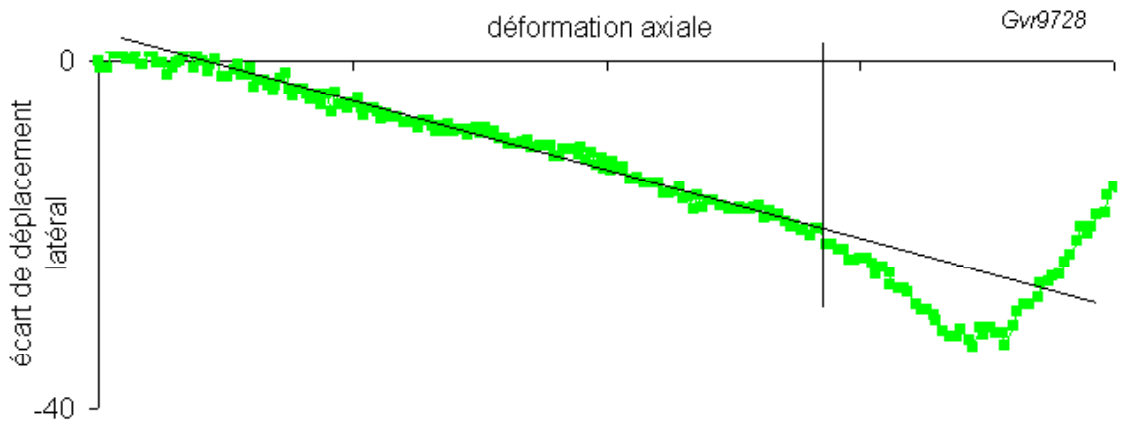


FIG. 4.30 – *Exemple d'évolution de la différence des déplacements radiaux du centre de l'échantillon dans deux directions orthogonales.*

pente du tronçon linéaire n'est pas exactement égal à un, signifiant une légère anisotropie du grès. La figure 4.32 montre un exemple d'évolution de l'écart type de la fonction déformation latérale par rapport à la déformation latérale perpendiculaire, correspondant au graphe précédent. Trois phases peuvent être mises en évidence. La phase de mise en place, la phase de déformations homogènes pendant laquelle l'écart type évolue peu et une troisième phase où l'écart type augmente de façon significative, indiquant une perte de linéarité de la fonction, et qui correspond au point indiqué sur la première figure.

Trois critères de perte d'homogénéité ont été montrés. On classe d'une part le critère de divergence des courbes de déformation axiale. D'autre part, on regroupe par commodité les deux critères de divergence des mesures radiales. On verra que l'observation de l'écart type ne permet pas systématiquement de dégager un point précis de perte d'homogénéité de l'essai. Le paragraphe suivant compare ces critères pour les différents confinements et les différents élancements.

4.6.3.2.2 analyse détaillée

Rappelons que les différentes courbes, présentées précédemment, pour chacun des essais sont disponibles en annexe D. Pour faciliter la lecture, seulement quelques essais sont représentés dans ce paragraphe pour illustrer les commentaires, et les numéros de page des graphes relatifs aux autres essais sont spécifiés.

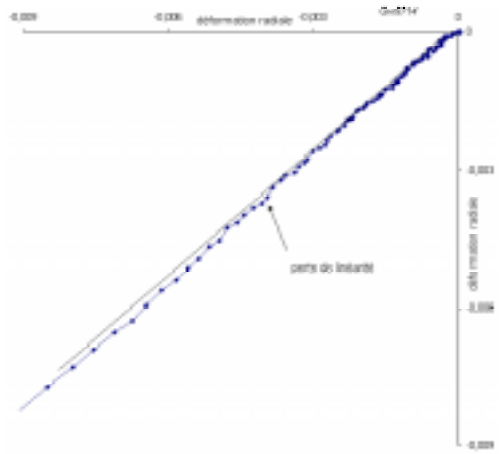


FIG. 4.31 – *Exemple d'évolution des deux déformations latérales, l'une par rapport à l'autre.*

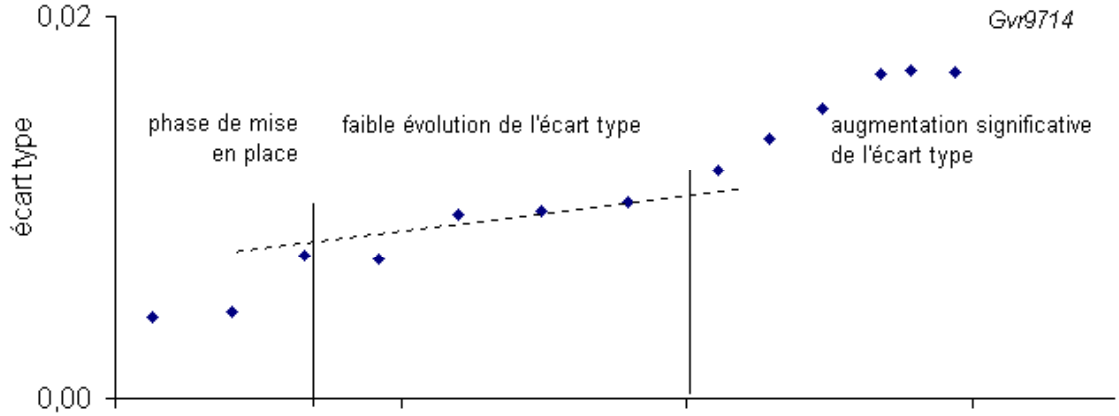


FIG. 4.32 – *Exemple d'évolution de l'écart type de la fonction déformation radiale vis-à-vis de la déformation radiale dans la direction perpendiculaire.*

Essais uniaxiaux :

Les essais uniaxiaux présentent une partie de courbe de contrainte avec une concavité orientée vers le haut correspondant à une phase de fermeture de fissures (cf. 4.6.1.1, p. 79). Pendant cette phase la courbe du graphe relatif au déplacement latéral du centre de l'échantillon est assez linéaire, les courbes du graphe des différences de déformations axiales sont faiblement non linéaires. La jonction de ce tronçon avec le tronçon linéaire sur la courbe de contrainte correspond avec un coude sur le graphe de différence de déplacement radial ainsi que sur le graphe des différences de déformations axiales (cf. essais Gvr9720 figure 4.33 et Gvr9711 p. 308, Gvr9731 p. 310).

Pendant la phase linéaire de la courbe de contrainte qui suit, les courbes de différences de déformation axiale sont linéaires. Ce qui veut dire que les trois vitesses de déformation axiale sont constantes et très proches entre elles. Cela signifie que la fin de la phase dite de fermeture de fissures correspond, d'une part, seulement à un début de déformation axiale homogène, et d'autre part à un changement de direction de déplacement de l'échantillon. Il n'y a pas de corrélation nette à partir de l'écart type, excepté pour l'essai Gvr9731.

Pendant la phase linéaire de la courbe de contrainte, il n'y a plus de direction privilégiée de déplacement du centre de l'échantillon, excepté pour cet essai Gvr9731. On observe ensuite, sur le graphe des différences de déformation axiale, un second coude correspondant à un seuil de divergence des trois courbes. Ce moment intervient peu de temps après la fin de la phase linéaire de la courbe de contrainte et avant le pic de contrainte. Seul l'essai Gvr9711 montre en même temps une corrélation avec l'écart type. Ce seuil de divergence des courbes des différences de déformation axiale est considéré comme étant le seuil de localisation en terme d'analyse axiale. Le seuil de localisation en terme d'analyse radiale, à défaut d'indicateur clair, est considéré arbitrairement au pic de contrainte.

Si l'on considère les essais uniaxiaux en élancement un, les observations sont moins faciles du fait de l'effet perturbateur de la forme des crochets de fixation des capteurs axiaux à l'approche du pic, mais on retrouve les observations suivantes :

- à la jonction du tronçon concave et du tronçon linéaire de la courbe de contrainte, correspondent des coudes sur les graphes des différences des déformations axiales et des déplacements latéraux du centre de l'échantillon (essais Gvr9745 p. 311 et Gvr9751 p. 312). Cela indiquant un début de déformation axiale homogène, et une perte de la direction privilégiée de déplacement initial du centre de l'échantillon, pour cette fois atteindre une autre direction privilégiée de déplacement.

- une perte de linéarité des courbes des différences de déformation axiale intervenant entre la fin de la phase linéaire de la courbe de contrainte et le pic de contrainte, plus précocement qu'en élancement deux, ainsi qu'une nouvelle perte de la direction privilégiée de déplacement du centre (essai Gvr9751). Sur l'essai Gvr9745, on observe une augmentation significative de l'écart type des

déformations latérales également un peu après le tronçon linéaire de la courbe de contrainte.

Essais à 10 MPa :

Les essais au confinement de 10 MPa présentent une petite partie concave sur la courbe de contrainte qui se confond avec la phase d'accommodation de l'échantillon quant au défaut de parallélisme de ses extrémités. On observe pendant la phase linéaire de la courbe de contrainte un coude des courbes de différence de déformation axiale (essais Gvr9717 figure 4.34 et Gvr9710 p. 313). Plus loin dans le chargement, on observe la divergence de ces trois courbes, correspondant environ au pic de contrainte. Il n'y a rien de vraiment visible sur le graphe relatif au déplacement du centre de l'échantillon. Il n'y a pas de corrélation non plus avec l'écart type des déformations latérales, excepté pour l'essai Gvr9726 (p. 315) où il existe une variation de pente de la courbe avant même l'événement axial, et donc avant le pic de contrainte.

Les deux essais en élancement un présentent également une divergence des courbes de différence de déformation axiale, mais cette fois-ci bien avant le pic, plus précocement qu'en élancement deux (essais Gvr9744 p. 316 et Gvr9750 p. 317). Ce point est accompagné pour l'essai Gvr9744 d'un brusque changement de direction du déplacement de l'échantillon et d'une nette augmentation de l'écart type des déformations latérales.

Essais à 20 MPa :

La divergence des courbes de différence de déformation axiale, intervenant après une phase linéaire correspondant à des déformations homogènes, a lieu très légèrement avant le pic de contrainte. Il existe également un seuil à partir duquel l'écart type de la courbe des déformations latérales, l'une par rapport à l'autre, augmente significativement. Celui-ci intervient avant le seuil axial.

Il n'y a pas de direction de déplacement privilégiée pour l'essai Gvr9712 (p. 318), à l'inverse des essais Gvr9714 (p. 319) et surtout Gvr9725 (fig. 4.35). Cet essai Gvr9725 est un peu différent des deux autres, d'une part car le seuil radial intervient très tôt, un peu après la fin du tronçon linéaire de la courbe de contrainte, et d'autre part, on constate une chute brutale de cette contrainte axiale après le pic, qui n'existe pas pour les autres essais à ce confinement.

Pour les essais en élancement un, l'essai Gvr9749 (p. 322) provenant de la partie basse du premier bloc de grès dont la densité est plus faible que la moitié haute, possède une partie concave de fermeture de fissures beaucoup plus importante que l'essai Gvr9742 (p. 321) provenant de cette moitié supérieure.

Il existe une bonne concordance entre le seuil de divergence des courbes de différence de déformation axiale et la courbe relative au déplacement radial du centre de l'échantillon. Ceux-ci interviennent avant le pic de contrainte et à nouveau plus

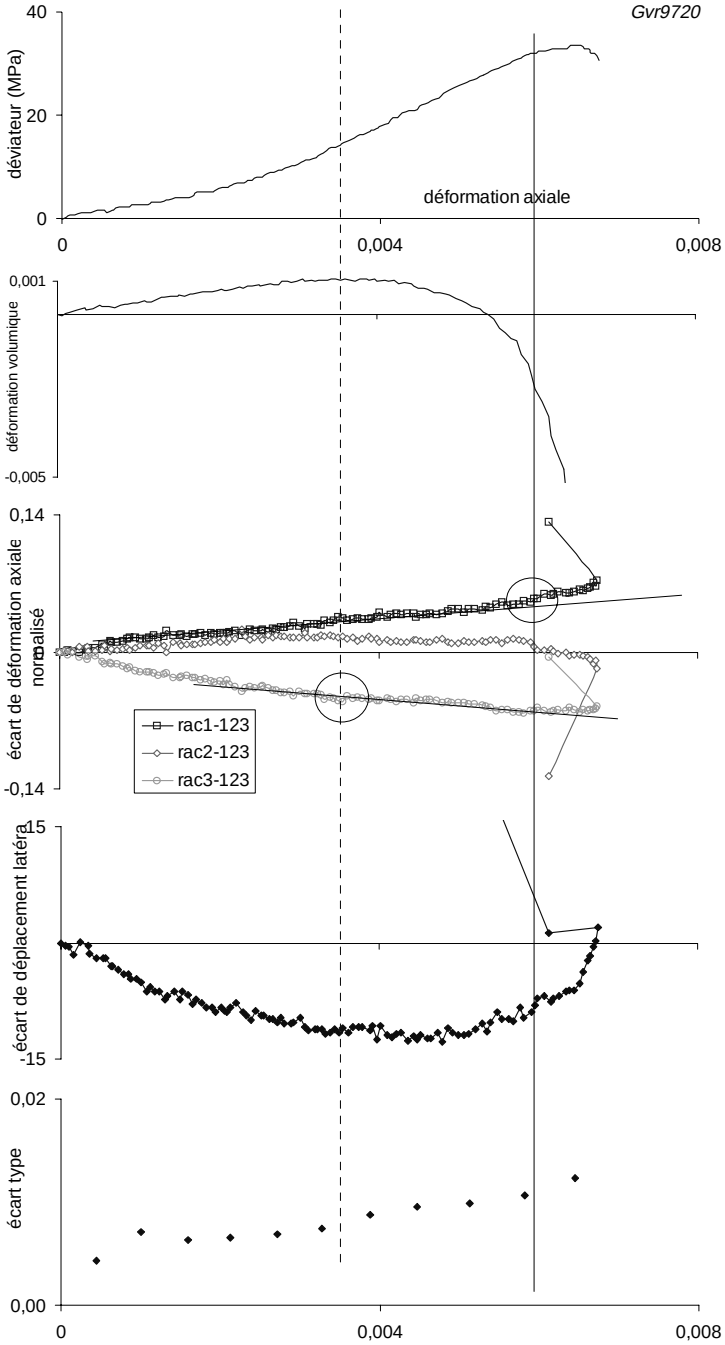


FIG. 4.33 – *Essai 9720 : 0MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

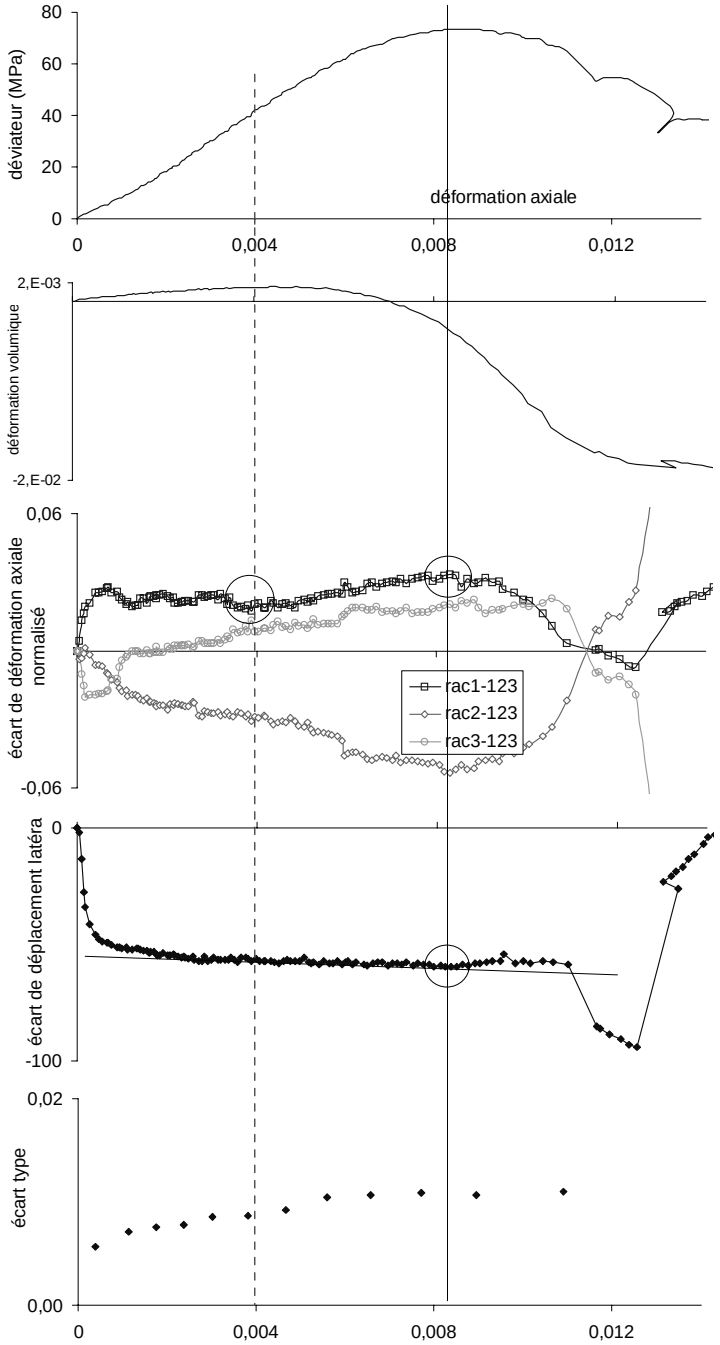


FIG. 4.34 – *Essai 9717: 10MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

précocement qu'en élancement 2. Il existe également un seuil sur la courbe de l'écart type des déformations latérale correspondant au deux précédents pour l'essai Gvr9742.

Pour ces deux essais en élancement 1, on constate à environ la moitié du chargement l'existence de coudes sur les courbes de différence de déformation axiale accompagné d'un changement de direction du déplacement du centre de l'échantillon. Ce point correspond d'ailleurs avec la fin de la phase de fermeture de fissures pour l'essai Gvr9749. Il peut difficilement être considéré comme un début possible de la localisation.

Essais à 30 MPa :

La perte de linéarité sur les courbes des différences de déformation axiale est plus précoce qu'aux confinements inférieurs. Ce moment coïncide avec une amorce de rotation de la direction de déplacement du centre, bien qu'il soit difficile dans l'ensemble de définir un point exact de transition car cette rotation est assez progressive. Un seuil sur la courbe d'écart type relative aux déformations latérales apparaît plus tard, plus près du pic de contrainte (essais Gvr9709 figure 4.36 et Gvr9719 p. 324, Gvr9724 p. 325). L'essai Gvr9724 voit apparaître, comme pour certains essais à plus faible confinement, un coude sur les courbes de différence de déformation axiale, à environ la moitié du chargement axial, un peu après la fin du tronçon linéaire de la courbe de contrainte déviatorique.

Pour les échantillons d'élancement un, la divergence des courbes de différence de déformation axiale, intervient avant le pic de contrainte, mais ne présente plus de différence comme il en existait pour les plus faibles confinements entre les deux types d'élancement (essais Gvr9741 p. 327 et Gvr9748 p. 326). Quand à l'écart type, il n'y a rien de visible sur les deux essais.

Essais à 40 MPa :

Les trois essais d'élancement 2 présentent un changement de direction du déplacement du centre de l'échantillon en cours de chargement, juste après la fin de la phase linéaire de la courbe de contrainte (essais Gvr9708 figure 4.37 et Gvr9718 p. 329, Gvr9723 p. 330). On passe d'une direction de déplacement privilégiée à une autre. Ensuite, avant le pic de contrainte, il existe la divergence des courbes de différence de déformation axiale, sauf pour l'essai Gvr9718 où cela se produit au pic.

Les essais en élancement un montrent le même comportement avec aussi un changement de direction de déplacement du centre à un peu plus de la moitié du chargement. La courbe de contrainte est par contre linéaire sur pratiquement tout l'essai.

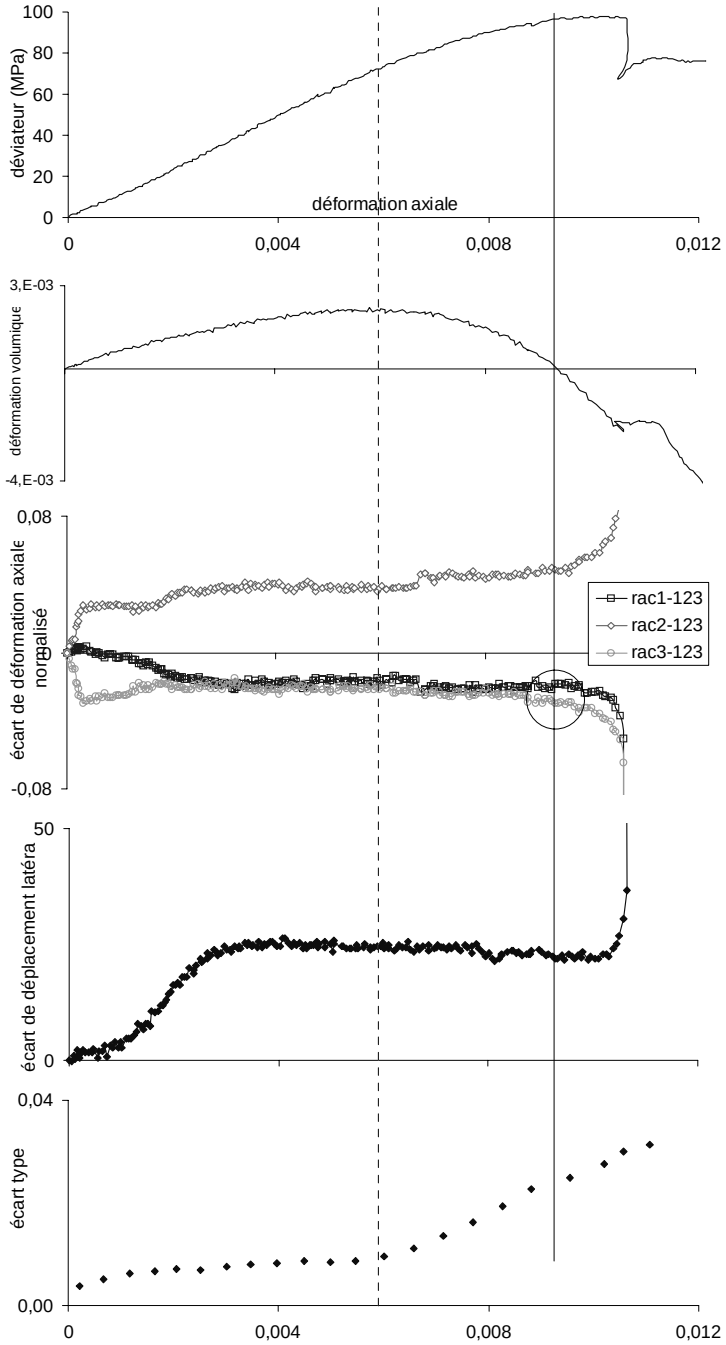


FIG. 4.35 – *Essai 9725 : 20MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

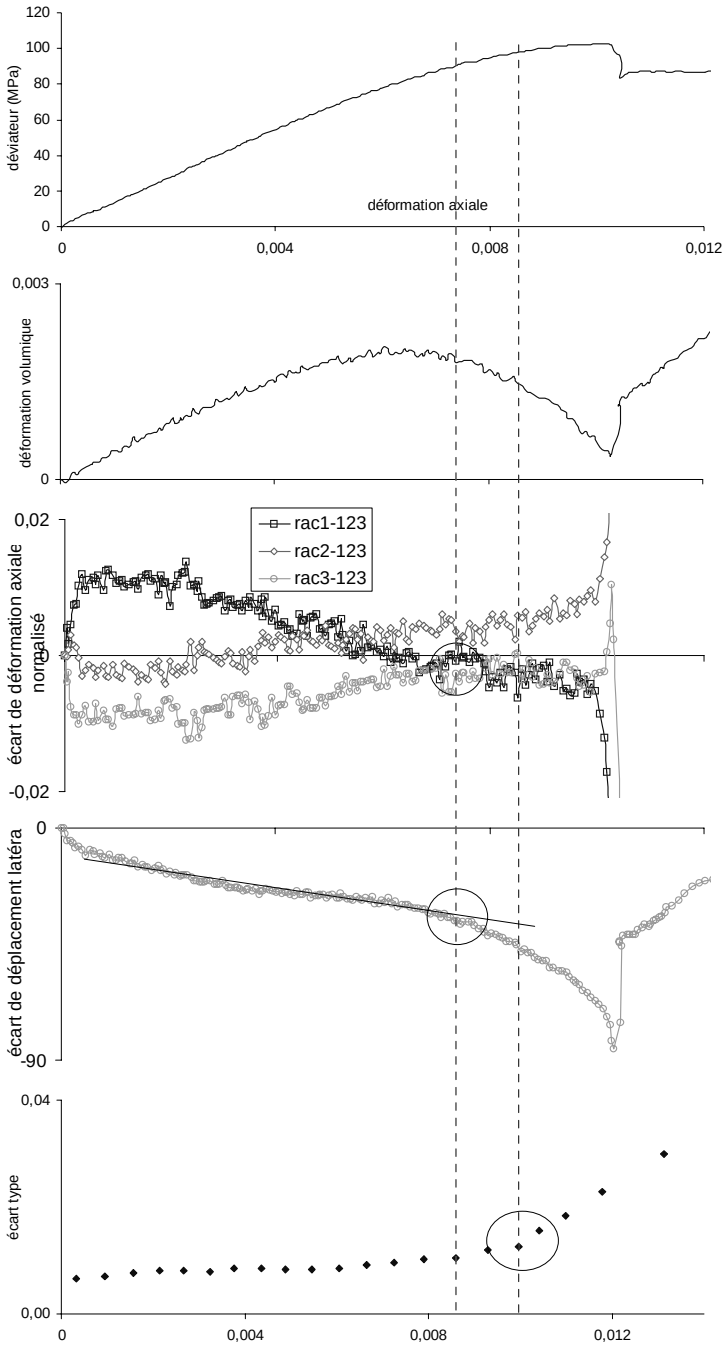


FIG. 4.36 – *Essai 9709 : 30MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

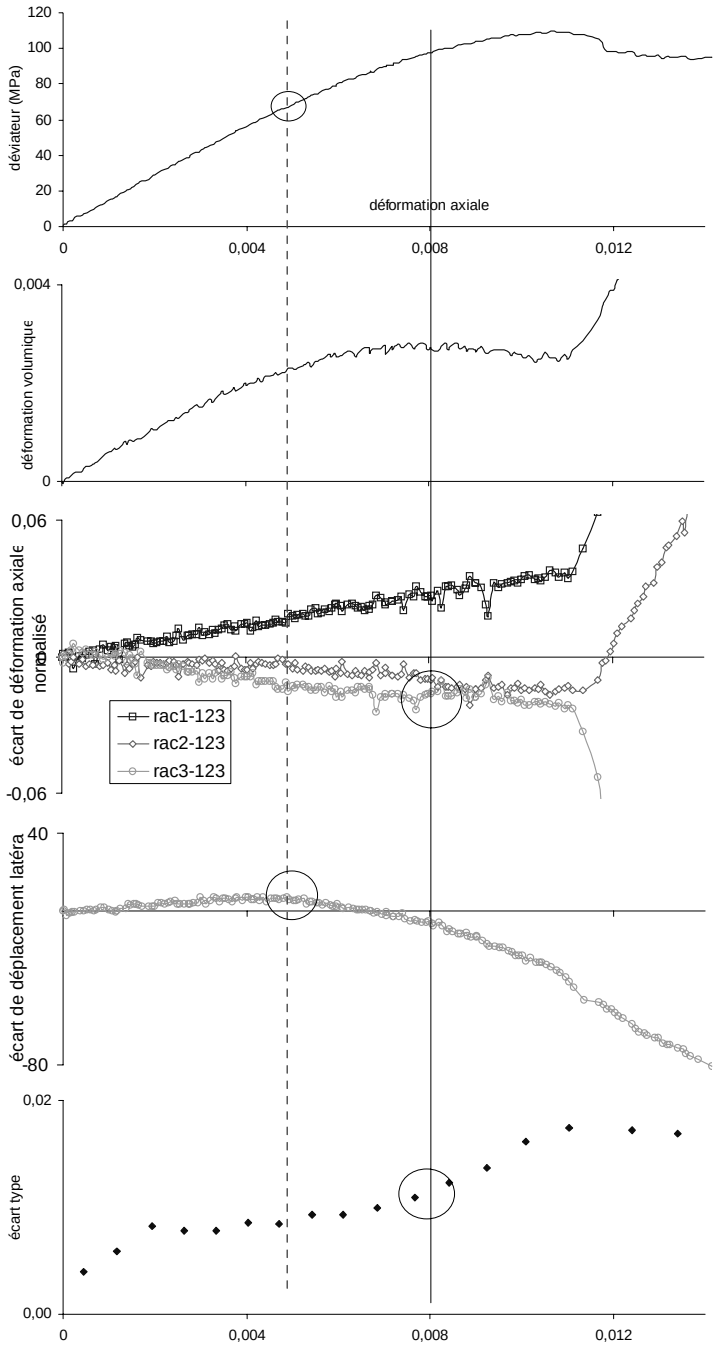


FIG. 4.37 – *Essai 9708 : 40MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

Essais à 50 MPa :

Les essais à 50 MPa sont très similaires en terme d'événements dans les déformations radiales et axiales, aux essais à 40 MPa. On observe à nouveau un changement de la direction de déplacement du centre de l'échantillon vers la fin du tronçon linéaire de la courbe de contrainte déviatorique. Et une divergence des courbes de différence de déformation axiale avant le pic de contrainte (essais Gvr9715 figure 4.38 et Gvr9707 p. 333, Gvr9722 p. 335 et pour les élancements de un Gvr9739 p. 337, Gvr9746 p. 336).

Essais à 60 MPa :

Les essais pour ce confinement sont plus nombreux (p. 338 à p.345). Une constante globale est la présence d'une divergence des courbes de différence de déformation axiale avant le pic, de façon systématique. D'autre part, le changement de direction du déplacement du centre de l'échantillon qu'on visualise par une perte de la linéarité de la courbe des différences de déplacement dans deux directions orthogonales apparaît soit avant l'événement axial (Gvr9716, Gvr9732 et Gvr9738), soit en même temps que l'événement axial (Gvr9728 fig. 4.39, Gvr9721, Gvr9706). Pour les essais Gvr9730 et Gvr9743 il n'est pas possible de déterminer un seuil précis car la courbe de différence de déplacement ne présente pas de linéarité, on a une rotation permanente de la direction de déplacement. L'observation de l'écart type des déformations latérales ne donne pas de résultat excepté pour l'essai Gvr9716 où il y une concordance avec l'événement sur le déplacement radial et l'essai Gvr9743 où le point détecté se situe avant l'événement axial.

D'un aspect global, si on cumule les seuils *radiaux* obtenus, soit à partir du déplacement latéral du centre de l'échantillon, soit à partir de la comparaison des déplacements latéraux via l'écart type, ces événements ont lieu soit un peu avant, soit en même temps que le seuil de divergence obtenus à partir des mesures de déformation axiales.

D'autre part, les événement axiaux sur les échantillons d'élancement un sont légèrement plus précoces que ceux obtenus en élancement deux (essais Gvr9743 et Gvr9738).

Une information quantitative sur les seuils observés précédemment pour les différents essais, en fonction du confinement et de l'élancement est répertoriée dans le tableau 4.5, et est traduite sur les deux graphes 4.48 et 4.49 (p. 132) dans la discussion.

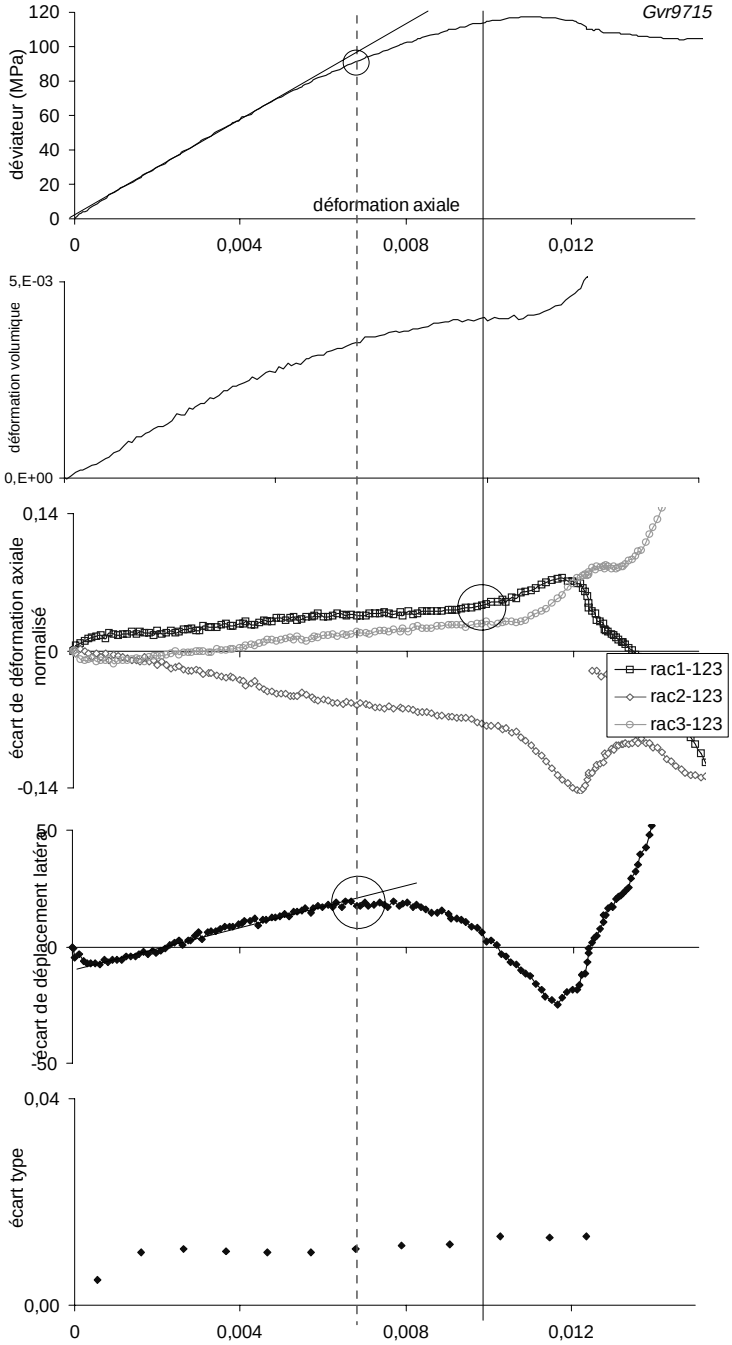


FIG. 4.38 – *Essai 9715 : 50MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

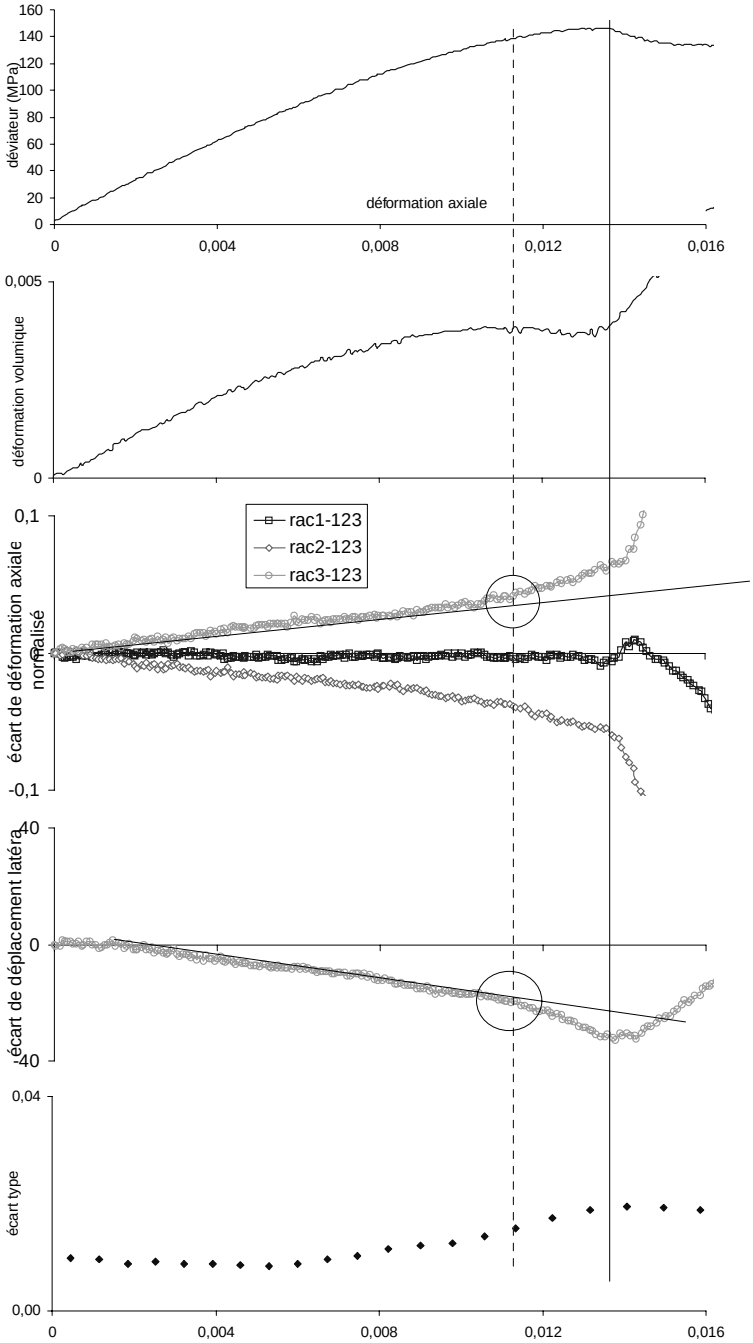


FIG. 4.39 – *Essai 9728 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

Echantillon	Gvr9711	Gvr9720	Gvr9731	Gvr9745	Gvr9751	Gvr9710	Gvr9717
H/P - Confin.	2 - 0	2 - 0	2 - 0	1 - 0	1 - 0	2 - 10	2 - 10
Seuil axial (%)	96	96	100	88	90	100	100
Seuil radial (%)	96	100	100	100	?	?	100
Echantillon	Gvr9726	Gvr9744	Gvr9750	Gvr9712	Gvr9714	Gvr9725	Gvr9742
Confinement	2 - 10	1 - 10	1 - 10	2 - 20	2 - 20	2 - 20	1 - 20
Seuil axial (%)	99	75	69	99	99	?	95
Seuil radial (%)	96	?	95	98	94	75	95
Echantillon	Gvr9749	Gvr9709	Gvr9719	Gvr9724	Gvr9741	Gvr9748	Gvr9708
Confinement	1 - 20	2 - 30	2 - 30	2 - 30	1 - 30	1 - 30	2 - 40
Seuil axial (%)	93	88	98	92	91	93	89
Seuil radial (%)	93	88	98	92	91	93	89
Echantillon	Gvr9718	Gvr9723	Gvr9740	Gvr9747	Gvr9707	Gvr9715	Gvr9722
Confinement	2 - 40	2 - 40	1 - 40	1 - 40	2 - 50	2 - 50	2 - 50
Seuil axial (%)	93	97	79	93	91	97	96
Seuil radial (%)	?	?	66	93	91	?	92
Echantillon	Gvr9739	Gvr9746	Gvr9706	Gvr9716	Gvr9721	Gvr9728	Gvr9730
Confinement	1 - 50	1 - 50	2 - 60	2 - 60	2 - 60	2 - 60	2 - 60
Seuil axial (%)	97	96	96	93	89	95	97
Seuil radial (%)	97	78	96	86	89	95	?
Echantillon	Gvr9732	Gvr9743	Gvr9738				
Confinement	2 - 60	1 - 60	1 - 60				
Seuil axial (%)	92	92	79				
Seuil radial (%)	88	77	?				

TAB. 4.5 – *Evénements détectés sur les mesures de déformations axiales et les mesures de déplacements / déformations latérales, interprétés en terme de seuils de localisation.*

4.6.4 Bandes de cisaillement

4.6.4.1 Observation générale

Après essai, les bandes de cisaillement apparaissent sur l'échantillon comme des zones claires et d'aspect crayeux (Ord *et alii* [115]).

Cette évolution de l'altération apparente des échantillons après écrasement en compression est résumée par la figure 4.40, qui reprend les caractéristiques générales des zones cisaillées en fonction du confinement pour les deux élancements. Les deux séries de photographies 4.41 et 4.42 présentent également les modes de rupture caractéristiques pour les échantillons d'élancement deux et un.

Pour les essais uniaxiaux, les échantillons d'élancement deux sont traversés par une combinaison de fractures, verticales, qui révèlent un phénomène d'*axial splitting* (formation de colonnettes), et de fractures inclinées, d'un peu moins de 20° par rapport à l'axe de l'échantillon. L'échantillon est en plusieurs morceaux. Pour les essais en élancement un, il n'y a que des fractures verticales, et également la présence d'un cône de frettage à certaines extrémités d'échantillon.

Pour les faibles confinements, entre 10 et 20 MPa, les échantillons sont traversés par des fractures inclinées. Ces fissures sont uniques et partent en général d'un "coin" de l'échantillon. Elles semblent délimiter un plan qui traverserait l'échantillon de part en part. Elles sont entourées de couches de grès plus claires laissant supposer une zone environnante ayant subi une intense déformation. Certains échantillons sont en plusieurs blocs, d'autres restent consistants, ce qui permet de penser que les fractures sont un phénomène de surface, et qu'à l'intérieur des échantillons les fractures sont prolongées par des zones de forte déformation non fissurées macroscopiquement (une fissuration à l'échelle microscopique est très probable). Pour les élancements de un, les échantillons ont la même allure. Les fissures ou zones cisaillées peuvent être dans certains cas deux et parallèles, et non plus uniques. Celles-ci partent d'un coin de l'échantillon et vont traverser vers l'autre extrémité.

A 30 MPa, il n'y a plus que des zones blanches, ayant subi de fortes déformations. Les échantillons sont consistants. Dans les élancements de deux comme de un il peut y avoir deux ou trois bandes de cisaillement parallèles. Elles ont une épaisseur très fine, qu'on peut approximer à l'oeil nu, et en surface, à moins de cinq grains (c.a.d. $\sim 1\ mm$).

Pour les confinements de 40 à 60 MPa, ces zones claires et poussiéreuses sont de plus en plus nombreuses. Elles se croisent et ne sont plus uniquement parallèles. L'angle apparent par rapport à l'axe de l'échantillon augmente avec le confinement. Ces zones ayant subi des déformations intenses sont de plus en plus épaisses. La distance entre deux bandes parallèles diminue quant à elle, et au plus fort confinement, cette distance peut être de l'ordre de deux à trois épaisseurs de bandes. La zone de l'échantillon concernée par cette altération apparente est limitée à environ une moitié de l'échantillon, et est de moins en moins grande avec le confinement du fait de l'évolution de l'inclinaison des bandes. Pour les échantillons d'élancement un,

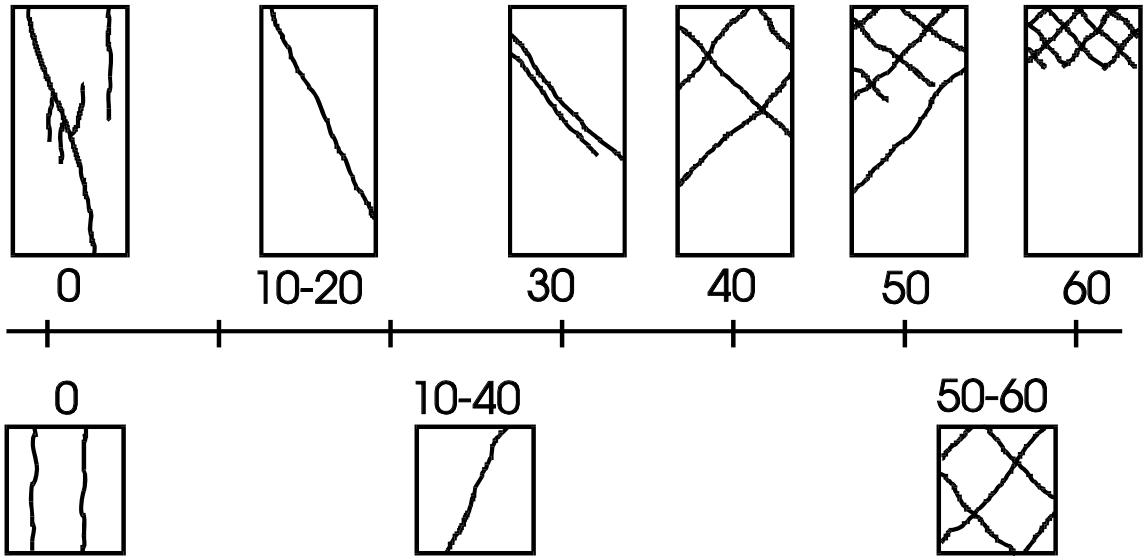


FIG. 4.40 – *Allure générale des bandes de cisaillement sur les échantillons en compression en fonction du confinement et de l'élancement.*

les distances entre bandes parallèles sont beaucoup plus importantes et les bandes restent clairement distinctes.

D'autre part, pour les essais effectués sur des échantillons provenant du premier bloc de grès, dans lequel il existe une moitié plus dense que la seconde, les zones de cisaillement traversent systématiquement la zone moins dense. En particulier, pour les forts confinements, là où les zones de cisaillement ne concernent qu'une partie de l'échantillon, c'est systématiquement la zone la moins dense qui est concernée. Le point de localisation de la déformation est plus rapidement atteint dans cette partie.

4.6.4.2 Evolution des angles de bande

Méthode de mesure :

Lors de la formation des bandes de cisaillement, il y a broyage d'une partie de la matière à l'intérieur de la bande et production de poussière. Lorsque la membrane est ouverte pour visualiser l'échantillon, on observe un dépôt de cette poussière sur celle-ci, aux endroits correspondant aux bandes. La membrane, une fois mise à plat, fournit une développée des lignes d'intersection entre les bandes de cisaillement et la surface de l'échantillon.

On cherche à mesurer la pente de la bande à partir de ces traces. Si l'on fait l'hypothèse que les bandes sont des plans parfaits et que la surface de l'échantillon est un cylindre parfait, on peut montrer que la développée de l'intersection forme une courbe sinusoïdale. La mesure de l'angle tangent des traces aux endroits de

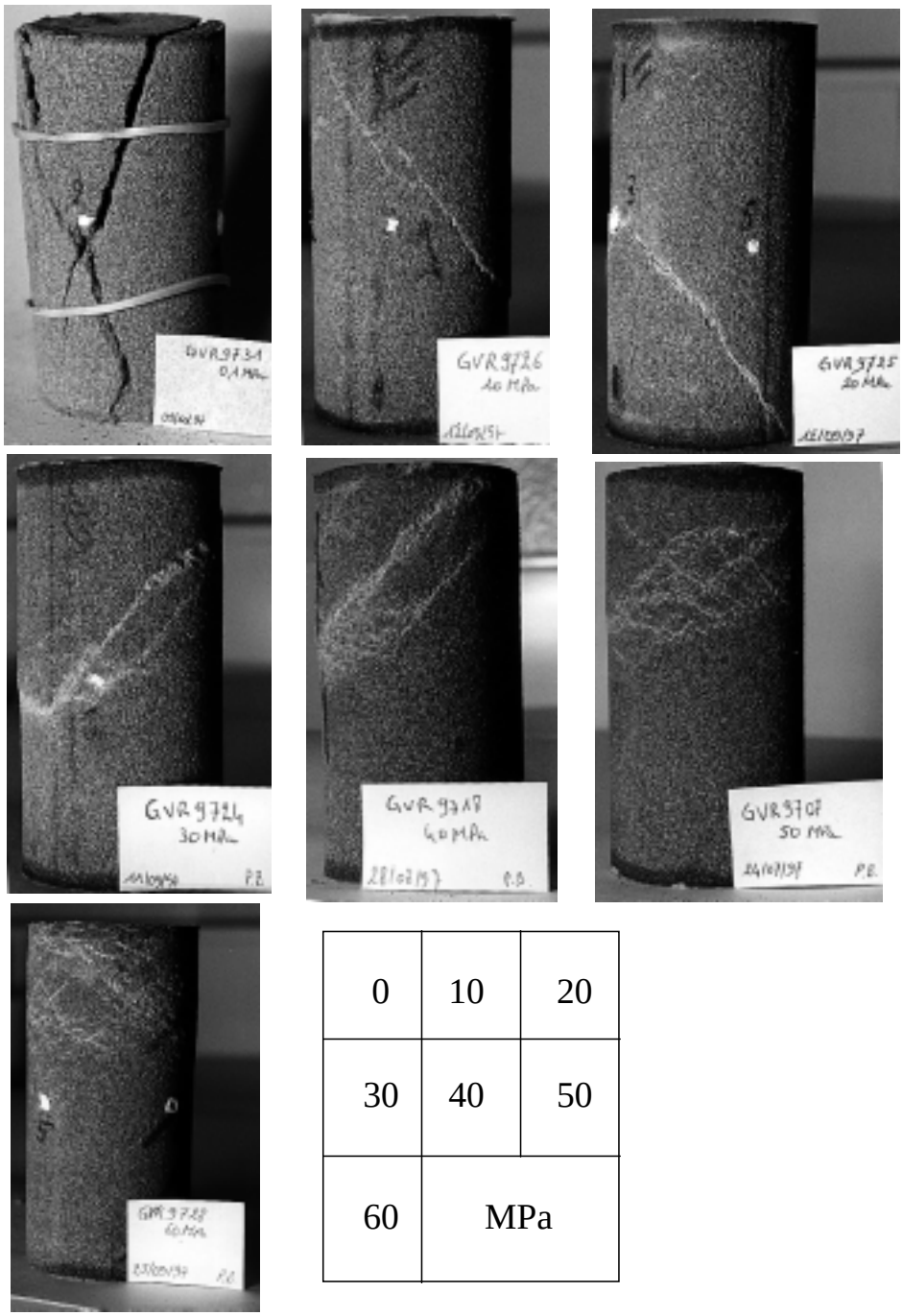
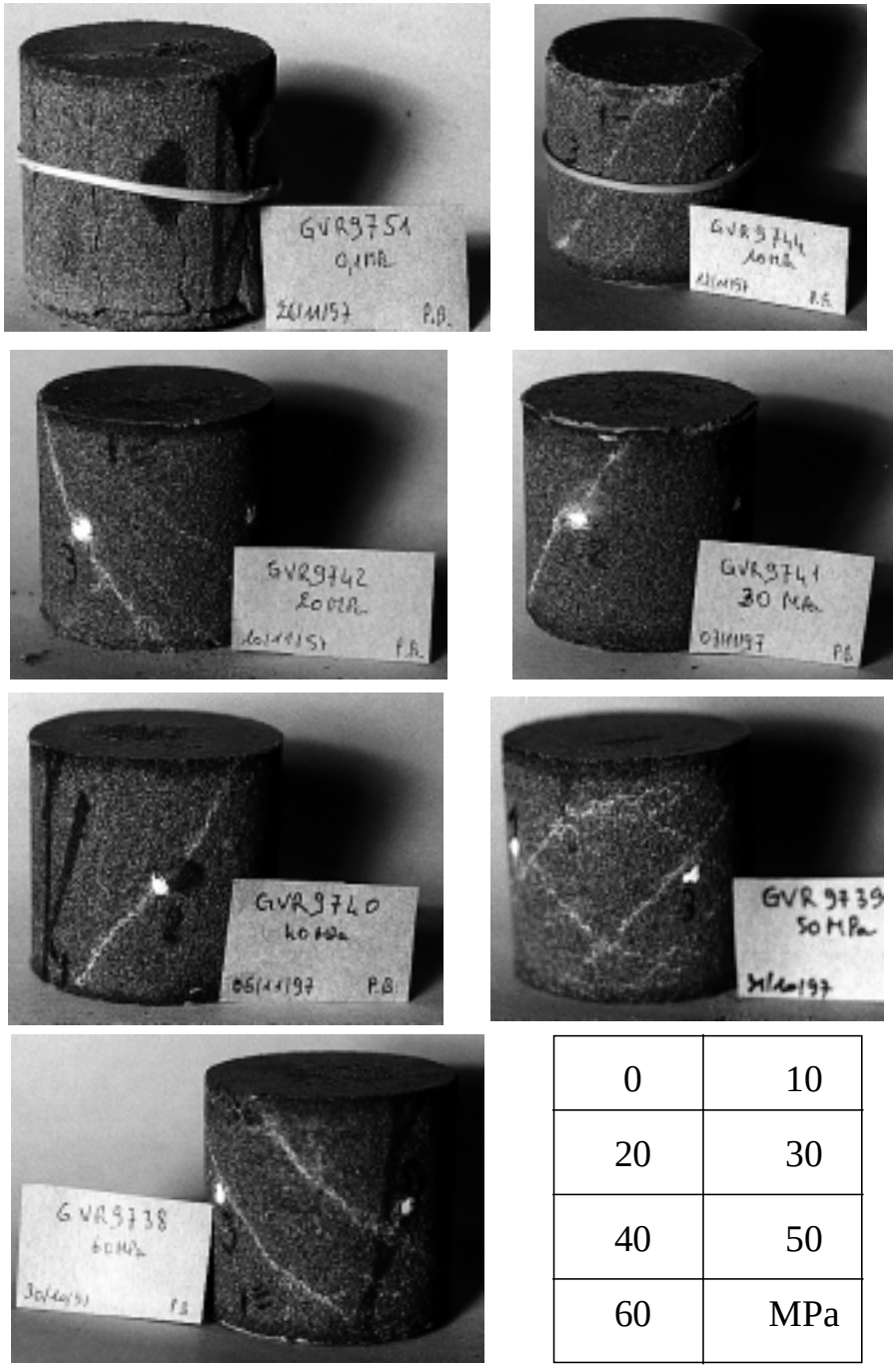


FIG. 4.41 – *Allure générale des échantillons d'élancement 2 après localisation. Les points de peinture blanche repèrent la position des capteurs radiaux.*



0	10
20	30
40	50
60	MPa

FIG. 4.42 – *Allure générale des échantillons d'élancement 1 après localisation. Les points de peinture blanche repèrent la position des capteurs radiaux.*

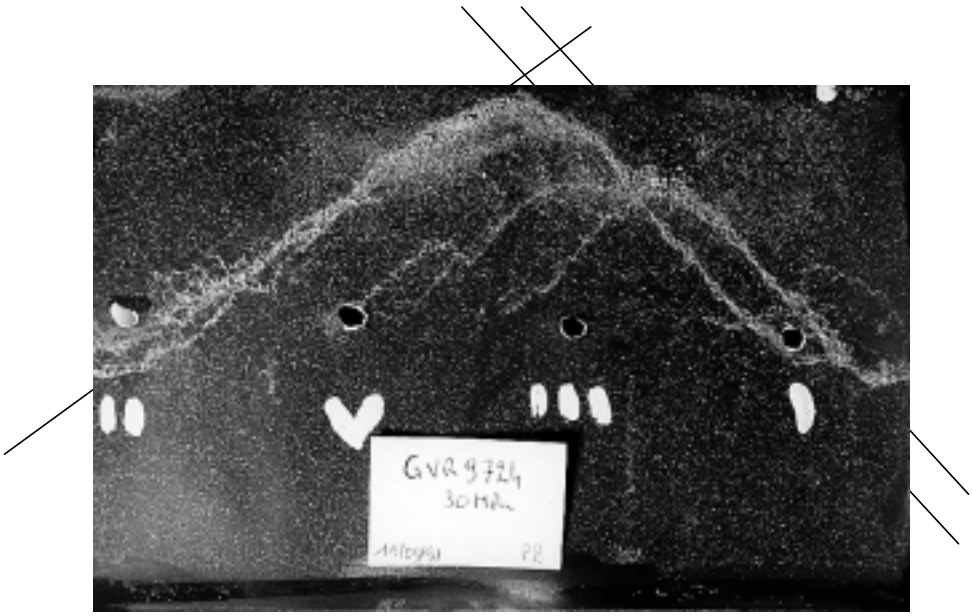


FIG. 4.43 – *Exemple des traces observées sur une membrane développée, et repérage relatif de la position des capteurs radiaux.*

changement d'inflexion, ou plus concrètement aux endroits où la trace semble la plus plate, donne l'angle d'inclinaison de la bande de cisaillement. Un résultat similaire est obtenu en faisant des hypothèses complémentaires sur la forme de l'échantillon (déformation en tonneau) ou de la bande (portion de cylindre) (cf. annexe C). La précision de cette mesure est de l'ordre de quelques degrés, ce qui est nettement supérieure à la précision d'une mesure qui serait faite directement sur l'échantillon.

La photo 4.43 donne un exemple de traces constatées sur une membrane après essais.

Résultats :

La figure 4.40 a montré la forte dépendance de l'inclinaison des plans de cisaillement par rapport au confinement de l'essai. Plus le confinement est élevé et moins les plans sont proches de la verticale. La figure 4.44 donne une représentation des mesures d'inclinaison effectuées, en distinguant les élancements un et deux. L'évolution de l'inclinaison est en première approche assez linéaire vis-à-vis de la contrainte moyenne au pic. Les échantillons d'élancement un ont des bandes de cisaillement plus proches de la verticale que les échantillons d'élancement deux, cependant les droites passant au mieux des deux nuages de points, calculées par une méthode de moindre carrés, sont parallèles pour les deux élancements. La pente de ces droites est d'environ $0,29^o/MPa$ de contrainte moyenne. Cette différence d'inclinaison pour les deux élancements ne tient pas uniquement au fait que les échantillons courts présentent une résistance au pic supérieure, car si on trace les deux nuages vis-à-vis

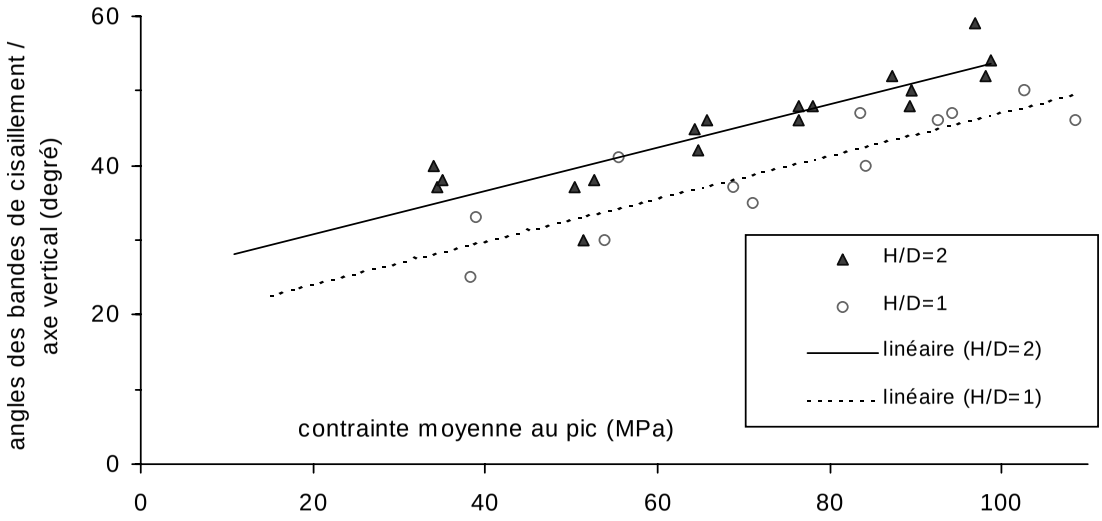


FIG. 4.44 – *Evolution de l'angle d'orientation des bandes de cisaillement par rapport à l'axe vertical de l'échantillon, vis-à-vis de la contrainte moyenne au pic, pour les deux élancements.*

uniquement du confinement, on constate également cette différence. Il y a donc un effet structural sur l'inclinaison des bandes de cisaillement.

Les mesures des angles de bande des essais uniaxiaux ne sont pas reportées, car le mode de rupture en colonnettes (*axial splitting*) est un mode particulier, avec ouverture de fissures, qui à notre avis doit être distingué d'un mode de rupture avec confinement. On constate aussi que pour les essais à 20 MPa de confinement, ce qui correspond à une contrainte moyenne au pic de l'ordre de 50 MPa , les points de mesure, en élancement deux, sont tous en dessous de la droite d'interpolation du nuage de point. Les bandes sont plus proches de la verticale à ce confinement qu'à 10 MPa.

4.6.4.3 Direction des déplacements

La méthode de mesure des déplacements de quatre points de la périphérie de l'échantillon a permis de faire une étude sur les seuils de perte d'homogénéité. Soit

à partir des déplacements du centre de l'échantillon, soit à partir de la comparaison des déformations latérales dans deux directions orthogonales.

D'autre part, à la fin de l'écrasement, des bandes de localisation de la déformation sont constatées sur l'échantillon. Il semble intéressant de mettre en évidence une éventuelle correspondance, ou pas, entre les déformations latérales et l'azimut des bandes, qu'on définira comme la direction de la projection de la normale au plan de cisaillement dans le plan horizontal.

L'azimut du déplacement du centre de l'échantillon a été mis en évidence. Ce déplacement du centre de l'échantillon correspond à une dissymétrie des déplacements radiaux de deux points diamétralement opposés sur la surface de l'échantillon. Dans le cas de la dilatance radiale, deux points opposés ont tendance tous les deux à se déplacer vers l'extérieur de l'échantillon, mais l'un plus que l'autre. Cette dissymétrie crée alors un déplacement du milieu du segment, qu'on appelle déplacement du centre de l'échantillon. A partir du déplacement du centre, normalisé par la variation de diamètre maximum au pic de contrainte axiale, la vitesse de déplacement dans deux directions normalisées a été calculée. Cette vitesse est définie comme le rapport de l'incrément du déplacement normalisé, sur l'incrément de déformation axiale correspondant. Cette vitesse, représentée dans un repère orthonormé, permet de connaître l'*accélération* du déplacement du centre de l'échantillon par l'évolution de l'éloignement du point tracé par rapport à l'origine. D'autre part, cette représentation permet de visualiser l'azimut de l'incrément de déplacement.

L'azimut des plans de cisaillement peut également être superposé sur ce graphique, à partir du moment où la position des capteurs radiaux sur l'échantillon a été repérée au moment du démontage de l'essai.

La figure 4.45 montre six exemples de ces graphiques, pour des confinements allant de 10 à 60 MPa, sur des échantillons d'élancement deux. Pour les essais Gvr9726 (10 MPa), Gvr9725 (20 MPa) et Gvr9724 (30 MPa), une seule bande bien nette a été observée et est symbolisée par le trait gris. Pour l'essai Gvr9723 (40 MPa), deux bandes croisées sont présentes, l'une est en gris et l'autre en noire. Pour l'essai Gvr9722 (50 MPa), plusieurs bandes sont visibles, mais l'une d'entre elles est plus développée que les autres, de par son épaisseur et sa couleur plus claire; les traces sur la membrane confirme la prédominance de cette bande. Le trait gris représente cette bande. Pour le dernier essai, Gvr9721 (60 MPa), une multitudes de bandes sont observées, mais difficilement distinguables les unes des autres à cause de leur concentration. Les traits gris représente de façon arbitraire ces bandes, l'une est tracée en noir pour son rôle particulier présupposé.

Pour l'essai à 10 MPa, le pic de contrainte correspond avec un point à l'intérieur du nuage de points initial. Cela signifie qu'au moment du pic, la vitesse de déplacement radial est relativement faible. Par la suite, il y a une accélération du déplacement. Dans un premier temps, le déplacement s'oriente vers le bas de la figure, puis par la suite s'oriente vers une direction presque opposée, vers le haut de la figure. L'orientation reste fixe jusqu'au palier de contrainte. Cette orientation est assez proche de la perpendiculaire à la trace de la bande de cisaillement.

Pour les essais à 20 et 30 MPa, la description est semblable. Après un nuage initial correspondant à une phase homogène de l'essai, il se précise une orientation privilégiée. Cette orientation est prise avant le pic de contrainte, et se poursuit jusqu'au palier de contrainte. Elle est perpendiculaire à la trace de la bande de cisaillement.

Pour l'essai à 40 MPa, le phénomène est le même, sauf qu'il existe deux bandes de cisaillement croisées. L'orientation du déplacement du centre de l'échantillon semble cependant indiquer qu'une des deux bandes, dessinée en noir, a joué un rôle prépondérant par rapport à l'autre.

A 50 MPa, il existe plusieurs bandes dont est seulement tracé l'une d'entre elles qui semblait avoir plus cisaillé que les autres (mais cela est estimé seulement à la fin de l'essai). L'orientation du déplacement prend une première direction privilégiée, qui n'est pas cohérente avec la trace de bande. A partir du pic de contrainte axiale, le déplacement prend une deuxième orientation privilégiée, verticale vers le bas du graphe, perpendiculaire à la trace de la bande. La première direction peut être supposée correspondre à une première bande de cisaillement, et que seulement par la suite, la bande principale s'est formée, ou du moins s'est mise à cisailler plus que l'autre.

A 60 MPa, les bandes sont tracées arbitrairement, car très nombreuses. Cependant, le déplacement du centre prend une direction privilégiée, d'abord dans un sens puis dans l'autre, ce qui laisse supposer qu'une bande a plus fonctionné que les autres.

D'une manière générale, le centre de l'échantillon, après avoir peu bougé, entame un déplacement suivant une direction privilégiée. Le début de ce déplacement significatif correspond sensiblement au seuil de perte d'homogénéité observés précédemment. Le pic de contrainte intervient après que ce déplacement ait commencé. Cette direction privilégiée semble perpendiculaire aux bandes de cisaillement existantes à la fin de l'essai. Il y a donc un point précédant le pic de contrainte avant lequel les déformations restent relativement axisymétriques, pour ensuite dégager une direction radiale prépondérante par rapport aux autres, et perpendiculaire aux projections des bandes de cisaillement dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'échantillon.

4.6.5 Comportement après localisation

Lorsque les bandes de cisaillement se sont entièrement développées, l'échantillon est supposé fonctionner par blocs. Chaque bloc rigide glissant par rapport aux autres suivant les plans de cisaillement. On peut vérifier si ce mécanisme est bien le mécanisme prépondérant de déformation lorsque l'échantillon est ruiné.

Pour cela on compare les mesures effectuées par les capteurs axiaux et les capteurs radiaux. On peut montrer que dans l'hypothèse d'un échantillon en deux blocs séparés par un plan incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale, et si l'on appelle Δ_r la moyenne des deux mesures latérales de variation de diamètre, le rapport des déplacements s'écrit : $\frac{\Delta_h}{\Delta_r} = -\tan(\alpha)$, dans le cas où l'une des deux mesures latérales de

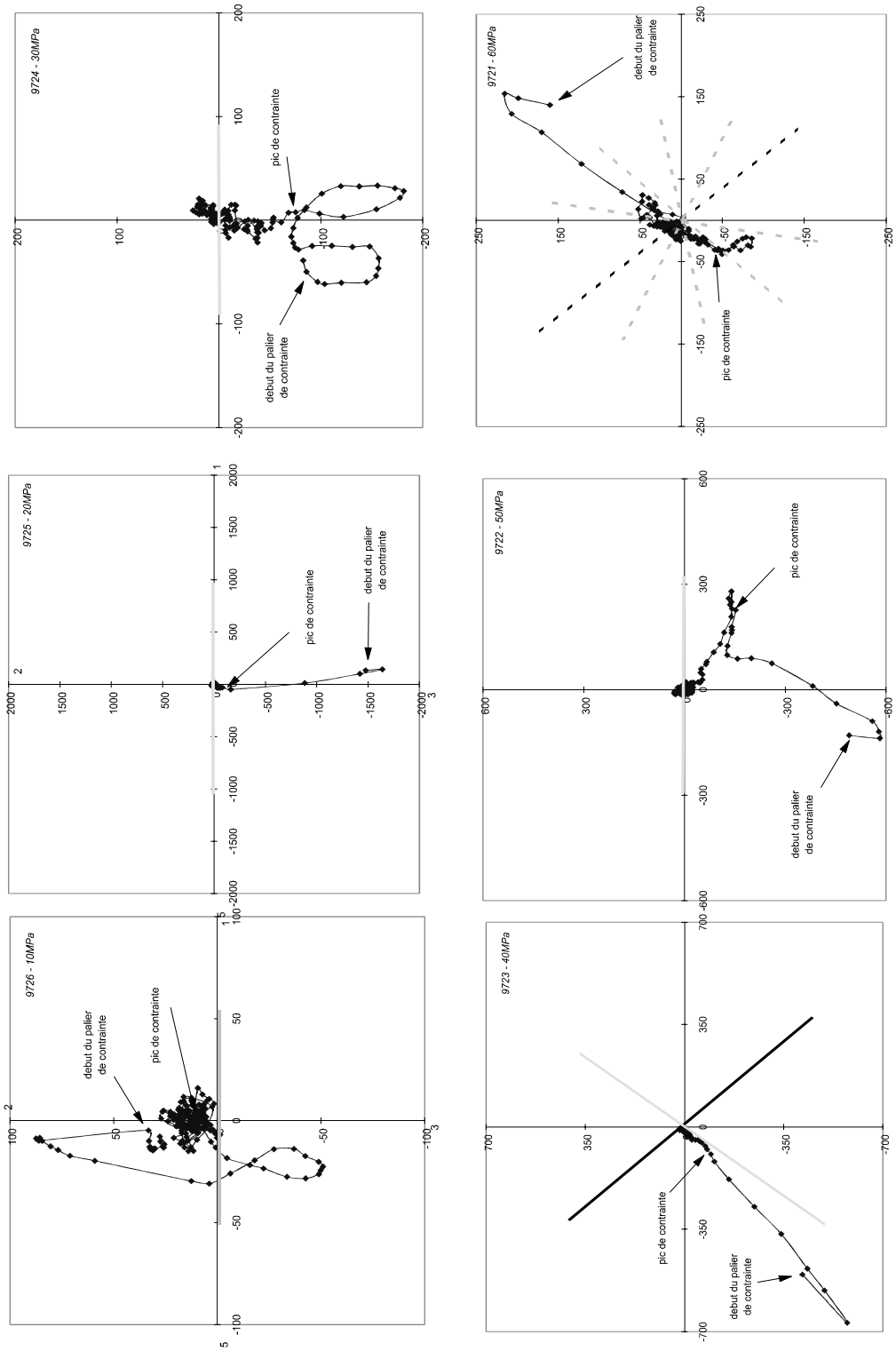


FIG. 4.45 – *Vue de dessus des incréments de déplacement du centre de l'échantillon, confronté à l'azimut des bandes de cisaillement observées après écrasement.*

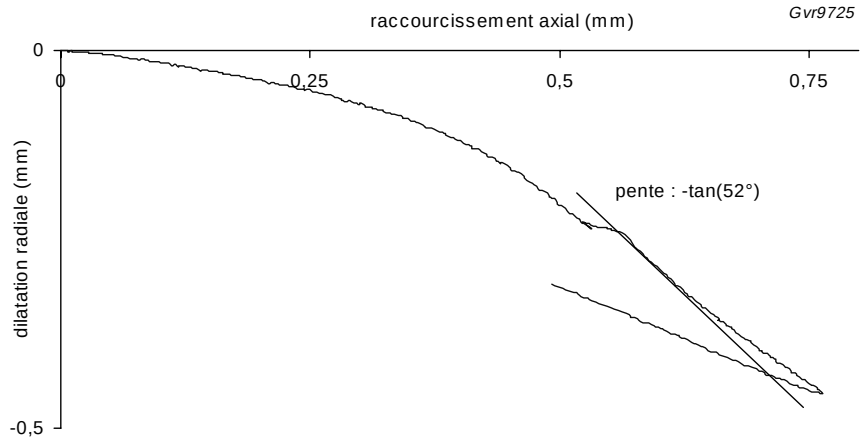


FIG. 4.46 – *Courbe de la variation de diamètre par rapport au raccourcissement axial.*

variation de diamètre est dans la direction horizontale perpendiculaire à la bande. Si ce n'est pas le cas, alors le rapport peut varier entre : $-\sqrt{2}.\tan(\alpha) \leq \frac{\Delta_h}{\Delta_r} \leq -\tan(\alpha)$.

Il existe un certain nombre d'essais correspondants au premier cas, où l'une des deux mesures radiales est perpendiculaire à la bande de cisaillement, dans le plan horizontal. Un exemple d'évolution de ce rapport $\frac{\Delta_h}{\Delta_r}$ est représenté sur la figure 4.46. On superpose une droite de pente $-\tan(\alpha)$, avec α mesuré sur l'échantillon. On constate qu'il existe une bonne cohérence entre la courbe dans la phase post pic et la droite ainsi déterminée. Au fur et à mesure de la progression dans le palier, la courbe s'écarte de la droite théorique. Cela peut s'expliquer par un éventuel basculement d'un bloc sur l'autre. Lorsque la contrainte axiale est relâchée, les déformations élastiques cette fois jouent dans le même sens, la longueur et le diamètre ont toutes deux tendance à augmenter, ce qui explique que la pente de la courbe lors du déchargement est plus faible que la pente sur le palier de contrainte. Le mécanisme de glissement de blocs rigides l'un sur l'autre est bien le mécanisme prépondérant de déformation de l'échantillon dans la phase du palier de contrainte axiale.

4.6.6 Conclusion sur les essais de compression

Comportement : Le comportement du grès, en terme de courbe de contrainte par rapport à la déformation axiale, peut se décomposer en quatre étapes comme les avait récapitulées Paterson [118](cf. chapitre 2). Les déformations lors du chargement déviatoire relèvent pour partie du domaine élastique, et pour l'autre partie du domaine plastique. En effet, les cycles effectués dès le début du chargement montrent une part d'irréversibilité de la déformation, et d'autre part révèlent un endommagement progressif du matériau puisque les modules sécants des cycles diminuent au fur et à mesure du niveau de chargement.

Les échantillons en élancement un montrent une plus forte résistance au pic que les échantillons en élancement deux. Le frottement latéral aux extrémités de l'échan-

tillon, malgré le dispositif de lubrification, crée un effet de sur-confinement dans une zone avoisinante. Cette zone a d'autant plus d'influence que l'échantillon est court, ce qui explique cette hausse de résistance. On observe que sur les échantillons les plus denses, la résistance au pic est plus élevée que sur les échantillons moins denses, et que d'autre part, la déformation axiale sur ces échantillons plus denses est également légèrement plus forte.

La courbe enveloppe de la résistance au pic, dans le diagramme (q,p) (Fig. 4.17, p. 88), présente une forte non linéarité. Entre les confinements de 0 et 10 MPa, l'angle de la droite tangente à la courbe enveloppe, dans le plan de Mohr, (c.a.d. l'angle de frottement) est de l'ordre de 42°, alors qu'à partir de 50 MPa, il est nul, voire même négatif. Ce phénomène laisse suggérer un fort endommagement diffus de la structure du grès du fait de la contrainte moyenne atteinte pour ces plus forts confinements.

Cette allure de courbe enveloppe ressemble à celle présentée par Wong *et al.* [161] et Menéndez *et al.* [104]. Le grès des Vosges étudié ([161]) provient d'une carrière d'Adamsviller assez proche de la carrière de Woustviller, et il a une courbe enveloppe similaire mais légèrement au dessus de notre grès. Le comportement d'un grès, selon leur classification, se décompose par une zone de rupture fragile et une zone de rupture ductile. La limite entre les deux domaines fragile - ductile est caractérisée, dans un plan déformation volumique - contrainte moyenne, par l'effet de la contrainte déviatrice. Cette dernière impose un comportement dilatant en comparaison de la courbe de chargement isotrope pour la rupture fragile, et un comportement contractant, pour la rupture ductile. D'autre part, la rupture fragile se manifeste par la formation d'une bande de cisaillement dilatante, et la rupture ductile par une déformation quasi homogène et compactante, par effondrement des pores et broyage de grains (déformation cataclastique).

La figure 4.47 représente le comportement du grès de Woustviller dans ce plan. On observe que pour les confinements inférieurs à 40 MPa, le comportement est dilatant, ce qui place bien celui-ci dans la zone de rupture fragile. La courbe est interrompue volontairement aux pics de contrainte, car notre calcul de déformation volumique n'est plus fiable une fois que la bande de cisaillement s'est propagée et que l'échantillon fonctionne par bloc. Contrairement à Wong [161], il existe un comportement dilatant à 40 MPa avec des bandes de cisaillement conjuguées. Au delà de 50 MPa, bien que la courbe de compression isotrope s'interrompe à 60 MPa, la déformation volumique en compression déviatoire est similaire à la déformation en compression isotrope, et ceux jusqu'aux pics de contrainte. A ces deux confinements, le comportement est donc intermédiaire entre la rupture fragile et ductile. On peut raisonnablement penser que le mode de déformation après rupture, pour ces forts confinements, sera intermédiaire entre les bandes de cisaillement dilatantes et la déformation diffuse et compactante. Cela est confirmer par les mesures par tomographie présentées au chapitre 4.9.

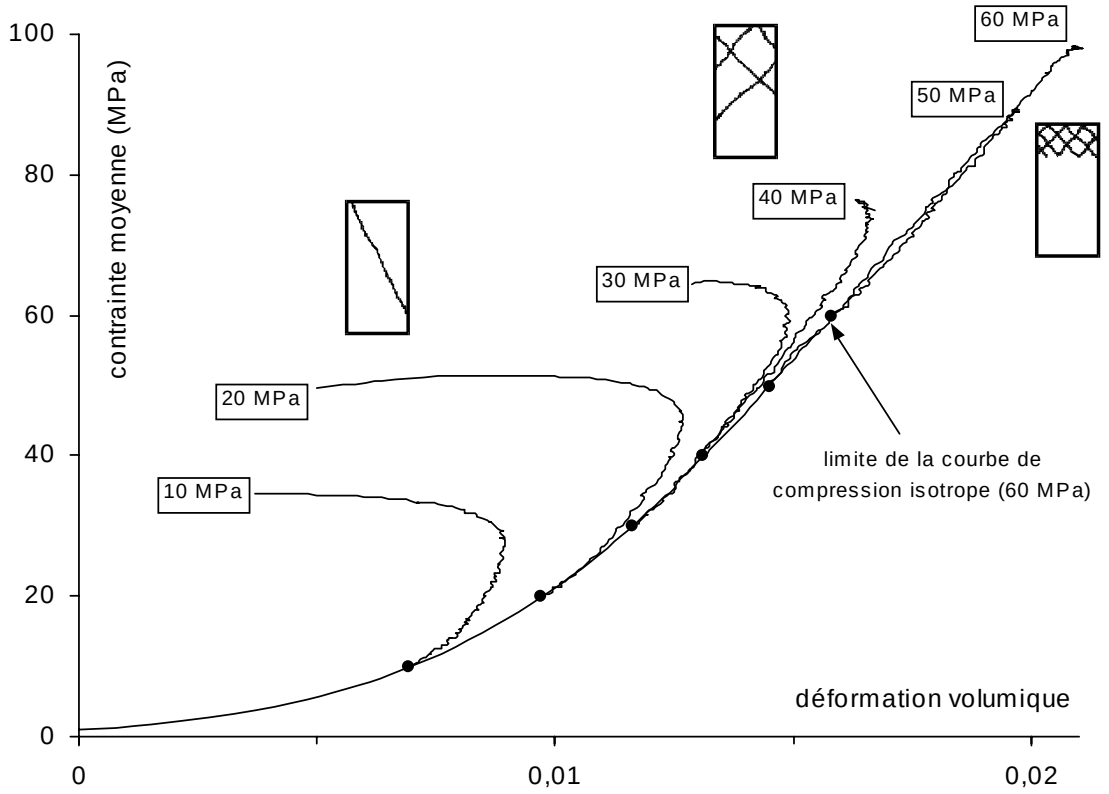


FIG. 4.47 – *Evolution du comportement du Grès dans le plan déformation volumique - contrainte moyenne.*

Détection de la localisation : La détection de la localisation est effectuée par deux types de mesures indépendantes. A partir des trois capteurs de déplacement axiaux, posées sur l'échantillon, on observe l'homogénéité du champ de déformation axiale, en comparant les trois mesures entre elles. A partir des quatre capteurs de déplacement radiaux, on mesure les déformations radiales dans deux directions orthogonales et aussi le déplacement du centre de l'échantillon, dans sa section médiane, suivant ces deux mêmes directions latérales. Ce déplacement du centre révèle une dissymétrie de la dilatance radiale par rapport à l'axe vertical de l'échantillon.

De par les mesures axiales, le comportement de l'échantillon se décompose en trois phases. Une première phase non homogène, correspondant à la mise en place de l'échantillon, due notamment au défaut de parallélisme inhérent des extrémités. Une deuxième phase homogène, pendant laquelle les trois vitesses de déformation axiale sont très voisines. Puis une dernière phase non homogène, où certaines mesures axiales deviennent beaucoup plus fortes que les autres. Le début de cette phase est interprété comme le seuil de localisation des déformations.

D'autre part, le centre de l'échantillon se déplace latéralement tout au long de l'essai. Au début de l'essai, les déplacements sont faibles, puis augmentent à l'approche du pic. Ce déplacement latéral ne peut être dû à un effet de flambement, d'une part parce qu'il existe aussi pour les échantillons d'élancement un, et d'autre part car cela impliquerait une cohérence avec les déformations axiales. Certaines devraient être plus faibles que d'autres en respect de la direction de flambement supposée. Cela pourrait être dû aussi à un défaut de perpendicularité entre les embases de l'échantillon et l'axe de déplacement du piston axial. Mais alors la direction de déplacement serait toujours identique par rapport à la cellule, ce qui n'est pas le cas. Pour la plupart des essais, les capteurs internes sont disposés de la même façon, il est donc facile de vérifier l'absence d'une direction privilégiée de déplacement par rapport à la cellule. Par contre le déplacement latéral devient plus grand à l'approche du pic et admet une direction privilégiée. Cette direction est dans la plupart des cas en accord avec la direction des bandes de cisaillement observées à la fin des essais.

Pour certains essais, mais de façon non systématique, les déformations axiales ne deviennent homogènes qu'assez tardivement. Pour les essais à faible confinement, ce point correspond approximativement à la fin de la phase de fermeture de fissure, pour les plus forts confinements, à la fin de la phase linéaire de la courbe de contrainte, soit dans les deux cas à environ la moitié de la résistance au pic. Correspond pour ces essais, un changement de la direction privilégiée de déplacement latéral du centre. De façon beaucoup plus systématique, le point de perte d'homogénéité axiale intervient avant le pic de contrainte. Ce moment est accompagné de près d'un changement de direction de déplacement très sensible du centre de l'échantillon, et/ou d'une perte de linéarité de la courbe des déformations latérales, l'une vis-à-vis de l'autre. Ces différents événements sont comparés dans la figure 4.48 pour les échantillons d'élancement deux et la figure 4.49 pour les échantillons d'élancement un. On peut

constater qu'il y a une bonne cohérence pour les deux événements. C'est un peu moins vrai pour les échantillons d'élancement un, mais rappelons que les mesures axiales sont perturbées à l'approche du pic, ce qui rend l'analyse et la détection plus difficile et moins certaine; cependant les deux événements arrivent dans l'ensemble plus tôt qu'aux élancements deux. D'autre part, lorsque le confinement augmente, le seuil de localisation devient de plus en plus précoce en terme de pourcentage de la résistance au pic. L'évolution est quasiment linéaire. L'équation de la droite moyenne est de $y\% = 97 - 0,067\ x$, avec x la contrainte de confinement en MPa et $y\%$ le rapport en pour-cent du déviateur de contrainte sur le déviateur au pic, dans le cas des élancements de deux, et $y\% = 97 - 0,175\ x$, pour les échantillons d'élancement un.

D'une manière générale, les événements observés avec les capteurs axiaux, sont de bons indicateurs de la localisation. Ils sont assez systématiques pour les différents essais. Ils sont souvent accompagnés d'un événement sur la direction latérale de déplacement du centre, mais ce critère est moins fiable en général. Par contre celui-ci permet de prévoir l'azimut des bandes de localisation qu'on observe après la fin de l'essai. Quand aux événements relatifs aux déformations latérales, ils ne sont pas toujours observés. Pour les essais où ils existent, ils sont assez cohérents avec les autres. Ce manque de fiabilité peut être dû à notre avis à une résolution des mesures radiales qui n'est pas assez bonne, et qui pollue les calculs d'écart types présentés. Il conviendrait de revenir à des mesures radiales avec jauges de déformation pour vérifier cette fiabilité du critère. D'autre part, il serait intéressant de confronter les différents comportements (homogènes et inhomogènes, direction privilégiée de déplacement) à des mesures d'événements micro-structuraux à l'aide d'une mesure d'émission acoustique. D'autant que les techniques récentes, bien que lourdes techniquement, permettent de situer à l'intérieur du matériau les lieux d'émission. Cela permet de bien mettre en évidence la formation de bande de concentration d'émission.

Globalement, on retiendra que la perte d'homogénéité est détectée avant le pic de contrainte, mais assez peu avant en terme de contrainte; le pic lui même peut être considéré comme systématiquement postérieur à la perte d'homogénéité, et ainsi indicateur par excès de cette dernière.

Les zones de cisaillement évoluent fortement avec le confinement. Les plans observés après essais présentent une épaisseur non nulle, de quelques grains, dans lesquels les déformations ont été intenses. Cette observation, en plus des résultats de perte d'homogénéité, montre l'intérêt d'interpréter la rupture dans le grès en terme d'analyse de bifurcation.

L'angle des plans ainsi formés par rapport à la direction de contrainte principale majeure augmente de façon quasi linéaire avec le confinement. L'épaisseur des bandes et leur nombre augmentent également avec le niveau de confinement. Les angles mesurés sur les échantillons d'élancement un sont globalement plus faibles que ceux

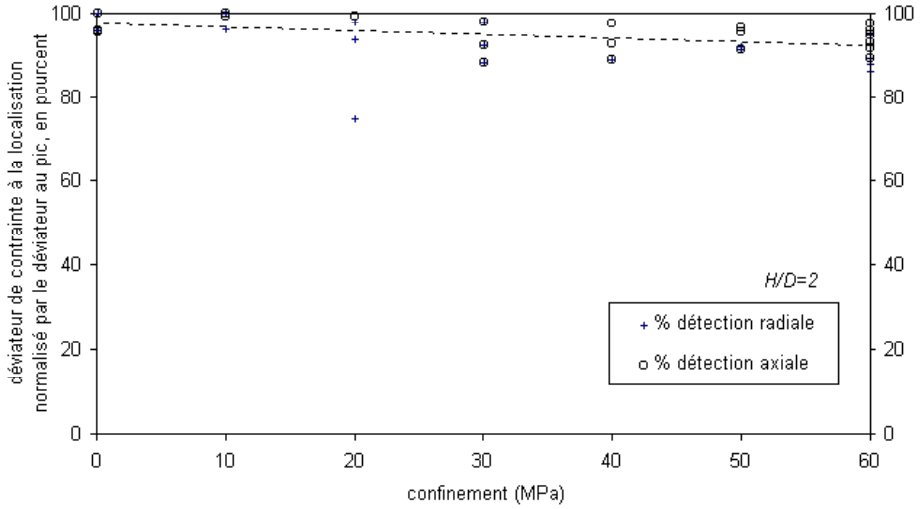


FIG. 4.48 – *Evénements axiaux et radiaux interprétés comme seuils de localisation de la déformation, pour les essais de compression en élancement 2.*

mesurés en élancement deux. L'angle est donc influencé par un effet de structure, qui peut éventuellement s'expliquer par une moins bonne homogénéité des échantillons courts.

Une comparaison des bandes de cisaillement avec les zones de rupture observées en extension est menée dans la conclusion sur les essais d'extension page 143.

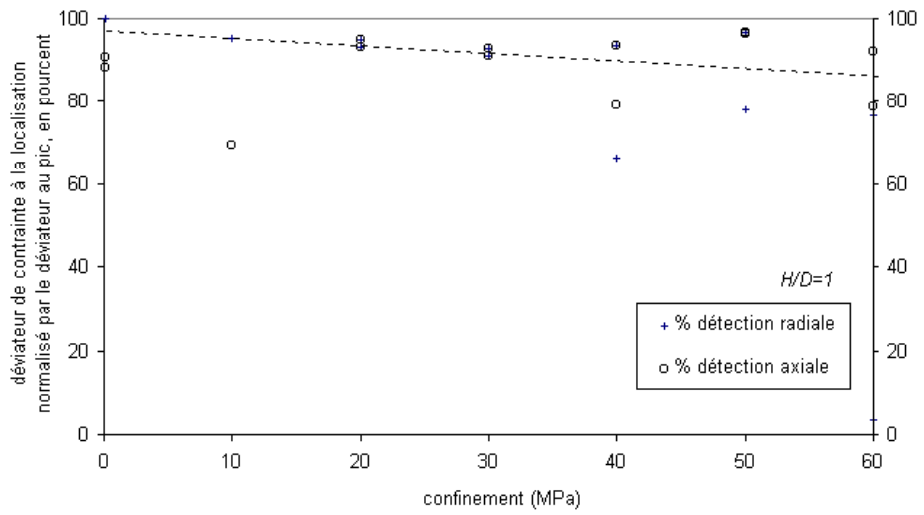


FIG. 4.49 – *Evénements axiaux et radiaux interprétés comme seuils de localisation de la déformation, pour les essais de compression en élancement 1.*

4.7 Essais d'extension axisymétrique

4.7.1 Principe de l'essai

L'essai d'extension est similaire à l'essai de compression. A partir d'un état de contrainte isotrope, la contrainte latérale est maintenue constante, et la contrainte axiale est diminuée. L'échantillon s'allonge dans la direction axiale, les déformations axiales sont négatives. Le déviateur est défini dans cette partie par la relation : $q = \sigma_{lateral} - \sigma_{axial}$, il est positif pendant la phase d'extension.

D'un point de vue technique quant à la configuration de la cellule pour ces essais, il convient d'annuler le système d'autocompensation pour pouvoir avoir une contrainte axiale plus faible que la pression de cellule. Une embase supérieure de l'échantillon a été conçue pour éviter l'entrée de l'huile de la cellule dans la chambre d'autocompensation du piston.

4.7.2 Forme des échantillons

Les premiers essais ont été tentés dans les conditions décrites ci-dessus. Pourtant il n'y a pas eu de rupture d'échantillon avant que la contrainte axiale ne deviennent nulle et que l'échantillon ne se décolle de ses embases (entraînant une rupture de la membrane). Le déviateur maximum possible avec cette configuration ne permet pas une rupture des échantillons du grès des Vosges, pour les confinements inférieurs à 60 MPa. Si l'on suppose dans une première approche que la surface limite en extension est similaire à la surface limite en compression, on vérifie bien qu'il est nécessaire d'avoir une contrainte axiale de traction pour mener l'échantillon à la rupture, ce qui n'est pas possible dans la configuration précédente.

Des essais avec les extrémités d'échantillon collées sur les embases n'ont pas été satisfaisants, car une rupture se produisait du fait du frettage ainsi obtenu, parallèlement au front de colle qui avait pénétré dans la matrice poreuse. La rupture obtenue était dépendante des conditions d'essais, et n'était plus représentative du comportement du grès.

Une forme particulière d'échantillon, en allure de bobine, a été adoptée, pour permettre d'atteindre des contraintes de traction dans la partie la plus étroite de l'échantillon, et avoir ainsi un plus grand déviateur possible (Fig. 4.50). Grâce à cette forme, la pression du fluide de confinement participe, au niveau des épaulements, au bilan des efforts axiaux dans la partie centrale de l'échantillon. La figure 4.51 donne le profil de ces échantillons, avec le dispositif de pose des capteurs axiaux. Le calcul de la contrainte dans la partie centrale de l'échantillon est donnée par la relation : $\sigma_a = [pression\ p_1 \times S_1 - pression\ p_c \times (S_2 + S_3)]/S_4$. Les surfaces S_1, S_2, S_3 et S_4 sont définies sur la figure 4.52. La déformation axiale est supposée homogène dans la partie centrale de l'échantillon. Par contre, il existera des concentrations de contrainte, notamment au niveau des congés de raccordement entre les deux diamètres. Une simulation numérique serait souhaitable pour évaluer ces concentrations, et à l'occasion adapter le diamètre des congés pour diminuer celles-ci, si elles apparaissaient trop importantes. En l'absence, on peut se référer à une simulation sur un échantillon pour essai biaxial, de profil similaire, présenté dans Tillard [144]. La concentration représentait une majoration de l'ordre de 10 % par rapport à la contrainte dans la partie centrale. Les bandes de cisaillement vont donc se développer à partir de ces points de concentration.

La forme de l'échantillon est obtenue par tournage, à l'aide d'un outil de forme, de diamètre 16 mm, en carbure (type H13), à une vitesse de rotation très faible. L'état de surface de l'échantillon est propre, similaire à celui obtenu par carottage à l'outil diamant, sans endommagement de surface apparent.

La contrainte axiale dans la partie centrale de l'échantillon est calculée à partir de la pression injectée en tête du piston de la cellule, en tenant compte des rapports de surface du piston, et du diamètre de l'échantillon mesuré avant essai, ainsi que de la pression du fluide de confinement.

Le principe d'utiliser une forme de bobine pour des essais d'extension sur roche a déjà été retenue par Millar et Murray [105], mais en utilisant un profil avec une partie centrale sans diamètre constant. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'effectuer une mesure de déformation axiale du fait de l'absence d'un champ homogène.

4.7.3 Résultats

4.7.3.1 Réponse globale

Les essais ont été effectués pour des confinements allant de 10 à 60 MPa, sur

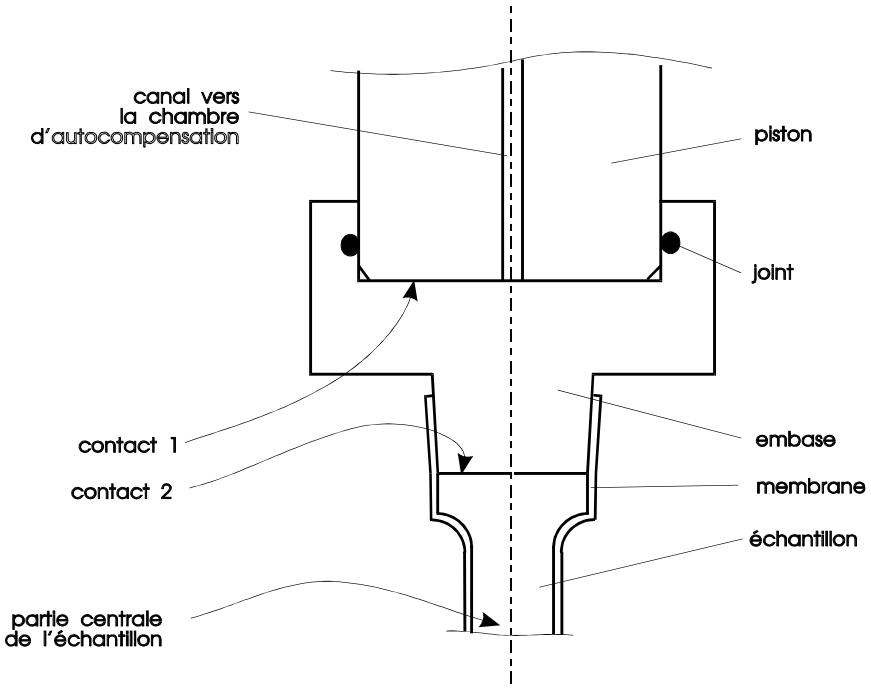


FIG. 4.50 – *Disposition à l'intérieur de la cellule pour les essais d'extension. L'embase obstrue le canal alimentant la chambre d'autocompensation. Par la forme de l'échantillon, on peut avoir une contrainte de traction dans la partie centrale de celui-ci, tout en ayant une force de compression sur les contacts 1 et 2.*

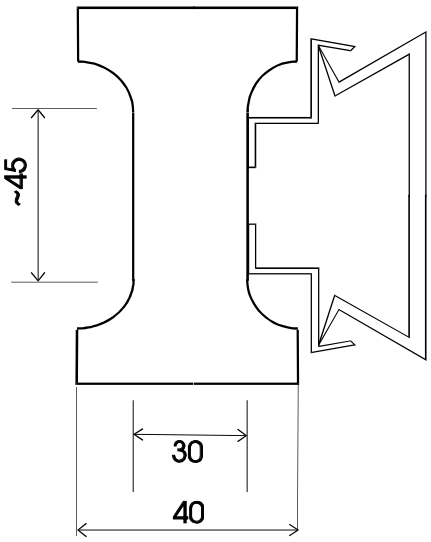


FIG. 4.51 – *Forme des échantillons d'extension et dispositif de pose des capteurs axiaux.*

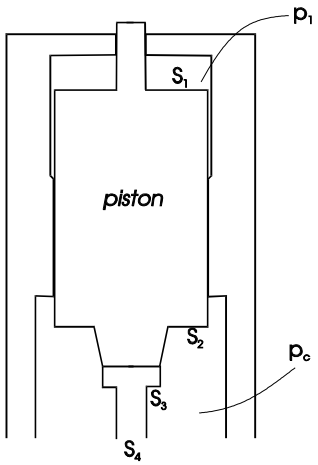


FIG. 4.52 – *Définition des surfaces et des pressions intervenant dans le calcul de la contrainte au milieu de l'échantillon.*

des échantillons étuvés. En dessous de 20 MPa, la rupture n'a pas pu être atteinte. Les courbes des résultats relatives aux différents essais sont classées en annexe D, des pages 347 à 353.

Les différents essais sont représentés par ailleurs sur la figure 4.53. Les modules initiaux de chargement sont peu dépendants du niveau de confinement. Ils sont proches de 14 GPa, sauf pour les essais à 20 MPa où ils avoisinent 10 GPa. Les courbes sont non linéaires dès le début de l'extension, et tendent vers un palier de contrainte, dont le niveau dépend du confinement. La rupture se manifeste sur ces paliers, de façon brutale. Il y a formation d'une discontinuité dans l'échantillon, et celui-ci se retrouve en deux morceaux lors du démontage. La rupture brutale est due au fait que la membrane qui entoure l'échantillon pénètre dans la discontinuité et se perce. L'huile de la cellule sous pression pénètre alors rapidement dans l'échantillon. Lorsque l'échantillon est démonté, seule la zone qui entoure la fissure est imprégnée d'huile.

La déformation à la rupture à tendance a augmenter avec le confinement, sauf pour l'essai à 20 MPa. En terme de contrainte axiale, la rupture a lieu systématiquement, quel que soit le confinement, pour une contrainte de traction comprise entre 5 et $10MPa$.

En début d'extension, la déformation volumique est très faible. Pour la plupart des essais, le matériau semble peu dilatant. Rapidement, elle devient plus dilatante et quasiment linéaire tout au long du reste de l'essai. Les différentes courbes, excepté celle à 20 MPa, sont superposées. Le comportement volumique ne dépend quasiment pas du niveau de confinement.

La courbe enveloppe à la rupture est représentée dans le plan (p, q) sur la figure 4.54. La courbe pour les essais entre 20 et 60 MPa de confinement est assez linéaire.

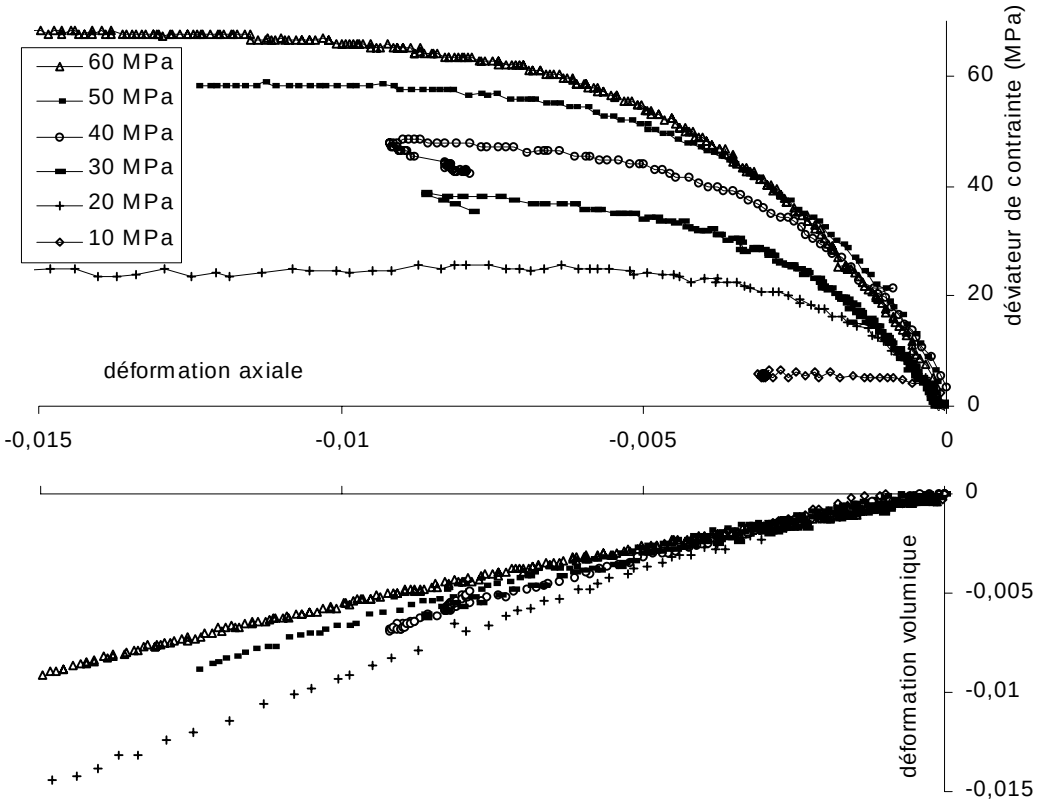


FIG. 4.53 – *Essais d'extension : courbe d'évolution de la contrainte axiale et de la déformation volumique par rapport à la déformation axiale.*

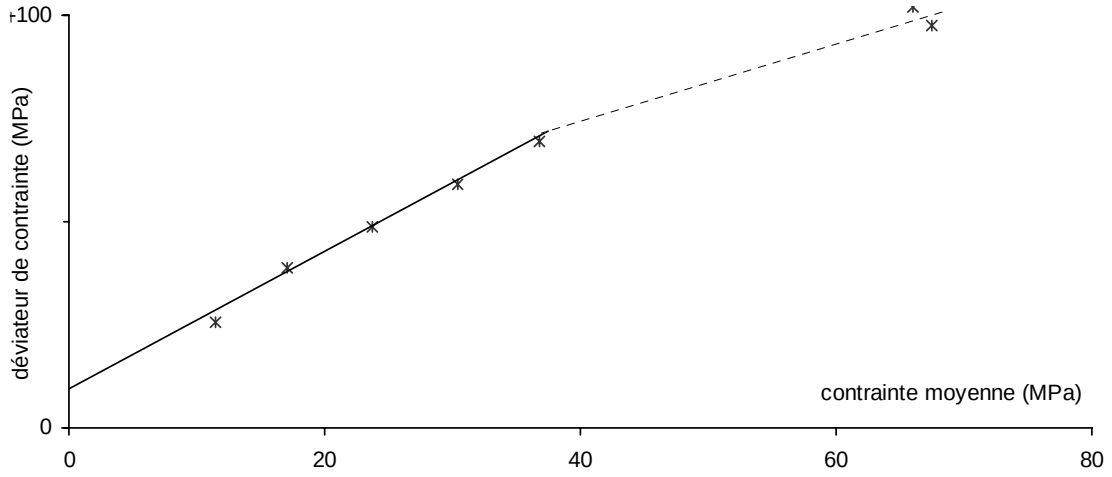


FIG. 4.54 – *Essais d'extension : courbe enveloppe des essais d'extension à la rupture, dans le plan (p, q).*

Cela ne correspond pas aux observations effectuées en compression (cf. fig. 4.17 p. 88). Cependant, la contrainte moyenne en compression était plus élevée, sauf pour les essais à moins de 10 MPa de confinement. Il était alors intéressant de pouvoir réaliser un essai d'extension pour un confinement supérieur à 60 MPa pour voir si ce comportement linéaire se poursuivait pour des contraintes moyennes plus élevées. Deux essais d'extension à 100 MPa de confinement ont été effectués par la société *Geodesign*. Les deux points apparaissent à droite du graphe. On peut constater que pour ce domaine de contrainte moyenne, il y a également une forte non linéarité de la courbe enveloppe.

4.7.3.2 Détection de la localisation

L'analyse de la détection de la localisation est basée sur le même principe que celle réalisée sur les essais de compression. On sépare les résultats obtenus avec les trois mesures de déformation axiale, et avec les quatre capteurs de déplacements radiaux.

L'écart de chaque mesure de déformation axiale par rapport à la moyenne de ces trois mesures est tracé en fonction de la déformation axiale moyenne. Lorsque

cette évolution est linéaire, et quasiment parallèle à l'axe des abscisses, le champ de déformation axial est considéré comme étant homogène dans la partie centrale de l'échantillon. Une perte de cette linéarité est interprétée comme un début de localisation des déformations.

A partir des capteurs radiaux, le déplacement du centre de l'échantillon, dans sa section médiane, est calculé pour les deux directions orthogonales de mesure. Pour ces essais, où le diamètre de l'échantillon est faible, et du fait du type de chemin de contrainte, les déplacements latéraux mesurés sur la périphérie de l'échantillon sont faibles, et la résolution des capteurs devient relativement moins performante. En conséquence, un calcul de la différence des déplacements du centre de l'échantillon dans les deux directions orthogonales n'est pas facilement interprétable. C'est pour cette raison que les deux déplacements du centre ont été directement observés et tracés. Une évolution linéaire de ces deux courbes indique une vitesse de déplacement constante. Quand ces courbes divergent, il y a accélération du déplacement. Ce point de divergence est considéré comme étant un événement susceptible de révéler le début de la localisation, puisque comme c'est le cas en compression, la localisation est accompagnée d'une accélération et d'un changement de la direction du déplacement du centre de l'échantillon.

Pour les différents essais, on peut constater que les deux événements, axiaux et radiaux, coïncident très bien (Fig. 4.55). Cette détection de la localisation intervient, en terme de déviateur de contrainte axiale, très près de la contrainte à la rupture (entre 96 et 100 %), c'est par contre un bon précurseur en terme de déformation axiale, puisqu'elle intervient avant la déformation à la rupture (entre 55 et 85 %).

Grâce à la société Géodesign, sur une cellule similaire mais de plus grande capacité, un essai d'extension à 100 MPa a été mené. La mesure du raccourcissement axial est externe à l'échantillon et ne peut donc pas être interprété en terme de déformation. Par contre quatre mesures de déplacement sont réalisées sur la périphérie de l'échantillon, avec des capteurs de type LVDT. Un calcul du déplacement peut être fait. La figure 4.56 donne cette évolution et montre un début de localisation proche de la contrainte de rupture, mais vers 75 % de la déformation à la rupture.

4.7.3.3 Bandes de cisaillement

Lorsque les échantillons sont démontés, ils se présentent en plusieurs blocs, séparés par une surface quasi plane, inclinée par rapport à l'axe de l'échantillon. Cette séparation est supposée être l'aboutissement d'une bande de cisaillement qui s'est transformée en une fissure macroscopique traversant entièrement l'échantillon. La plupart des bandes passent par un point du congé de raccordement entre les deux diamètres de l'échantillon, là où existe une concentration de contrainte. L'allure générale des zones cisaillées est représenté sur la figure 4.57 et sur les photographies de la figure 4.58. Si on prend comme référence une direction horizontale qui correspond

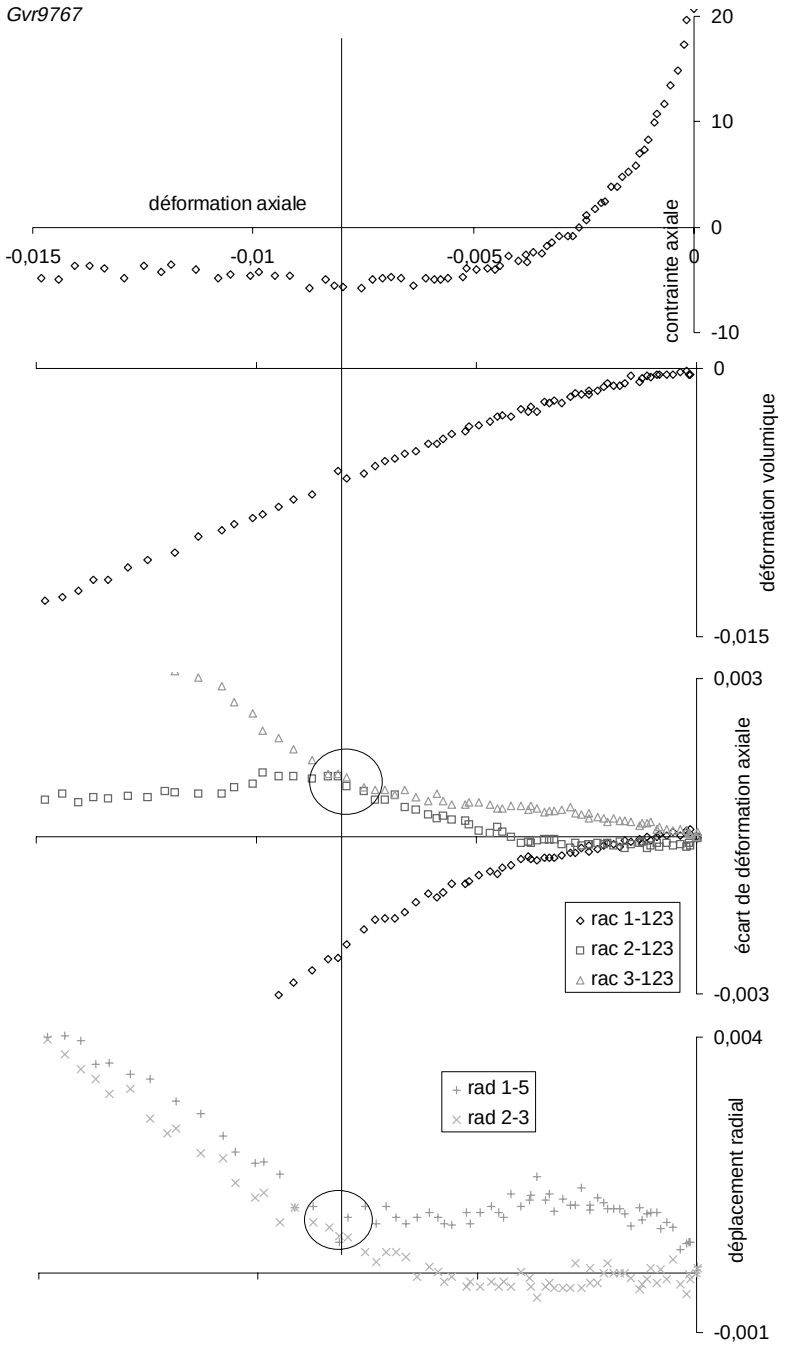


FIG. 4.55 – *Exemple d'essai d'extension : essai 9767, 20MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

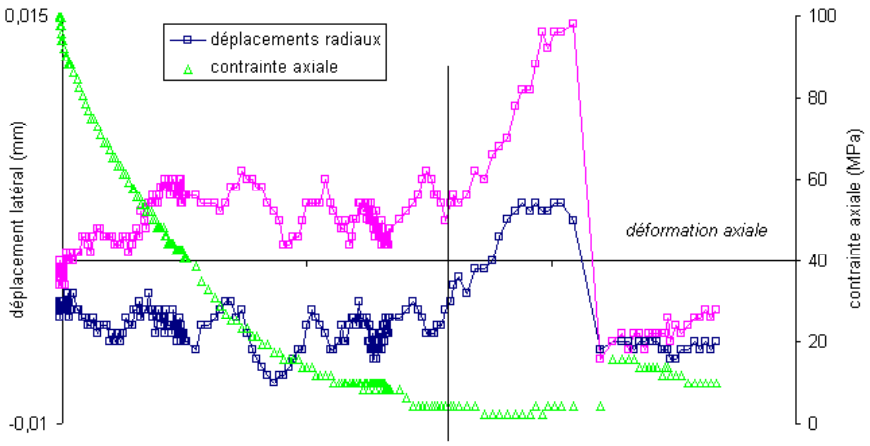


FIG. 4.56 – *Essais d'extension à 100 MPa de confinement: courbe d'évolution des déplacements latéraux du centre de l'échantillon et de la contrainte axiale.*

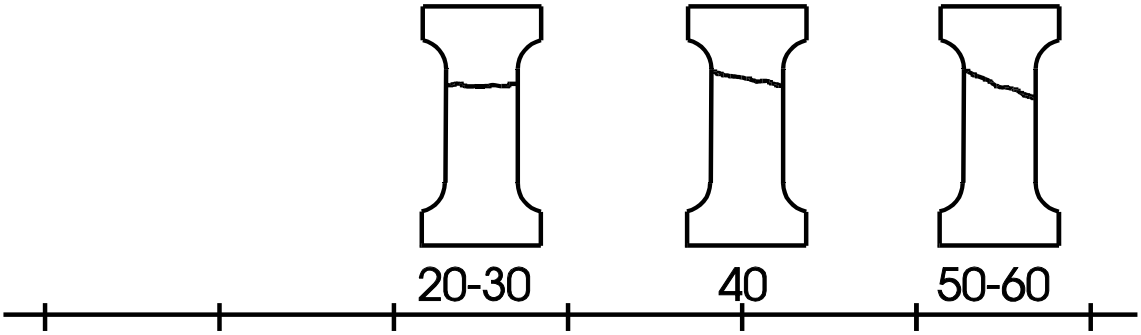


FIG. 4.57 – *Allure générale des bandes de cisaillement sur les échantillons en extension en fonction du confinement (MPa).*

à la direction de la contrainte principale majeure, on peut constater que la bande est de plus en plus inclinée lorsque que le confinement augmente. Pour les confinements de 20 à 30 MPa, la fracture est quasiment parallèle à la contrainte principale. Cette situation est d'ailleurs équivalente aux essais de compression uniaxiaux, où les fractures sont parallèles à l'axe vertical de l'échantillon, direction de la contrainte principale.

Une mesure d'inclinaison est effectuée directement sur les blocs des échantillons. La mesure sur les membranes n'étant pas possible ici. Cette évolution est reportée sur la figure 4.59

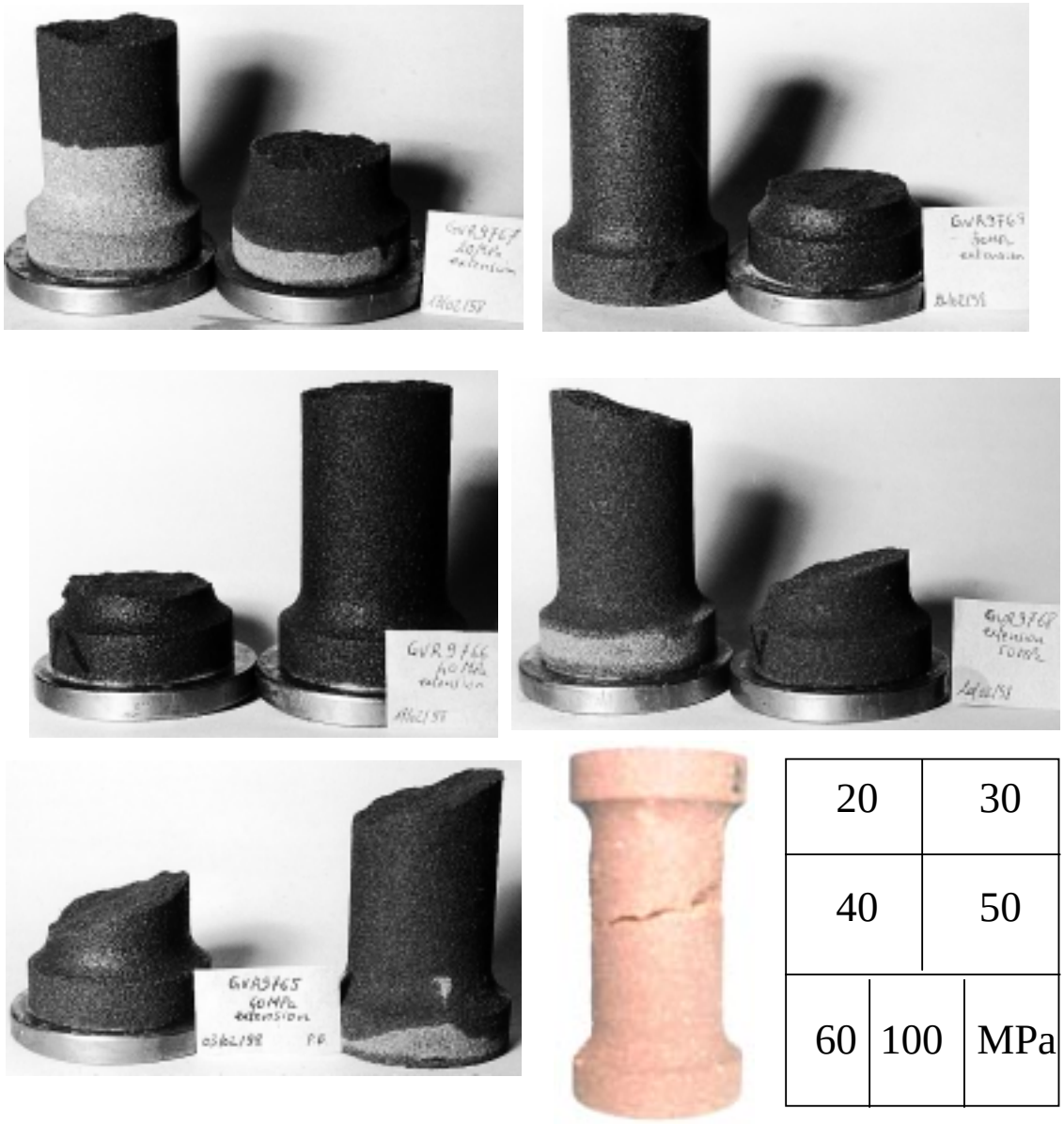


FIG. 4.58 – *Allure générale des échantillons d'extension après localisation. Les zones sombres contiennent de l'huile qui a pénétré lors de la rupture de la membrane, au niveau des discontinuités de l'échantillon.*

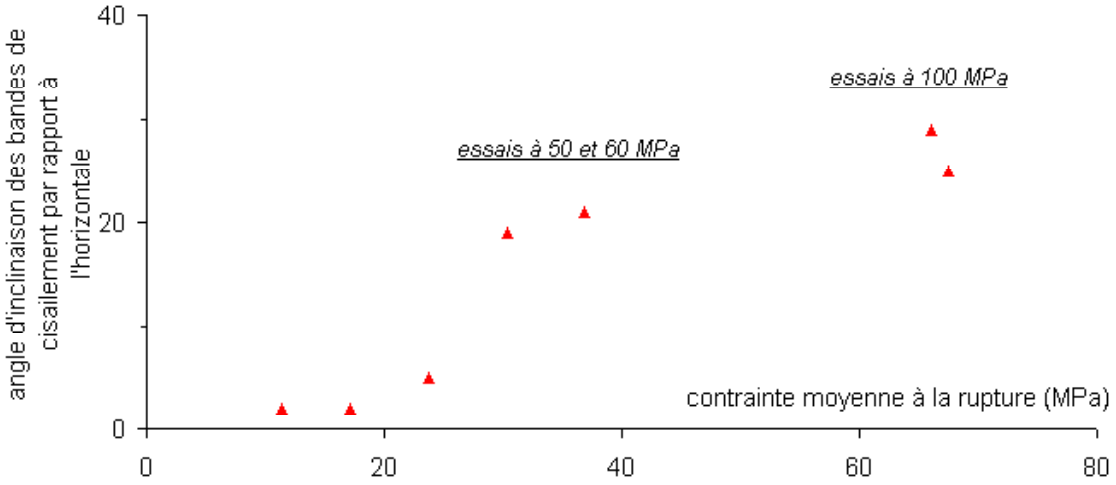


FIG. 4.59 – *Evolution de l'angle d'orientation des bandes de cisaillement par rapport à l'horizontale, vis-à- vis de la contrainte moyenne à la rupture, pour les essais d'extension.*

4.7.4 Conclusion sur les essais d'extension

Les essais d'extension sont originaux au sens où la rupture se produit pour des contraintes axiales de traction.

Les déviateurs mobilisés au pic sont comparés à ceux mobilisés sur les essais de compression. Rappelons que le déviateur de contrainte est défini comme la contrainte principale majeure moins la contrainte principale mineure. Pour cela, les différents points sont superposés sur le même plan (q, p) de la figure 4.60. Les déviateurs en extension sont légèrement en dessous de ceux en compression. Les angles de frottement en extension sont légèrement inférieurs aux angles mobilisés en compression. Toutefois, il faut tenir compte de la concentration de contrainte au niveau des congés (§4.7.2) sur les échantillons d'extension et qui impliquerait de majorer légèrement les déviateurs d'extension calculés ici.

Les résultats de détection montrent que le seuil de perte d'homogénéité est très proche du déviateur à la rupture (entre 96 et 100 %), et qu'il y a peu d'influence vis-à-vis du confinement. Les zones de cisaillement, pour les plus forts confinements sont inclinées par rapport à la contrainte principale horizontale. Ce mode de rupture est très similaire au mode de rupture en compression. D'ailleurs, les angles de bandes mesurés par rapport à la direction de contrainte principale majeure sont comparables entre eux (Fig. 4.61). La droite tracée sur cette figure en pointillée est une indication de l'évolution possible de l'angle vis-à-vis de la contrainte moyenne, en supposant que

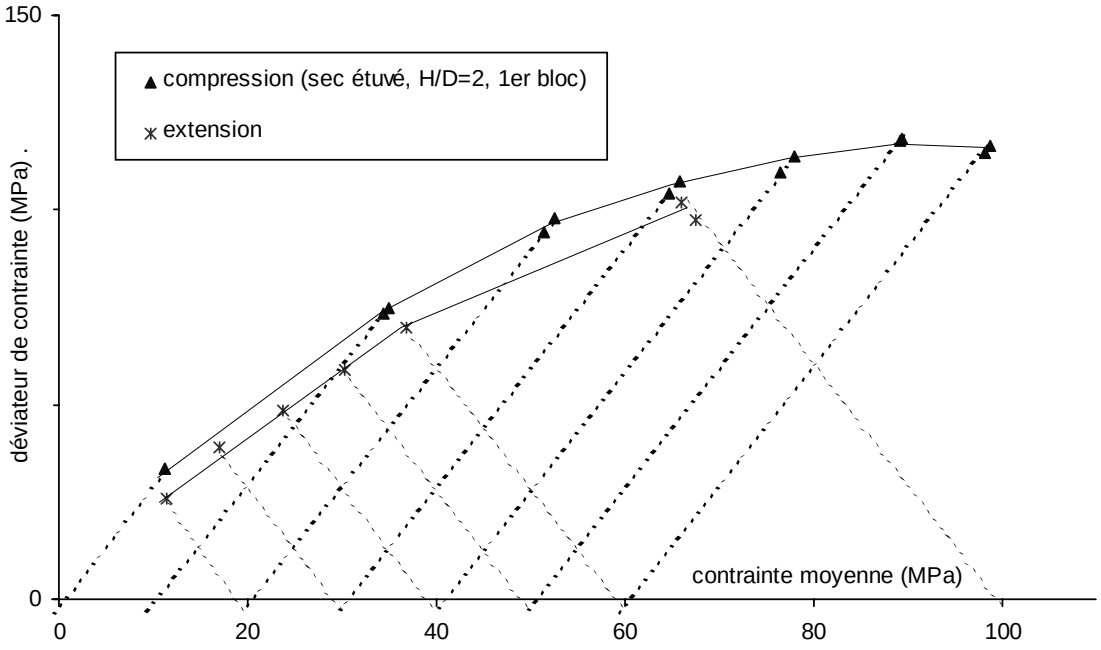


FIG. 4.60 – *Comparaison dans le plan (q, p) des déviateurs au pic pour les essais triaxiaux d'extension et de compression.*

celle-ci soit parallèle aux droites décrites en compression. Les angles en extension sont donc plus faibles que ceux mesurés en compression. Cependant, l'angle semble être influencé par les effets de structure, comme on l'a vu entre les essais de compression d'élancement un et deux, ce qui va dans le sens de l'hétérogénéité au niveau des concentrations de contrainte sur l'échantillon en extension.

Pour les plus faibles confinements, la surface de rupture est parallèle à la contrainte principale. Ces points viennent se superposer aux points (non tracés sur la figure) correspondants aux essais uniaxiaux de compression présentant une rupture en colonnettes, par ouverture de fissures. Cette zone est visiblement à distinguer des modes de rupture par cisaillement (Vardoulakis *et al.* [154]).

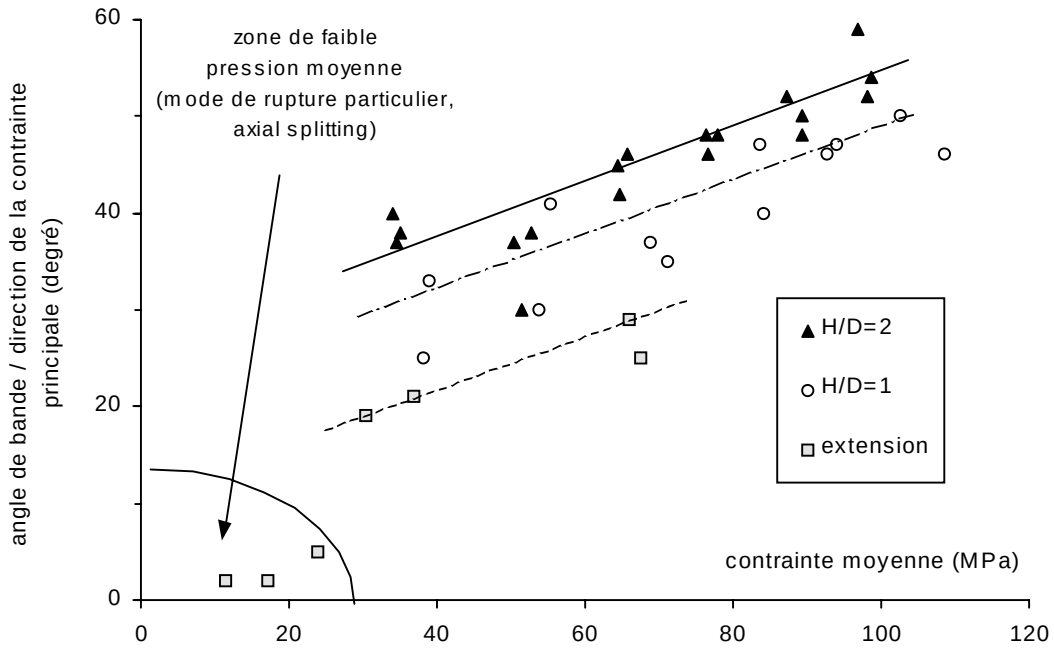


FIG. 4.61 – *Comparaison des angles de plan de cisaillement par rapport à la direction de contrainte moyenne pour les essais triaxiaux d'extension et de compression en élancement un et deux.*

4.8 Essais pseudo-isotropes

4.8.1 Intérêt de ce chemin

L'essai appelé pseudo-isotrope est un essai à déviateur non nul et constant. Le chemin de contrainte est parallèle à la trisectrice du repère des contraintes principales. Il est donc parallèle au chemin de contrainte d'un essai isotrope, ce qui lui vaut son nom. La contrainte axiale est plus grande que la contrainte latérale.

Cet essai n'est pas un essai classique en géomécanique. Il est nécessaire pour la calibration du modèle théorique, présenté dans la seconde partie de ce mémoire. De plus, il correspond au chemin de contrainte en condition non drainée lorsque un matériau approche de sa surface limite. L'évolution se fait à déviateur de contrainte quasi constante (cf. fig. 4.62).

4.8.2 Résultats

Le résultat qui nous intéresse ici est de connaître l'influence de l'anisotropie induite par le déviateur de contrainte, sur le grès. Si l'on suppose que le matériau est parfaitement isotrope initialement, lorsque qu'on réalise un essai pseudo-isotrope avec un déviateur nul (qui est en l'occurrence un essai isotrope), les déformations latérales doivent être égales à la déformation axiale. On peut perdre cette égalité

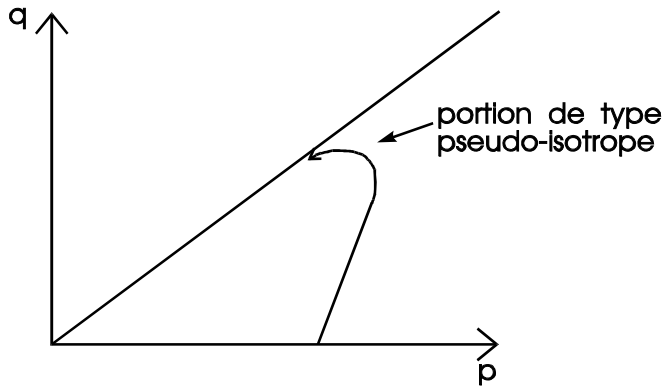


FIG. 4.62 – *Exemple d'évolution d'un chemin de contrainte à l'approche de la surface limite.*

lorsque le déviateur n'est plus nul.

Pour cela, on réalise un essai triaxial de compression, interrompu à plusieurs reprises à des déviateurs différents. Pour chaque interruption, un chargement et un déchargement isotrope de faibles amplitudes sont pratiqués en augmentant la pression de cellule (qui augmente en même temps la contrainte axiale du fait de l'auto-compensation du piston axial). Les déformations axiales et radiales sont mesurées et comparées. Un rapport de un indiquerait une isotropie du matériau.

Les capteurs de mesure internes sont sensibles à des variations substantielles de la pression de confinement (cf. p. 63), mais des petits incréments sont pratiqués ici et on suppose leur influence négligeable sur les capteurs internes.

La pression de confinement moyenne est fixée à 30 MPa pour les deux essais réalisés. Les deux échantillons proviennent du second bloc de grès. La figure 4.63 donne un exemple de l'évolution de la déformation radiale en fonction de la déformation axiale, lorsque l'on augmente le confinement en gardant le déviateur constant. La pente moyenne du nuage de points est déterminée pour les différents niveaux de déviateur. Pour le second essai (Gvr9758), les deux déformations radiales ont été différenciées dans deux directions orthogonales, car le matériau n'est pas tout à fait orthotrope de révolution. L'une des deux est systématiquement plus faible que l'autre.

L'évolution des pentes de la déformation radiale en fonction de la déformation axiale est représentée sur la figure 4.64, pour les deux essais. L'essai Gvr9757 admet des pentes en moyenne plus fortes que l'essai Gvr9758. C'est à dire que l'anisotropie est plus forte pour ce premier essai. La droite de moindre carré du nuage de points est tracée, elle admet une pente positive, de l'ordre de 0,7. On a imposé à cette droite de passer par un, en faisant l'approximation que le matériau initial est proche d'un matériau isotrope. On mesure donc l'augmentation de l'influence de l'anisotropie induite par le déviateur par la pente positive de cette droite.

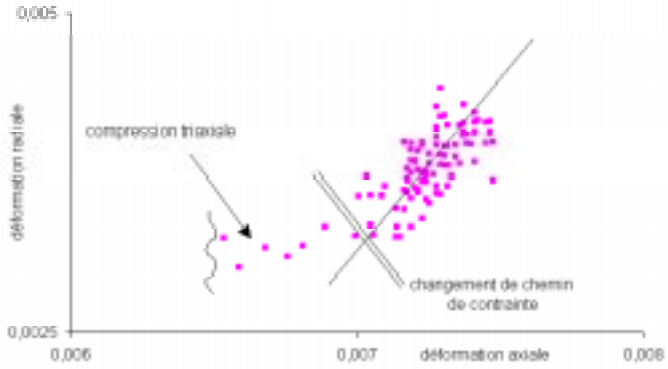


FIG. 4.63 – *Exemple d'évolution de la déformation radiale par rapport à la déformation axiale sur un essai pseudo-isotrope.*

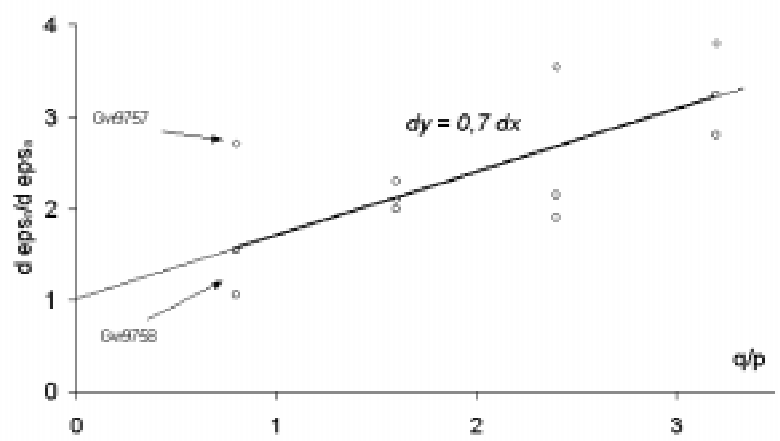


FIG. 4.64 – *Evolution du rapport de déformation radiale sur la déformation axiale en fonction de rapport q/p pour les deux essais pseudo-isotrope.*

4.9 Analyse tomographique

4.9.1 Principe du scanner

La radiographie classique repose sur la mesure de la transmission d'un faisceau de rayon X à travers un corps. Le faisceau est envoyé sur le corps avec une certaine incidence et la partie du rayonnement transmise à travers celui-ci est mesurée par une plaque photographique, ou encore une série de détecteurs. Le taux de transmission du signal dépend principalement des propriétés physiques du matériau et de son épaisseur, vue sous l'incidence du faisceau. Un détecteur permet de mesurer de façon globale les différentes atténuations qu'a subi le faisceau en traversant le corps étudié, on obtient donc une mesure moyenne dont on ne peut distinguer les différentes sources d'absorption internes à l'objet étudié.

Le tomographe, connu pour son application médicale sous le nom de scanner à rayons X, combine la radiographie classique et l'analyse numérique. Cette technique non destructive permet d'établir une carte interne au corps, chaque point à l'intérieur étant caractérisé par son aptitude à transmettre un rayonnement X.

L'analyse numérique servant à l'établissement de cette carte, utilise plusieurs profils d'atténuation, obtenus sous plusieurs incidences. Chaque profil correspond lui même à la mesure par les détecteurs du rayonnement transmis à travers le corps lors du balayage orthoradial de la source de rayons X. La figure 4.65 présente une tranche du corps, traversée par le faisceau de rayons X qui est collecté après traversée par une série de détecteurs. La source de rayonnement admet un mouvement de translation pour le balayage orthoradial, et un mouvement de rotation pour changer l'incidence du rayonnement.

La reconstruction numérique en deux dimensions de la tranche traitée reste une représentation moyenne de la tranche par rapport à son épaisseur puisque chaque pixel représenté sur la carte est la mesure moyenne des propriétés d'absorption d'un volume appelé voxel, qui a même épaisseur que la tranche.

Si l'on décompose de façon fictive l'échantillon en une série de tranches successives, traitées une par une par le scanner, il est alors possible de reconstituer entièrement l'échantillon par rapport à ses propriétés d'absorption. Toutes les coupes possibles de l'échantillon, dans une direction quelconque, peuvent être reconstruites.

Le scanner ND 8000, installé au laboratoire d'Acoustique et de Mécanique de Marseille, défini initialement pour un usage strictement médical, a une résolution volumique de $0,35$ x $0,35$ x e mm^3, e étant l'épaisseur de la tranche pouvant varier entre 6, 3 et 2 mm. Une épaisseur de 2 mm a été utilisée pour l'étude présente, afin d'augmenter la résolution spatiale de la mesure.

Les propriétés d'absorption aux rayons X dans un voxel du corps dépendent de la densité d'électron. Cette densité est définie par la composition chimique et la densité apparente à l'intérieur de ce voxel. On a :

$$I/Io = \exp(-\mu\gamma h)$$

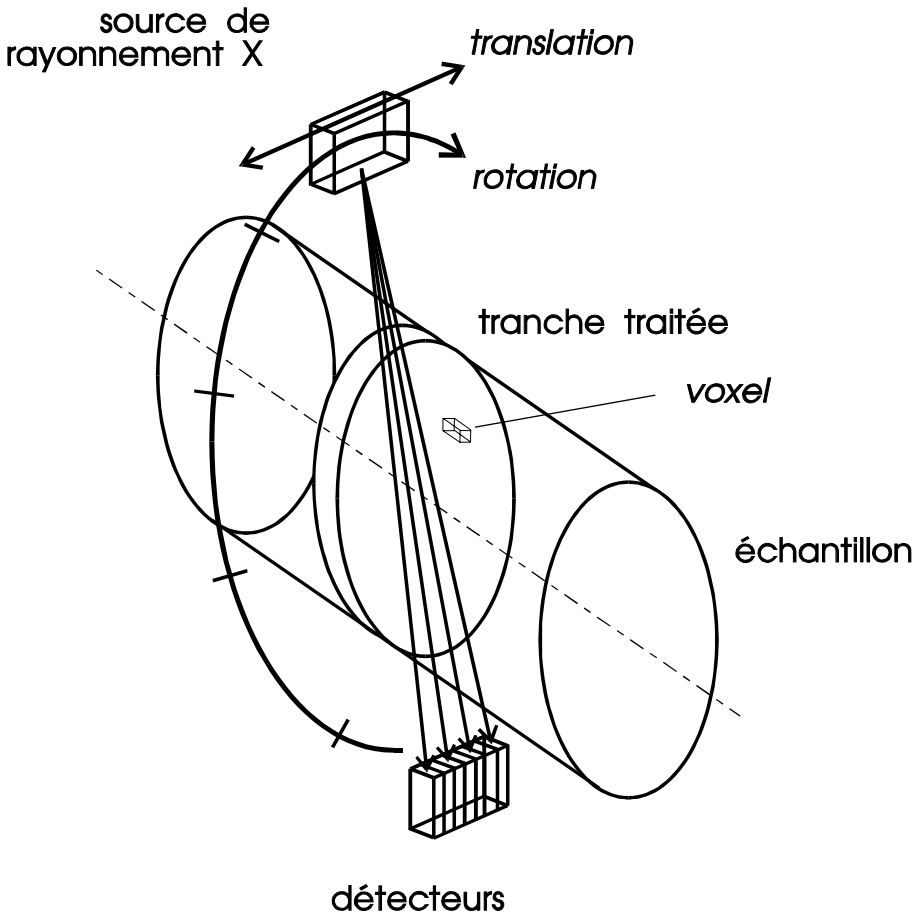


FIG. 4.65 – *Principe de fonctionnement du scanner à rayons X.*

avec I et Io l'intensité du rayon sortant et rentrant, μ le coefficient d'absorption massique, γ la masse volumique apparente et h l'épaisseur du voxel. Si l'on considère que le matériau est homogène en terme de composition chimique à l'échelle du voxel, alors le coefficient μ est une constante propre à l'échantillon. Seule la densité apparente peut varier. La carte obtenue par reconstruction est alors représentative de la porosité à l'intérieur de l'échantillon. Un étalonnage est nécessaire pour corréler la densité radiologique mesurée par tomographie et la porosité du matériau étudié. Des informations plus détaillées sont fournies dans Latière et Mazerolle [96], et plus généralement sur la tomographie dans Bossi *et al.* [24], Blumenfeld *et al.* [20].

4.9.2 Etudes existantes

Les applications de la tomographie dans l'étude des géomatériaux sont très étendues, tant en mécanique des roches qu'en géophysique. Pour les géophysiciens, elle permet de mesurer la porosité, de détecter et évaluer l'épaisseur des fractures, de déterminer la minéralogie d'une roche, d'observer les mouvements de fluide par suivi d'un front de liquide. Une extension concernant les sols non saturés, triphasiques, permet de mesurer d'une part la variation d'indice des vides d'un matériau et d'autre part l'évolution de la teneur en eau. Pour cela, Conciani *et al.* [42] utilisent deux niveaux d'énergie de rayonnement pour lesquels les propriétés d'absorption des trois phases changent différemment. Cela permet de déterminer le rôle de chaque composant et de quantifier ceux-ci.

En géomécanique, la qualité d'un essai sur sable, au niveau de la lubrification des extrémités de l'échantillon, a pu être établie. Colliat-Dangus [41] montre la supériorité des essais d'élancement 1 bien lubrifiés, en terme d'homogénéité d'essai, par comparaison à des essais classiques d'élancement 2 frettés.

Mokni [107] a montré l'existence d'un indice des vides critique dans la bande de cisaillement pour les sables. A partir d'échantillons de sable d'Hostun, préparés à des densités initiales différentes, et écrasés à un même confinement, les mesures de densité dans la bande convergent toutes vers une même valeur dans la phase post-pic. Des mesures à un confinement supérieur mènent au même résultat, mais avec un indice des vides plus faible (Bésuelle *et al.* [12], Bésuelle [13]). L'organisation complexe des bandes a pu être établie. Desrues *et al.* [56] montrent que lorsque de multiples bandes coexistent dans un même échantillon, celles-ci sont organisées selon des V tout autour de l'échantillon, dans une direction radiale, avec au centre un cône de frettage.

Tillard [144] a constaté l'existence d'une bande de cisaillement contractante dans la marne de Beaucaire, entre le domaine consolidé et surconsolidé.

Vinegar *et al.* [157] observent l'influence du frettage aux extrémités d'un échantillon du grès de Castlegate, lors de sa compression. En dehors de ces zones, il observe une dilatation radiale diffuse sur toute la section de l'échantillon, et non pas seulement à l'emplacement de la future bande. Il l'interprète comme une fissuration aux surfaces des grains. Quand la bande de cisaillement se forme, la dilatation y devient

plus forte qu'en dehors.

4.9.3 Problème de la résolution

La résolution de la mesure par tomographie est traitée par Johns *et al.* [81] et Desrues *et al.* [56]. On doit distinguer la résolution spatiale et la résolution de la mesure de densité radiologique, bien que ces deux caractéristiques soient liées entre elles.

Si l'on réalise des mesures sur un échantillon parfaitement homogène, la mesure radiologique présente une faible variation, due aux bruits de la mesure. Si l'on fait ces mesures sur un échantillon présentant une zone où la porosité change fortement, comme c'est le cas dans une bande de cisaillement, le profil de la densité radiologique, réalisé perpendiculairement à la bande, montre un pic au niveau de la bande correspondant à une plus forte ou plus faible porosité par rapport au milieu environnant. La forme de ce pic, quant à son amplitude et son épaisseur, dépend de la porosité dans la bande et de son épaisseur mais elle dépend aussi de la résolution de l'appareil. La mesure radiologique dans les zones présentant un fort gradient de porosité est perturbée par deux phénomènes :

- la mesure dans un voxel est une moyenne de la densité dans celui-ci, elle est donc perturbée par un fort gradient ou dans le cas où la bande de cisaillement n'est pas perpendiculaire à la tranche traitée ;
- sur une zone de discontinuité de la densité, il existe une dispersion de la réponse par tomographie sur plusieurs voxels avoisinants, même si ceux-ci ne sont pas directement concernés par la discontinuité.

Dans l'étude de Johns *et al.* [81], une série de mesures a été réalisée sur des échantillons de graniodorites dans lesquels ont été pratiqués artificiellement des fissures de différentes épaisseurs. Le profil de la densité radiologique à travers ces différentes fissures est comparé (cf. Fig. 4.66, les nombres indiquent en millimètres l'épaisseur des fissures et doivent être rapportées à la taille des voxels proches de 0,65 x 0.65 x e mm^3). L'amplitude du pic observé sur les coupes a et b, correspondant aux fissures les plus épaisses, dépend directement de la roche et de l'air présent dans la fissure. Pour des fissures plus fines, de c à h, cette amplitude est influencée par les effets décrits ci-dessus.

Dans ce cas particulier, il est supposé n'y avoir que de l'air dans la fissure, il est alors possible par calibration de connaître l'épaisseur de la fissure à partir de la forme du pic. Par contre, dans le cas d'une bande de cisaillement de faible épaisseur comme c'est le cas dans notre étude, où l'épaisseur de la bande et la porosité dans la bande sont inconnues alors qu'elles ont un effet similaire sur le pic du profil d'atténuation, la mesure tomographique dans le bande reste une information plus qualitative que quantitative. Pour une mesure vraiment quantitative, on peut imaginer de déterminer expérimentalement, de façon similaire à l'étude sur les fissures,

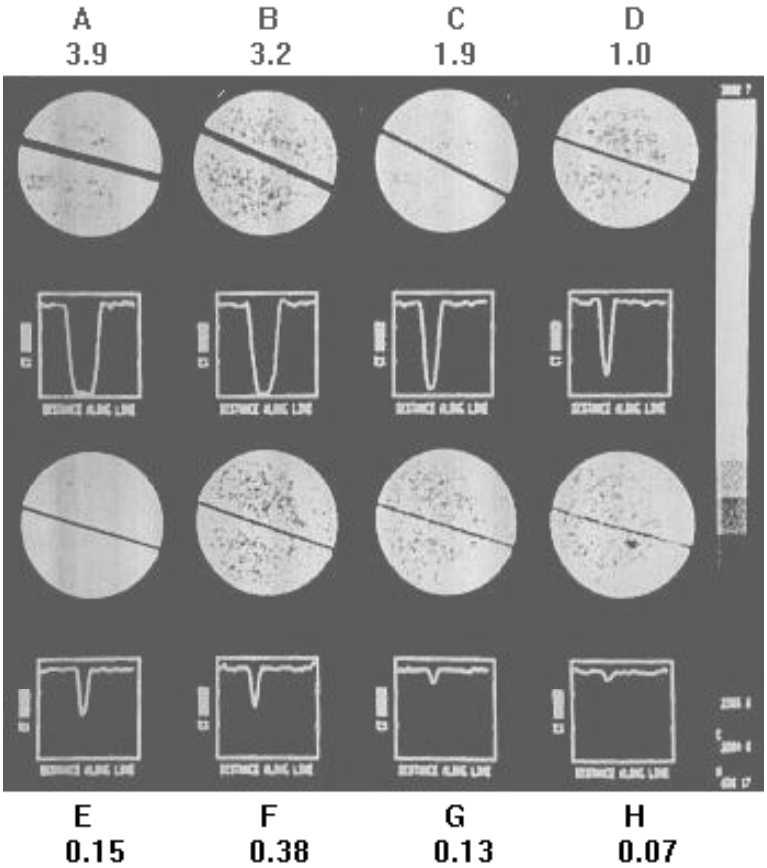


FIG. 4.66 – *Evolution des profils d'atténuation pour différentes épaisseurs de fissure dans un échantillon de graniodorite, selon Johns et al. [81].*

la porosité dans la bande en effectuant deux coupes tomographiques sur l'échantillon, l'une sur l'échantillon sec, l'autre sur l'échantillon saturé d'eau par exemple. La comparaison des deux profils ainsi obtenus peut peut-être permettre d'obtenir une information non dépendante de la largeur de la bande mais uniquement de la porosité dans celle-ci. On peut imaginer une seconde solution, ou l'on effectuerait deux coupes tomographiques sur l'échantillon, mais avec deux niveaux d'énergie du rayonnement X différents. Sachant que l'absorption des grains de la roche et celle du fluide interstitiel évoluent différemment en fonction du niveau d'énergie, la comparaison des deux profils de densité pourrait éventuellement permettre d'obtenir une information sur la porosité dans la bande. Ces deux solutions doivent être auparavant vérifiées de façon expérimentale sur des échantillons comportant des bandes dont la porosité serait parfaitement contrôlée. Actuellement, nous retenons surtout l'aspect qualitatif de la mesure par tomographie X.

4.9.4 Calibration

L'étude théorique de l'absorption des rayons X prévoit une relation linéaire entre la densité radiologique et la porosité d'un matériau. Cette relation a été établie expérimentalement par Mokni [107] et Desrues *et al.* [56] sur un sable et par Vinegar *et al.* [157] sur un ensemble de grès.

Une calibration entre la densité radiologique et la porosité du grès, en effectuant une série de mesures sur plusieurs morceaux du grès des Vosges provenant des différents blocs (premier bloc, partie haute et basse, et deuxième bloc) est possible.

Malheureusement, une panne prolongée, non résolue à ce jour, intervenue au cours de la campagne de mesures sur le scanner à Marseille nous a empêché d'effectuer cette calibration. Pour la même raison, la série de mesures, prévoyant l'étude d'échantillons déjà écrasés sur toute la gamme de pression (de 0 à 60 MPa) a été interrompue après avoir analysé deux carottes.

Les deux échantillons testés sont l'essai GVR9722 mené sous un confinement de 50 MPa et l'essai GVR9724 mené sous 30 MPa. Le premier se situe dans une zone intermédiaire entre le domaine de rupture fragile et le domaine de rupture ductile (cf. Fig. 4.47), tandis que le second se situe dans le domaine fragile.

4.9.5 Résultats

Les deux échantillons ont été mesurés, en pratiquant une succession d'observations dans des plans de coupe contigus (épaisseur 2 mm). L'ensemble des coupes couvre la totalité de l'échantillon, ce qui permet d'effectuer des reconstructions dans des plans autres que les plans de coupe mesurés et selon d'autres angles. Les cartes obtenues en niveau de gris indiquent la densité locale dans ces coupes. Plus un point tend vers le noir, et plus la porosité est élevée; au contraire, plus un point tend vers le blanc et moins sa porosité est élevée. Le blanc et le noir "parfait" correspondent à des porosités en dehors de la zone de calibration choisie pour tracer les coupes.

4.9.5.1 Bande de cisaillement dilatante

Une sélection de coupes réalisées sur l'échantillon GVR9724 testé sous 30 MPa de confinement est présentée sur la figure 4.68. Ces coupes sont situées dans la zone signalée sur la figure 4.67. Elles concernent la zone où se sont localisées les déformations. La première coupe correspond à la partie basse de cette zone, et les coupes suivantes sont situées les unes au-dessus des autres, chacune ayant une épaisseur de 2 mm. L'ordre de présentation de la planche 4.68 est : de haut en bas, de gauche à droite. La zone de localisation apparait en noir, ce qui signifie qu'elle est plus poreuse que le reste de l'échantillon.

Au fur et à mesure des coupes successives, la bande se déplace dans la direction NO-SE, ce qui résulte de l'inclinaison de la bande par rapport à l'axe de l'échantillon. Dans la partie basse de la zone observée, la zone localisée est courbée. Cela ne peut être dû à un phénomène de frettage car cette zone se situe dans la partie médiane

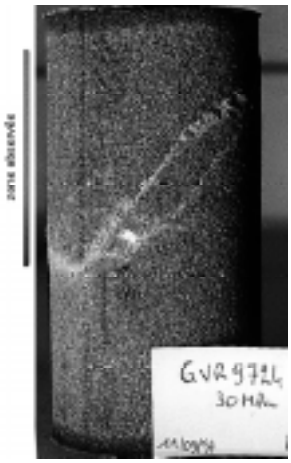


FIG. 4.67 – *Echantillon GVR9724, écrasé sous un confinement de* 30 *MPa. Les coupes présentées ci-dessous appartiennent à la zone signalée par le trait latéral.*

de l'échantillon. Par contre, elle est rectiligne plus haut, même à l'approche de l'extrémité.

Dans la portion de la bande localisée ressortant à la surface, il existe une fourche laissant apparaître deux traces. Cela correspond bien à l'observation visuelle que l'on peut faire de l'échantillon à la fin de l'essai (Fig. 4.67).

Dans la partie inférieure et supérieure de la zone observée, la bande traverse de part en part l'échantillon. Par contre, dans la partie intermédiaire, la bande apparaît plus poreuse sur la surface, mais semble disparaître au milieu de la section. Il semble donc que le mécanisme de la bande est différent loin des surfaces de l'échantillon.

La reconstruction suivant un plan contenant l'axe de l'échantillon, et perpendiculaires aux traces de moindre densité laissées dans les coupes précédentes est représentée sur la figure 4.69. L'échantillon est représenté en entier. La partie inférieure de la figure correspond à la partie la plus dense de l'échantillon, déjà observée lors des mesures de densité apparente (cf. Tab 4.2, p. 70). Cette zone plus dense avait, avant essai, une masse volumique de $1,982\ g/cm^3$, tandis que la zone la moins dense (partie supérieure de la figure) avait une masse volumique de $1,955\ g/cm^3$.

La bande passe par le plan de jonction des deux parties, et ne passe pas par l'intersection entre l'extrémité et la surface cylindrique de l'échantillon (le "coin" de l'échantillon). Les bandes se forment de façon générale, systématiquement dans la zone la moins dense.

L'épaisseur de la zone localisée est de l'ordre de 1,5 à 3 mm, soit environ 7 à 15 grains, en considérant la taille moyenne des grains à $0,2\ mm$. L'inclinaison mesurée sur la figure est de 44° par rapport à la direction axiale, ce qui correspond bien à la mesure d'inclinaison réalisée à partir des développées de la membranes (45°). La partie centrale de la bande a subi, comme sur les coupes radiales, une plus faible dilatation. C'est certainement ce phénomène qui maintient une certaine cohésion pour les échantillons rompus à plus faible confinement, et qui présentent des fissures

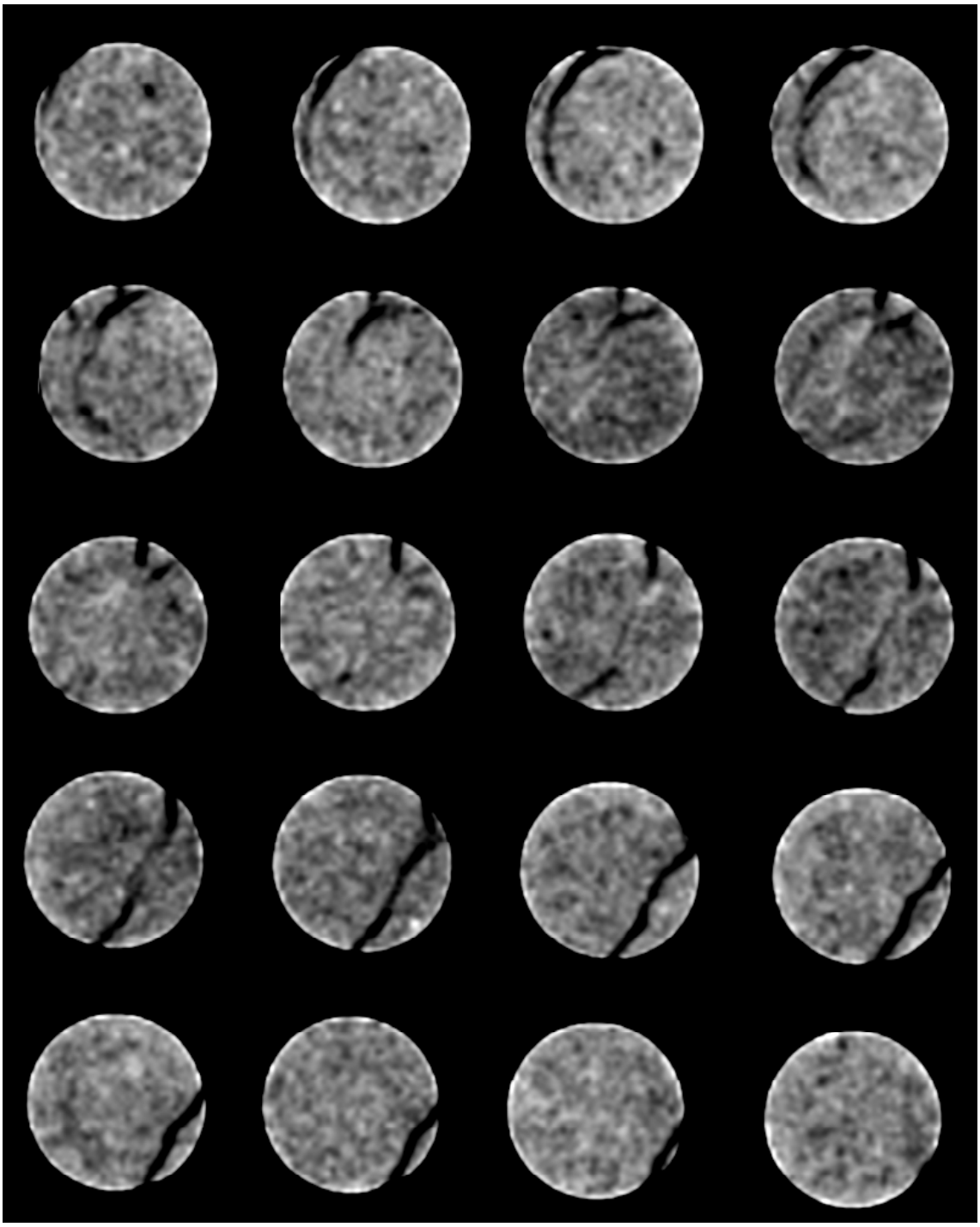


FIG. 4.68 – *Coupes successives dans la zone localisée de l'échantillon GVR9724.*

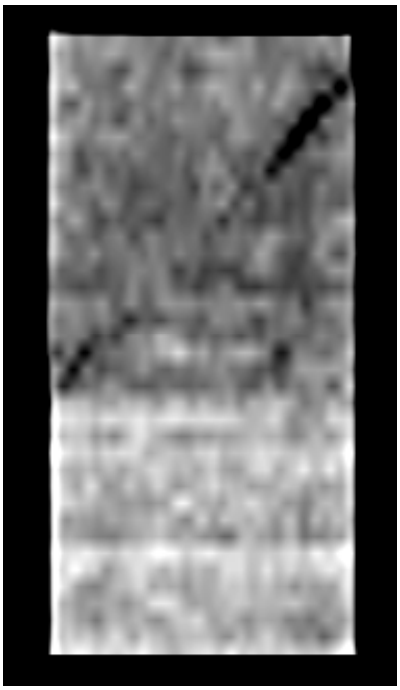


FIG. 4.69 – *Coupe verticale de l'échantillon GVR9724. La coupe passe par l'axe de l'échantillon et est perpendiculaire aux traces laissées dans les coupes radiales.*

macroscopiques en surface.

4.9.5.2 Bande de cisaillement contractante

Une sélection de coupes réalisées sur l'échantillon GVR9722 testé sous 50 MPa est présentée sur la planche 4.71. L'ordre de présentation de cette planche va de haut en bas, de gauche à droite. Ces coupes sont celles situées dans la partie de l'échantillon signalée sur la figure 4.70. La première coupe est à l'extrémité inférieure de l'échantillon, et les autres sont situées au-dessus.

La première coupe est perturbée car elle est à cheval sur le plan d'extrémité de l'échantillon. Au fur et à mesure que les coupes montent par rapport à l'échantillon, se dessine une zone plus claire, i.e. plus dense, en partant de la gauche, et se déplaçant vers la droite, du fait de l'inclinaison de cette zone par rapport à l'échantillon. Les taches blanches sont oblongues, et ne sont pas aussi localisées que dans le cas des bandes dilatantes. On les distingue de la coupe 4 à la coupe 12. Elles sont situés au milieu des sections, et dans certains cas, elles se prolongent vers la surface de l'échantillon par une zone plus localisée et dilatante.

La figure 4.72 présente une reconstruction contenant l'axe de l'échantillon, et perpendiculaire à la direction de décalage des zones contractantes. Une bande linéaire, contractante, est clairement visible. Elle passe par l'intersection de l'extrémité et de la surface cylindrique de l'échantillon. Elle se situe dans la moitié la moins dense de l'échantillon. Son épaisseur varie jusqu'à environ 3 mm, soit à peu près 17 grains.

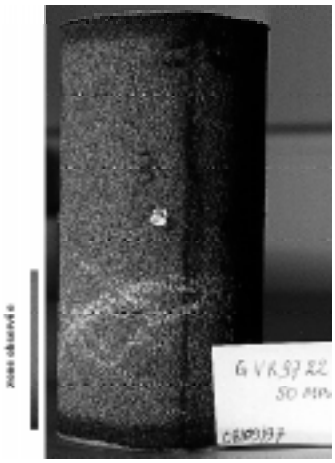


FIG. 4.70 – *Echantillon GVR9722, écrasé sous un confinement de* 50 *MPa. Les coupes présentées ci-dessous appartiennent à la zone signalée par le trait latéral.*

L'épaisseur diminue à l'approche des surfaces.

Cette bande est inclinée par rapport à l'axe de l'échantillon d'un angle de 57°, alors que la mesure sur la développée de la membrane, à partir des multiples traces laissées sur celle-ci était estimée à 50°. Mais la mesure réalisée sur la reconstruction reste dans l'intervalle des mesures effectuées à ce confinement à partir des membranes.

L'existence de cette bande unique sur les images aux rayons X, alors qu'on observe plusieurs traces à la surface de l'échantillon, confirme l'hypothèse faite, à partir des mesures de déplacements radiaux, qu'il existe une bande prépondérante par rapport aux autres (§4.6.4.3, p. 123).

4.9.6 Conclusion

La tomographie aux rayons X a permis de visualiser l'intérieur des échantillons de grès. Pour les échantillons comprimés sous un confinement moyen, dans le domaine de rupture fragile, la bande de cisaillement s'avère être dilatante, et pour l'échantillon comprimé sous un fort confinement, entre le domaine fragile et ductile, la bande est contractante.

Cette appellation de bande est d'ailleurs approximative. Dans le cas dilatant, elle n'est pas parfaitement plane mais épouse par endroit une courbe cylindrique d'axe parallèle à la droite de plus grande pente. Dans le cas contractant, elles est très épaisse au milieu de l'échantillon, et s'affine sur les bords.

D'une manière générale, à partir de ces deux mesures, il apparaît une influence importante des bords de l'échantillon. Outre le fait que les bandes passent par les "coins" de l'échantillon ou à proximité immédiate, les coupes tomographiques montrent que ce qui se passe sur la surface est différent de ce qui se passe à l'intérieur. Dans le cas dilatant, aux endroits les plus éloignés d'une des surfaces de l'échantillon,

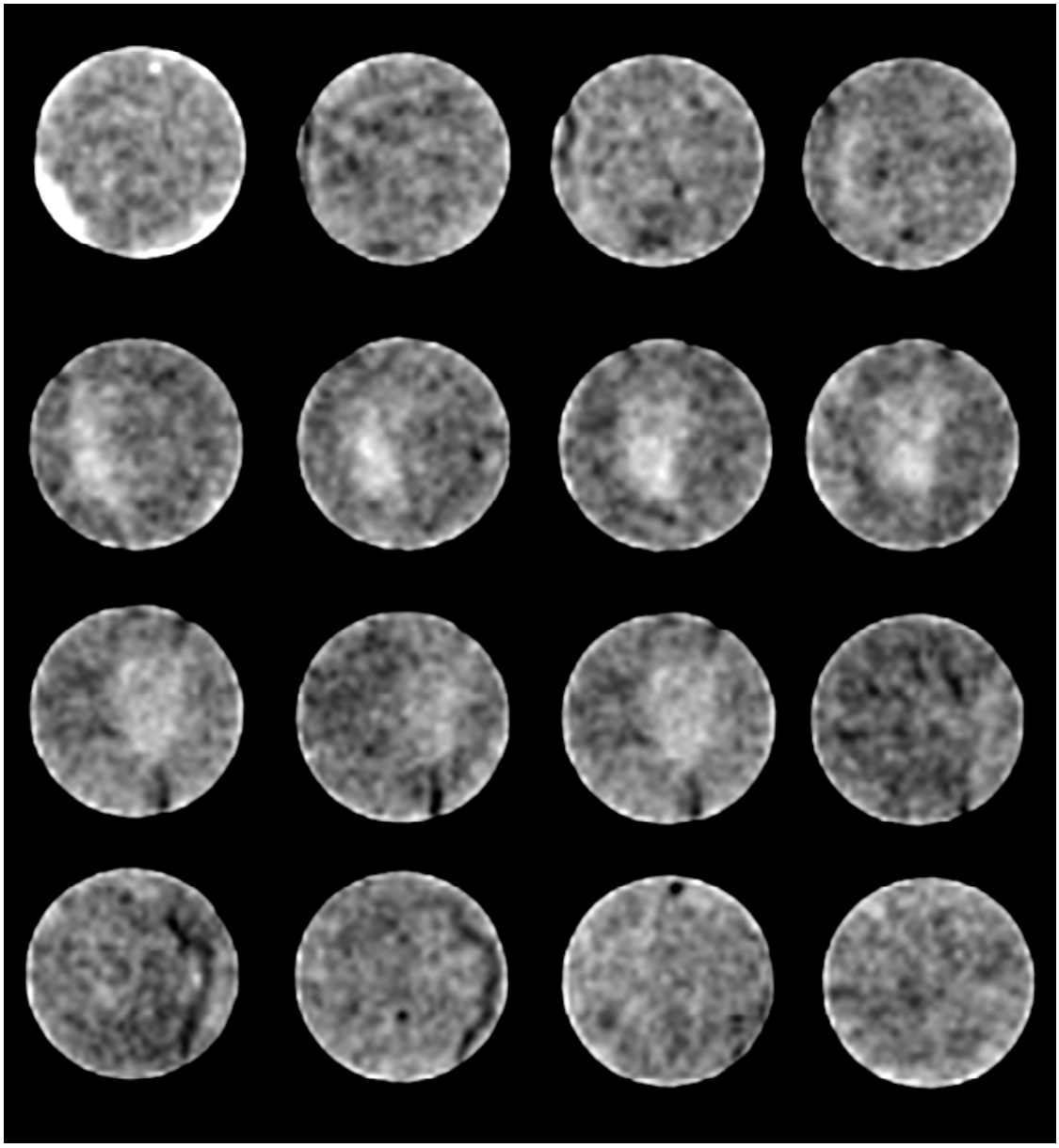


FIG. 4.71 – *Coupes successives dans la zone localisée de l'échantillon GVR9722.*

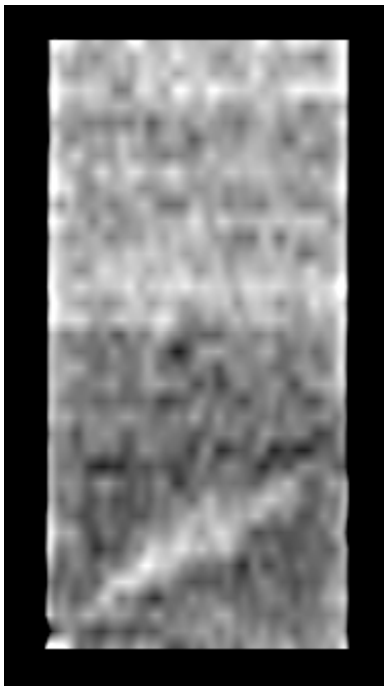


FIG. 4.72 – *Coupe verticale de l'échantillon GVR9722. La coupe passe par l'axe de l'échantillon et est perpendiculaire aux traces laissées dans les coupes radiales.*

la bande est très peu dilatante, contrairement aux bords. Dans le cas contractant, la bande est très épaisse et contractante au coeur de l'échantillon, alors qu'elle ne se distingue presque plus sur les bords, ou alors devient dilatante. Cette observation est importante, car elle pose le problème de la caractérisation de la localisation à partir de la seule observation de la surface extérieure. On voit bien ici que cette caractérisation peut être insuffisante. Néanmoins dans l'état actuel des pratiques de laboratoire, c'est la seule dont on dispose et même imparfaite, elle reste une indication intéressante.

4.10 Analyse microscopique

Les deux échantillons observés par tomographie aux rayons X (cf. 4.9) ont été par la suite analysés par microscopie électronique et optique. Les observations, la description et les quantifications de la déformation ont été effectuées par Suzanne Raynaud du laboratoire Hydrosciences de l'Université de Montpellier II. Les deux échantillons avaient été comprimés axialement, sous deux confinements différents (essai GVR9724 à 30 MPa et essai GVR9722 à 50 MPa), et présentent une localisation des déformations, de type dilatant ou contractant. Les observations qui suivent ont donc été réalisées sur des échantillons déchargés après rupture, alors qu'ils avaient atteint une phase résiduelle en terme de déviateur de contrainte.

4.10.1 Méthodes

4.10.1.1 Techniques employées

La description microscopique a été réalisée à l'aide d'un microscope optique et d'un microscope électronique à balayage en électrons secondaires et rétrodiffusés.

La quantification de la déformation est basée sur la mesure de la densité de fissures, et sur celle de la porosité à l'échelle locale. La densité de fissuration a été mesurée en comptant le nombre de fissures existant dans un carré de un millimètre de coté, à partir d'image obtenues au microscope optique. La porosité surfacique est mesurée par un logiciel d'analyse d'image sur des sections de un millimètre carré à partir d'images obtenues au microscope électronique à balayage.

4.10.1.2 Relation entre les mesures surfaciques et spatiales

Il est important de situer la difficulté de relier des mesures faites sur le plan de coupe que représente la lame mince, telle que la porosité surfacique, à des mesures spatiales telle que la porosité volumique.

La discussion qui suit situe le problème de la détermination des tailles moyennes de grains dans un problème en trois dimensions à partir des mesures de tailles moyennes de grains effectuées sur une coupe en deux dimensions, ainsi que du calcul de la porosité volumique à partir de la porosité surfacique. Cette discussion est basée sur l'analyse largement détaillée par Underwood [148].

Taille de grain On considère un grain de forme quelconque, traversé par un plan de coupe telle qu'une lame mince. Il convient de définir ce que l'on peut appeler la longueur moyenne de coupe $\underline{L}_3$ du grain, et de la différencier du diamètre du grain (valeur que l'on peut également définir de plusieurs façons). La longueur moyenne de coupe est la valeur moyenne que l'on pourrait calculer à partir des mesures de l'intersection du grain avec une ligne, en faisant varier indéfiniment l'inclinaison et la position de celle-ci. Pour un grain de forme quelconque convexe, suivant la position

de la ligne et de son orientation, la longueur d'intersection du grain et de la ligne peut varier de zéro à une valeur maximum.

Dans le cas d'un grain sphérique de diamètre D, cette longueur d'intersection peut varier de 0 à D. Dans ce cas particulier, la longueur moyenne de coupe est reliée au diamètre du grain par la relation ([148, p. 81]): $\underline{L}_3 = 2/3\, D$. C'est cette relation que Wong *et al.* [161] utilisent pour définir une dimension de grain à partir de sections de plusieurs grains sur une lame mince, pour tenir compte d'un passage de deux dimensions à trois dimensions. Nous l'avons également utilisé pour exprimer la taille des grains.

Porosité La porosité surfacique A_S est définie comme la proportion de vide sur une section donnée. Soit A_T cette section, et A_α la surface de vide, on a : $A_S = A_\alpha/A_T$. La porosité volumique V_V est définie comme la proportion du volume de vide sur un volume donné : $V_V = V_\alpha/V_T$. Underwood [148, p. 24] montre que la porosité volumique sur un volume donné est égale à la porosité surfacique moyenne sur ce volume, soit : $V_V = \bar{A}_S$, avec $\bar{A}_S = 1/l \int_0^l A_S(x)dx$, l étant le coté du cube représentant le volume donné, et x définissant une position du plan de coupe dans le volume suivant une direction parallèle à une des arêtes du cube.

La démonstration est réalisée avec une direction particulière x, et il apparaît en pratique que dans un milieu orienté, le calcul de $\bar{A}_S$ (à partir de la somme discrète de plusieurs mesures) peut varier suivant que l'on considère une série de sections parallèles ou au contraire orientées différemment. Si l'on suppose, lorsque que l'on fait une mesure de porosité ponctuelle à l'échelle du millimètre carré, que notre milieu n'est pas orienté (ce qui ne peut être fait à l'échelle de l'échantillon lorsque que l'on est en présence de bandes de cisaillement qui sont des structures orientées), il faut néanmoins considérer que $\bar{A}_S$ est une valeur moyenne, tandis que la porosité surfacique est mesurée généralement sur une seule section (un x fixé) (cf. Fig. 4.73). Il y a donc là une source d'erreur possible que Underwood évalue à environ 10%.

Notons pour mémoire l'étude récente de Cousin *et al.* [44] qui a visé à comparer certaines informations obtenue en deux dimensions à des informations obtenues en trois dimensions. Ils ont reconstitué un échantillon de sol poreux (avec des tailles de pore jusqu'à plus de 2 mm) en trois dimensions à partir d'image de coupes parallèles de l'échantillon espacées de 100 μm. La porosité surfacique moyenne sur les coupes était de 22,8 % alors que la porosité volumique de l'échantillon ainsi reconstitué était de 20 %. Bien que les auteurs ne mentionnent pas de porosité mesurée de façon classique, la porosité surfacique semble donc légèrement surévaluer la porosité volumique. Leur technique semble intéressante pour effectuer des mesures ponctuelles précises.

On retient donc que le passage d'une mesure sur un plan de coupe à une valeur pour une structure en trois dimensions est délicat, et il convient, quand les mesures sur le plan de coupe sont simples et ne prennent pas de dispositions particulières,

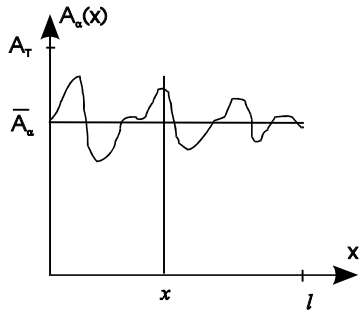


FIG. 4.73 – *Représentation de la fluctuation de la valeur de la porosité surfacique suivant la position du plan de coupe dans le volume considéré et détermination de la porosité surfacique moyenne (selon Underwood [148]).*

de tenir compte d'un certain niveau d'erreur possible. Nous considérons cependant que la porosité volumique et la porosité surfacique sont identiques, et nous avons appliqué le coefficient 3/2 pour le calcul d'un diamètre de grain.

4.10.2 Résultats

4.10.2.1 Description des échantillons

Les échantillons étudiés présentent à l'échelle macroscopique des structures de localisation sensiblement différentes. L'échantillon GVR9724 (30 MPa) présente une bande de localisation inclinée à 45° par rapport à l'axe de chargement, et des bandes moins marquées, d'inclinaisons identiques et conjuguées par rapport à la bande principale (Fig. 4.67, p. 154). L'échantillon GVR9722 (50 MPa) présente des bandes quasiment parallèles entre-elles, inclinées de 50° par rapport à la direction axiale (Fig. 4.70, p. 157). Les lames minces ont été taillées de façon à être le plus perpendiculaires possible aux bandes de cisaillement principales.

Le grès étudié est formé de grains détritiques essentiellement de quartz, de feldspaths, et de micas (cf. §4.1, p. 67), le quartz étant plus prédominant, et le mica rare (Fig. 4.74). La taille moyenne des grains sur la lame mince est comprise entre 100 et 300 μm (soit en raisonnant en trois dimensions 150 à 450 μm, cf. §4.10.1.2), avec de rares grains à 500 μm (750 μm). Les mesures des rapports de forme des grains, définis par le rapport de la largeur sur la longueur des grains, sont centrés sur la valeur moyenne de 0,3. Des comptages de grains et des mesures effectuées sur des zones éloignées des bandes de localisation, et au contraire au voisinage de celles-ci, montrent que le matériau est remarquablement homogène et est similaire sur les deux échantillons (Fig. 4.75).

La cohésion des grains est assurée essentiellement par des interpénétrations entre grains d'origine diagénétique (Fig. 4.76). Aucun ciment ne soude ces grains entre eux. Cette caractéristique doit conférer rapidement au grès un comportement des grains entre eux de type granulaire (au sens des matériaux non cohésifs et purement frottants).

FIG. 4.74 – *Photographie de lame mince montrant la minéralogie et la fissuration expérimentale du matériau dans une zone non localisée. Q : quartz, F : feldspath, M : mica, f : fissure, P : pore.*

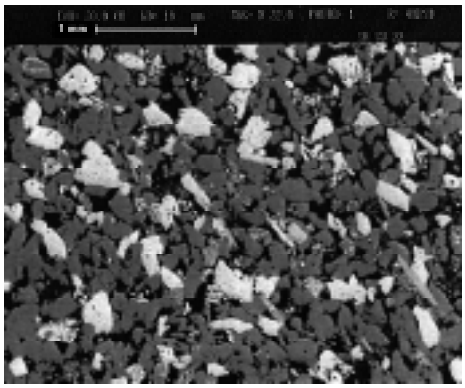


FIG. 4.75 – *Aspect du matériau hors zones fissurées vu au MEB en électrons rétro diffusés : image en éléments chimiques à faible grandissement montrant l'homogénéité du matériau.*

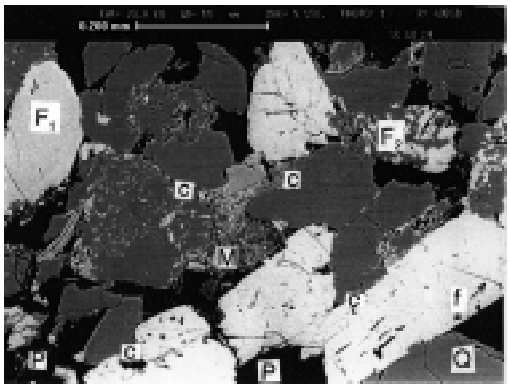


FIG. 4.76 – *Aspect du matériau hors zones fissurées vu au MEB en électrons rétro diffusés : image en éléments chimiques à fort grandissement montrant les contacts diagénétiques initiaux entre les grains. P : pore (noir), c: contact diagénétique, Q : quartz, F1 : feldspath (blanc), F2, feldspath (gris et blanc), M : mica (rayé).*

4.10.2.2 Analyse de la déformation

A l'échelle des grains, la déformation de ce grès est de deux types, une fissuration des grains pouvant aller jusqu'à la fragmentation, et une variation de la distance entre grains (comportement granulaire).

Nous traiterons successivement de ces deux types de déformation microscopiques, en comparant les deux échantillons. Ces deux formes de déformation sont souvent associées, la première est directement observable par microscopie, le seconde sera analysée à l'aide de mesures de porosités surfaciques locales, bien que ces dernières soient aussi influencées par la fissuration.

4.10.2.2.1 La fissuration

Les bandes de cisaillement Les bandes de cisaillement sont définies ici comme des bandes de grains mono à polyfissurés (Figs. 4.77, 4.78). Du fait de l'intensité de la fissuration, les grains sont dans la plupart des cas fragmentés. La transition entre ces zones et le matériel non fissuré se fait sur une épaisseur de un à deux grains. Dans les zones avoisinant les bandes de cisaillement, les grains présentent moins de fissuration intragranulaire, mais une tendance à la fissuration intergranulaire, suggérant l'existence de mouvement des grains entre eux.

De telles bandes existent sur les deux échantillons. Elles sont plus développées dans l'échantillon GVR9722 (50 MPa), où elles ne donnent pas lieu à la formation de fissure macroscopique, et où elles se traduisent en surface d'échantillon par des bandes plus claires. Dans l'échantillon GVR9724 (30 MPa), des fractures macroscopiques se sont formées au cœur des bandes de cisaillement.

Ces bandes se développent généralement sur des longueurs suffisantes pour que la direction des épontes permette de définir une orientation par rapport à l'axe de

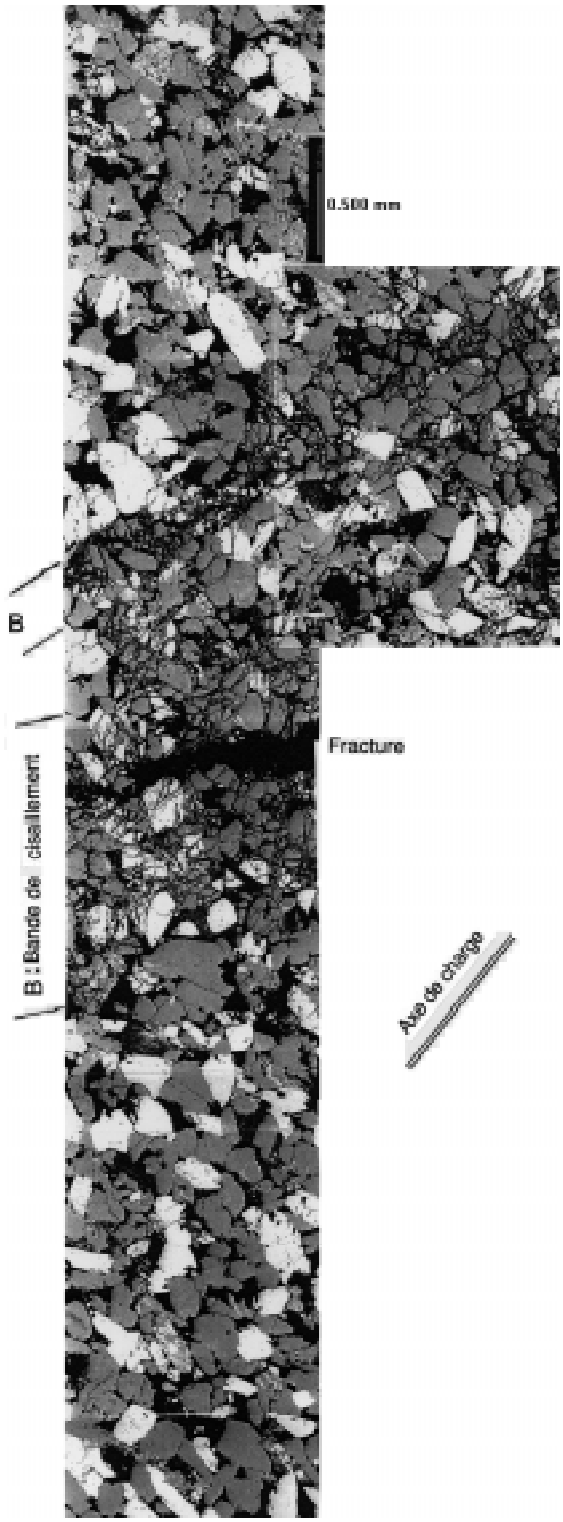


FIG. 4.77 – *Aperçu de la déformation dans l'échantillon GVR9724 (30 MPa). B : bande de cisaillement (images MEB en éléments chimiques).*

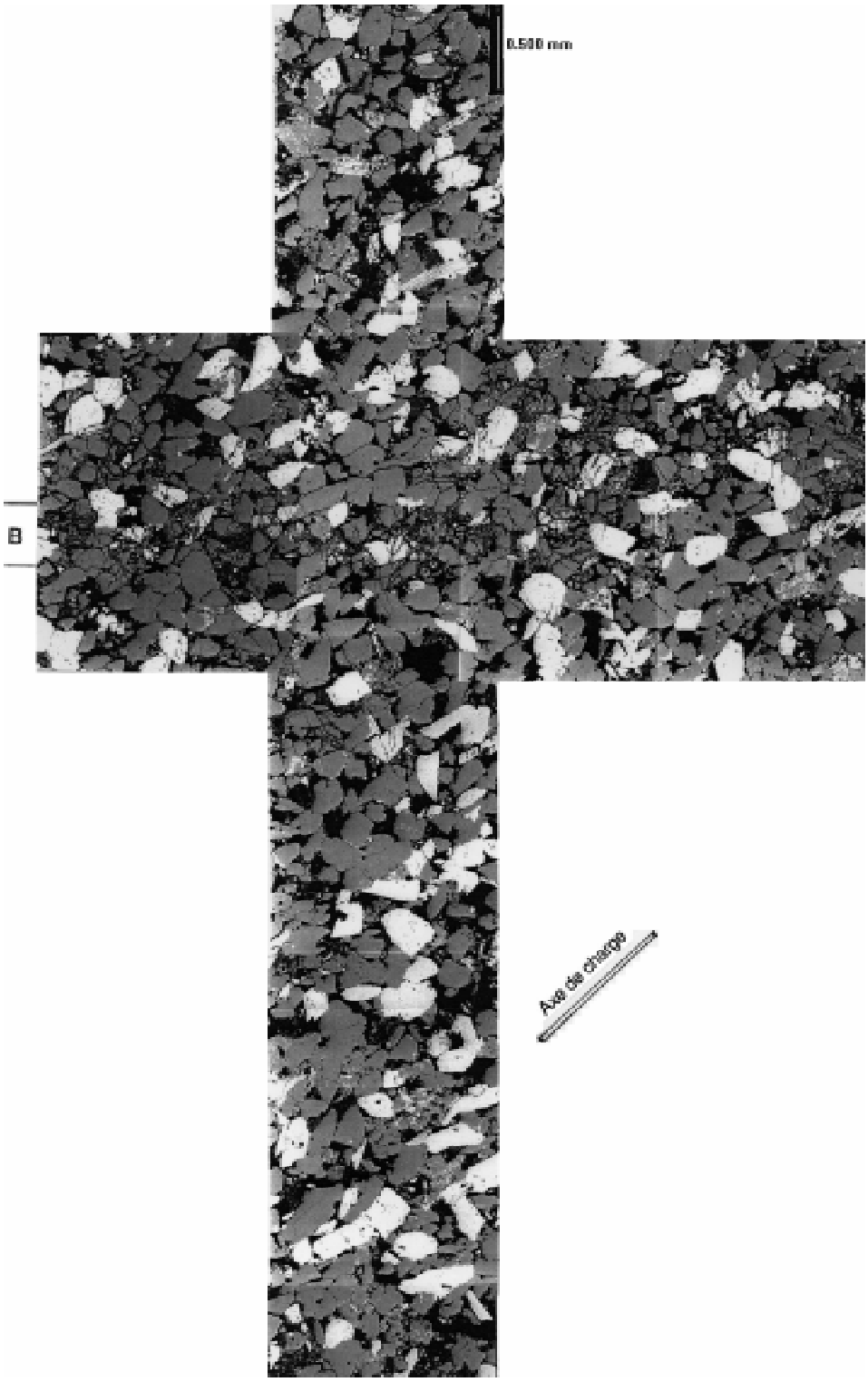
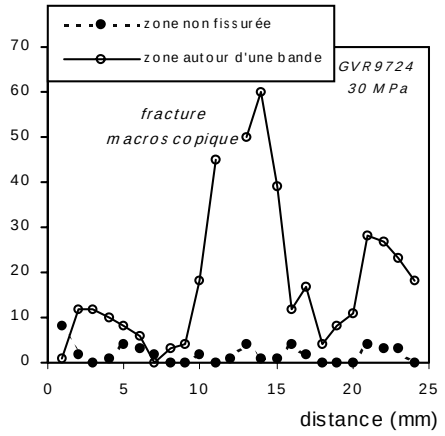


FIG. 4.78 – *Aperçu de la déformation dans l'échantillon GVR9722 (50 MPa). B : bande de cisaillement (images MEB en éléments chimiques).*



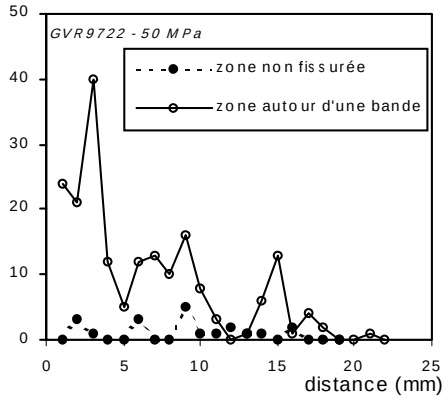


FIG. 4.79 – *Nombre de fissures au millimètre carré à différentes positions sur la lame mince : loin et autour des bandes de cisaillement (transect perpendiculaire à la bande). Mesures effectuées par microscope optique, grossissement 115.*

charge. L'échantillon GVR9724 présente des bandes faisant un angle de $0^o, 20^o, 40^o$ et 45° de part et d'autre de l'axe de charge. Notons que l'inclinaison de la bande la plus inclinée correspond à la mesure faite en surface d'échantillon à partir des membranes en néoprène. C'est d'ailleurs dans ces bandes inclinées de 45° que se forment les fractures macroscopiques. L'échantillon GVR9722 présente des bandes faisant un angle de $0^o, 35^o, 40^o$ et 50° de part et d'autre de l'axe de charge. Cette dernière valeur correspond également aux mesures faites sur les membranes des échantillons à la sortie de la cellule d'essai.

Dans les deux cas, la largeur des bandes varie de 360 à 1200 μm. Les bandes les plus larges présentent les angles d'inclinaison les plus forts. La fracture macroscopique de l'échantillon GVR9724 s'est formée dans une bande de 5 mm de large environ, comprise dans un couloir de plusieurs bandes.

La déformation des minéraux Outre les bandes de cisaillement, des minéraux fissurés sont dispersés dans le matériau. A l'intérieur des bandes, les fissures dans les minéraux ne présentent pas d'orientation préférentielle. Quand la fissuration est intense, les minéraux se fragmentent, les feldspaths, moins résistants et présentant des plans de faiblesse que sont les plans de clivage faciles, se fragmentent plus intensément que les quartz. Dans ces conditions, la déformation est de type cataclastique. Ponctuellement, autour des bandes, la fissuration intragranulaire peut montrer une orientation préférentielle subparallèle à l'axe de chargement.

La densité de fissuration est très faible quand on est loin de bandes de cisaillement (Fig. 4.79). Elle est élevée dans les bandes et elle évolue rapidement en s'en éloignant, elle tend en quelques millimètres vers la moyenne sur l'échantillon.

4.10.2.2.2 Evolution spatiale de la porosité Nous assimilons la porosité volumique à la porosité surfacique mesurée sur la lame mince, tout en sachant qu'une certaine erreur est commise par cette approximation (cf. §4.10.1.2). Il faut considérer également que la porosité surfacique prend en compte également la porosité fermée.

Pour comparaison, deux mesures de porosité volumique, par imprégnation à l'eau sous vide, ont été effectuées sur des morceaux prélevés loin des bandes de cisaillement des deux échantillons. Loin d'être parfaite, compte tenue de la petite taille des morceaux, les deux mesures fournissent les valeurs de 22,8 % et 23,2 %, soit des valeurs proches de la porosité avant essai (qui est pour ce bloc de grès de 23,2 %). Par contre, la porosité surfacique dans les mêmes zones des échantillons (i.e. loin des bandes de cisaillement) est de 30 %. Une mesure de porosité au mercure serait nécessaire pour approfondir les causes d'une telle différence, mais dans l'état actuel, nous considérons que l'évolution de la porosité surfacique est une bonne indication de l'évolution de la porosité volumique.

Porosité des zones fissurées Deux profils de porosité sont tracés pour l'échantillon GVR9724 (Fig. 4.80), et deux autres profils pour l'échantillon GVR9722 (Fig. 4.81). Les profils sont perpendiculaires aux bandes de cisaillement ou à la fracture macroscopique.

Pour l'échantillon comprimé sous un confinement de 30 MPa (GVR9724), les bandes de cisaillement ou la fracture macroscopique sont marquées dans les deux profils par une forte porosité sur une largeur inférieure à 1 mm. Autour des bandes de cisaillement, la porosité est plus élevée sur une largeur de 1 à 2 mm d'environ 5 à 10 % par rapport à la porosité loin des bandes (30 %).

Pour l'échantillon comprimé au confinement de 50 MPa, les bandes de cisaillement se manifestent également sur les deux profils (Fig. 4.81) par une forte porosité, sur une largeur de 0,5 à 1 mm. Par contre, autour des bandes, sur une largeur de 1 à 2 mm, la porosité est de 3 à 4 % inférieure à la porosité moyenne loin des bandes, ce qui indique un mécanisme contractant autour des bandes de cisaillement dilatantes.

4.10.3 Conclusion de l'étude microscopique

Les bandes de cisaillement formées lors du chargement déviatorique des échantillons de grès, et qui se manifestaient en surface par des traces claires, apparaissent à l'échelle microscopique comme des bandes dans lesquelles les grains sont fortement fissurés (déformation de type cataclastique). La fissuration semble y être isotrope. Autour de ces bandes, les grains sont également fissurés, mais dans des proportions qui diminuent lorsqu'on s'éloigne des bandes, avec parfois une orientation préférentielle subaxiale (i.e. les orientations des fissures dans les grains peuvent parfois être en moyenne proches de la direction de contrainte majeure), les grains sont également parfois décollés des autres grains (présence de fissures intergranulaires), suggérant des mouvements de grains entre eux.

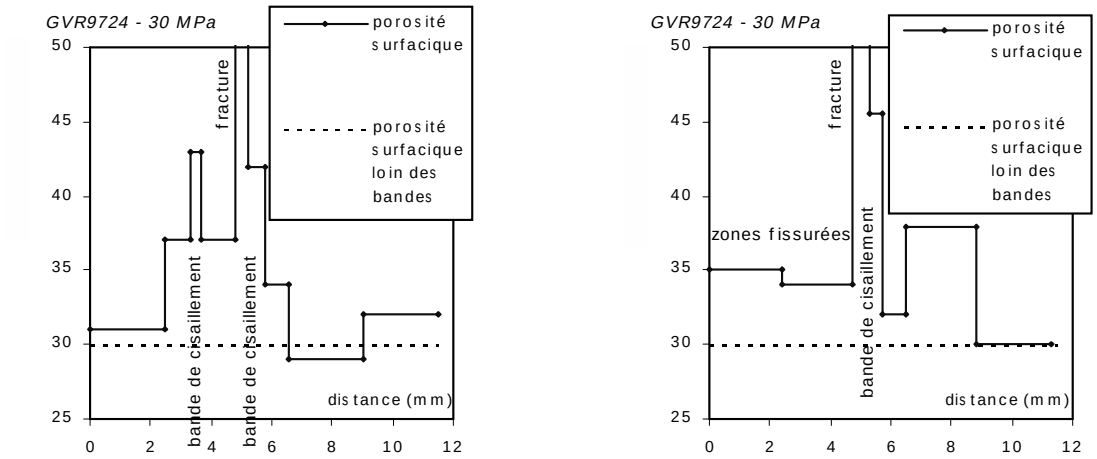


FIG. 4.80 – *GVR9724 : Porosité surfacique ponctuelle (mesurée sur un millimètre carré) à différentes positions sur la lame mince : loin et autour des bandes de cisaillement (transect perpendiculaire à la bande). Mesures effectuées par MEB.*

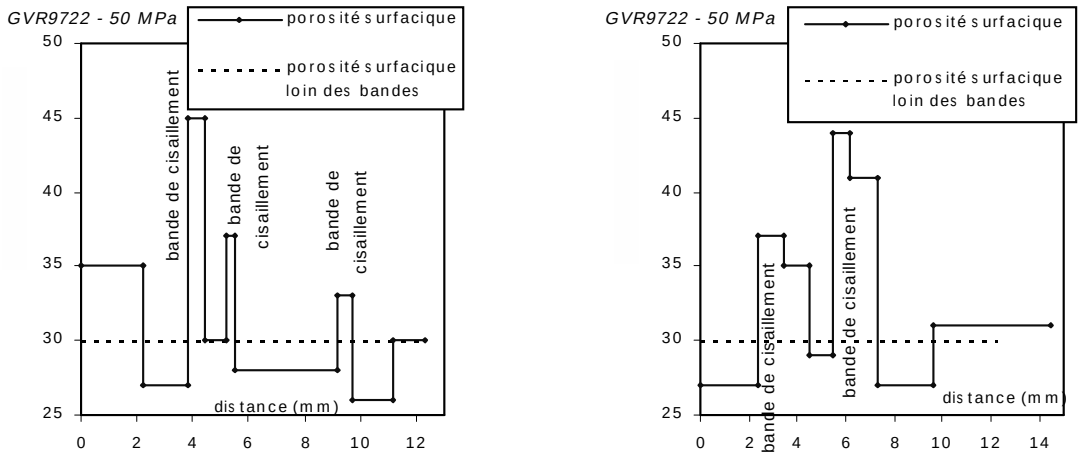


FIG. 4.81 – *GVR9722 : Porosité surfacique ponctuelle (mesurée sur un millimètre carré) à différentes positions sur la lame mince : loin et autour des bandes de cisaillement (transect perpendiculaire à la bande). Mesures effectuées par MEB.*

La porosité dans les bandes de cisaillement est forte, comparativement à la porosité moyenne sur l'échantillon. Autour des bandes, la porosité est également plus forte que la valeur moyenne pour l'échantillon comprimé avec un confinement de 30 MPa (rupture fragile), tandis que pour l'échantillon comprimé à 50 MPa (rupture transitoire fragile-ductile) la porosité autour des bandes est plus faible que la valeur moyenne dans l'échantillon.

Ces mesures de la porosité autour des bandes sont cohérentes avec les observations obtenues par tomographie aux rayons X. Néanmoins, sur ces dernières, la dilatance dans la bande de cisaillement n'était pas apparue pour l'échantillon GVR9722, probablement du fait de la résolution insuffisante du scanner : en présence d'une dilatance forte mais très localisée associée à une contractance moins forte mais plus étendue, la moyenne peut ne révéler que la contractance. On voit ici l'intérêt d'associer plusieurs méthodes d'observation pour une caractérisation objective des phénomènes quand ils impliquent des échelles différentes.

Les observations microscopiques sont effectuées sur des échantillons après rupture, et le mécanisme d'apparition des bandes lors du chargement n'est pas accessible. On peut toutefois penser, mais avec précautions, que la localisation des déformations se forme initialement selon des bandes assez larges, dilatantes ou contractantes selon le niveau de confinement, et que dans une phase ultérieure du chargement, une seconde localisation accompagnée d'un mécanisme de broyage des grains, ou alors une fracturation macroscopique, se manifeste à l'intérieur des premières bandes, avec dans ce cas une dilatance systématique quelle que soit le confinement pour atteindre une porosité surfacique autour de 45 %. Cette interprétation reste cependant à vérifier par des études microscopiques menées à différents stades du chargement.

4.11 Conclusion et discussion sur les essais triaxiaux

La campagne d'essais triaxiaux sur le grès des Vosges a porté sur une étude systématique du comportement et de la détection de la localisation pour une gamme de pression de confinement allant de 0 à 60 MPa. La tableau 4.6 récapitule tous ces essais, la figure 4.84 en donne également une représentation graphique.

L'expérimentation montre clairement l'existence de bandes de cisaillement, d'épaisseur non nulle, dans lesquelles se localisent les déformations. A ce titre, la théorie de la bifurcation semble une approche intéressante pour analyser la rupture dans ce type de roche.

La technique de détection de la localisation est basée sur des mesures multiples à partir de capteurs internes (à la cellule) et globaux (mesure sur toute une partie de l'échantillon) développés spécialement pour cette étude. Elle a montré, en faisant la comparaison des différentes mesures, que la localisation intervenait avant le pic de contrainte. A ce titre, on peut penser que celui-ci est une conséquence du phénomène de localisation des déformations, le matériau s'affaiblissant dans cette zone, ce qui se répercute sur la réponse globale de l'échantillon par un radoucissement. La localisation est d'autant plus précoce, relativement au pic de contrainte, que le confinement augmente.

Le comportement du grès sur les chemins triaxiaux de compression et sur la gamme de pression de confinement étudiée (0 à 60 MPa) montre un comportement fragile jusqu'à 40 MPa, et un comportement intermédiaire entre le domaine fragile et le domaine ductile au-delà. Pour le domaine de pression de confinement allant de 50 à 60 MPa, la pression latérale n'entraîne plus un renforcement de la résistance mais au contraire une dégradation progressive de la résistance (dans ces pressions, le déviateur au pic diminue lorsque le confinement augmente).

On a considéré d'autre part l'effet que le déviateur de contrainte produit sur la déformation volumique. Pour une même contrainte moyenne (i.e. une même ordonnée sur le graphe 4.82), on compare la différence de déformation volumique entre un état de contrainte isotrope et un état avec un déviateur de contrainte. On constate que pour les plus faibles contraintes moyennes, dans le domaine de rupture fragile, le déviateur de contrainte, sur un chemin de compression ou bien d'extension, entraîne une dilatance relative du matériau. Par contre, aux plus fortes contraintes moyennes, dans le domaine transitoire entre fragile et ductile, il n'a pas d'influence sur la dilatance relative (Fig. 4.82). Notons toutefois que les chemins d'extension doivent être comparés à des chemins de décharge isotrope (diminution de la contrainte moyenne) et non pas au chemin de chargement isotrope. La figure 4.83 illustre de façon plus précise le graphe précédent en montrant un exemple d'un essai d'extension à 40 MPa et un essai de décharge isotrope après un chargement jusqu'à 40 MPa. On constate bien qu'il y a dilatance relative dû au déviateur de contrainte, bien que l'écart des deux courbes au début de l'essai soit moins net qu'en compression.

L'analyse tomographique par rayons X montre la présence de bandes de cisaillement dilatantes dans le domaine fragile. Elle met également en évidence la présence

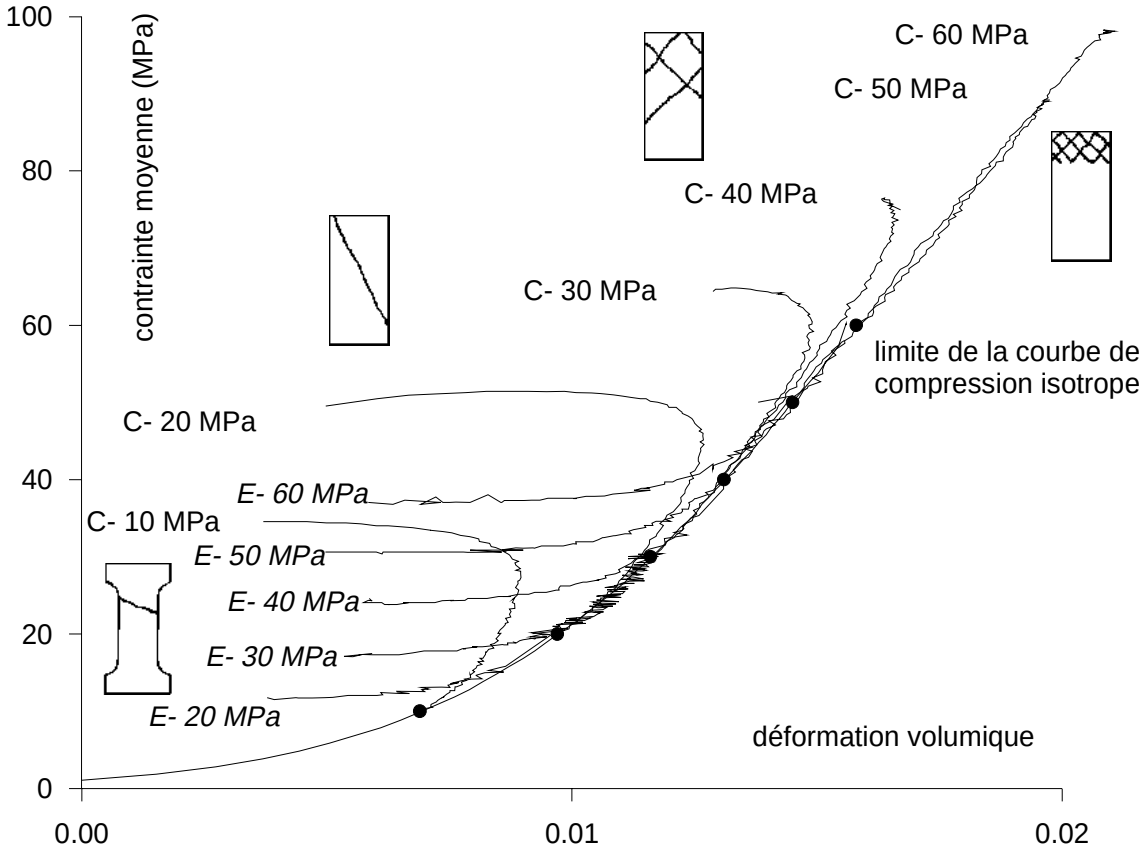


FIG. 4.82 – *Evolution du comportement du Grès dans le plan déformation volumique - contrainte moyenne, sur les chemins de compression et d'extension axisymétriques.*

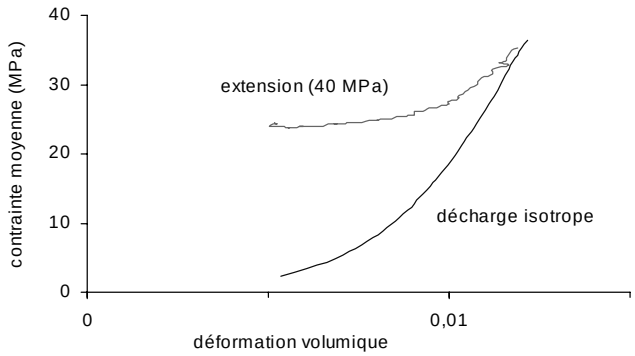


FIG. 4.83 – *Evolution du comportement du Grès dans le plan déformation volumique - contrainte moyenne, sur un chemin d'extension axisymétrique, comparé à une décharge sur chemin isotrope.*

de *bande de cisaillement contractante* sur le domaine intermédiaire. Ce dernier point semble être un résultat assez original, et peu traité dans la littérature (Antonellini *et al.* [3], Hicher *et al.* [71], Olsson [114]).

Cette observation est confirmée par les mesures de porosité par microscopie. On observe en plus précisément l'existence de bandes étroites de grains broyés où la porosité est plus forte que la porosité initiale. Autour de ces bandes, il existe une zone de porosité également plus forte que la porosité initiale pour un essai mené à faible confinement, tandis qu'il existe une zone de porosité plus faible que la porosité initiale pour un échantillon comprimé à un fort confinement.

Les essais d'extension montrent une courbe enveloppe de rupture similaire et tout aussi non linéaire que la courbe enveloppe en compression. Une technique particulière a été nécessaire pour atteindre la rupture, car celle-ci se manifestait lorsque la contrainte devenait négative (contrainte de traction). Une forme spéciale d'échantillon, en bobine, a été utilisée. La rupture se produit également avec l'apparition d'une localisation des déformations dans une bande étroite. La localisation apparaît très peu avant le pic de contrainte en terme de contrainte, mais il existe un palier de contrainte assez long entre le seuil de localisation et le pic de contrainte.

L'orientation des bandes de cisaillement a été mesurée pour chacun des essais. D'une façon systématique, la ou les bandes de cisaillement s'éloignent de la direction de contrainte principale majeure lorsque le confinement augmente. On constate que pour une contrainte moyenne identique, la bande est moins inclinée pour les essais de compression en élancement 1 qu'en élancement 2. Cet effet structural peut être dû à la présence du frettage qui existe aux extrémités de l'échantillon, malgré le soin apporté à la lubrification. Ce frettage joue un rôle plus important dans les échantillons les plus courts, si l'on considère l'importance relative des zones directement influencée par ce frottement (cône de frettage). De même, les angles de bandes sont moins inclinés en extension par rapport à la direction principale majeure, en comparaison des essais de compression. Le changement de type de sollicitation peut en être la cause, mais il faut aussi considérer que la forme des échantillons en extension entraîne des concentrations de contrainte, dans lesquelles les directions de contraintes principales ne sont plus fixes. Une simulation numérique pourrait être intéressante pour éclaircir ce point.

Dans la seconde partie de ce mémoire qui suit, une nouvelle loi de comportement est présentée, avec une identification des paramètres sur le grès des Vosges. Une approche théorique de l'analyse en bifurcation est menée à partir de cette loi de comportement, en prenant en compte les résultats expérimentaux.

Dans la suite de l'étude expérimentale, une étude de la propagation d'une fracture est présentée sur une siltite raide à fine granulométrie. La question de l'existence d'une bande de cisaillement en concomitance avec la fracture y est discutée.

GVR97 - -		confinement (MPa)						
types d'essais	H/D [a]	0,1	10	20	30	40	50	60
compression [b] saturé	2	04		03		02	05	01
compression sec à l'air	2	11	10	12	09	08	07	06
compression sec étuvé	2	20 31	17 26	14 25	19 24	18 23	15 22	16 21 28 30 32
compression sec étuvé	1	45 51	44 50	42 49	48 41	47 40	46 39	43 38
compression sec étuvé, cycles	2	64		61		63		62
pseudo-isotrope [c] sec étuvé	2				57 58			
extension [d] sec étuvé			70	67 71	69	66	68	65 72

TAB. 4.6 – *Tableau récapitulatif des essais triaxiaux, le nombre indique l'extension du nom de l'essai GVR97 - -*

[a] élancement, rapport hauteur sur diamètre
[b] essai de compression, à contrainte latérale constante
[c] essai pseudo-isotrope, à déviateur de contrainte constant
[d] essai d'extension, à contrainte latérale constante

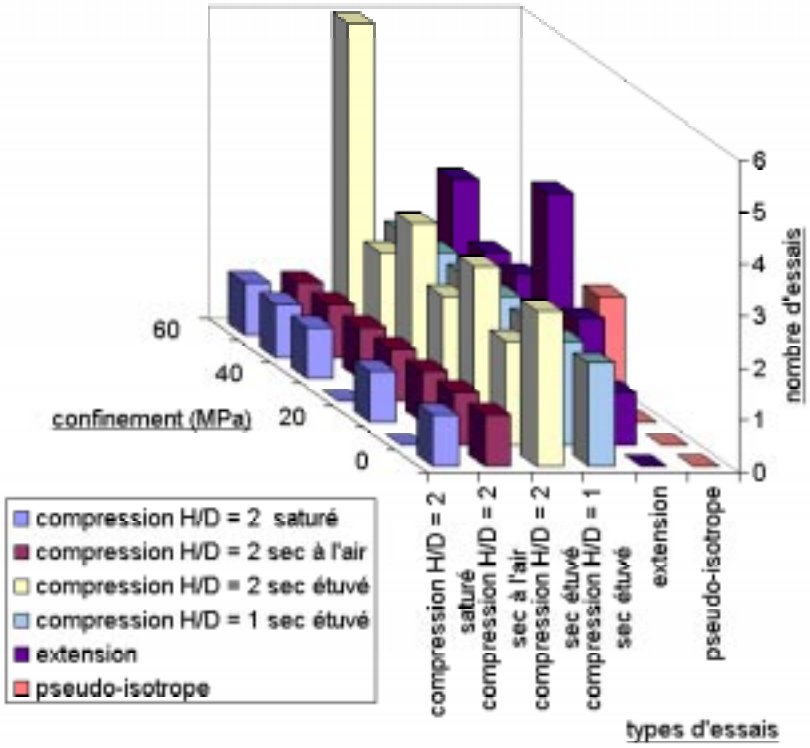


FIG. 4.84 – *Graphique récapitulatif des essais triaxiaux menés sur le grès des Vosges.*

Chapitre 5

Essais de fracturation sur une siltite

L'étude présentée dans ce chapitre est un travail financé par l'ANDRA (agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). Le matériau provient du site du Gard pressenti pour un stockage radioactif en grande profondeur. Ce travail a été effectué avec Dr. Michel Küntz, et a fait l'objet d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final [91], qui sont repris pour partie ici. Les essais ont été réalisés sur une presse du LGM (Laboratoire de Géologie et Mécanique de Grenoble), avec la collaboration de Yves Orengo.

Ce chapitre étudie le mode de fissuration dans une roche homogène à fine granulométrie, en condition non confinée. Une étude de seuil de localisation est menée, avec des jauges de déformation, sur des essais uniaxiaux axisymétriques, et une observation par stéréophotogrammétrie de faux relief du champ de déformation est réalisée sur des essais biaxiaux.

Ce chapitre présente en premier lieu le matériau, puis les essais uniaxiaux et les essais biaxiaux. Une conclusion rappellera les principaux résultats.

5.1 Introduction

Le comportement d'une roche est considéré comme fragile lorsqu'il est caractérisé par une rupture brutale, sans signe précurseur, et en l'absence de déformations antérieures notables. Suivant le niveau de pression moyenne, une même roche peut développer soit un comportement ductile, lorsqu'elle est soumise à un fort confinement, soit un comportement fragile, aux faibles confinements. Dans ce dernier cas, il est classiquement admis que le mode de déformation résulte d'un processus de microfissuration (Paterson [118]). Les fissures initiales jouent alors un rôle important, soit par leur propagation due à un changement de l'état de contrainte, soit comme points de départ pour de nouvelles microfissures induites par le niveau de contrainte différentielle (Bombolakis [21], [22], Tapponnier et Brace [140], Horii et Nemat-Nasser [74], Hallam et Ashby [68]). Il est considéré, de façon générale, que les nouvelles fissures, distribuées à travers tout un échantillon dans le cas d'un essai de laboratoire, s'initient vers la moitié de la contrainte maximale que pourra supporter

la roche, et qu'alors le nombre de ces microfissures et leur longueur augmentent jusqu'à la ruine du matériau, ce qui explique la dilatance constatée pendant cette phase. A l'approche de la rupture, la densité des fissures augmente rapidement et celles-ci se relient entre elles pour former des discontinuités macroscopiques. Cependant, sur des roches particulièrement homogènes, et ayant des grains de taille très fine, ce processus de microfissuration préliminaire à la rupture est presque absent (Houpert [75]).

La théorie de la bifurcation a été appliquée aux sols avec succès. Elle prévoit l'apparition et la propagation de zone où la déformation dans le matériau est localisée (bande de cisaillement). Cette localisation est vue comme la conséquence d'une instabilité mécanique apparaissant lors du chargement, et prédite uniquement à partir des relations constitutives du comportement homogène, avant localisation. Cette théorie montre son intérêt pour les matériaux cohésifs (Vardoulakis et Sulem [153], Vardoulakis [151], Tillard [144]). Les discontinuités macroscopiques du champ de déplacement qu'on observe éventuellement au cours d'un essai sur roche seraient alors l'aboutissement d'une très forte localisation de la déformation à l'intérieur de ces bandes.

Ce travail étudie de façon détaillée l'initiation et la propagation des fissures macroscopiques dans un matériau, ainsi que la cinématique de la fracturation.

5.2 Matériau

Les blocs étudiés, fournis par l'ANDRA, proviennent du forage MAR203. Ces tronçons de forage sont issus des côtes de 581,5 à $581,8\ m$ (échantillon MAR06089) et 593,51 à $593,83\ m$ (échantillon MAR06136). A ces profondeurs, la roche est composée d'alternances carbonatées et bioturbées de siltite argileuse et d'argilite silteuse ([2]). Les tronçons sont des cylindres de diamètre 95 mm. Chacun des deux tronçons est découpé en trois morceaux pour la préparation des éprouvettes (cylindriques ou prismatiques). Le tableau 5.1 trace l'origine des différents échantillons étudiés.

Le découpage, le carottage et la rectification des échantillons ont été effectués à sec pour prévenir toute altération susceptible de se produire au contact de l'eau, notamment le risque de gonflement, et le changement de la teneur en eau susceptible de modifier le comportement mécanique. Lors du carottage, un jet d'air continu à servi a évacuer les résidus de roche et à refroidir le carottier. La rectification a été réalisée au Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) de Lyon.

Analyse structurale : La siltite du Gard est un matériau finement grenu, de teinte gris clair à sombre, présentant un aspect compact et homogène. L'observation d'une section polie (Fig. 5.1), parallèle au sens de carottage, montre une orientation préférentielle relativement perpendiculaire à l'axe des carottes. Des lentilles de couleur claire confirment cette orientation, bien qu'il ne s'agisse pas d'une stratification

échantillons	côtes (m)	essais
MAR95-01	593,51 - 593,61	cylindre
MAR95-02	593,61 - 593,71	cylindre
MAR95-03	593,71 - 593,81	cylindre
MAR95-04	581,50 - 581,60	prisme (Pamar1)
MAR95-05	581.60 - 581.70	cylindre
MAR95-06	581,70 - 581,80	prisme (Pamar2)

TAB. 5.1 – *Présentation des échantillons étudiés.*

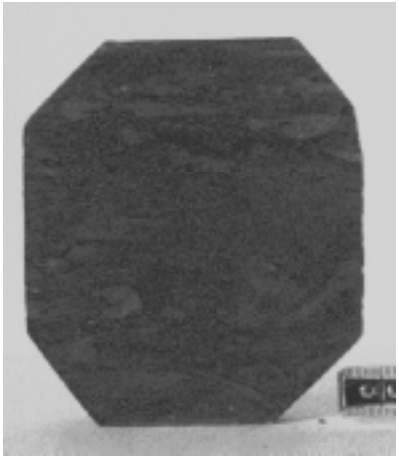


FIG. 5.1 – *Section polie de la siltite, parallèle au sens de carottage.*

régulière. Aucune fracture ou fissure n'est visible à l'œil nu.

Des lames minces ont été examinées au microscope optique avec un grossissement de 10 (Fig. 5.2). A cette échelle, le matériau apparaît homogène. Les grains de quartz de petite taille, aisément reconnaissables, sont réparties dans la matrice sombre. Ces grains sont de forme anguleuse et de granulométrie constante. Leur concentration augmente dans les lentilles claires identifiées sur la section polie. La proportion matrice/quartz change localement, à l'échelle de quelques millimètres, conférant des variation de couleur. Aucune fissure ou pore ne sont identifiés, même à plus fort grossissement.

Composition granulométrique : Une analyse en diffraction X sur roche totale en poudre et sur fraction argileuse a été effectuée par le laboratoire de sédimentologie de l'Institut Dolomieu à Grenoble, sur les résidus de carottage des différents échantillons. Les composants principaux sont le quartz, l'illite, et de carbonates. Le feldspath potassique et la pyrite sont à l'état de traces. Les proportions des différents composants principaux sont résumées dans le tableau 5.2. La composition est globalement monotone, mais laisse apparaître des variations de proportion relative des trois phases majeures. Ces faibles variations témoignent d'une hétérogénéité,

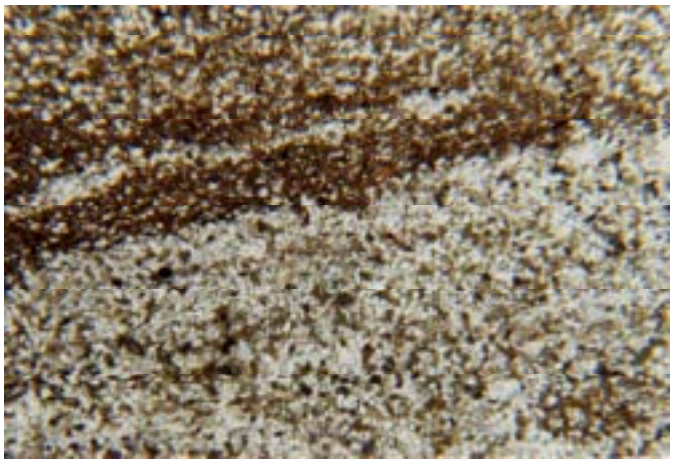


FIG. 5.2 – *Lame mince de la siltite, parallèle au sens de carottage, vue au microscope optique à grossissement 10.*

aussi bien à l'échelle du décimètre que de la dizaine de mètres.

La fraction argileuse (taille inférieure à 2 μm), désignée au sens large par l'illite, a été analysée. La séparation de la fraction fine est obtenue par sédimentation. La composition de cette phase apparaît constante pour les différents échantillons. Les argiles gonflantes smectites et interstratifiées illite-smectite représentent environ 60 % de la fraction fine.

échantillons	carbonates (Ca,Mg,Fe)CO3	quartz	phyllosilicates (illites)	minéraux accessoires
MAR95-01	34	33	27	6
MAR95-02	42	32	21	5
MAR95-03	42	35	15	8
MAR95-04	37	42	19	2
MAR95-06	28	43	25	4

TAB. 5.2 – *Composition minéralogique des échantillons de siltite étudiés.*

Masse volumique et porosité : La masse volumique est calculée à partir de la masse des éprouvettes et du volume estimé par mesure des diamètres et longueurs. Elle est proche de $2,52\ g/cm^3$ (cf. Tab. 5.3). Si l'on considère d'une part cette masse volumique, et d'autre part la composition minéralogique des différents constituants dont on connaît la masse volumique spécifique, il est possible d'estimer la porosité de la siltite du Gard à environ 5 %. La porosité mesurée par le BRGM est du même ordre. C'est donc une roche très peu poreuse.

échantillon	masse volumique (g/cm3)
MAR95-01	2,54
MAR95-02	2,56
MAR95-03	2,54
MAR95-04	2,51
MAR95-05	2,52
MAR95-06	2,48

TAB. 5.3 – *Masses volumiques des échantillons de siltite.*

Vitesses d'onde P : Des mesures de vitesse d'onde de compression P ont été effectuées à l'air ambiant, sur les échantillons MAR95-03, MAR95-04 et MAR95-06, dans plusieurs directions radiales et la direction axiale. Les vitesses mesurées axialement, dans la direction de carottage, sont plus faibles (de l'ordre de 10 %) que les vitesses radiales. Il existe une anisotropie du matériau, résultant vraisemblablement de la structure litée, d'origine sédimentaire de la siltite.

Conclusion : La siltite du gard est un matériau compact dont le porosité est d'environ 5 %, et semble assez constante sur l'ensemble des échantillons. La perméabilité mesurée in situ par le BRGM est faible (de l'ordre de $10^{-12} ms^{-1}$) et suggère que cette porosité est faiblement connectée. Les vitesses de propagation d'onde de compression montrent une anisotropie, de type orthotrope de révolution, parallèle à l'axe des carottes.

La composition minéralogique de la siltite est assez homogène, le quartz les carbonates et les argiles représentant à eux trois 90 % du matériau, dans des proportions égales. Le quartz est présent sous forme de grains anguleux sans fissures (aux échelles d'observation optiques), dont la concentration peut varier localement et qui sont noyés dans une matrice sombre. Le carbonate (CaCO3) semble constituer le ciment entre le quartz et l'argile, à l'origine de la cohésion du matériau.

5.3 Essais en compression simple

Quatre essais en déformation uniaxiale, axisymétriques, ont été réalisés au début de l'étude de façon à déterminer les principales caractéristiques mécaniques de la siltite du Gard. Il s'agissait d'évaluer la résistance du matériau et sa déformation axiale à la rupture, de déterminer l'évolution du comportement lors du chargement et d'identifier les modes de rupture.

La vitesse de chargement, contrôlée en force, a été fixée à 6 kN/mn (soit 80 kPa/s), pour les essais MAR95-01 et MAR95-02. Elle est divisée par dix pour l'essai MAR95-03 (soit 8 kPa/s), pour détecter une éventuelle influence de la vitesse de chargement qui pourrait être due à l'aspect visqueux du comportement de la siltite ou à la génération de surpressions à l'intérieur du matériau du fait d'un mauvais drainage. Des cycles de déchargement à différents niveaux de contrainte axiale ont

été pratiqués lors de l'essai MAR95-05.

5.3.1 Dispositif expérimental

Les essais ont été effectués sur la presse *AMSLER* de capacité 3000 kN, du laboratoire de Géologie et Mécanique (LGM) de l'Université de Grenoble. La presse est constituée d'un bâti et d'un plateau supérieur actionné par un vérin hydraulique. La pression de fluide est générée par une centrale. Il est possible de réguler l'ensemble par une vitesse constante de variation de la force axiale (régulation semi-automatique).

5.3.1.1 Instrumentation

Un capteur de force, posé sur le plateau fixe du bâti, mesure l'effort exercé sur l'échantillon. Celui-ci est positionné sur le capteur, entre les deux est intercalé un plateau élargi et rectifié. La précision de mesure de la force est de l'ordre de 0,2 %.

La rigidité de l'ensemble presse plus capteur a été mesurée en mettant le plateau supérieur de la presse directement en contact sur l'embase élargie du capteur de force. Un capteur de déplacement mesure le déplacement entre le corps du vérin hydraulique et le plateau du piston. Cette mesure prend en compte l'allongement du châssis de la presse (ainsi que la flexion du chevêtre supérieur, la compression du plateau supérieur) et le raccourcissement du capteur, ce qui permet d'évaluer la rigidité de l'ensemble presse et capteur à $1,28\ MN/mm$. C'est un système de chargement plus rigide que les presses classiques (rigidité moyenne de $0,2\ MN/mm$, Bieniawski *et al.* [17], Hudson *et al.* [76]).

Les déformations de l'échantillon sont mesurées par des jauges de déformation (type PL de *Tokyo Sokki*), collées en périphérie de l'échantillon. Ce sont des jauges autocompensées, de résistance 120 Ω, avec un facteur de jauge de 2,13 et admettant une déformation maximale de 5.10^{-2}. La longueur de grille est de 10, 20 ou 60 mm suivant les cas. Les jauges sont collées directement sur l'échantillon, sans préparation de l'état de surface, avec une colle cyanoacrylate (*Vishay* M200). Elles sont connectées, chacune indépendamment, en un montage quart de pont au système d'acquisition. Deux jauges sont collées transversalement, dans deux directions orthogonales et deux jauges axiales sont diamétralement opposées (Fig. 5.3).

Un enregistrement de l'émission acoustique mesure l'activité micro-sismique à l'intérieur de l'échantillon. Deux capteurs ont été utilisés alternativement. Le premier est un microphone à large bande de fréquence 100 kHz -1 Mhz, avec une fréquence de résonance de 135 kHz. Le second est un capteur à faible bande 25 -100 kHz, avec une fréquence de résonance de 35 kHz. Ceux-ci sont connectés à un préamplificateur qui amplifie une première fois les signaux d'émission acoustique et filtre le signal de

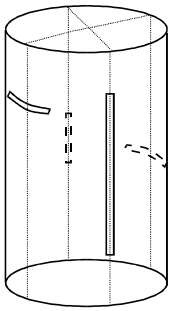


FIG. 5.3 – *Disposition des jauges de déformation sur un échantillon cylindrique.*

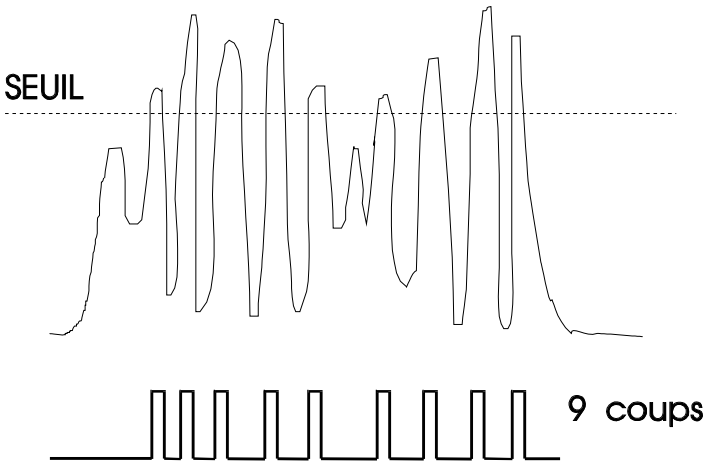


FIG. 5.4 – *Principe du comptage des événements acoustiques.*

façon à éliminer les fréquences parasites. Le signal de sortie du préamplificateur est ensuite conditionné. Dans un premier temps, il est à nouveau amplifié, puis dans un second temps, les signaux dépassants un certain seuil prédéfini par l'utilisateur sont comptés. Tout signaux dépassant ce seuil plus de 75 ns sont enregistrés par le compteur, dont la vitesse d'exécution ne dépasse pas 2 kHz (cf. fig. 5.4). L'état du compteur est régulièrement consulté et enregistré informatiquement. Cela permet d'avoir une indication de la progression de l'activité acoustique au cours de l'essai. Notons toutefois que si deux événements ont lieu en même temps, il ne sont pris en compte que comme un seul événement, et que si un événement subit une atténuation importante entre son lieu d'émission et le capteur, son niveau d'énergie peut ne plus dépasser le seuil défini.

5.3.1.2 Conditions d'essai

Les échantillons cylindriques ont un diamètre de 40 mm et une hauteur proche de 80 mm. Les extrémités sont rectifiées afin de respecter le parallélisme de $\pm 0,05$ mm (un angle inférieur à $0,06^o$) et une planéité de $\pm 0,01$ mm recommandés par la norme ISRM [78]. L'ellipticité des échantillons est inférieure à la valeur de $0,1$ mm recommandée également par la norme ISRM [77]. Aucun dispositif d'antifrettage

n'a été utilisé. Les dispositifs disponibles au moment des essais (graisse au graphite) étaient susceptibles de créer une émission acoustique parasite.

La contrainte axiale est calculée à partir de la force mesurée par le capteur de force, et la section initiale de l'échantillon. On ne tient pas compte ici de l'effet des pressions de pore éventuelles.

5.3.2 Résultats

5.3.2.1 Réponse globale

Les réponses des essais sont assez similaires entre elles. La figure 5.5 montre l'évolution des courbes de déviateur de contrainte et de déformation volumique vis-à-vis de la déformation axiale. L'essai MAR95-01 présente une phase initiale à concavité vers le haut, indiquant une période de fermeture de fissures. Les autres essais ne présentent pas ce comportement, bien que provenant de la même carotte pour les essais MAR95-02 et MAR95-03. La contrainte à la rupture varie entre 68 et 77 MPa, la déformation axiale à la rupture oscille quand à elle entre $6,4.10^{-4}$ et 8.10^{-4}. L'essai MAR95-05, provenant de la carotte moins profonde, admet une déformation légèrement supérieure, mais il semble qu'il existe une dispersion naturelle, même pour des échantillons proches, qui empêche de généraliser à partir d'un essai. Les cycles de déchargement partiel, observables sur les courbes relatives à l'essai MAR95-05, suggèrent qu'il existe des déformations irréversibles dès le début du chargement. Des cycles de déchargement complet seraient nécessaires pour le confirmer. Par contre, les pentes de ces petits cycles, qui présentent une faible hystérésis, sont relativement constantes (cf. Tab. 5.4). Il ne semble donc pas qu'il y ait d'endommagement, au sens d'altération des modules de décharge-recharge, au cours du chargement, au moins jusqu'à 80 % de la contrainte axiale à la rupture.

Le comportement volumique est contractant initialement puis devient dilatant à l'approche de la rupture. On observe une dispersion substantielle des comportements en terme de déformation volumique.

L'essai MAR95-03 a été effectué avec une vitesse de chargement dix fois plus lente que les autres essais. Ce changement ne montre pas de conséquence notable sur les courbes de réponse. L'aspect éventuellement visqueux de la roche ou l'effet des surpressions interstitielles ne sont pas mis en évidence dans cette gamme de pression.

5.3.2.2 Précurseurs de la rupture

Deux précurseurs potentiels de la rupture sont étudiés, d'une part l'émission acoustique, supposée révélatrice de l'activité d'endommagement dans l'échantillon, et d'autre part l'évolution comparée des déformations locales.

L'émission acoustique enregistrée au cours de ces essais, soit avec le capteur large bande $0,1 - 1$ Mhz, soit avec le capteur faible bande $25 - 100$ kHz, révèle

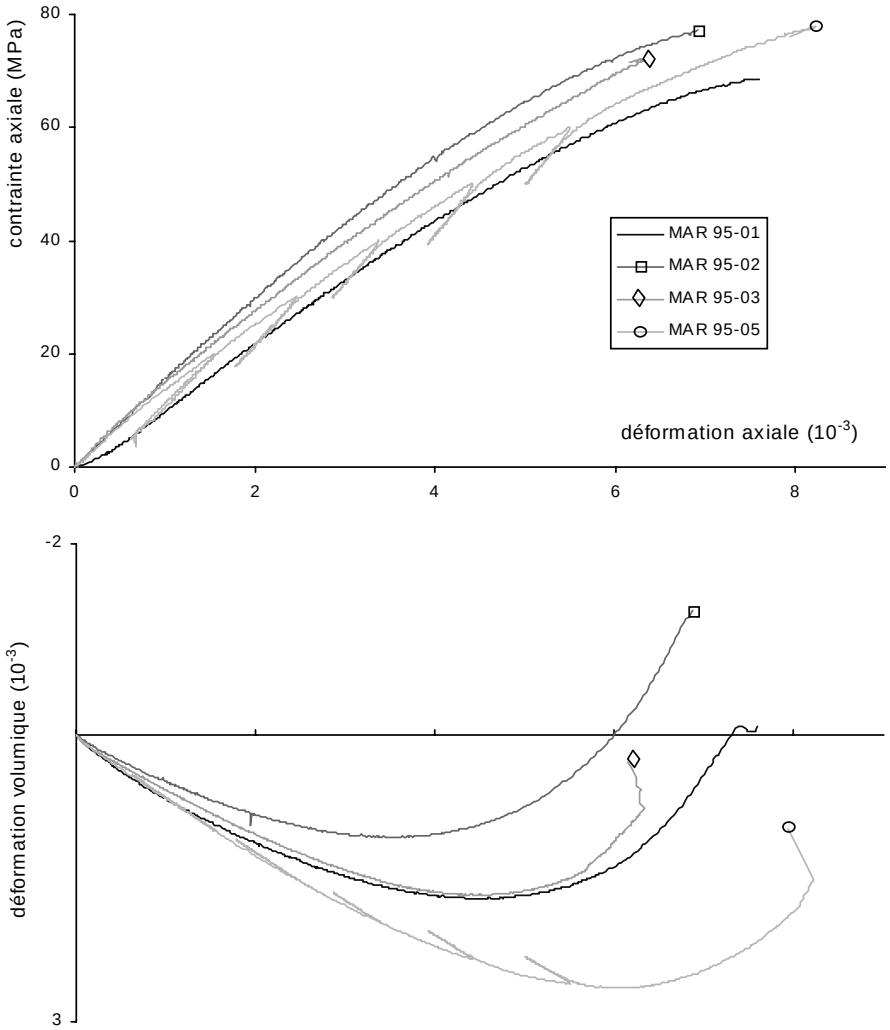


FIG. 5.5 – *Comparaison des courbes de contrainte et déformation volumique des essais uniaxiaux sur la siltite.*

cycles	taux de chargement (%)	module (GPa)
cycle 1	26	17,9
cycle 2	39	19,8
cycle 3	51	19,8
cycle 4	64	21,7
cycle 5	77	20,4

TAB. 5.4 – *Caractéristiques des cycles de décharge de l'essai MAR95-05 pour différentes contraintes axiales, exprimées en pourcentage de le contrainte au pic. Le module moyen est de* $19,92 \pm 2$ *GPa, soit une variation de 20 % seulement pour 300 % de variation du taux de chargement.*

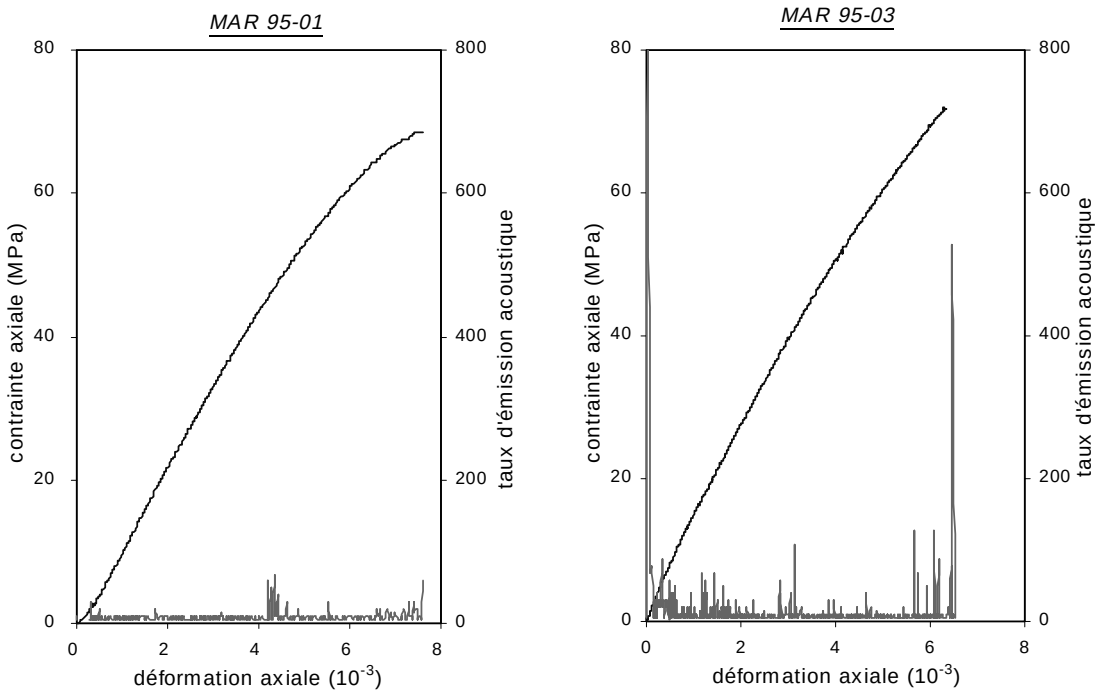


FIG. 5.6 – *Evolution des émissions acoustiques lors des essais MAR95-01 (bande passante* $0,1 - 1$ *MHz) et MAR95-03 (bande passante* $25 - 100$ *kHz). Les taux d'émissions sont exprimés en nombre de "coups" mesurés par intervalles de 5 secondes.*

une activité acoustique très faible (en comparaison avec d'autres types de roches testées avec le même montage expérimental à titre de comparaison : granite, marbre, grès) (Fig. 5.6). Il y a une production de quelques événements notables seulement très près du pic de contrainte, juste avant la rupture brutale des échantillons. Bien qu'il ne soit pas possible de dire quoi que ce soit sur l'énergie dissipée puisque l'intensité des événements n'est pas prise en compte, cela semble confirmer l'absence d'endommagement notable de la structure de la roche lors du chargement, avec création ou propagation de microfissures.

Le deuxième précurseur étudie l'évolution comparée des déformations latérales dans deux directions orthogonales. Cette technique est déjà évoquée dans l'étude expérimentale sur le grès des Vosges, et s'appuie entre autres sur les travaux de Hadley [65], Santarelli [127], Kondo *et al.* [88], [89]. La perte d'homogénéité du champ de déformation, associée à l'apparition de la localisation des déformations, correspond à une perte de la proportionnalité d'une déformation latérale par rapport à une autre, prise dans une autre direction; autrement dit, par une perte de linéarité de la courbe représentant les deux déformations latérales orthogonales, l'une vis-à-

vis de l'autre. L'écart type de la linéarisation de cette courbe est calculée sur une succession de fenêtres de tailles croissantes. Une perte de linéarité de cette fonction, se manifestant par un changement dans l'évolution de l'écart type, est observée avant le pic, entre 93 % de la contrainte axiale pour MAR95-03 et 97-98 % pour les autres essais. Ce moment de divergence correspond approximativement aux quelques événements acoustiques observés (Fig. 5.7).

5.3.2.3 Mode de rupture

La rupture brutale des échantillons est due au relâchement de l'énergie élastique emmagasinée par le système de chargement et l'échantillon lui même. C'est une rupture de type explosive, avec éjection de petits morceaux de roche. L'organisation des fractures est la combinaison de discontinuités verticales, produites par un mécanisme d'ouverture, et de discontinuités inclinées ayant visiblement subi un mécanisme de cisaillement (Fig. 5.8). Ces différentes fissures peuvent être reliées entre elles. Globalement, il existe un plan de fracture majeur (MAR95-01 et MAR95-05) ou deux plans inclinés conjugués (MAR95-02 et MAR95-03). Il y également formation d'un cône de frettage sur certaines extrémités d'échantillon, dû probablement au frottement tangentiel du contact avec les embases.

5.3.3 Conclusion

La siltite de Gard présente une résistance de l'ordre de 70 à 75 MPa, pour une déformation axiale d'environ 7.10^{-3}. La comportement semble homogène tout au long de l'essai, jusqu'à la rupture brutale des échantillons. Il n'y a semble-t'il pas d'endommagement progressif du matériau, ceci étant indiqué par des modules de déchargement constants pour plusieurs niveaux de contrainte axiale et une activité acoustique quasi inexistante. Le précurseur de la rupture obtenue à partir des déformations latérales indique une perte d'homogénéité tardive, autour de 98 % de la charge de rupture pour l'ensemble des essais.

5.4 Rupture progressive sur parallélépipèdes

Le second volet de l'étude expérimentale sur la siltite du Gard, envisage l'observation et la caractérisation de la fracturation au regard des contraintes et déformations mesurées. Il s'agit notamment de caractériser le passage d'un mode de déformation diffus à un mode de déformation localisé, avec en point final un champ de déformation discontinu. Le mécanisme et la cinématique de fonctionnement des fissures sont également définis.

Les techniques de mesure mises en œuvre ici, les jauges de déformation et la stéréophotogrammétrie, fournissent des mesures macroscopique. On ne peut pas envisager de caractériser par ces méthodes les micromécanismes de déformation.

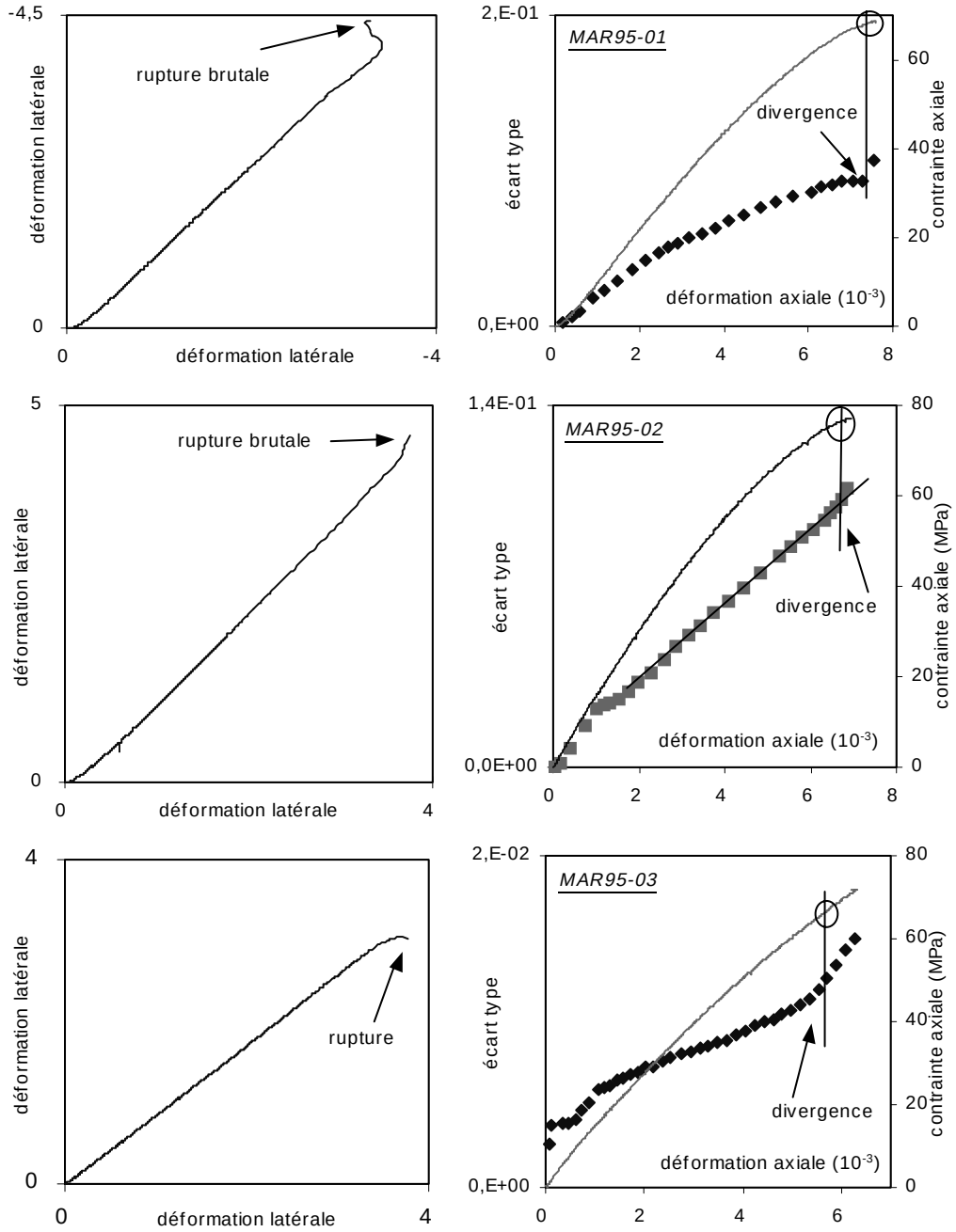


FIG. 5.7 – *Evolution d'une déformation latérale vis-à-vis de la déformation latérale orthogonale, et de l'écart type de la linéarisation de cette courbe sur une série de fenêtres de tailles croissantes : exemple des essais MAR95-01, MAR95-02 et MAR95-03.*

MAR95-01 MAR95-02

MAR95-04 MAR95-05

FIG. 5.8 – *Echantillons fissurés après la compression uniaxiale.*

La technique optique de stéréophotogrammétrie de faux relief nécessite d'avoir une surface plane de l'échantillon. De plus, l'échantillon ne doit pas, ou peu, se déformer suivant la direction de visée (condition de déformation plane). L'idéal serait d'avoir un système de chargement qui empêche la déformation dans cette direction (c'est ce qu'on appelle un appareil biaxial en déformation) et qui permette de visualiser la face plane de l'échantillon. Un appareil de ce type a été développé au laboratoire 3S, par Jacques Desrues, pour l'étude de matériaux de faible rigidité (matériaux granulaires, argiles, roches très tendres), mais n'est pas utilisable pour la siltite du Gard.

D'autre part, il convient de pouvoir appliquer le chargement de façon progressive, même après le pic, pour pouvoir observer les fissures. La rigidité de presse *AMSLER* du laboratoire LGM, ne permet pas ce contrôle, comme on l'a vu pour les essais uniaxiaux axisymétriques. Une technique simple pour rigidifier la presse a donc été mise en place.

Nous abordons dans un premier temps ces techniques expérimentales, pour pouvoir ensuite présenter les résultats.

5.4.1 Techniques expérimentales

5.4.1.1 Rigidification de la presse

Lorsque l'on charge un échantillon de roche sur une presse mécanique conventionnelle, le matériau reprend la charge imposée jusqu'à un maximum de contrainte axiale, limite à laquelle l'échantillon se rompt brutalement. Le comportement de type explosif est dû à la relaxation de l'énergie élastique stockée par le dispositif pendant la compression. Cette relaxation se produit au moment de la rupture de l'éprouvette et elle induit une accélération de la vitesse de déformation d'autant plus brutale que le bâti est déformable (i.e. que l'énergie de déformation stockée pendant le chargement est importante), conduisant généralement à la ruine instantanée de l'échantillon. La rupture explosive dépend donc de la rigidité du système de chargement, plutôt que des seules caractéristiques de l'échantillon.

Un moyen de prévenir la rupture explosive de l'éprouvette consiste à augmenter la rigidité de la presse, ce qui revient à diminuer la quantité d'énergie de déformation emmagasinée pendant la compression, et qui est restituée au moment de la perte de la capacité du matériau à soutenir la charge. Pour obtenir ce résultat, on peut envisager des bâtis de presse très massifs, mais cette solution coûteuse et encombrante n'est plus guère utilisée. Une alternative est la "rigidité virtuelle" qui consiste à équiper un bâti de calibre normal d'un vérin et d'une centrale hydraulique capables de compenser en temps réel la détente élastique du bâti et de l'échantillon au moment de la rupture. Cette solution est bonne mais coûteuse en équipement, nous n'en disposons pas dans le cadre de cette étude. Une autre alternative repose sur une idée très simple, déjà proposée par Bieniawski [17] et par Brady [28], [27]. Deux piliers

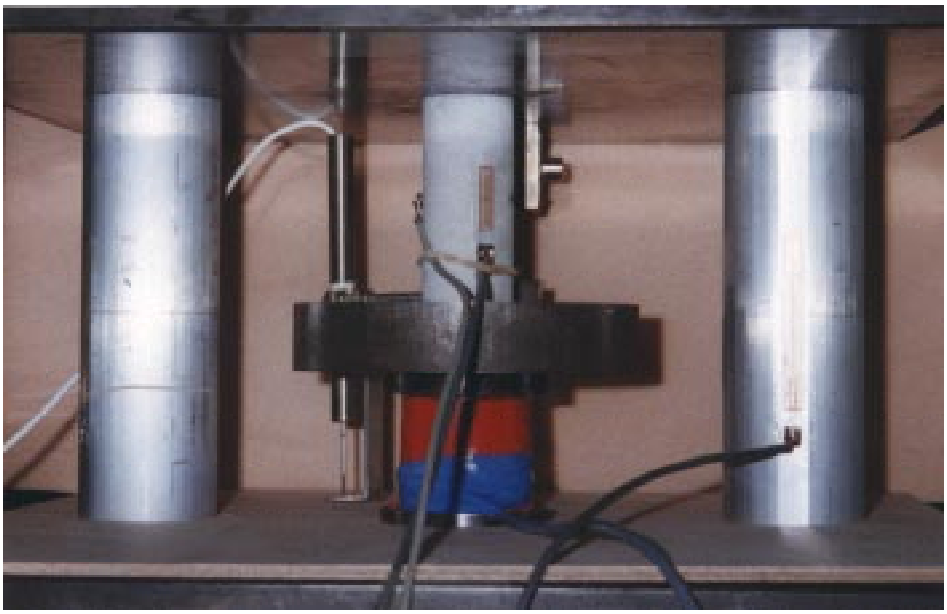


FIG. 5.9 – *Installation de rigidification de la presse : deux piliers en parallèle avec l'échantillon monté sur le capteur de force.*

sont placés en parallèle avec l'échantillon entre les plateaux de la presse (Fig. 5.9). Au cours de l'écrasement, l'échantillon est soumis, comme en l'absence des piliers, à un raccourcissement progressif. Seule la presse *voit* la différence, c'est à dire qu'elle doit appliquer une charge correspondant à l'écrasement de l'échantillon et des piliers simultanément. Si on enregistre la charge appliquée à l'échantillon seulement, par l'intermédiaire d'un capteur de force convenablement disposé, la caractéristique charge-déplacement pour l'échantillon n'est pas modifiée par ce dispositif. La différence entre ce montage et le montage standard, i.e. sans piliers, se manifeste lorsque l'échantillon atteint un pic de résistance : la poursuite du raccourcissement progressif de l'échantillon reste possible, car les piliers continuent à résister au raccourcissement. Il n'apparaît plus une détente élastique brutale du bâti qui précipite la ruine de l'échantillon. On peut ainsi suivre le développement de la rupture de ce dernier, du moins tant que le taux de perte de résistance de l'échantillon demeure inférieur à une certaine valeur, qui peut être précisée par une étude de stabilité.

Suivant Hudson *et al.* [76], si l'on considère la presse comme un ressort de rigidité k_m et qu'on appelle μ la pente tangente (négative) de la courbe force-déplacement de l'échantillon de roche au cours de la phase post-pic (Fig. 5.10.a), la condition de stabilité de l'ensemble presse-échantillon s'exprime par la relation $k_m + \mu > 0$. Cette condition n'est pas respectée pour une presse "molle" (rigidité k_m faible) et la propagation non contrôlée des fissures conduit à la rupture explosive de l'éprouvette. Lorsqu'on fait entrer en jeu les piliers dans le dispositif, si l'on nomme k_p la rigidité des piliers (Fig 5.10.b), la rigidité équivalente de l'ensemble échantillon + piliers est $k_p + \mu$. La condition de stabilité s'écrit donc, en remplaçant μ par la rigidité

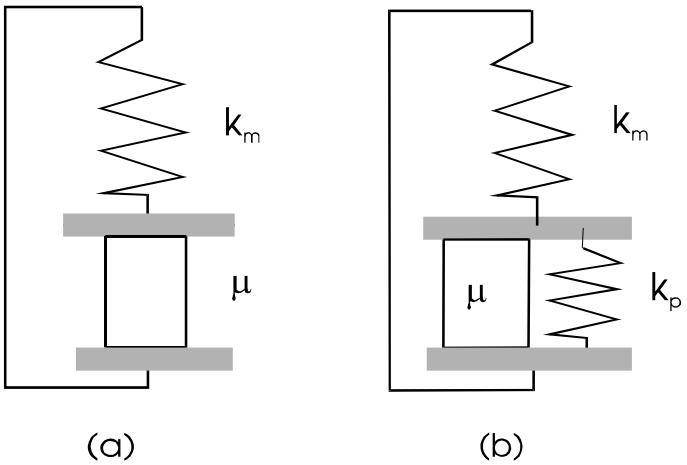


FIG. 5.10 – *Schéma du système de chargement : échantillon et presse seul (a), piliers montés en parallèle de échantillon et presse.*

équivalente:

$$k_m + k_p + \mu > 0$$

On notera que l'effet du dispositif sur la réponse de l'échantillon est limitée à la phase post-pic du comportement, qui de toute façon est marquée par la perte d'homogénéité et donc non interprétable en termes de propriétés intrinsèques.

Les piliers sont en alliage d'aluminium AU4G, de module d'Young égal à 70 GPa et de limite élastique d'environ 0,4 %, et ont une section de 60 mm et une hauteur de $188,5$ mm (soit un peu plus de deux fois la hauteur des éprouvettes). Les deux piliers ont été usinées en même temps de façon à ce que les deux pièces soient rigoureusement identiques. Le parallélisme des surfaces d'appui, mesurée sur un marbre mécanique à l'aide d'un comparateur au $1/100^{eme}$ est de $\pm 0,015$ mm. Les caractéristiques mécaniques et géométriques des piliers ont été définies en prenant en compte les capacités de la presse (3000 kN) et les valeurs de déformation du matériau mesurée au pic de contrainte. En conditions d'utilisation, l'éprouvette est placée sur un capteur de force de rigidité $4,33$ MN/mm. La hauteur des piliers est légèrement inférieure à la hauteur (épouvette + capteur) au repos, de façon à ne charger les piliers qu'à l'approche du pic de contrainte axiale. Cette disposition permet de demeurer dans le domaine élastique de l'alliage même lors de l'écrasement complet de l'échantillon et prévient la sollicitation excessive du dispositif de chargement. La rigidité mesurée des piliers est de $2,08$ MN/mm.

Différentes roches ont été testées de façon à vérifier l'efficacité mais aussi les limites de la méthode. Deux essais réalisés sur des éprouvettes du marbre de Vilette (un essai sans le dispositif des piliers, un autre avec le dispositif) sont illustrés sur la figure 5.11. En l'absence des piliers, une rupture explosive est obtenue pour une contrainte axiale de 100 MPa et une déformation axiale égale à $2,06.10^{-3}$. La contrainte axiale devient immédiatement nulle juste après le pic. En présence des piliers, la rupture du marbre de Vilette est progressive et la totalité de l'évolution

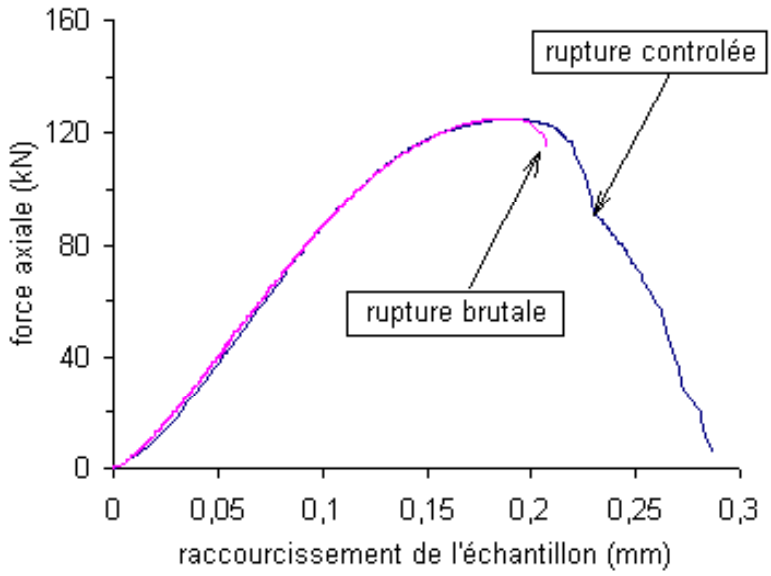


FIG. 5.11 – *Evolution de la contrainte axiale vis-à-vis de la déformation axiale, sur un échantillon de marbre de Vilette, en compression simple. L'essai avec presse rigidifiée est comparé avec l'essai sur presse normale (rupture brutale).*

post-pic de l'essai est enregistrée. La charge exercée sur l'échantillon avant le pic est progressivement transférée aux deux piliers d'aluminium après le pic, permettant une déformation contrôlée de l'éprouvette après rupture. Notons que la présence des piliers ne modifie ni l'aspect de la courbe contrainte-déformation ni la valeur du module de déformation et que les valeurs de la contrainte et de la déformation axiales au pic sont identiques pour les deux essais.

Un échantillon du granite de Sidobre a été testé dans les mêmes conditions. On obtient cette fois-ci une rupture explosive malgré le dispositif des piliers pour une contrainte et une déformation au pic respectivement égales à 171 MPa et 3.10^{-3}. La méthode ne permet donc pas dans tous les cas de contrôler le processus de la rupture. Dans certains cas, la relaxation de l'énergie élastique stockée dans l'échantillon lui-même est suffisante pour précipiter la ruine de l'éprouvette. Seul un contrôle dynamique du chargement peut alors permettre d'éviter l'explosion (presse à rigidité virtuelle). On peut espérer de cette méthode, sinon un contrôle total de la phase post-pic, au moins un contrôle du début de cette phase, avant que la pente négative de la courbe de charge - racourcissement de l'échantillon testé ne devienne trop forte.

5.4.1.2 La stéréophotogrammétrie de faux relief

La stéréophotogrammétrie de faux relief permet de déterminer avec précision le champ de déplacement de la face observée de l'échantillon. En condition de déformation plane, ce qui est presque notre cas ici, ce champ est représentatif du champ de déformation de toute les coupes internes parallèles à cette face observée. On peut

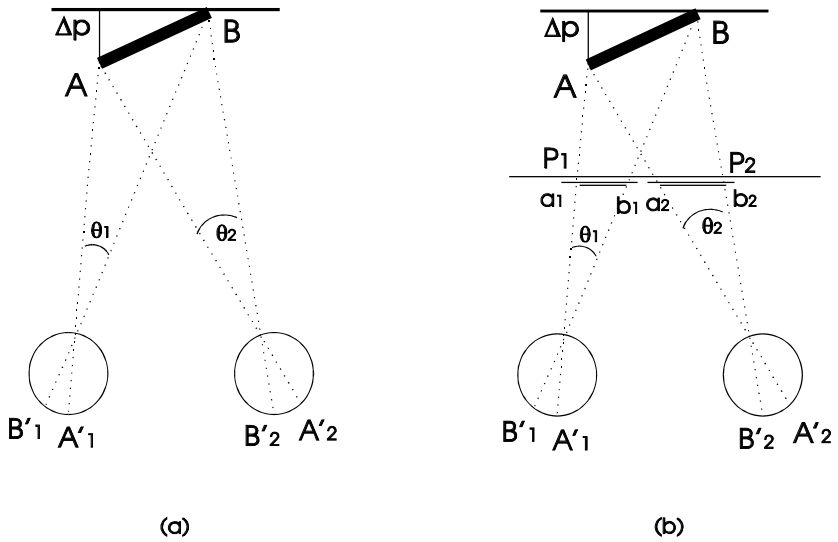


FIG. 5.12 – *Principe d'utilisation de la vision stéréo, par la méthode de stéréophotogrammétrie.*

alors raisonnablement supposer connaître le champ de déformation dans les trois dimensions, sur l'échantillon entier.

Cette technique a été initiée dans les années 70 (Butterfield *et al.* [30], Bonneval [23], et appliquée notamment dans les travaux de Beynet [16], Bénéfice et Boehler [10] sur les métaux et Desrues [52], [53] sur les matériaux granulaires.

5.4.1.2.1 Principe de la méthode La stéréophotogrammétrie, dans le sens général, est une technique qui utilise le principe de perception de relief par l'appareil visuel d'un individu. Un même objet est vu sous des angles très légèrement différents par les yeux de l'individu. Un objet linéaire AB se projette sur la rétine de l'œil gauche par le segment $A'_1B'_1$ et sur celle de droite par le segment $A'_2B'_2$ (Fig. 5.12.a). L'objet est perçu par l'œil gauche sous un angle θ_1 et l'œil droit sous un angle θ_2. C'est cette différence qui est interprétée comme le relief Δp. Si on interpose un écran fictif entre l'individu et l'objet AB, la vision de l'œil gauche intercepte l'écran par le segment a_1b_1 et l'œil droite par a_2b_2 (Fig. 5.12.b). La stéréophotogrammétrie consiste à remplacer l'objet réel par deux photographies P_1 et P_2 représentant respectivement les segments a_1b_1 et a_2b_2. On peut donc avoir une perception de relief à partir de deux photographies.

La stéréophotogrammétrie ordinaire (vrai relief) utilise des photographies d'un objet indéformable, prises sous deux angles différents, pour restituer l'objet dans sa géométrie tridimensionnelle. Les applications sont la topographie par photographie aérienne, ou encore la photogrammétrie industrielle (caractérisation géométrique ultra fine d'objets industriels ou de batiments). Dans ces cas, le relief perçu correspond effectivement à la vraie géométrie de l'objet ou du terrain.

La stéréophotogrammétrie de faux relief au contraire, utilise des photographies

d'un objet déformable, prises sous un angle unique. Les photographies correspondent à différents états de déformation de l'objet, mais par cette technique, la déformation entre deux états peut être visualisée sous la forme d'un faux relief.

Cette vision qualitative en relief du champ de déformation d'une face d'un objet peut être quantifiée en utilisant les appareils développés pour la topographie (appareil *LEICA* DSR 15 au Laboratoire 3S). Si autour de l'objet qui est déformé entre les deux moments de prise photographique, il existe un certain nombre de points fixes, il est possible de définir un repère fixe de référence. Les deux couples de coordonnées, dans ce repère, d'un même point matériel de l'objet dans les deux états de déformation permettent de connaître le déplacement de l'objet entre ces deux états. L'appareil sert à mesurer ces couples de coordonnées des deux points homologues sur les deux photographies. Une série de mesures sur plusieurs points disséminés sur toute la face de l'échantillon, permet par des outils mathématiques de passer de la grille aléatoire des mesures de déplacement à un champ de déplacement interpolé puis à un champ de déformation.

L'échantillon est recouvert de petites taches de peinture avant l'essai, ce qui permet d'identifier les deux points homologues (représentant le même point matériel de l'objet) sur les deux photos. Un quadrillage de la face observée facilite également ce repérage.

5.4.1.2.2 Analyse des discontinuités L'analyse en terme de champ de déformation continue n'est plus suffisante lorsque des discontinuités apparaissent. La fissure est en effet le lieu d'une discontinuité du déplacement dont il faut pouvoir rendre compte au moment de l'analyse du champ de déplacement. La procédure du traitement en fissures, résumée ici, est expliquée de façon détaillée par Desrues [55]. Le déplacement d'une série de points est mesuré sur l'une puis l'autre lèvre de la fissure, au plus près de la discontinuité de déplacement. Pour calculer le saut de déplacement au travers de la fissure à partir d'un ensemble de points distribués de façon quelconque autour de la discontinuité, il faut pouvoir déterminer le déplacement de deux points en regard de part et d'autre de la fissure. Les étapes du calcul sont illustrées sur la figure 5.13.

- calcul de la longueur de la première lèvre. La lèvre est définie comme la suite des segments qui relient les points mesurés sur cette lèvre. La longueur de la lèvre est donc la somme de la longueur des segments (Fig. 5.13.b)

- interpolation, à partir des points mesurés, de la fonction de déplacement le long de chaque lèvre pour obtenir un ensemble de points régulièrement répartis sur la fissure, avec une abscisse curviligne augmentant régulièrement.

- détermination sur la seconde lèvre des coordonnées du point en regard du point courant de la première lèvre. Le point est situé à l'intersection de la seconde lèvre avec la normale à la première lèvre, au niveau du point courant (Fig. 5.13 d et e).

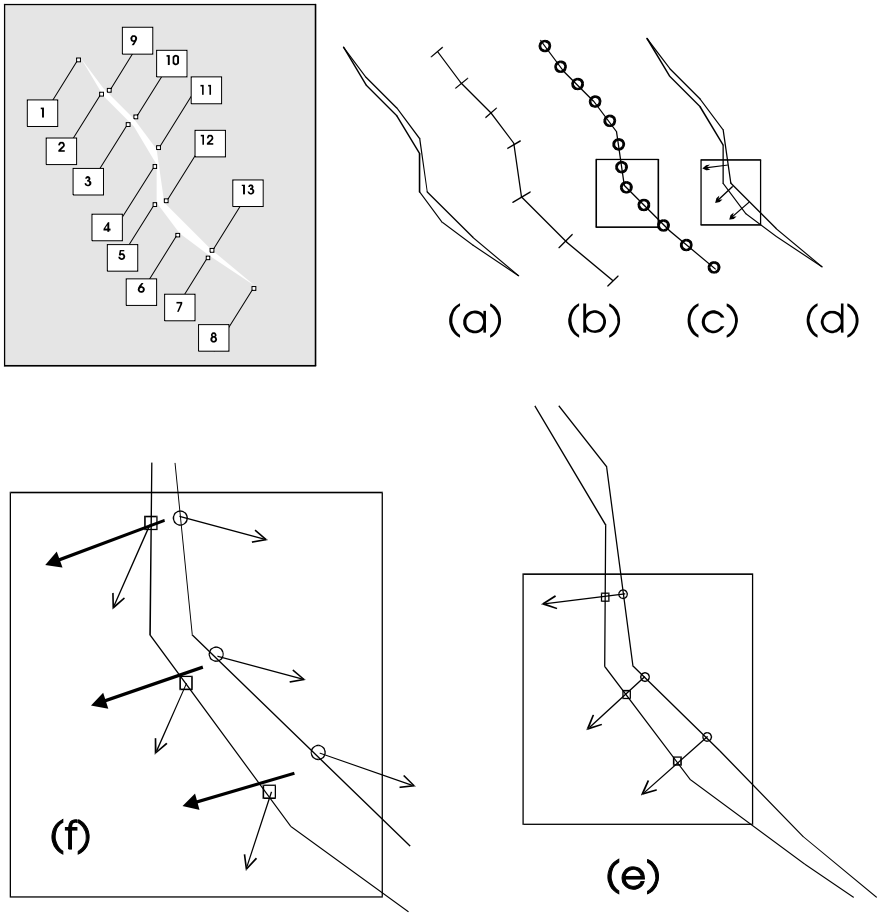


FIG. 5.13 – *Calcul du saut de déplacement à travers la fissure: la lèvre 1 de la fissure (a) est constituée de n segments comme on le voit en (b) ; des points sont régulièrement répartis le long de cette lèvre (c), et pour chacun d'eux, la normale à la lèvre est définie(d); ceci permet de déterminer les points en regard sur l'autre lèvre (e) et enfin de calculer le vecteur déplacement relatif comme la différence des déplacements des deux points (f).*

- l'interpolation curviligne effectuée respectivement sur la première et la seconde lèvre de la fissure fournit les composantes des vecteurs déplacement des deux points en regard (Fig. 5.13.f)
- le saut de déplacement sur la fissure est défini par la différence entre les composantes du déplacement déterminées pour chaque couple de points (Fig. 5.13.f).

Ce saut est représenté comme un vecteur, ou par ses composantes projetées sur la direction de la fissure, ce dernier mode de représentation permettant de séparer la composante en ouverture (normale) de la composante en cisaillement (tangentielle) dans le plan de la fissure. La méthode a été mise en oeuvre avec succès par Tillard [144] sur la marne de Beaucaire, Torrenti *et al.* [145], [146], [147] et Benaija [9] sur les bétons.

Dans l'étude de la transition de la déformation diffuse à un mode localisé avec apparition de fissures, l'utilisation conjointe des deux outils de dépouillement est intéressante car l'un et l'autre sont complémentaires. On accède par le traitement en fissure, au mode de fonctionnement et à la quantification du déplacement relatif des deux lèvres de la fracture. L'analyse en champ de déformation, quant à elle, peut mettre en évidence l'organisation globale et permettre le suivi des évolutions des composantes continues et localisées de la déformation à l'échelle de l'échantillon.

5.4.1.2.3 Précision des mesures La précision de ces mesures dépend bien sûr de l'appareil de mesure, des défauts optiques de l'appareil photographique (*HASSEBLAD* 6x6) mais aussi de la faculté de l'opérateur à travailler avec les deux yeux indépendamment, alors que la vision normale définit un œil directeur prédominant. L'étude menée par Benaija [9] et Torrenti *et al.* [146] a comparé la précision des mesures, suivant que l'utilisateur est habitué à ce travail ou non. Avec une grande habitude, la dispersion des mesures peut être divisée par un facteur huit.

La précision de mesure des cordonnées de deux points homologues sur l'appareil *LEICA* DSR15 utilisé est de $0,002\ mm$. Si l'on tient compte du facteur d'échelle entre les négatifs sur lesquels sont faites les mesures, et la taille réelle des échantillons, la précision de la mesure du déplacement d'un point entre deux photos est de $0,008\ mm$.

L'opérateur commet des erreurs inévitables lorsqu'il doit définir les points homologues sur les photographies correspondants exactement au même point matériel de l'échantillon. Cette erreur reste très acceptable pour des matériaux granulaires. Pour une roche raide comme la siltite, admettant de faibles déplacements, il est nécessaire de réduire cette source d'erreur. Une procédure de fiabilisation a donc été introduite pour cette étude. Plutôt que de ne faire qu'une seule mesure par point, les coordonnées d'un point sont définies par la moyenne d'une série de mesures. Cette série comprend au moins cinq mesures, et se poursuit tant que l'écart type des mesures n'est pas inférieur à une limite prédéfinie par l'opérateur. Cette technique a permis dans le cas présent de garantir une précision de la mesure réalisée par l'opérateur de $0,015\ mm$ à l'échelle de l'échantillon.

5.4.1.3 Préparation des éprouvettes

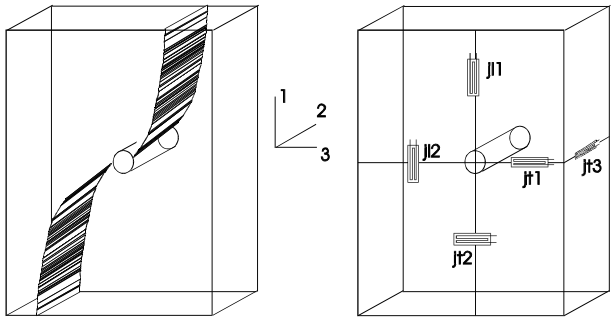
5.4.1.3.1 Géométrie La technique de stéréophotogrammétrie de faux relief nécessite en toute rigueur que le déplacement de la surface photographiée de l'échantillon, dans la direction de visée de l'appareil photographique et donc perpendiculaire à cette surface, soit nul. Cette condition sera d'autant mieux respectée que l'épaisseur de l'échantillon dans cette direction sera faible. Les échantillons testés ont une épaisseur de 20 mm pour le premier, et 30 mm pour le second, pour une hauteur de 90 mm et une largeur de 57 mm. Les travaux de Torrenti [147] et Benaija [9] reposent aussi sur cette hypothèse que les déplacements perpendiculaires à la face observée de l'échantillon sont très faibles.

Pour apprécier les conséquences d'une déviation par rapport à la condition idéale de déplacement hors plan nul en tout point, il faut noter que dans un mouvement hors plan d'amplitude δ, un segment voit sa longueur apparente augmentée de façon homothétique à δ par rapport au foyer le l'objectif photographique. Par exemple, pour une distance de 1 m, un déplacement de $0,1$ mm produira une déformation apparente de 10^{-4} dans le plan. Un tel déplacement hors plan, pour nos éprouvettes de 30 mm d'épaisseur, correspondrait à une dilatation latérale de l'échantillon de $3,3.10^{-3}$, ce qui correspond approximativement à une déformation axiale de 7.10^{-3}, soit environ la déformation maximum à la rupture. La perturbation maximum introduite par ce déplacement hors plan peut donc être estimée à 10^{-4}, soit un ordre de grandeur en dessous de la résolution des mesures en terme de déformation. Elles seront noyées dans le bruit résiduel et donc négligeables.

L'analyse de la cinématique de la fissure impose d'autre part que l'observation se fasse dans le plan de la fissure, i.e. que la fissure soit dans l'axe de visée de l'appareil photographique. Pour imposer une telle condition, un trou de faible diamètre (4 mm) a été pratiqué dans cette direction au centre de l'échantillon. Celui-ci joue le rôle de point de nucléation et impose aux fissures de passer par son axe (Fig. 5.14.a). Ainsi, les déplacements mesurés sur les bords visibles des fissures sont représentatifs de la cinématique de celles-ci. Des comparaisons de comportement, réalisées par Labuz *et al.* [93], sur des parallélépipèdes de grès en conditions biaxiales, percés ou non, montrent que le mécanisme de rupture n'est pas profondément changé, et que les angles des plans de cisaillement restent identiques, seul le point d'initiation de la fissuration change, passant d'un coin de l'échantillon au trou central. Par contre, Haied [67], en comparant des parallélépipèdes percés ou non, en conditions triaxiales, a observé que la présence du trou diminuait sensiblement l'angle entre le plan de rupture et la direction de contrainte principale majeure, et augmentait l'épaisseur de bande de cisaillement.

5.4.1.3.2 Instrumentation La contrainte axiale exercée sur l'échantillon est mesurée avec une précision de 0,2 % par l'intermédiaire d'un capteur de force de capacité 600 kN centré sur le plateau inférieur de la presse.

Des jauges d'extensométrie placées à la surface de l'échantillon permettent de



(a) (b)

FIG. 5.14 – *Géométrie de l'échantillon parallélépipèdique, percé en son centre. Les fissures formées ont une de leurs directions parallèle à l'axe du trou (a). L'échantillon est équipé de plusieurs jauges dans les trois directions de l'espace (b).*

déterminer l'évolution des déformations axiales et transversales de l'éprouvette pendant la phase de chargement. Ce sont des jauges FLA 5-11 (*Tokyo Sokki*) de longueur 5 mm, de résistance 120 Ω et ayant un facteur de jauge égal à 2,13. Les jauges sont reliées en montage quart de pont au système d'acquisition. La figure 5.14.b illustre la façon dont les jauges ont été disposées sur le parallélépipède.

Une jauge transversale est placée selon l'épaisseur de l'éprouvette, à mi-hauteur, de façon à mesurer la composante ε_2 de la déformation pendant l'essai. Deux jauges transversales et deux jauges longitudinales sont placées sur la face avant du spécimen et permettent de mesurer les composantes ε_1 et ε_3 de la déformation. La disposition relative des quatre jauges a été choisie de manière à mettre en évidence une perturbation éventuelle de la déformation locale autour du trou.

Le déplacement entre la partie supérieure du capteur et le plateau supérieur de la presse est mesuré grâce à un capteur LVDT de ± 3 mm de course. Ce capteur de déplacement a une double fonction: i) il permet d'une part d'obtenir une mesure de la déformation axiale globale de l'échantillon pendant le début du chargement à la différence des jauges d'extensométrie qui donnent une mesure plus locale ii) il permet de conserver la possibilité de mesurer la déformation dans le cas où les jauges seraient endommagées pendant la rupture progressive du matériau, notamment pendant la phase post-pic de l'expérience.

Un système de points fixes, nécessaire à l'exploitation des expériences par la stéréophotogrammétrie de faux relief, est mis en place de part et d'autre de l'éprouvette. Ce dispositif en acier rigide est solidaire du plateau supérieur de la presse, immobile pendant le chargement.

5.4.2 Résultats

Deux essais ont été effectués, le premier (pamar1) sur une éprouvette d'épaisseur 29 mm, le second (pamar2) sur une éprouvette d'épaisseur 20 mm. Les deux

essais sont effectués à la vitesse de déformation axiale d'environ $5.10^{-5}s^{-1}$. Ils sont présentés séparément, une discussion vient synthétiser les résultats.

5.4.2.1 Expérience pamar1

5.4.2.1.1 Comportement mécanique L'évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale est représentée sur la figure 5.15. Les déformations enregistrées par les jauges jl1 et jl2 et la déformation calculée à partir de la réponse du LVDT sont similaires. Les photographies réalisées en cours d'essai sont repérées sur la courbe et numérotées de 1 à 12. La courbe conserve une pente à peu près constante pendant la plus grande partie du chargement ($E_{50} = 11,8\ GPa$) et s'infléchit progressivement peu avant le pic de contrainte. Le pic de contrainte ($74,1\ MPa$) est atteint pour une déformation axiale de $6,3.10^{-3}$. Une partie du chemin post-pic est enregistrée. Cependant la décharge n'est plus contrôlée pour une déformation axiale de $7,03.10^{-3}$, soit peu après le pic de contrainte et ce, malgré le dispositif des piliers. La ruine de l'échantillon intervient brutalement, conduisant à une décharge brutale de l'échantillon. La rupture se manifeste par une forte émission acoustique et se caractérise par le développement de plusieurs plans de fractures qui traversent l'ensemble de l'échantillon.

La déformation volumique, calculée à partir des enregistrements des déformations axiale (ε_1) et transversales (ε_2 et ε_3) est représentée sur le deuxième graphe de la figure 5.15. L'échantillon est globalement contractant pendant tout l'essai. Le volume diminue d'abord rapidement au début du chargement puis plus progressivement. On observe à partir de 6.10^{-3} de déformation axiale une brusque variation de la pente de la courbe de variation de volume peu avant le pic de contrainte. La représentation de l'évolution de la déformation transversale en fonction de la déformation axiale (troisième graphe de la figure 5.15) montre en fait que les trois jauges transversales jt1, jt2 et jt3 divergent brusquement au même moment pour une déformation axiale de 6.10^{-3}. Cet événement est simultané avec une diminution faible mais significative de la contrainte axiale (au niveau du cliché 7). Il y a une modification du régime de la déformation à l'échelle de l'éprouvette, qui correspond au passage d'une déformation diffuse plus ou moins homogène à une déformation fortement hétérogène localisée sur les fissures.

C'est ce que suggère le fait que l'évolution de la déformation transversale enregistrée par les trois jauges (qui ne fournissent que des mesures locales des composantes ε_2 et ε_3 de la déformation) soit simultanée. La variation de volume enregistrée ensuite au delà de 6.10^{-3} de déformation axiale n'est donc pas significative d'une augmentation de la contractance dans l'échantillon.

5.4.2.1.2 Cinématique de la fracturation La cinématique de la fissuration de l'échantillon a été reconstituée à partir des clichés successifs pris au cours de l'expérience par observation directe et par observation stéréoscopique. Aucune fracture n'est visible jusqu'au cliché 7 ($5,9.10^{-3}$ de déformation). A ce stade (situé à

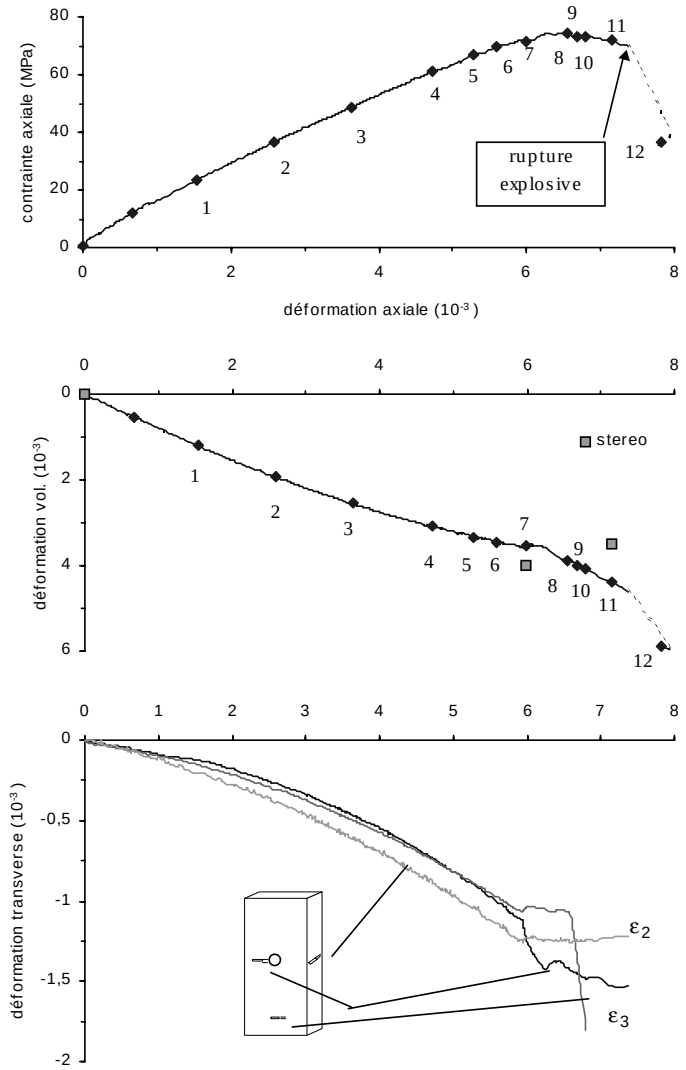


FIG. 5.15 – *Pamar1 : Evolution de la contrainte axiale, de la déformation volumique et des déformations transversales vis-à-vis de la déformation axiale.*

96,5 % de la contrainte axiale au pic), on peut observer en bordure du trou deux fissures diamétralement opposées dont la longueur est de quelques millimètres (Fig. 5.16, cliché 7) et qui se propagent vers les têtes de l'éprouvette. Les deux fissures semblent apparaître simultanément sur la bordure du trou et se propager d'abord quasi-instantanément avant de se stabiliser. Notons que i) les deux points où s'initient les fissures forment une ligne inclinée d'environ 20° sur l'horizontale, ii) la fissure gauche située sur la partie haute du trou se propage vers l'extrémité inférieure de l'échantillon et la fissure droite qui s'initie sur la partie basse du trou se propage vers le haut de l'éprouvette. Des écailles infra-millimétriques se détachent de la paroi à l'intérieur de la cavité.

A charge croissante, ces fissures, inclinées d'environ 10° sur l'axe de chargement, se propagent lentement dans leur propre plan. Le décalage des lignes horizontales du quadrillage de part et d'autre des fractures indique clairement que le déplacement relatif des lèvres des deux fissures présente une composante en cisaillement importante (cliché 8). Au pic de contrainte qui correspond approximativement au cliché 9, les fissures se sont propagées de façon équivalente et dessinent sur le plan d'observation une trace à peu près linéaire. Il faut souligner que le pic de contrainte ne coïncide pas avec la ruine de l'éprouvette, qui garde la capacité de supporter une charge importante.

Les fissures continuent à se propager lentement dans la partie post-pic de la courbe contrainte - déformation (Figs. 5.16, cliché 10 et 11, jusqu'à une déformation axiale de $7,1.10^{-3}$, limite à partir de laquelle la déformation n'est plus contrôlée (cliché 12). On observe une augmentation brutale de la fissuration. De nouvelles fractures de cisaillement, dont la plupart se branchent sur les premières structures, apparaissent rapidement, soit obliques sur la direction de compression soit tendant à devenir parallèles avec l'axe de chargement. Des fissures se forment au coin du parallélépipède. De petites écailles, qui se forment au niveau des intersections entre fractures, se détachent de la surface de l'échantillon. La ruine de l'éprouvette est consommée lorsque les structures majeures connectent les têtes de l'échantillon aux coins supérieur droit et inférieur gauche respectivement (cliché 14). Elle est accompagnée d'une forte émission acoustique. Elles forment une structure macroscopique unique passant par le trou et inclinée à environ 30° de la direction de compression (Fig. 5.17). La contrainte axiale devient nulle, attestant de l'incapacité de la structure à supporter la charge.

L'observation des autres faces de l'échantillon après rupture permet de préciser la géométrie du champ de fractures dans la masse du spécimen. On retrouve sur l'autre face 1-3 les deux fissures déjà observées. Une troisième fissure partant du trou et orientée à environ 30° de l'axe de compression (non visible sur la face photographiée) s'est développée sur la partie haute de l'échantillon. Elle est constituée d'une série de fentes de tension, de taille centimétrique, disposées en échelon et parallèles à l'axe de compression (Fig. 5.17), connectées à proximité du trou.

On observe dans le plan 2-3 au pied de l'échantillon, une structure en coin délimitée par deux fractures visiblement cisaillantes, dont la formation peut être reliée au

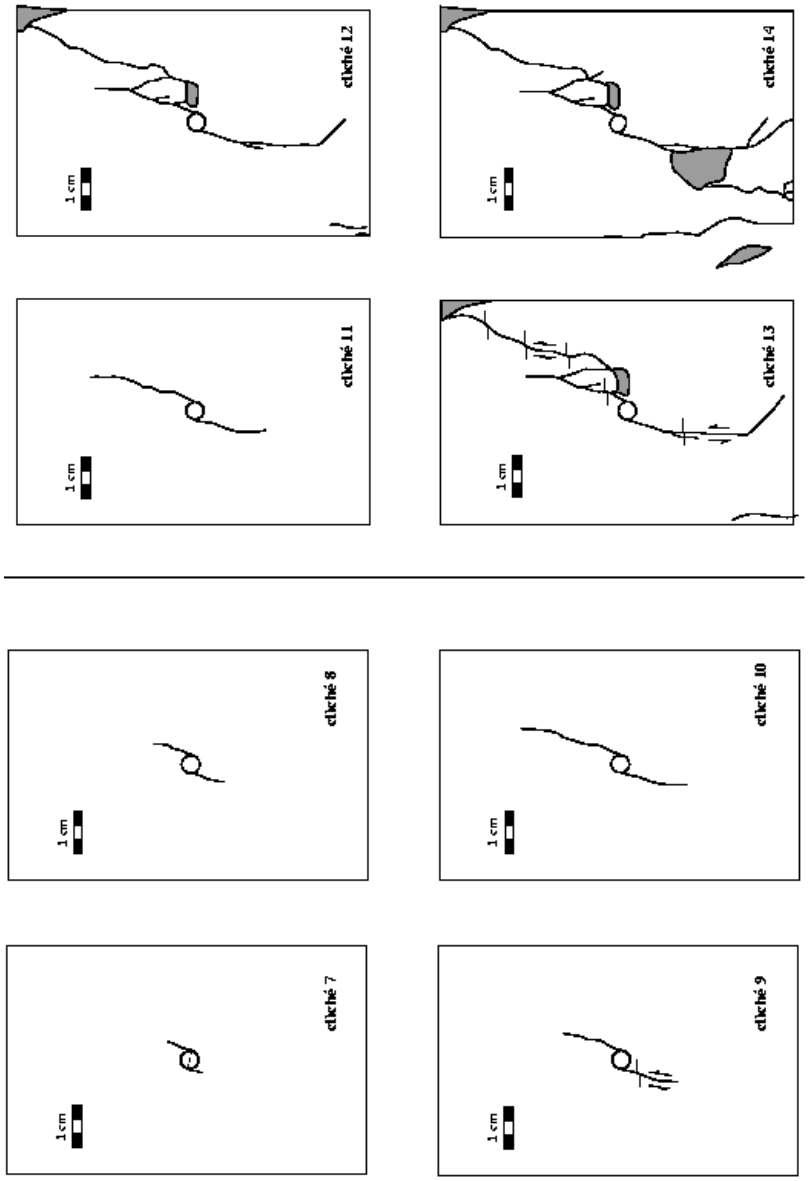


FIG. 5.16 *Pamar1 : Représentation schématique de la propagation des fissures, relevées sur les différents clichés pris au cours du chargement.*

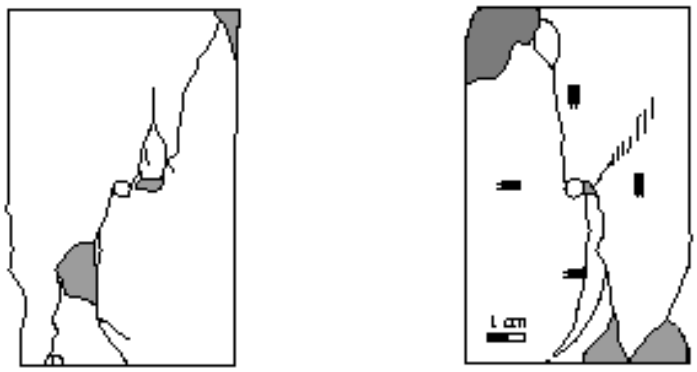


FIG. 5.17 – *Pamar1 : Fracturation de l'échantillon, sur la face avant (photographiée), et sur la face arrière (à droite).*

frottement du pied de la face d'appui sur le plateau de la presse. Deux fentes ayant un jeu mixte ouverture - cisaillement prolongent les faces du coin vers la tête de l'éprouvette. Ces structures n'apparaissent qu'au moment de la rupture incontrôlée de l'échantillon. Remarquons enfin que les facettes 1-2 ne sont pas fracturés.

L'examen du champ de fractures indique que l'essentiel de la déformation demeure contenu dans le plan 1-3 de l'échantillon pendant la plus grande partie de l'expérience. Les structures majeures sont visibles sur les deux grandes faces de l'éprouvette et affectent le spécimen dans la masse. C'est le résultat qui était cherché en pratiquant une ouverture perpendiculaire au plan 1-3 au centre de l'échantillon. En l'absence de cette ouverture, la déformation localisée se serait développée en présentant la ligne de plus grande pente du plan de localisation a priori dans n'importe quelle direction, rendant impossible une caractérisation par stéréophotogrammétrie. L'examen des différents morceaux de l'échantillon après essai, montre qu'autour du trou central, les fractures sont perpendiculaires au plan 1-3. A l'approche de l'extrémité supérieure de l'échantillon, la fracture n'est plus parfaitement perpendiculaire au plan 1-3. La première fracture supérieure qui semble ne plus s'être propagée a partir du cliché 11, et la fracture qui a rejoint le coin supérieur droit, sont en fait reliées entre elles dans la masse, comme le montre la figure 5.18. C'est certainement le frottement de l'échantillon sur les plateaux qui a modifié la propagation de la fracture initiale.

Il est intéressant de souligner que de nouvelles structures macroscopiques, qui n'étaient pas visibles juste après l'expérience, sont apparues dans les mois suivants et que l'échantillon se dégrade progressivement par écaillage. Cette observation suggère que le matériau a été fortement endommagé en dehors des fractures majeures pendant la rupture progressive du matériau.

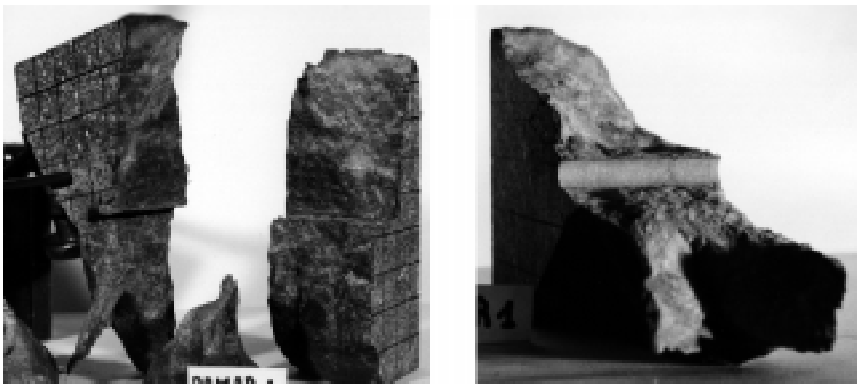


FIG. 5.18 – *Pamar1 : photographies des résidus de l'échantillon. La fracture est bien perpendiculaire au plan observé au bord du trou, puis devient inclinée à l'approche de l'extrémité supérieure, du fait du frottement sur le plateau de la presse.*

5.4.2.1.3 Champs de déformation L'application de la méthode de stéréphotogrammétrie de faux relief a permis de quantifier l'évolution du champ de déplacement incrémental et de préciser le mode et la cinématique de la fissuration au sein de l'échantillon. Compte tenu de l'incertitude des mesures ($0,015\ mm$) et des faibles déformations enregistrées, nous avons choisi de dépouiller des couples de clichés séparés par un incrément de déformation suffisamment grand pour garantir une bonne résolution du champ de déplacement. Il s'agit des incréments 1- 7 (de 10 à 85,5 % de la déformation axiale au pic), 7-11 (85,5 à 104 % de la déformation axiale au pic) et 11-12. L'incrément 1-7 représente la partie continue de la déformation de l'échantillon jusqu'au moment où les discontinuités apparaissent au niveau du trou, c'est à dire jusqu'à la transition d'un mode de déformation diffus à une déformation localisée. L'incrément 7-11 correspond à la propagation contrôlée pré et post-pic des fissures nouvellement formées. L'incrément 11-12 est situé juste avant la rupture incontrôlée de l'échantillon.

Le couple 1-7 correspond à la phase de montée en charge. Le déplacement relatif tête-pied est important (grands vecteurs en bas de l'échantillon, Fig. 5.19.a). L'observation stéréoscopique met en évidence un fort relief à proximité du trou traduisant une concentration locale de la déformation autour des deux fissures naissantes. A ce stade, les fissures ont une taille réduite (quelques millimètres) et il est difficile d'identifier leur extrémité c'est à dire de distinguer la transition d'une discontinuité du champ de déplacement (qui apparaît comme une falaise) à une concentration de déformation continue (qui apparaît comme un talus). Le champ de déformation incrémentale (Fig. 5.19.b) calculé à partir du semis de vecteurs déplacement (Fig. 5.19.a) met en évidence une forte concentration de la déformation cisaillante le long des discontinuités nouvellement formées, superposée à un champ de déformation diffus homogène, d'intensité plus faible, caractéristique d'une déformation continue du matériau (incrément 1-6). L'analyse du déplacement de part et d'autre des fissures

indique que le mouvement relatif des lèvres des fractures présente une composante tangente (cisaillement, Fig. 5.19.e) dès le début du processus de rupture. La composante normale (ouverture, Fig. 5.19.f) est cependant de même amplitude. Cette observation suggère que le mode de propagation des fissures au moment de leur formation est un mode mixte ouverture - cisaillement. La composante normale du déplacement pourrait cependant résulter d'une relaxation des contraintes sur la bordure du trou et n'être donc que la conséquence du développement essentiellement cisaillant des fissures. On observe aussi que la valeur du saut de déplacement n'est pas constant le long des deux fissures. La valeur maximum du déplacement est située en bordure du trou et diminue progressivement pour atteindre une valeur nulle aux extrémités des fissures. Le mouvement relatif sur les fractures s'amortit donc progressivement. Le champ de déformation déviatoire ne permet cependant pas de voir comment il est transmis en tête de fissure à la partie encore intacte du matériau.

Pendant l'incrément de déformation 7-11 qui inclut une partie du trajet post-pic de la courbe contrainte - déformation, le déplacement relatif tête-pied est beaucoup plus faible que dans l'incrément considéré précédemment. En effet, le déplacement aux limites de l'éprouvette est inférieur à $0,1\ mm$ entre les deux clichés (Fig. 5.20.a). On observe que les deux fissures se sont propagées de façon contrôlée pour atteindre une longueur d'environ trois centimètres. Elles demeurent les seules structures visibles à la surface de l'échantillon. Les fractures apparaissent clairement comme deux falaises en vision stéréoscopique. Le champ de déformation incrémental (Fig. 5.20.b) montre que la déformation déviatoire est essentiellement concentrée le long des deux fissures. L'échantillon en dehors des fissures, apparaît peu ou pas déformé, suggérant que le mécanisme de déplacement relatif des lèvres de la fissure domine largement le processus de déformation global.

L'analyse du déplacement relatif des lèvres des deux fractures montre que le mouvement est essentiellement cisaillant pendant l'incrément 7-11 (Fig. 5.20.e). La composante normale du saut de déplacement de part et d'autre des fractures (Fig. 5.20.f) est du même ordre de grandeur que l'incertitude de la mesure. Remarquons que les variations de l'amplitude du déplacement tangent sont différentes sur les deux fissures. Le déplacement tangent décroît progressivement du trou jusqu'à l'extrémité de la fracture gauche alors qu'il demeure à peu près constant sur la fissure droite. La trace de cette dernière n'est cependant pas rectiligne. Il pourrait donc s'agir d'ajustements locaux du déplacement associés aux changements de direction de la structure. La façon dont le déplacement cisaillant s'amortit en tête de fissure dans la partie encore intacte du matériau est cette fois plus facile à illustrer. La superposition de la trace des fissures et du champ de déformation cisaillante met en évidence l'existence d'une zone étroite de concentration de déformation cisaillante continue à l'avant et dans le prolongement de la fissure. La longueur de la zone de concentration du cisaillement peut atteindre un centimètre environ. La distribution de la rotation matérielle sur la surface de l'échantillon (Fig. 5.20.c) met en évidence l'existence d'une bande continue du coin inférieur gauche au coin supérieur droit du

prisme, sur laquelle se superpose la trace des fractures et dans laquelle la rotation est significativement plus élevée que dans le reste de l'échantillon. Cette observation suggère que le déplacement tangent le long des lèvres des discontinuités pourrait se prolonger sous forme de bande de cisaillement à une certaine distance dans la partie encore intacte du matériau.

Au cours de l'incrément 11-12 (juste avant la rupture), une nouvelle fracture est apparue dans la partie supérieure droite de l'éprouvette et s'est rapidement développée pour atteindre une taille d'environ 4 cm. Remarquons que sa trace est superposée à la bande de forte rotation matérielle mesurée au cours de l'incrément 7-11 (cf. Fig. 5.20.c). La déformation déviatoire est fortement concentrée le long de cette structure (Fig. 5.21.b). La première fissure est maintenant inactive, suggérant que le déplacement cisaillant a été entièrement transféré à la nouvelle structure. L'examen après essai des morceaux de l'échantillon montre que ces deux fractures se relient entre-elles au c œur de l'échantillon. Une petite fissure, qui accommode vraisemblablement les incompatibilités géométriques, connecte l'ancienne et la nouvelle fracture. La figure 5.21.a met en évidence un changement important de la cinématique à l'échelle de l'échantillon. On distingue maintenant deux compartiments délimités par une bande de cisaillement quasi continue passant par le centre de l'éprouvette et se superposant aux fissures inférieure gauche et supérieure droite. Le compartiment gauche est montre des déplacements faibles. Dans le compartiment droit , l'évolution du champ de déplacement du bas vers le haut de l'échantillon montre un phénomène qui ne peut être mis sur le compte de l'incrémentation des conditions aux limites : on observe un gradient très important de la composante Y du déplacement, depuis le pied d'échantillon jusqu'au coin supérieur du compartiment droit. A l'évidence, l'écaille délimitée par la fracture désormais continue à travers l'échantillon, se détend dans la direction Y en libérant l'énergie élastique stockée pendant la montée en charge. L'écaille échappe au contrôle cinématique exercé jusque là par les plateaux de la presse parce qu'elle n'est plus en contact avec l'un d'eux (le supérieur), à partir du moment où la fracture a rejoint le coin. On remarque que les déplacements enregistrés en haut de l'écaille sont du même ordre de grandeur que les déplacements du plateau inférieur dans l'incrément 1-7. Ceci indique que, si l'échantillon est désormais totalement ruiné, cependant le matériau des morceaux qui en résultent montre encore une forte réversibilité. C'est exactement ce phénomène qui survient en paroi de galerie dans les accidents connus sous le nom d'écaillage.

Le fait que la fracture supérieure n'est plus parfaitement perpendiculaire au plan observé à l'approche de extrémité de l'échantillon, occasionné par le frottement sur le plateau (§5.4.2.1.2), implique que le glissement relatif des deux blocs n'est pas exactement dans le plan. Le bloc supérieur descend par rapport au bloc inférieur et se rapproche en même temps de l'appareil photographique. C'est ce phénomène à trois dimensions qui explique que sur la portion de fracture quasi horizontale formant un triangle avec deux autres fractures quasi verticales, le déplacement relatif des deux lèvres apparaît comme étant un déplacement de fermeture, alors qu'il s'agit du

chevauchement du bloc supérieur sur le bloc inférieur. L'analyse du déplacement le long des fissures inclinées (Fig. 5.21.d, e et f) indique que le mouvement relatif des lèvres des fractures est essentiellement cisaillant et que la composante normale est négligeable.

Signalons qu'il est possible d'estimer la déformation volumique dans le matériau à partir de l'analyse stéréophotogrammétrique en comparant la surface de l'échantillon sur chacun des clichés d'un couple stéréoscopique. On obtient pour l'incrément 1-7 une valeur de -4.10^{-3}, comparable à la valeur calculée à partir des jauges d'extensométrie pour le même incrément (cf. Fig. 5.15). Pour l'incrément 7-11, pour lequel nous n'avons plus de mesure fiable de la variation de volume par les jauges, on obtient une valeur de $0,5.10^{-3}$, qui indique que l'échantillon a un comportement dilatant après l'apparition de la déformation localisée. L'augmentation du volume juste avant le pic de contrainte est de plus conforme aux résultats des expériences réalisées sur la Siltite à partir d'éprouvettes cylindriques.

5.4.2.1.4 Saut de déplacement Le saut de déplacement entre les lèvres d'une fissure est étudiée plus spécifiquement ici. Entre la photographie 7 et la photographie 11, on distingue une fissure haute et une fissure basse. Le saut de déplacement peut être décomposé en une composante normale à la fissure, et une composante tangentielle, correspondant à un mouvement cisaillant.

Sur la fissure basse (Fig. 5.22 a), on observe que le saut de déplacement (plus exactement le module du saut de déplacement) a tendance à diminuer en moyenne de l'extrémité en contact avec le trou central de l'échantillon, où la fissure s'est initiée, vers la pointe active de la fissure. Cette évolution correspond par ailleurs aux profils mesurés sur des fissures dans la marne de Beaucaire (Desrues [57]). L'évolution du module du saut de déplacement est cependant perturbée par la forme de la fissure. Celle-ci n'est pas parfaitement linéaire comme le montre la figure a sur lequel est reporté l'orientation des segments décrivant l'une des lèvres de la fissure (l'orientation est calculée comme l'angle entre la fissure et l'axe de chargement). Les fluctuations du module du saut de déplacement se corrèlent assez bien avec les changements d'inclinaison, une plus faible inclinaison locale entraînant une diminution locale du saut.

La décomposition du saut en une composante normale et tangentielle (Fig. 5.22 b) montre une dominance du mouvement de cisaillement, qui lui même s'atténue à l'approche de la pointe de fissure. La composante normale fluctue entre une composante d'ouverture ou de fermeture, en ayant une légère tendance a devenir de plus en plus "ouvrante" à l'approche de la pointe. Les fluctuations de cette composante semblent être essentiellement un effet de la forme de fissure. Cela suggère que la variation de volume dans la fissure est aussi un effet de la géométrie de la fissure, en plus du type de mécanisme de fonctionnement de celle-ci.

Pour la fissure haute, l'évolution du module du saut de déplacement (Fig. 5.22 c) est moins claire que dans la fissure basse. On observe cependant qu'en moyenne, le saut est plus important quand l'inclinaison de la bande par rapport à l'axe de

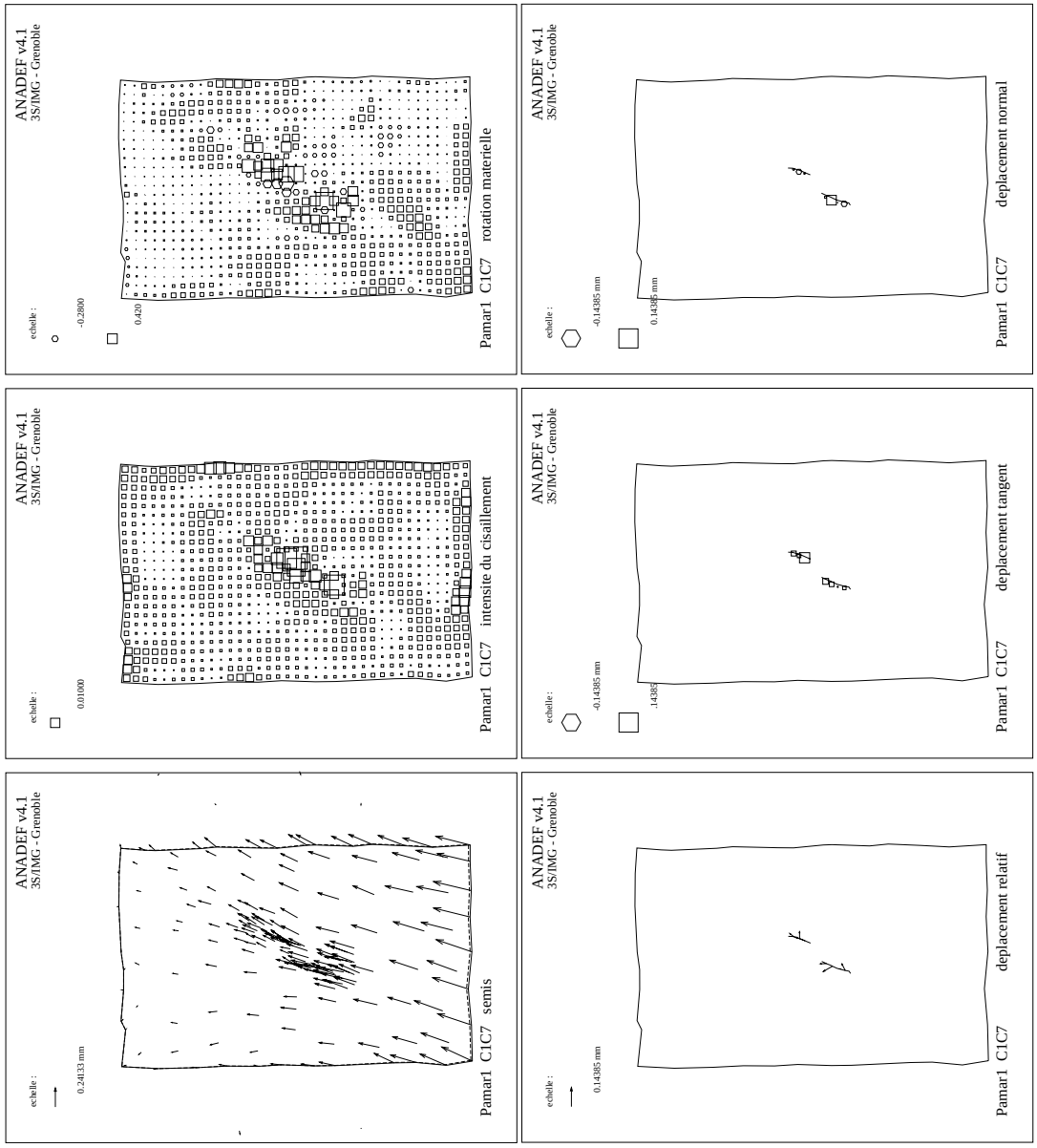


FIG. 5.19 – *Pamar1 : Analyse de l'incrément 1-7. Colonne 1 : a) champ de déplacement incrémental, b) champ de déformation, c) rotation matérielle. Colonne 2 Analyse de fissuration : d) déplacement relatif sur les lèvres des fissures, e) composante tangente du déplacement, f) composante normale du déplacement.*

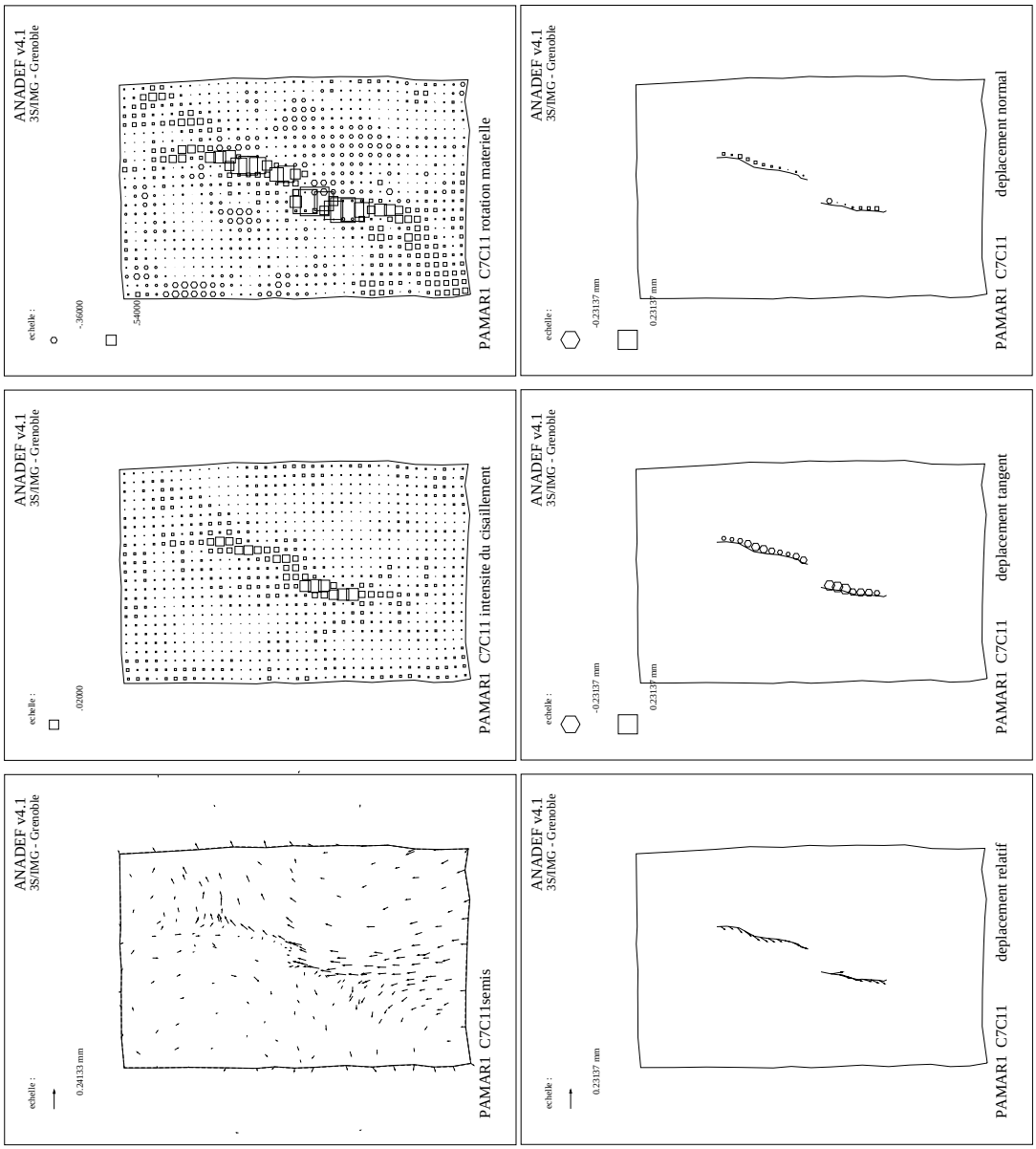


FIG. 5.20 – *Pamar1 : Analyse de l'incrément 7-11. Colonne 1 : a) champ de déplacement incrémental, b) champ de déformation, c) rotation matérielle. Colonne 2 Analyse de fissuration : d) déplacement relatif sur les lèvres des fissures, e) composante tangente du déplacement, f) composante normale du déplacement.*

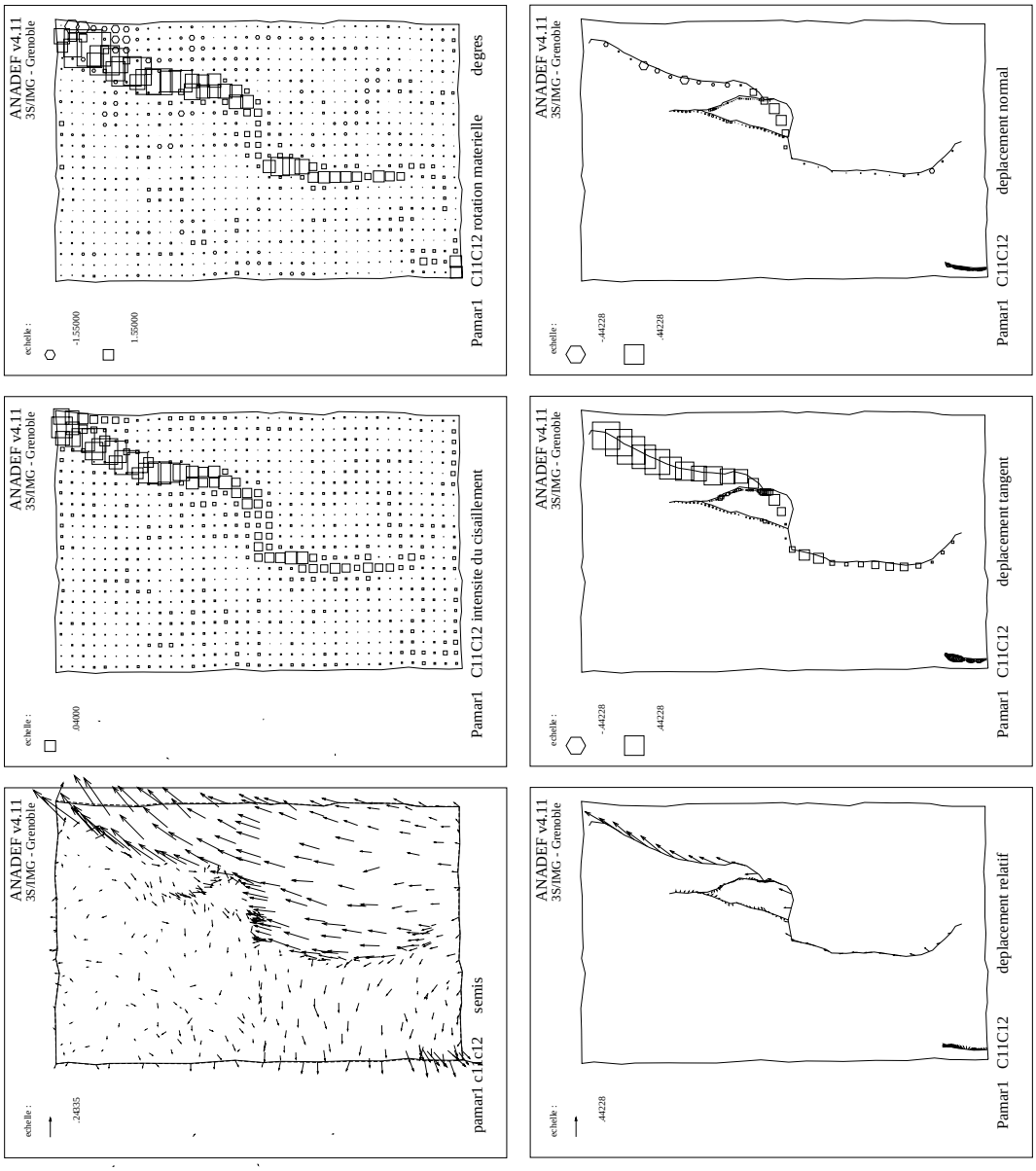


FIG. 5.21 – *Pamar1 : Analyse de l'incrément 11-12. Colonne 1 : a) champ de déplacement incrémental, b) champ de déformation, c) rotation matérielle. Colonne 2 Analyse de fissuration : d) déplacement relatif sur les lèvres des fissures, e) composante tangente du déplacement, f) composante normale du déplacement.*

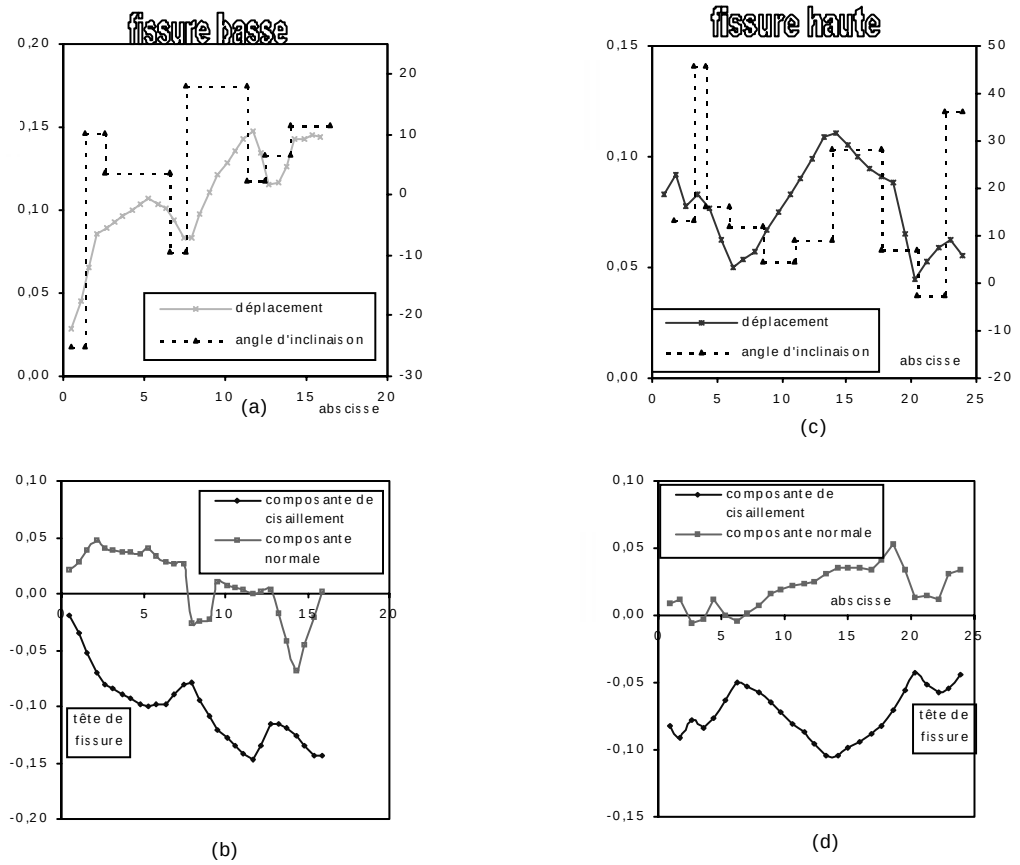


FIG. 5.22 – *Pamar1 : saut de déplacement le long des fissures, en fonction de l'abscisse curviligne.*

chargement augmente. Cela pose la question de l'influence de la forme de la fissure, à l'échelle locale de celle-ci, sur le champ de déformation du matériau avoisinant. Est- ce qu'une fluctuation de l'orientation de la bande entraîne un changement de la déformation autour de la fissure, qui pourrait justifier les fluctuations du saut de déplacement. Les mesures effectuées ne permettent pas d'analyser cette question, et il faudrait pour cela une observation de la déformation concentrée dans le matériau au voisinage de la fissure. On retrouve bien sûr ces fluctuations sur les composantes normales et tangentielles (Fig. 5.22 d), mais la composante normale devient en moyenne une composante d'ouverture à l'approche de la pointe de la fissure.

Le mécanisme des fissures est essentiellement et globalement cisaillant, cependant, dans la zone active en pointe, le mécanisme devient un mécanisme mixte entre ouverture et cisaillement.

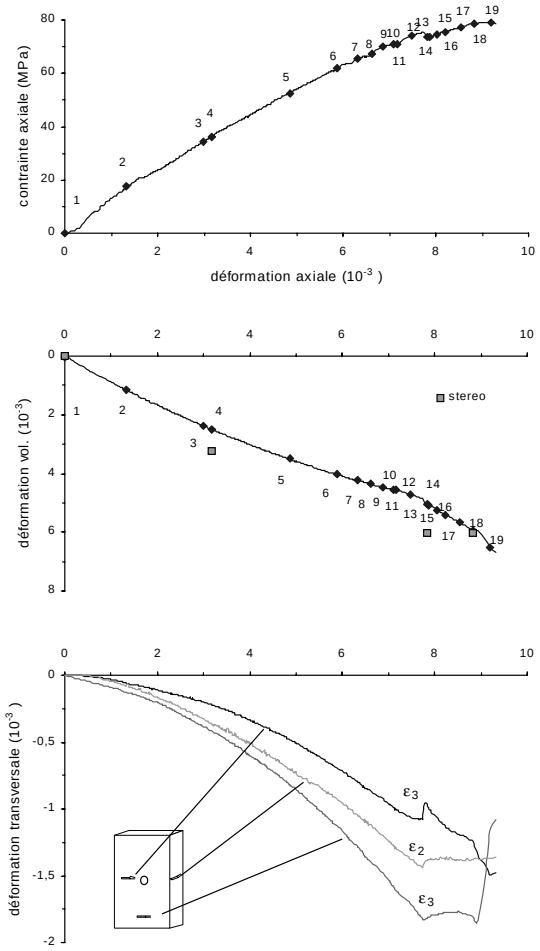


FIG. 5.23 – *Pamar2 : Evolution de la contrainte axiale, de la déformation volumique et des déformations transversales vis-à-vis de la déformation axiale.*

5.4.2.2 Expérience pamar2

5.4.2.2.1 Comportement mécanique L'évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale est représentée sur la figure 5.23. Les photographies réalisées en cours d'essai sont repérées sur la courbe et numérotées de 1 à 18. La pente de la courbe contrainte - déformation demeure à peu près constante ($E_{50} = 9,4\ GPa$) pendant toute la durée de l'essai. Signalons que la courbe montre un léger infléchissement juste avant le cliché 13. La rupture de l'échantillon intervient au pic de contrainte ($79,2\ MPa$) pour une déformation axiale de $9,2.10^{-3}$. Cette rupture, de type explosif, provoque la projection d'écailles qui se détachent de la surface de l'éprouvette. La contrainte axiale devient immédiatement nulle après le pic indiquant la ruine complète de l'échantillon. La présence des piliers n'a pas empêché dans ce cas une déformation incontrôlée du spécimen au voisinage du pic. Cette expérience ne donne donc aucune information sur le comportement post-pic de la siltite.

L'évolution de la déformation volumique, calculée à partir des enregistrements des déformations axiale (ε_1) et transversales (ε_2 et ε_3) est en tout point semblable à l'expérience PAMAR1. Le deuxième graphe de la figure 5.23 indique que l'échantillon est globalement contractant pendant la première partie de l'essai. Les enregistrements fournis par les trois jauges transversales jt1 (ε_2), jt2 et jt3 (ε_3) (troisième graphe de la figure 5.23), suggèrent que la déformation cesse d'être uniforme pour une déformation axiale de $7,8.10^{-3}$, valeur pour laquelle toutes les courbes montrent simultanément un brusque changement de pente. La diminution de la pente de la courbe de variation de volume observée à partir d'une déformation axiale de $7,8.10^{-3}$ n'est donc pas significative d'une augmentation de la contractance dans l'échantillon mais traduit l'évolution de la déformation de l'éprouvette vers un mode localisé.

5.4.2.2.2 Cinématique de la fracturation La cinématique de la fissuration de l'échantillon a été reconstituée à partir des clichés successifs pris au cours de l'expérience. Aucune fracture n'est visible jusqu'au cliché 13 (93,3 % de la contrainte axiale au pic et $7,8.10^{-3}$ de déformation). Sur ce cliché, on observe deux fissures de quelques millimètres prenant naissance sur la bordure du trou et qui se propagent vers les têtes de l'éprouvette (Fig. 5.24). L'amorce des fissures peut être corrélée à une diminution de la contrainte axiale observée sur la figure 5.23 au niveau du cliché 13 et coïncide avec l'événement enregistré par les jauges transversales. L'initiation du mode de déformation localisée est donc clairement caractérisée par un changement de la distribution de la déformation à l'échelle de l'échantillon. Le point d'initiation de la fissure gauche est situé sur le diamètre horizontal du trou (à 90° de la direction de chargement). La fissure, faiblement inclinée sur la direction principale de contrainte ($< 10^o$) se propage vers le pied de l'échantillon. La fissure droite prend naissance sur la partie haute du trou sur un diamètre orienté à environ 20° de l'horizontale et se propage parallèlement à la direction de poussée vers la tête de l'échantillon. Des écailles infra-millimétriques se détachent de la paroi à l'intérieur de la cavité.

A charge croissante, les deux fissures se propagent lentement dans leur propre plan pour atteindre une longueur d'environ 20 mm sur le cliché 17 puis demeurent stationnaires jusqu'à la rupture (Fig. 5.24). Le mode de propagation des fissures est difficile à identifier à partir du seul examen macroscopique de l'échantillon. On peut cependant distinguer un faible décalage des lignes horizontales du quadrillage de part et d'autre des fractures à partir du cliché 16, suggérant l'existence d'un déplacement tangent le long des lèvres des fissures. De petites fissures, apparemment superficielles, apparaissent en bordure du trou et se connectent à la fissure droite sur le cliché 17. Au pic de contrainte, la rupture intervient de façon brutale. Les fissures rejoignent les extrémités de l'éprouvette (cliché 20), entraînant la ruine de l'échantillon. La fissure droite, dont la trace est parallèle à l'axe de chargement, a rejoint la tête de l'échantillon et semble avoir fonctionné essentiellement en ouverture. Une nouvelle fissure, branchée sur la fracture droite à hauteur du trou, s'est développée jusqu'au coin inférieur droit. La fissure gauche s'est propagée jusqu'au coin inférieur gauche du spécimen. Dans le même temps, des écailles, qui peuvent parfois représenter un

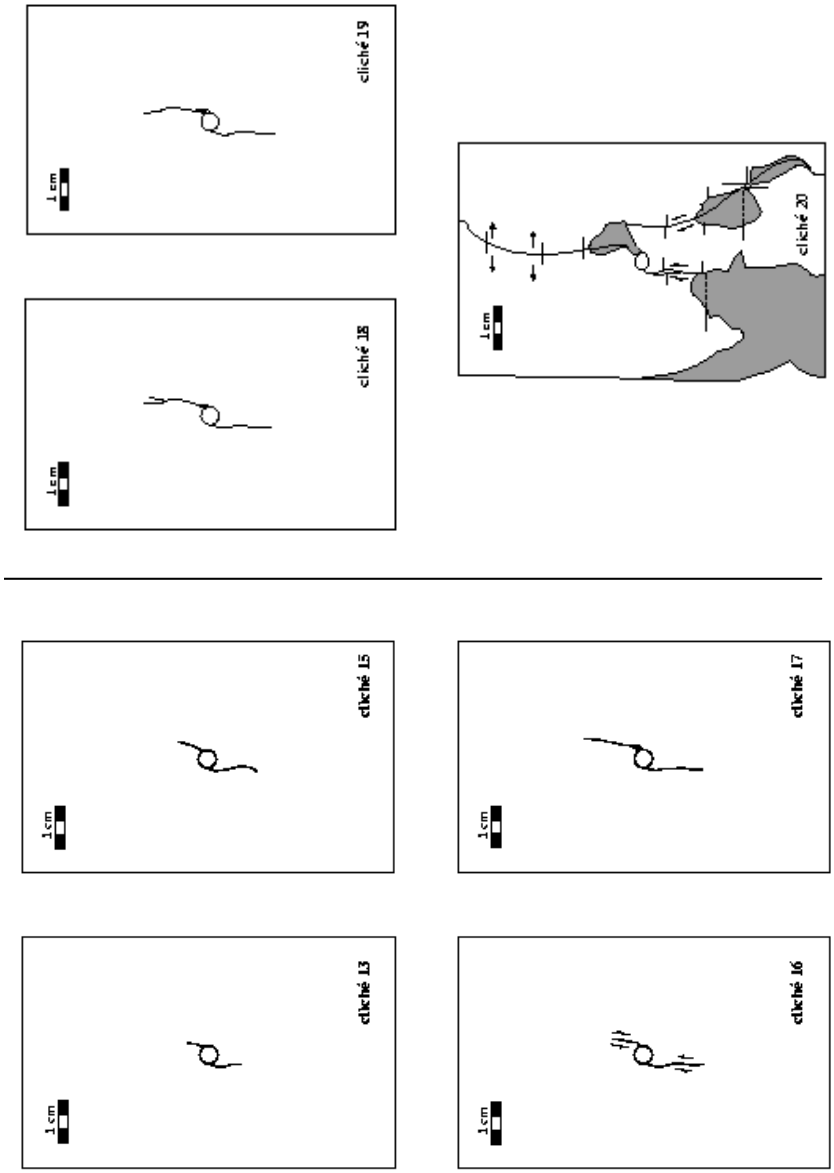


FIG. 5.24 *Pamar2 : Représentation schématique de la propagation des fissures, relevées sur les différents clichés pris au cours du chargement.*

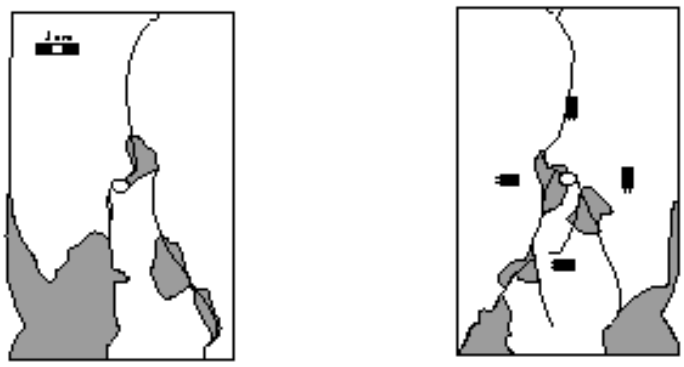


FIG. 5.25 – *Pamar2 : Fracturation de l'échantillon, sur la face avant (photographiée), et sur la face arrière (à droite).*

volume important du spécimen, se détachent de la surface de l'échantillon (Fig. 5.25).

L'examen du champ de fractures sur l'ensemble des faces du prisme indique que la fissuration est essentiellement contenue dans le plan 1-3 de l'échantillon. On retrouve sur l'autre face 1-3 les trois fissures déjà décrites dans le paragraphe précédent, qui délimitent trois compartiments indépendants (Fig. 5.25). Une fine poussière est visible sur les plans de fractures desquels se détachent de nombreux fragments, suggérant l'existence d'une zone broyée autour des fissures. On observe dans le plan 2-3 au pied de l'échantillon l'amorce d'une structure en coin délimitée par deux fractures cisaillantes. La formation de ce coin peut être la conséquence du frottement de la face d'appui sur le plateau de la presse. Remarquons que, comme pour l'échantillon PAMAR1, l'éprouvette s'est dégradée progressivement par écaillage, pendant les six mois qui ont suivi l'expérience.

5.4.2.2.3 Champs de déformation Trois couples de clichés de l'expérience PAMAR2 ont été analysés par la méthode de stéréophotogrammétrie de faux relief. Il s'agit des incréments 1-4, qui correspond aux premiers stades du chargement de l'éprouvette, 4-13, qui représente la partie continue de la déformation de l'échantillon jusqu'au moment où les discontinuités apparaissent au niveau du trou, c'est à dire jusqu'à la transition d'un mode de déformation diffus à une déformation localisée et 13-18, qui correspond à la propagation contrôlée des fissures nouvellement formées jusqu'au pic de contrainte.

L'analyse de la déformation au cours de l'incrément 1-4 confirme que l'échantillon se déforme de façon homogène au début du chargement (Fig. 5.26.b). On observe simplement une faible concentration de la déformation cisaillante au centre de l'éprouvette, résultant de la perturbation du champ de déplacement autour du trou. On observe aussi des zones ponctuelles de concentration de la déformation sur

la bordure gauche de l'échantillon, vraisemblablement liées à des erreurs de pointé.

Lorsque l'on observe les clichés du couple 4-13 en stéréoscopie, les deux fissures nouvellement formées apparaissent clairement comme deux falaises. En terme de déformation, ces fissures apparaissent comme des zones de déformation concentrée (Fig. 5.27.b), mais ce champ de déformation localisée se superpose à un champ de déformation continue plus ou moins homogène qui affecte le reste de l'échantillon. Ce champ de déformation diffus représente vraisemblablement la déformation continue de l'échantillon pendant l'incrément 4-12. Le saut de déplacement de part et d'autre des deux structures est faible (Fig. 5.27.d). On peut cependant observer qu'il présente une forte composante tangentielle et une composante normale plus petite, suggérant un mode de propagation mixte ouverture- cisaillement. L'intensité locale du déplacement sur les lèvres des fissures peut varier localement sans logique apparente. Le long de la fissure droite par exemple, le déplacement tangent est faible sur la bordure du trou et augmente progressivement vers l'extrémité de la fissure. Remarquons cependant que l'incertitude de la mesure ($0,015\ mm$) représente une fraction importante des vecteurs déplacement dont l'amplitude est d'environ $0,03\ mm$ et qu'elle pourrait être à l'origine des variations observées. La superposition de la trace des fissures et du champ de déformation déviatoire met en évidence l'existence d'une zone étroite de concentration de déformation déviatoire continue à l'avant et dans le prolongement de la fissure gauche dont la longueur est du même ordre que celle de la fracture. On n'observe pas cette distribution pour la fissure droite. La présence d'une zone large de concentration de la déformation à proximité de la fracture suggère que l'amortissement du déplacement en tête de fissure dans la partie intacte du matériau pourrait être diffus dans le cas de cette fissure.

Pendant l'incrément 13-18, les fissures se sont peu propagées. On observe bien une concentration de la déformation cisaillante sur les fractures. Mais une déformation continue subsiste, qui peut être assez forte sur les bordures, dans l'échantillon malgré l'apparition d'une déformation localisée (Fig. 5.28.b). Le déplacement relatif mesuré le long des lèvres des fissures (Figs. 5.28.d, e et f) est faible et confirme le fait que les fissures ont été peu actives pendant cet incrément. On remarquera que le saut de déplacement présente des composantes tangente et normale à peu près équivalentes et dont l'intensité varie notablement le long des fissures. Compte tenu de l'incertitude sur les mesures, nous supposons que ces variations n'ont pas de signification en terme de mécanisme de propagation.

La déformation volumique dans le matériau estimée à partir de l'analyse stéréophotogrammétrique pour l'incrément 1-4 est de $-3,25.10^{-3}$ et pour l'incrément 4-13 de $-2,8.10^{-3}$. Le matériau montre donc un comportement globalement contractant jusqu'à l'apparition de la déformation localisée. La variation de volume totale sur l'incrément 1-13, qui représente la partie strictement continue de la déformation représente -6.10^{-3} et est comparable à la valeur calculée à partir des jauges d'ex-

tensométrie pour le même incrément. La variation de volume calculée à partir du dépouillement stéréophotogrammétrique apparaît quasiment nulle pendant l'incrément 13-18, pour lequel nous n'avons pas de mesure fiable à partir des jauges.

5.5 Discussion et conclusion sur les essais de fracturation

L'évolution de la fracturation présente quelques variations entre les deux essais, notamment au niveau de l'amorce des fractures. Le trou central joue le rôle de site de nucléation pour ces fractures. Sur l'échantillon PAMAR1, les deux fractures se sont initiées sur un même diamètre, incliné de 20° par rapport à l'horizontal (Fig. 5.29.a), et la fracture initiée sur la partie haute du trou s'est propagée vers le bas, tandis que l'autre fracture s'est propagée vers le haut. Sur l'éprouvette PAMAR2, une des fractures s'est initiée sur le diamètre horizontal du trou et s'est propagée vers le pied de l'échantillon en faisant un angle de 10° par rapport à la direction verticale, alors que la deuxième fissure a pris naissance sur un diamètre à 20° de l'horizontal, dans la moitié supérieure du trou et s'est propagée en tête de l'échantillon (Fig. 5.29.b).

Cette diversité des géométries peut être due à une différence dans les conditions d'essais. Soit sur les conditions limites de l'essai (parallélisme des extrémités, frettage, position et forme du trou), soit sur des différences internes à l'échantillon, avec notamment des hétérogénéités locales de composition. Cette diversité a également été observée par Nadaï [110], Lajtai et Lajtai [94], Sammis et Ashby [125], Henry [70] et Haied [66] sur des parallélépipèdes percés d'un trou.

L'ensemble des essais, sur cylindres et parallélépipèdes, présente une réponse mécanique assez semblable. Les précurseurs à la rupture sont très tardifs vis-à-vis du pic de contrainte, à environ 98 % pour les essais sur cylindres et environ 94 % pour les essais sur parallélépipèdes du fait probablement du trou central. L'initiation des fissures observée par la technique de stéréophotogrammétrie de faux relief sur les parallélépipèdes est accompagnée d'un saut de la contrainte de compression et des déformations latérales mesurées avec les jauges de déformation. Les caractéristiques de la phase de propagation des fractures se résume ainsi :

L'apparition d'une déformation localisée intervient peu avant le pic de contrainte.

- Les fissures s'initient autour du trou central qui joue le rôle d'un site privilégié de nucléation. Le premier stade de propagation est très rapide, et les fractures se propagent instantanément de quelques millimètres avant de se stabiliser. Les fractures, faiblement inclinées par rapport à la direction de contrainte principale majeure, se propagent ensuite dans leur plan de façon contrôlée dans des directions opposées, l'une en tête et l'autre en pied de l'échantillon.

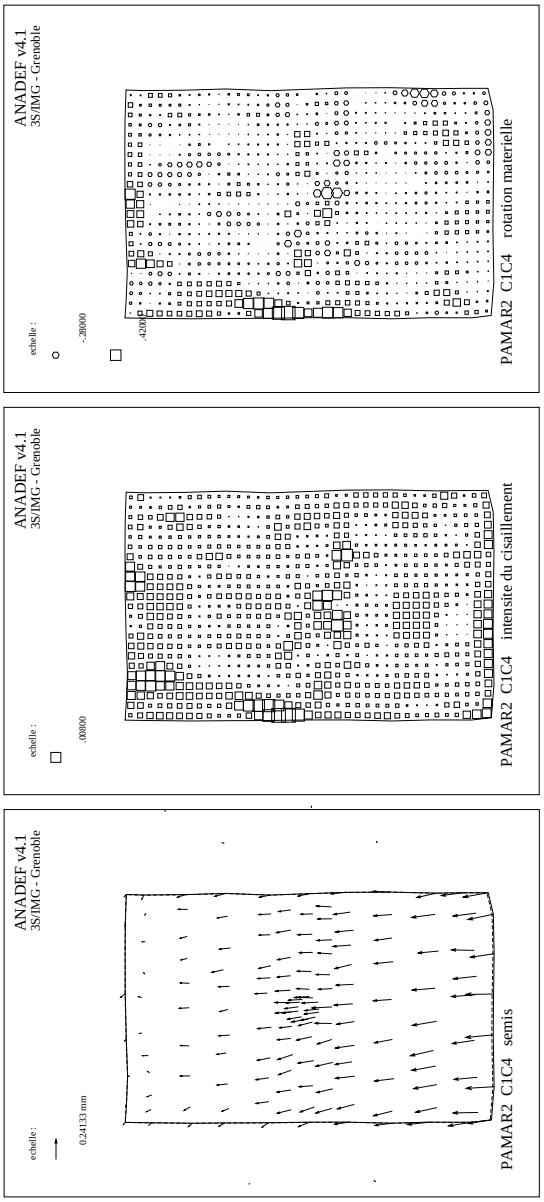


FIG. 5.26 – *Pamar2 : Analyse de l'incrément 1-4. a) champ de déplacement incrémental, b) champ de déformation, c) rotation matérielle.*

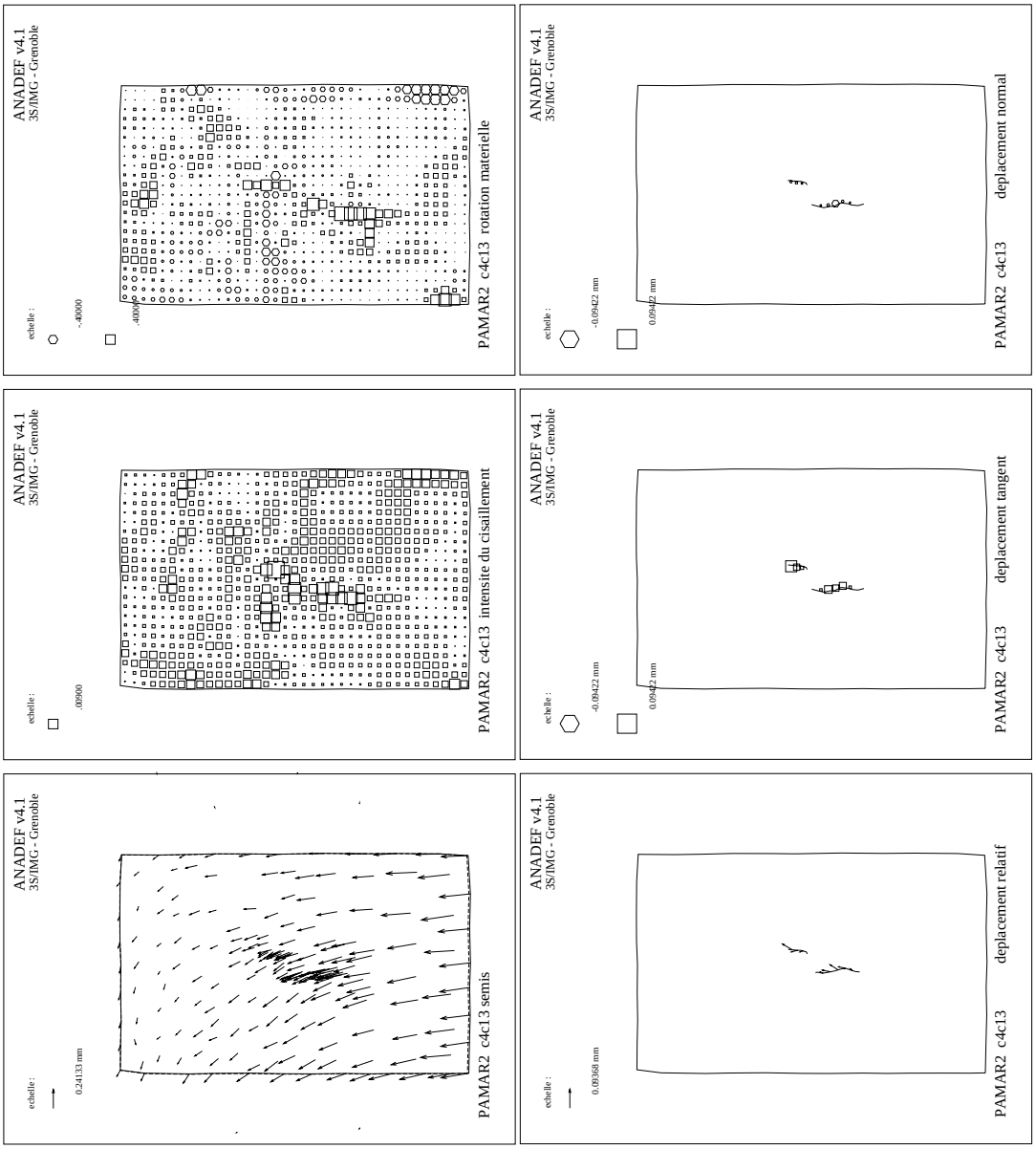


FIG. 5.27 – *Pamar2 : Analyse de l'incrément 4-13. Colonne 1 : a) champ de déplacement incrémental, b) champ de déformation, c) rotation matérielle. Colonne 2 Analyse de fissuration : d) déplacement relatif sur les lèvres des fissures, e) composante tangente du déplacement, f) composante normale du déplacement.*

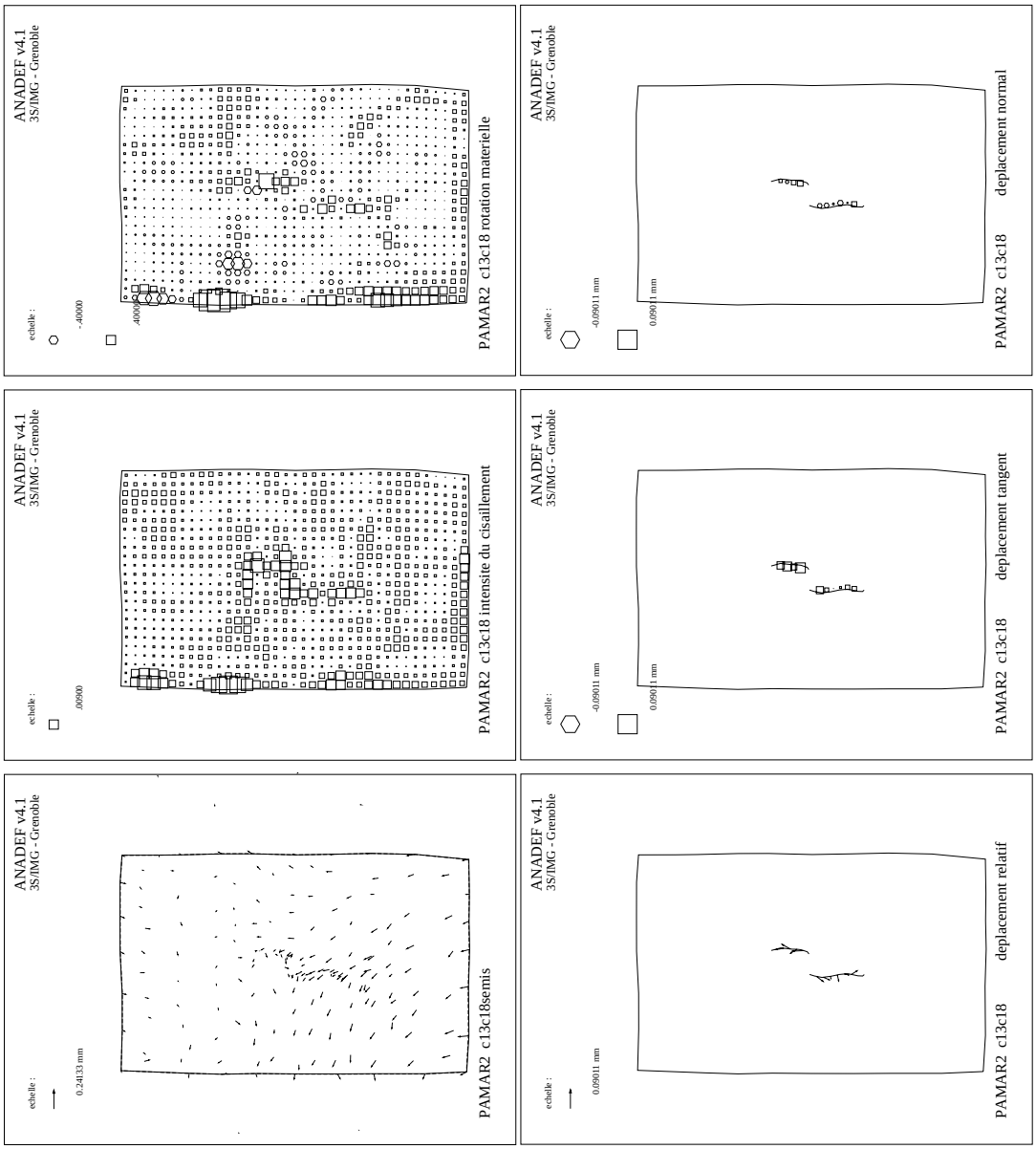


FIG. 5.28 – *Pamar2 : Analyse de l'incrément 13-18. Colonne 1 : a) champ de déplacement incrémental, b) champ de déformation, c) rotation matérielle. Colonne 2 Analyse de fissuration : d) déplacement relatif sur les lèvres des fissures, e) composante tangente du déplacement, f) composante normale du déplacement.*

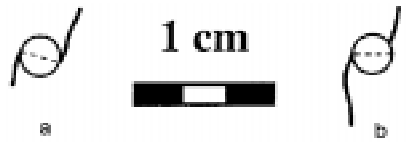


FIG. 5.29 – *Représentation schématique de l'amorce des fissures autour du trou, pour l'essai pamar1 (a) et l'essai pamar2 (b).*

- La rupture incontrôlée intervient soit au pic de contrainte, soit un peu après, malgré le dispositif de rigidification de la presse. Le champ ultime de fracture est composé de quelques plans de rupture majeurs traversant entièrement l'échantillon. Lors de la rupture incontrôlée, la propagation ne se fait pas nécessairement dans le plan de la fracture et peut faire apparaître de nouvelles fractures.

- L'étude du saut de déplacement le long des lèvres des fissures montre que les fractures se propagent essentiellement en cisaillement. La mise en évidence d'une composante normale à la naissance des fractures laisse penser que l'initiation de la fracture combine un mode d'ouverture et de cisaillement.

- Après la localisation des déformations autour des fissures, les déformations en dehors de ces zones sont faibles.

- La superposition de la trace des fissures et du champ de déformation, mesuré par la stéréophotogrammétrie de faux relief, montre que dans la plupart des cas, il existe une zone étroite de concentration de déformation cisaillante ou de rotation à l'avant des fissures et dans leur prolongement.

Ce dernier point a déjà été mis en évidence sur une marne du Plaisancien (marne de Beaucaire), beaucoup moins raide (résistance à la compression inférieure à 1 MPa) par Tillard [144]. L'observation est plus claire sur ce matériau car les déformations à la rupture sont plus grandes comparées à la résolution du stéréocomparateur. De même Sobolev *et al.* [136] et Spetzler *et al.* [137] ont montré ce phénomène de concentration de la déformation en tête de fissure à partir de la méthode d'holographie optique sur une roche (pyrophyllite) en compression biaxiale ou triaxiale (non axisymétrique). La bande de localisation précède la fracture, et se propage dans son plan. Pour ces différents matériaux, la fracturation semble pouvoir être la conséquence d'une intensification de la localisation de la déformation. Ces résultats constituent un argument expérimental en faveur de l'application de la théorie de la bifurcation pour prévoir la rupture dans les matériaux fragiles. Notons cependant que la théorie ne s'intéresse pas à une propagation de la bande à partir d'une discontinuité existante, mais à une apparition soudaine dans une zone de déformation homogène.

Chapitre 6

Perméabilité et déformation : étude sur une marne

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans une étude exploratrice de l'évolution de la perméabilité d'un matériau poreux saturé soumis à des essais mécaniques en grande déformation. Les chemins de contrainte appliqués sont la compression isotrope ou déviatoire. Les essais sont effectués sur une marne argileuse, de résistance en compression simple de l'ordre de $0,9\ MPa$, à des contraintes élevées, dans le domaine normalement consolidé, entraînant de grandes déformations.

L'étude expérimentale est menée en parallèle avec une étude théorique et numérique (Caillerie *et al.* [31]). Celle-ci étudie le comportement quasistatique incrémental d'un milieu continu biphasique en grandes transformations, le liquide est supposé newtonien non compressible et le solide non linéaire. L'homogénéisation d'un milieu périodique permettra d'obtenir les équations macroscopiques de la consolidation d'un milieu poreux saturé dans le cadre des grandes transformations.

6.1 Matériau

6.1.1 Prélèvement

Le matériau étudié est une marne du Plaisancien, provenant des environs de Beaucaire (Gard, France). Il a déjà été étudié par Bescond et Serratrice [11], Tillard [144] (dans lesquels on retrouvera une caractérisation minéralogique et géotechnique classique complète), Serratrice et Flavigny [133] et Bésuelle [13], dans les domaines surconsolidé et normalement consolidé.

Le matériau étudié dans cette étude a été prélevé dans la même carrière que celui des études précédentes, en cours d'exploitation, en Décembre 1996. La marne est prélevée en bloc à l'aide d'une tronçonneuse. Cette technique de prélèvement s'avère moins perturber le matériau que des techniques avec carottier (Tatsuoka et Kohata [142], Leroueil et Vaughan [97]). La carrière est organisée en plusieurs paliers

FIG. 6.1 – *Prélèvement de la marne dans la carrière des Ciments Français. Front de taille fraîchement dégagé (à gauche) et découpage des blocs à la tronçonneuse (à droite).*

de 2,5 à 4 m de hauteur. Le prélèvement s'est fait à une trentaine de mètres sous le niveau du terrain naturel.

Le sol se présente sous une couleur gris-bleu, avec un litage marqué par l'alternance de couches argileuses et de couches ou lentilles sablonneuses (jaunes), dont les grains sont plus gros, et le matériau moins plastique. Le matériau étudié ici a été prélevé uniquement dans les zones d'apparence plus argileuse.

Une première épaisseur, d'environ 40 cm a été dégagée du front de taille, pour retirer le matériau potentiellement perturbé par les engins d'extraction. Les blocs ont ensuite été découpés en forme de cube de coté d'environ 30 à 50 cm (Fig. 6.1). Ceux-ci ont été immédiatement enduits d'une couche de paraffine chauffée et enveloppés d'un sac en plastique pour préserver la marne des risques d'évaporation de l'eau interstitielle.

6.1.2 Caractérisation

La composition minéralogique donnée par Tillard [144] a montré une proportion similaire de quartz (36 %), d'argile (32 %) et de carbonate de calcium (31 %). La fraction argileuse se compose elle-même essentiellement d'illite (50 %), puis de chlorite (30 %) et de chlorite et montmorillonite interstratifiées (20 %). Les grossissements au microscope électronique avaient révélé une composition homogène. L'analyse granulométrique a montré que la quasi totalité des grains ont un diamètre inférieur à 74 μm.

6.1.3 Teneur en eau

La teneur en eau naturelle de la marne donnée dans la littérature se situe entre 24 et 24,5 %. Le matériau a été considéré comme saturé in-situ.

Trois mesures sur les blocs fraîchement taillés et protégés de l'évaporation don-

nent une teneur en eau de 25,35 %, 24,29 % et 24,19 %, soit une teneur en eau moyenne de l'ordre de 24,5 %.

Les blocs de marne sont conservés ensuite dans une enceinte close, spécialement mise au point pour cette étude. Les blocs de marne, enduits de paraffine et protégés par deux épaisseurs de film plastique, sont régulièrement aspergés d'eau (toutes les 30 minutes environ). Un système comprenant une pompe déclenchée par un programmateur et deux brumisateurs pulvérise de fines gouttelettes afin de maintenir une ambiance humide dans l'enceinte fermée. Ce système de conservation s'est avéré très efficace, et les mesures de teneur en eau, effectuées 18 mois après le prélèvement ne montrent pas de désaturation.

La masse volumique spécifique a été mesurée à l'aide d'un picnomètre à partir de poudre de marne broyée mécaniquement et étuvée. Une série de six mesures a fourni une valeur moyenne de : $\gamma_s = 2,734\ g/cm^3$. Une estimation de cette masse volumique spécifique, à partir de la densité apparente de la marne et de sa teneur en eau, en faisant l'hypothèse que le matériau est saturé, donne une valeur similaire ($2,765\ g/cm^3$), confirmant que la marne est saturée.

L'indice des vides est de l'ordre de 0,67 et la porosité de 40 %. Toutefois, ces valeurs sont reconsidérées pour chaque essai à partir de la masse volumique apparente mesurée sur les échantillons avant essai.

Différents essais ont été menés sur la marne. Le tableau 6.1 donne les mesures effectuées avant chacun d'eux.

essai	type de mesure	masse volumique apparente (g/cm^3)	teneur en eau %	indice [a] des vides	porosité [b]
MBT9701	échantillon chutes [c]	2,059	 24,5	0,67	0,40
MB9801	échantillon chutes	2,28 [d]	25,04 18,99 [e] et 24,75	0,67	0,40
MB9802	chutes		24,76		
MB9803	chutes		26,75		
MB9804	échantillon	1,99		0,75	0,43
MB9805	échantillon chutes	2,02	 26,9	0,7	0,412
MB980917	échantillon	2,05		0,64	0,39
MB981104	échantillon	2,01	23,3	0,71	0,41

TAB. 6.1 – *Caractéristiques de la marne mesurées à chaque essai.*

[a] valeur calculée à partir de la densité apparente et la densité spécifique

[b] calculée de façon identique à l'indice des vides

[c] matériau récupéré lors de la préparation des échantillons

[d] valeur supposée entachée d'une erreur de mesure, car très différente des autres mesures, l'indice des vides et la porosité sont pris égaux à leur valeur moyenne respective.

[e] valeur suspecte au regard des autres mesures, une erreur de mesure est possible.

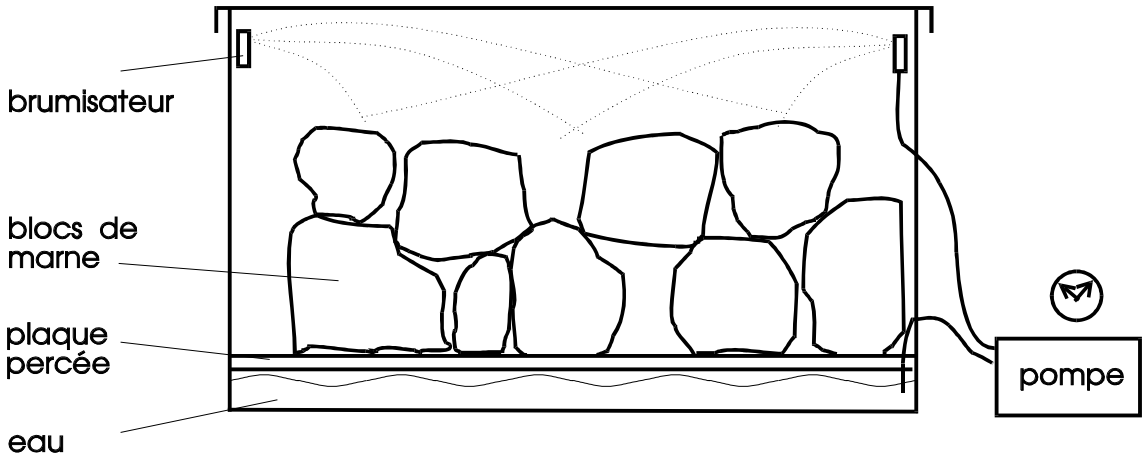


FIG. 6.2 – *Principe de conservation de la marne. Les blocs sont protégés par trois couches (paraffine et sacs en plastique), et stockés dans un enceinte régulièrement humidifiée par des brumisateurs.*

6.2 Essais

6.2.1 Protocole

Les essais menés sont les premiers sur ce type de matériau, dans la cellule triaxiale décrite précédemment (chapitre 3), avec de hautes pressions. Tous les essais n'ont pas été effectués dans des conditions identiques car il s'agissait d'explorer et de valider les protocoles expérimentaux.

6.2.1.1 Préparation et mise en place

Les échantillons cylindriques sont préparés par tournage avec un outil à pastille en carbure. Les extrémités sont dressées à l'aide d'une lame tranchante, l'échantillon étant placé dans un boitier spécial, de façon à obtenir des surfaces planes parallèles et perpendiculaires à l'axe de l'échantillon. Le diamètre de celui-ci est d'environ 40 mm et est mesuré à chaque fois pour être pris en compte comme condition initiale lors du dépouillement des essais. La hauteur est de 80 mm, sauf pour l'essai MB9802 où une hauteur de 40 mm a été choisie.

Un capteur de pression a été installé pour pouvoir faire des mesures de pression interstitielle à la base de l'échantillon. Des vannes coupe-circuit ont été montées sur le circuit de pression interstitielle, le plus près possible de l'échantillon, c'est à dire aux sorties de l'embase de la cellule. Ce dispositif doit permettre d'être en condition non drainée (non variation de volume de l'échantillon). L'intérêt de placer les vannes le plus près possible de l'échantillon est de minimiser le volume "mort" du fluide interstitiel. En effet, fermer le circuit permet de se placer en condition de non

variation de la masse du fluide situé entre les deux vannes, et la condition de non variation de volume de l'échantillon est plus ou moins respectée selon la compressibilité de ce volume, lui même dépendant du type de fluide, mais surtout du volume de fluide et de la rigidité du circuit hydraulique. Fermer les vannes uniquement à la sortie des générateurs de pression fait entrer en jeu la dilatation des tuyaux souples lors des variations de pression, ce qui est un effet perturbateur. De même, si l'on se contentait d'immobiliser les pistons des générateurs de pression, le grand volume d'eau contenu dans ceux-ci ne pourrait pas permettre d'empêcher la variation de volume d'eau dans l'échantillon.

La pression interstitielle, lors des phases drainées, a été imposée entre 3 et 6 MPa suivant les essais. La contrainte effective est définie comme la contrainte globale moins la pression interstitielle.

Le circuit de drainage est saturé par circulation d'eau avant l'essai, et des plaquettes drainantes en acier inoxydable fritté sont saturées sous vide. Elles sont posées sur les embases de la cellule et une feuille de papier *filtre* est placée entre chacune des extrémités de l'échantillon et les plaquettes, en suivant les recommandations de Oka et Maekawa [113] et Bishop et Henkel [18].

Lorsque l'échantillon est mis en place, et la cellule assemblée, le circuit de drainage est fermé. Dans ces conditions non drainées, on évite les risques de gonflement de la marne qui pourraient survenir du fait d'un apport d'eau supplémentaire. La pression du fluide de confinement est augmentée, jusqu'à ce que la pression du fluide interstitiel, mesurée par le capteur de pression, atteigne la valeur souhaitée pour l'essai. La différence entre la pression interstitielle et la pression de cellule à ce stade est significative de la succion (pression interstitielle négative) qui existait dans les blocs de marne à la pression atmosphérique (Bishop *et al.* [19], Kirkpatrick and Khan [84]). Cette différence est inférieure à $0,4$ MPa pour l'ensemble des essais.

6.2.1.2 Compression

Des mesures du coefficient de Skempton B, défini comme le rapport d'un incrément de pression interstitielle sur un incrément de pression de confinement ont été faites. Cependant la résolution de la mesure du capteur de pression n'est pas suffisamment bonne pour permettre d'interpréter les résultats, car le rapport est supérieur ou inférieur à 1 [1] suivant les cas.

La consolidation isotrope a été effectuée suivant deux méthodes. La première méthode charge l'échantillon par paliers (cas de l'essai MB9801). Chaque palier a une amplitude du double du précédent. Un palier est considéré comme fini quand la variation de volume s'est stabilisée. La figure 6.3 illustre la succession des paliers de contrainte isotrope. On constate que le temps de consolidation augmente au fur et à mesure du chargement.

1. un matériau saturé doit avoir un coefficient de Skempton B égal à 1, et un matériau non saturé, un coefficient inférieur à 1.

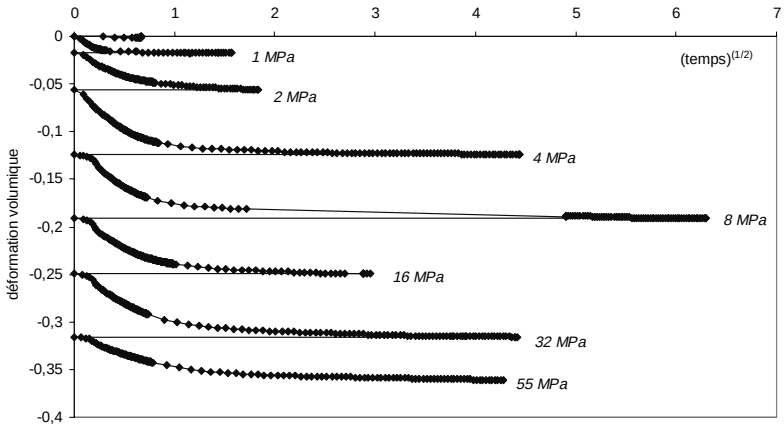


FIG. 6.3 – *Paliers successifs de chargement isotrope : déformation volumique en fonction de la racine carrée du temps, en heures. La déformation volumique se stabilise à la fin de chaque palier. L'amplitude de chacun d'eux est le double du précédent.*

La seconde méthode consiste à comprimer l'échantillon à une vitesse de contrainte isotrope continue. La vitesse de chargement de $0,01\ MPa$, qui est la vitesse minimum qu'il est possible de programmer aux régulateurs de pression, a été utilisée, avec un drainage par les deux faces de l'échantillon. Cette méthode a tendance à générer une surpression interstitielle (Atkinson [5]). Pour estimer cette surpression, l'essai MB9802 sur un échantillon d'élancement 1 a été fait, avec un drainage par une seule extrémité, et une mesure de la pression interstitielle par l'autre extrémité. Le chemin de drainage, dans ces conditions, est identique au chemin sur les échantillons d'élancement 2 drainés par les deux faces. La surpression tout au long de l'essai, effectué à la vitesse de contrainte isotrope de $0,01\ MPa$, jusqu'à la contrainte effective de $54\ MPa$, n'a pas dépassé $0,25\ MPa$. On peut donc considérer que la vitesse de chargement isotrope de $0,01\ MPa$ est satisfaisante. De façon identique, l'écrasement déviatoire de l'essai MB9802, a été poursuivi avec une vitesse d'écrasement de $0,001\ mm/min.$; la surpression interstitielle lors de cette phase ne dépasse pas $1\ MPa$. Cette valeur reste faible devant la pression effective de $54\ MPa$, et semble encore raisonnable.

La régulation du déplacement du piston axial de la cellule est contrôlé par un capteur LVDT placé en tête du piston, et qui est connecté au régulateur du générateur de pression, afin de pouvoir imposer une vitesse de déplacement constante.

La déformation volumique est définie comme étant : $\varepsilon_v = -\ln\left(\frac{V}{V_o}\right)$. Cette définition, dans le cas des grandes transformations, a l'avantage de donner, en dérivant par rapport au temps, une vitesse de déformation qui tient compte du changement de géométrie. De même, lors de la phase déviatoire, la déformation axiale est définie par $\varepsilon_a = -\ln\left(\frac{l}{l_o}\right)$.

6.2.1.3 Perméabilité

La mesure de perméabilité est réalisée en faisant circuler sous un gradient de pression le fluide interstitiel. Les gradients de pression sont imposés régulièrement au cours de l'essai, pendant des phases courtes (de 30 à 60 $min.$). Lors des premiers essais, les gradients étaient imposés toujours dans le même sens. Une technique plus complète, imposant régulièrement un gradient dans un sens et un autre dans l'autre sens immédiatement, a été adoptée plus récemment. Cela permet, en comparant le débit du fluide dans un sens puis dans l'autre, d'éliminer un éventuel débit résiduel généré lors de la déformation de l'échantillon. Ce dernier peut être causé par des dissymétries dans l'échantillon (hétérogénéité initiale de l'échantillon en terme de perméabilité, dissymétrie du champ de déformation lors de la compression, dissymétrie de sa géométrie) ou bien dans le circuit (perméabilités des deux pierres poreuses éventuellement différentes, longueurs des circuits hydrauliques de part et d'autre de l'échantillon légèrement inégales). En effectuant la différence des débits correspondants aux deux gradients opposés, on peut montrer que la composante du débit résiduel s'élimine (cf. annexe E).

Le calcul de la perméabilité, à partir des mesures de débit de gradient, fait intervenir la géométrie de l'échantillon. On est ici en grande transformation, et la géométrie change fortement. Pour tenir compte de ces modifications dans le calcul de perméabilité, les dimensions sont réactualisées tout au long de l'essai. Lors de la phase de consolidation isotrope, la déformation volumique est supposée isotrope. Les déformations axiale et radiale sont prises égales au tiers de la déformation volumique. Lors de la phase déviatoire, la déformation radiale est prise égale à la moitié de la différence entre la déformation volumique et la déformation axiale mesurée. On suppose ainsi que l'échantillon reste cylindrique tout au long de l'essai.

6.2.2 Résultats

6.2.2.1 Consolidation

Les courbes de consolidation (déformation volumique en fonction du logarithme de la pression effective) sont présentées sur la figure 6.4. Les différentes mesures effectuées au cours des différents essais y sont tracées. Les essais MBT9701, MB9802, MB9804 sont des essais dont la consolidation a été effectuée en continu à la vitesse de $0,01\ MPa/min$, tandis que l'essai MB9801 a été effectué par paliers successifs de contrainte. Dans ce cas, l'amplitude d'un palier est choisie au double du palier antérieur. La pente de l'essai MB9801 est légèrement supérieure aux autres essais. Il semble donc que le protocole de consolidation ait une influence non négligeable sur la déformation, bien que le nombre d'essais soit encore insuffisant pour conclure.

Cette différence de pente pourrait s'expliquer par une surpression interstitielle croissante au cœur de l'échantillon lors des essais en continu. Cette surpression, sous estimée, entraînerait une surestimation de la pression effective calculée. Cependant, le décalage des courbes à 60 MPa de contrainte isotrope impliquerait d'avoir une

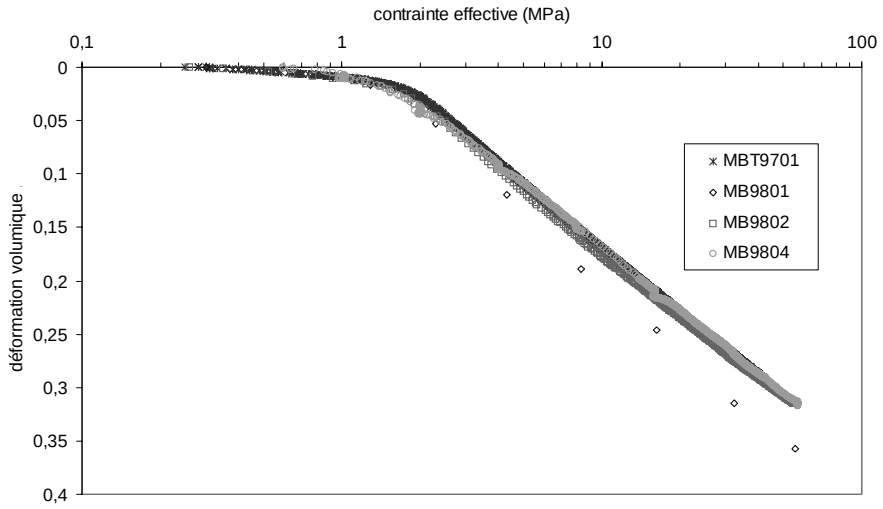


FIG. 6.4 – *Courbes de consolidation de la marne du Plaisancien, consolidation continue ou par paliers.*

surpression de plus de 20 MPa lors des essais en continu, ce qui est en contradiction avec la mesure de pression interstitielle réalisée au cours de l'essai MB9802. De plus, la relaxation de la pression interstitielle en fin d'essai, lorsque la contrainte isotrope imposée est stabilisée, ferait évoluer la déformation volumique des courbes d'écrasement en continu jusqu'à la déformation correspondant à la courbe d'écrasement par paliers. Or l'évolution de la déformation volumique est très faible pendant cette période alors qu'elle se stabilise avec le temps.

La contrainte de préconsolidation, définie à l'intersection des tronçons quasi linéaires des courbes de consolidation dans le domaine surconsolidé et normalement consolidé (Casagrande [33]), est proche de $1,7\ MPa$.

6.2.2.2 Ecrasement déviatoire

Deux niveaux de contrainte latérale ont été utilisés pour les essais déviatoires. Le volume de l'échantillon au début de l'essai (i.e. à la fin de la phase de consolidation) est pris volontairement comme état de référence pour représenter ces essais. Les courbes rapport de la contrainte axiale sur la contrainte latérale et déformation volumique en fonction de la déformation axiale sont représentées sur les figures 6.5 et 6.6. Le rapport de contrainte est utilisé, bien que cette expression n'ait pas vraiment de signification pour les matériaux cohésifs. Mais la cohésion de la marne est très faible devant les contraintes sollicitées, si bien que ce matériau peut raisonnablement être considéré comme un matériau sans cohésion à ce niveau de contrainte.

La contrainte axiale est calculée en prenant en compte le changement de section au cours du chargement, en supposant que l'échantillon reste cylindrique.

Le matériau est contractant, et le rapport de contrainte mobilisé tend vers une asymptote, dont le niveau dépend du niveau de contrainte latérale. Le rapport limite

est de 2,7 à la contrainte latérale de 10 MPa, et de 2,1 à la contrainte de 60 MPa. Bien que le nombre d'essais soit encore faible, cela suggère que la courbe enveloppe est non linéaire.

L'allure des échantillons après essai est représentée sur la figure 6.7. Ce sont des échantillons écrasés sous un confinement de 10 MPa. Ils présentent, même à ce niveau de contrainte, des surfaces de cisaillement, extrêmement fines. Les essais menés à 60 MPa ont également présenté des surfaces de cisaillement inclinées. Le phénomène de localisation de la déformation semble donc être le mode de rupture ultime de la marne.

6.2.2.3 Mesures de perméabilité

Le protocole expérimentale a été défini précédemment. Les différentes mesures de perméabilité, dans la phase de compression isotrope (essais MB9801 et MB9804), et dans la phase de compression déviatoire à une contrainte effective latérale de 10 MPa (essais MB9805 et MB980917), sont représentées en fonction de la porosité (Fig. 6.8). Celle-ci est elle-même calculée à partir de la déformation volumique mesurée au cours des essais, et de sa valeur estimée avant essai pour chacun des échantillons (Tab 6.1).

On observe que les quatre courbes de la figure 6.8 se superposent bien; à même porosité, la perméabilité axiale est la même. Pourtant, pour les deux types d'essais, les porosités sont atteintes sur des chemins de contrainte différents, et donc a priori également différents en déformation. On peut s'attendre, au niveau microscopique, à une réorientation des grains, perpendiculairement à l'axe de compression pour les essais déviatoires (Raynaud [121]). Néanmoins, on n'observe pas l'effet qu'on attendrait d'une telle modification anisotrope de la structure granulaire sur la perméabilité. La partie déviatoire de la déformation ne joue pas de rôle apparent sur les mesures de perméabilité axiale. Autrement dit, la porosité est une bonne indication de la perméabilité, alors que le champ de déformation peut être isotrope ou anisotrope. L'anisotropie de la perméabilité n'est cependant pas exclue, on peut imaginer avoir, à même porosité, des perméabilités latérales différentes pour les deux types d'essais. Il serait nécessaire pour évaluer cette anisotropie, de procéder à des mesures de perméabilité latérale, perpendiculairement à l'axe de compression.

Lorsque la porosité diminue, la perméabilité axiale diminue, suivant une loi en puissance. Sur le graphe, la courbe $k = k_o(\eta/\eta_o)^\alpha$ avec $\alpha = 6$ est représentée, k_o et η_o étant respectivement la perméabilité et la porosité de référence (elles sont prises aux valeurs initiales moyennes en début d'essai). La courbe représente bien l'évolution de la perméabilité en fonction de la porosité. La valeur de $\alpha = 6$ se situe dans l'intervalle $[1 - 25]$ des valeurs recensées par David *et al.* [50].

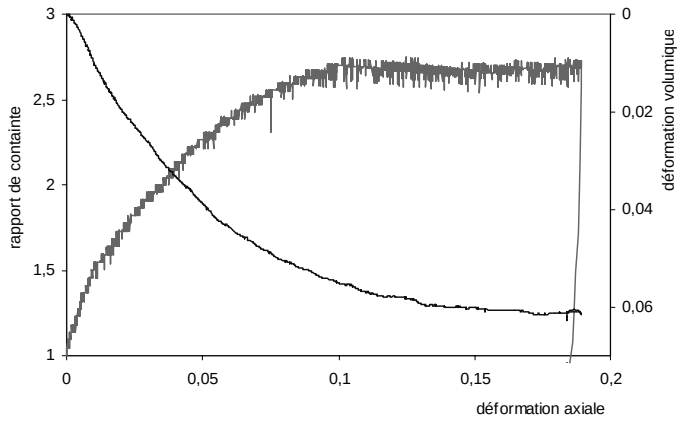


FIG. 6.5 – *Compression triaxiale de la marne sous* 10 MPa *de confinement. Courbes du rapport de contrainte (axiale sur latérale) et de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale.*

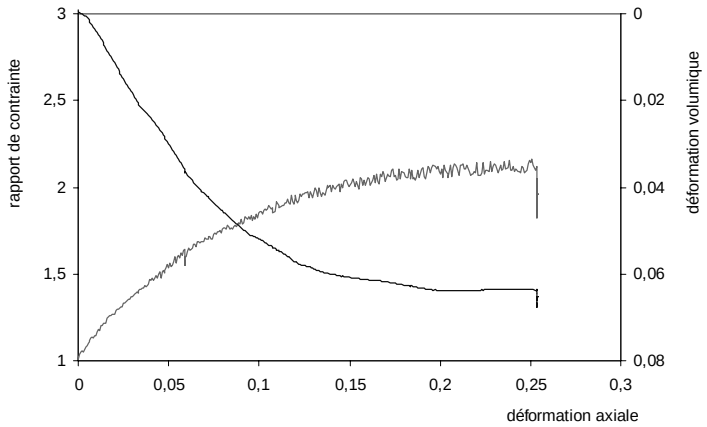


FIG. 6.6 – *Compression triaxiale de la marne sous* 60 MPa *de confinement. Courbes du rapport de contrainte (axiale sur latérale) et de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale.*

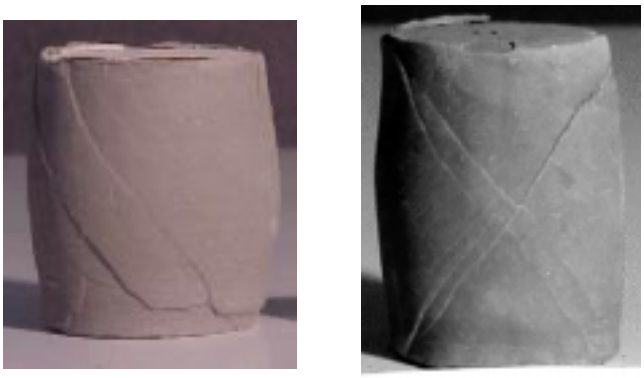


FIG. 6.7 – *Allure des échantillons de marne à la fin des essais déviatoires avec un confinement de* 10 MPa *(MB9805 à gauche, MB981104 à droite).*

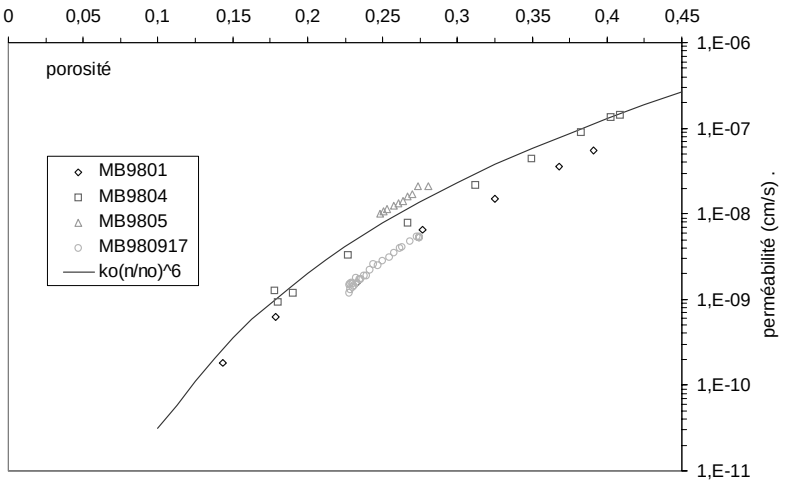


FIG. 6.8 – *Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité, pendant des phases de compression isotrope et déviatoire.*

6.3 Conclusion

La technique de conservation de la marne, spécialement développée pour cette étude, a montré son efficacité et permet de maintenir le matériau saturé.

Les protocoles d'essai ont été validés, et notamment les vitesses de chargement utilisées sont des valeurs ne générant que de faibles surpressions interstitielles. Il reste cependant une différence observée entre la technique de chargement isotrope par paliers et à vitesse constante. Une étude supplémentaire semble nécessaire pour confirmer ce fait.

Le comportement, dans le domaine normalement consolidé, est ductile. La contrainte axiale lors de la compression déviatoire atteint un palier qui dépend de la contrainte latérale. Des bandes de cisaillement sont observées sur les échantillons après essai. Il n'apparaît cependant pas de changement de la perméabilité globale au moment de la localisation. D'ailleurs, les mesures employées ne permettent pas de déterminer le moment d'apparition de la localisation.

La perméabilité mesurée lors des phases de compression isotrope et déviatoire ne dépend que de la porosité, malgré la différence des états de contrainte, état isotrope ou fortement anisotropie. Une loi en puissance 6 décrit bien l'évolution de la perméabilité en fonction de la porosité.

Conclusion de l'étude expérimentale

L'étude expérimentale a concerné trois types de matériau. Par ordre croissant de rigidité, on a étudié une marne argileuse du Plaisancien dont la résistance à la compression simple est de l'ordre de $0,9\ MPa$, un grès rouge des Vosges dont la résistance uniaxiale est d'environ 35 MPa, et une siltite du Gard ayant une résistance de 70 MPa.

L'étude très complète du grès des Vosges, effectuée sur des chemins triaxiaux axisymétriques, pour une gamme de confinement de 0 à 60 MPa, a permis de caractériser son comportement. Dans cette gamme, le comportement passe d'un domaine fragile à un domaine transitoire entre la rupture fragile et la rupture ductile. La courbe enveloppe du grès est fortement non linéaire.

La rupture dans le grès se manifeste par l'apparition d'une ou plusieurs bandes de cisaillement, d'épaisseur non nulle, à l'intérieur desquelles le matériau semble partiellement broyé. L'inclinaison des bandes évolue fortement en fonction du confinement. En compression uniaxiale, la rupture se manifeste par des plans de rupture axiaux ou légèrement inclinés. Dès qu'un confinement est appliqué, les bandes sont inclinées par rapport à la direction de contrainte principale majeure, et ce d'autant plus que le confinement augmente. D'autre part, le seuil de localisation, caractérisé par une perte de l'homogénéité du champ de déformation, devient de plus en plus précoce lorsque le confinement augmente, i.e. le rapport de la contrainte au seuil de localisation et de la contrainte au pic, diminue avec le confinement.

Les bandes de cisaillement observées par tomographie aux rayons X ou par microscopie montrent un aspect dilatant dans le domaine de comportement fragile, et un aspect contractant dans le domaine de comportement intermédiaire.

L'étude sur la siltite du Gard a permis d'observer l'initiation et la propagation de fissures. Après une caractérisation classique sur des échantillons cylindriques en compression simple, au cours desquels la recherche de précurseurs à la rupture n'a montré que des manifestations très tardives, une étude sur parallélépipèdes percés d'un trou central a été menée en compression simple. Le champ de déformation a été observé par une technique optique de stéréophotogrammétrie de faux relief. La naissance des fractures macroscopiques s'est manifestée autour du trou avec un mode mixte d'ouverture et de cisaillement, et la propagation contrôlée s'est produite dans le plan des fractures avec un mode essentiellement de cisaillement. Des indices

d'une zone de concentration de la déformation en tête des fracture et dans leur prolongement ont été observés, mais la caractérisation précises de la distribution des déformations dans ces zones est restée difficile.

L'étude sur la marne de Beaucaire a été effectuée sur le domaine normalement consolidé, à des contraintes très supérieures de la contrainte de préconsolidation. La rupture ductile en compression triaxiale a fait apparaître des bandes de cisaillement inclinées par rapport à l'axe de compression. La mesure de la perméabilité au cours des phases d'écrasement avec un état de contrainte isotrope ou anisotrope a montré une forte variation de la perméabilité, très bien corrélée avec la variation de la porosité, suivant une loi en puissance.

Les trois matériaux étudiés sont très différents les uns des autres, que ce soit d'un point de vue mécanique ou encore minéralogique pour le grès d'une part et la marne et la siltite d'autre part. Dans les trois cas, la rupture s'est manifestée par l'apparition de bandes de localisation de la déformation. A partir d'un certain niveau de contrainte, les bandes gardent une certaine cohésion, tandis que pour les faibles contraintes, la localisation conduit à la formation d'une macrofissuration.

Ces résultats permettent de montrer l'intérêt de la théorie de la bifurcation pour prédire la rupture par localisation des déformations, même pour des matériaux très divers.

La seconde partie du mémoire aborde le problème de la modélisation du comportement et de la localisation, en utilisant l'exemple du grès des Vosges. Une loi de comportement a été développée spécialement, à partir du modèle de loi CLoE déjà existant. Avec cette modélisation, une analyse de la rupture à partir du critère de bifurcation généralisé de Rice est menée, en étudiant l'influence des paramètres de la loi sur les caractéristiques de la localisation.

Deuxième partie

Études Théoriques

Le travail théorique qui suit concerne d'une part une étude de modélisation de comportement, et d'autre part une étude de bifurcation d'équilibre par localisation des déformations.

La modélisation présentée concerne le grès des Vosges dont on a étudié le comportement mécanique dans la première partie de ce mémoire. La modélisation utilise une loi de la famille des modèles CloE. La version dénommée *CLoE Roche* existait déjà (Tillard [144], El Hassan [59]), c'était une version dérivée de la version *CLoE Sable*, elle permettait de prendre en compte une cohésion. A partir des travaux présentés dans ces pages, il a été décidé de rebaptiser *CloE Sols* le modèle sable étendu de D. Tillard et N. El Hassan, et d'attribuer le nom de *CloE Roche* au présent modèle. En effet ce nouveau modèle constitue un développement plus spécifiquement adapté aux roches, en introduisant notamment une variation de la réponse de la variation de volume avec la pression moyenne.

Les résultats expérimentaux permettent également une confrontation avec les résultats numériques de la bifurcation. A cet effet, une prospection de l'influence de plusieurs paramètres de la loi sur les caractéristiques de la localisation est présentée en deuxième chapitre.

Chapitre 7

Modélisation

La forme générale des modèles de type incrémental non linéaire de la famille CLoE a déjà été abordée au chapitre 2. Nous présentons en premier lieu les principes de base de la loi *CLoE Roche*, qui permettent d'établir les différents composants de l'équation constitutive.

A partir de là, une identification des paramètres du modèle sur le grès des Vosges étudié est présentée.

7.1 Principe de CLoE

Le matériau modélisé par une loi de la famille CLoE[1] est supposé être non visqueux, et isotrope initialement. D'autre part, les chargements cycliques sont exclus de ce travail de modélisation.

Cette loi est non-standard. Elle conserve aussi les mêmes avantages que les lois élastoplastiques non coaxiales. Cette non-restriction vis-à-vis de la coaxialité permet d'améliorer les prédictions en bifurcation (Rudnicki et Rice [124], Papamichos et Vardoulakis [117]).

Elle utilise le concept de surface limite. De ce principe découle des conditions de consistance sur cette surface que nous énumérerons.

Et puis, pour tout état de contrainte à l'intérieur de la surface limite, les coefficients rentrants en compte dans la relation constitutive sont déterminés à partir de leur valeur sur des chemins simples, accessibles expérimentalement (**triaxiaux de compression**, d'**extension**, **essais isotrope** et **pseudo- isotrope**). Une interpolation est effectuée à partir de ces états de référence pour obtenir les valeurs à l'état de contrainte réel.

Pour les versions antérieures de CLoE, la réponse du matériau était supposée être proportionnelle à la contrainte moyenne, ce qui faisait que les tenseurs constitutifs de la loi ($\underline{\underline{A}}$ et $\underline{b}$) étaient linéairement dépendants de la trace du tenseur de contrainte $\underline{\sigma}$. Cette hypothèse est abandonnée en faisant dépendre la variation de volume en

1. Par abus de langage, nous appelons loi CLoE une loi extraite du modèle de loi CLoE

compression du niveau de contrainte moyenne. Cependant, excepté ce point, les implications de l'hypothèse antérieure sont conservées. Cela joue entre autre sur les aspects suivants, qui sont présentés dans la suite de ce chapitre :

- conservation d'une surface limite conique.
- définition de chemins de référence de contrainte en terme de rapport de contrainte axiale sur contrainte latérale indépendante de la pression moyenne.
- évolution de la contrainte sur un chemin isotrope exponentielle par rapport à la déformation.

Notons qu'une comparaison récente de la réponse d'un problème aux limites dans un matériau granulaire, en utilisant une loi CloE, une loi élastoplastique parfaite et une loi élastoplastique avec écrouissage a montré des résultats plus proches de la réalité obtenus avec la loi CloE (Viggiani et Tamagnini [156]).

7.1.1 Forme de CLoE

La relation constitutive établit la relation entre la vitesse de contrainte de Cauchy et la vitesse de déformation (cf. la représentation graphique de Gudehus Fig. 7.1) sous la forme :

$$\dot{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : \dot{\underline{\varepsilon}} + \underline{b}\,\|\dot{\underline{\varepsilon}}\| \text{ ou encore : } \dot{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : (\dot{\underline{\varepsilon}} + \underline{b'}\,\|\dot{\underline{\varepsilon}}\|)$$

$\underline{\underline{A}}$ et $\underline{b}$ ou $\underline{b'}$ sont des tenseurs qui ne dépendent que de l'état de contrainte. Ainsi, la non linéarité de la loi tient au terme $\|\dot{\varepsilon}\|$. Si l'on impose un incrément de déformation $\lambda\dot{\underline{\varepsilon}}$ au lieu de $\dot{\underline{\varepsilon}}$, la réponse $\dot{\underline{\sigma}}$ devient $\lambda\dot{\underline{\sigma}}$ si λ est positif. Cette linéarité n'est plus vraie si λ est négatif (loi homogène positive de degré un). D'autre part, tout changement de la direction de $\dot{\underline{\varepsilon}}$ entraîne une réponse non linéaire.

7.1.2 Surface limite

La surface limite délimite l'espace de contrainte accessible. Son équation s'écrit :

$$\psi(\underline{\sigma}) = 0$$

Pour la loi *CLoE Roche*, comme pour la loi *CLoE Sable*, la surface de Van Eekelen a été adoptée. Elle offre l'avantage d'accepter un angle de frottement en extension différent de celui en compression, dans la limite où elle reste convexe. C'est un cône, d'axe la trisectrice du repère des contraintes principales, dont l'allure de la section dans le plan déviatoire est présentée sur la figure 7.2. Cette section peut varier d'un cercle à un quasi triangle, mais avec une continuité des tangentes (arrondis aux angles). L'équation de la surface de Van Eekelen s'écrit :

$$\psi(\underline{\sigma}) = aI_\sigma \left(1 + b27\sqrt{2}\frac{III_{\hat{\sigma}}}{II_{\hat{\sigma}}^3}\right)^n - II_{\hat{\sigma}}$$

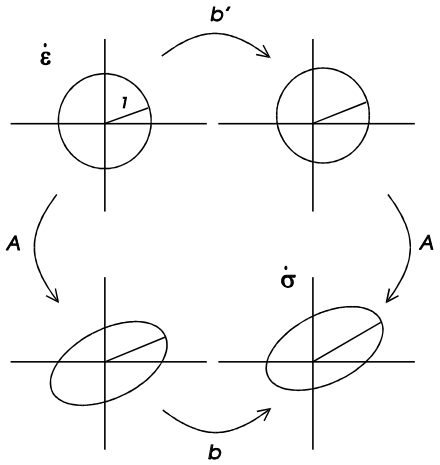


FIG. 7.1 – *Principe de la loi selon la représentation de Gudehus. Le graphe en bas à droite représente la réponse en contrainte d'une sollicitation quelconque en déformation de norme 1, représentée en haut à gauche.*

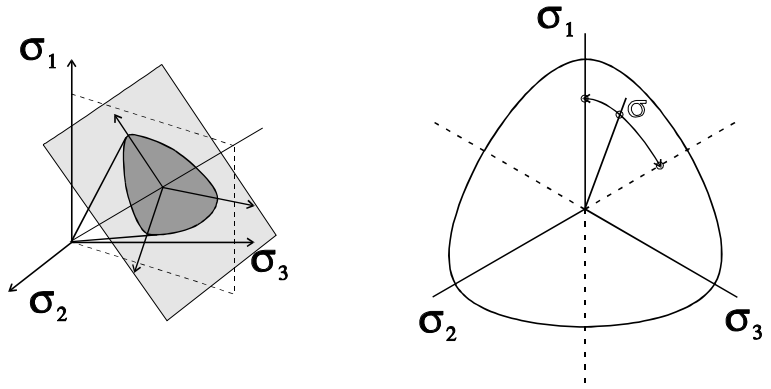


FIG. 7.2 – *Allure de la surface limite de Van Eekelen, délimitant l'espace de contrainte accessible.*

$\underline{\hat{\sigma}}$ est le déviateur de contrainte défini par $\underline{\hat{\sigma}} = \underline{\sigma} - \frac{1}{3}tr(\underline{\sigma})\underline{\delta}$, $\underline{\delta}$ étant la matrice identité. Les invariants de contrainte utilisés se définissent par : $I_\sigma = \frac{1}{3}tr(\underline{\sigma})$, $II_{\hat{\sigma}} = 3tr(\underline{\hat{\sigma}}^2)$ et $III_{\hat{\sigma}} = \frac{1}{3}tr(\underline{\hat{\sigma}}^3)$. Le paramètre n influe sur la courbure de la surface dans le plan déviatoire.

L'équation de **consistance à la surface limite** impose à l'état de contrainte de rester à l'intérieur de celle-ci. Notamment, pour un état sur la surface limite, quel que soit la vitesse de déformation imposée, l'incrément de contrainte doit se situer à l'intérieur de cette surface. Cela impose aux tenseurs $\underline{\underline{A}}$ et $\underline{b'}$ de respecter la relation suivante :

$$A_{klmn}\frac{\partial\psi}{\partial\sigma_{kl}} = -\lambda b'_{mn} \quad \text{avec} \quad \lambda > 0 \tag{7.1}$$

Par ailleurs, sur la surface limite, on a $\|\underline{b'}\| = 1$

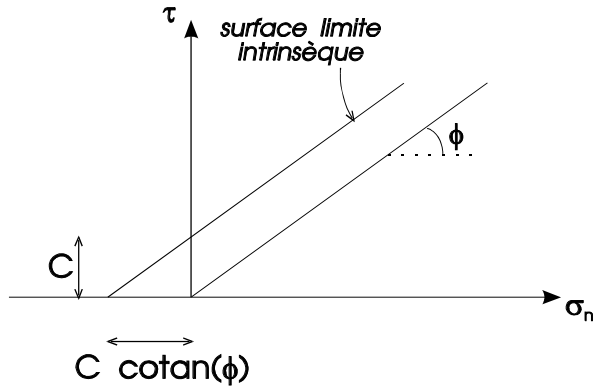


FIG. 7.3 – *Application du principe des états correspondants : la surface limite effective est décalée proportionnellement à la cohésion.*

7.1.3 Cohésion

Comme la loi *CloE Sols* utilisée par D. Tillard et N. El Hassan, la loi *CLoE Roche* permet de prendre en compte une cohésion du matériau à partir de l'hypothèse des états correspondants (Caquot [32]). Par cette approche, on se ramène à un matériau purement frottant, en décalant le repère des contraintes réelles vers un repère de contraintes modifiées. Ainsi, à chaque composante du tenseur des contraintes principales, un terme constant, dépendant de la cohésion (C) et de l'angle de frottement(ϕ), est ajouté. La figure 7.3 en donne le principe dans le plan de Mohr. On notera $\underline{\sigma}^*$ cette contrainte exprimée dans le repère des contraintes modifiées, et définie par la relation : $\underline{\sigma}^* = \underline{\sigma} + C\,\mathrm{cotan}\phi\,\underline{\delta}$

7.1.4 Tenseurs constitutifs

$\underline{\underline{A}}$ est un tenseur du quatrième ordre. Si l'on écrit les tenseurs de contrainte et de déformation sous la forme matricielle à une seule dimension et six composants, le tenseur du quatrième ordre prend la forme d'un tenseur à deux dimensions. Les tenseurs constitutifs s'écrivent alors sous la forme générale ([34]) :

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} a & f' & e' & & & \\ f & b & d' & & & \\ e & d & c & & & \\ & & & g & & \\ & & & & h & \\ & & & & & j \end{bmatrix}$$

$$\underline{b'} = \begin{bmatrix} k & l & m & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Pour les états de contrainte triaxiaux qui servent de référence lors de l'interpolation vers un état de contrainte quelconque, les matrices se simplifient vers l'écriture

suivante :

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} a & e' & e' & & & \\ e & b & d & & & \\ e & d & c & & & \\ & & & b-d & & \\ & & & & h & \\ & & & & & h \end{bmatrix}$$

$$\underline{b'} = \begin{bmatrix} k & l & l & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Et pour un état de contrainte isotrope :

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} a & d & d & & & \\ d & a & d & & & \\ d & d & a & & & \\ & & & a-d & & \\ & & & & a-d & \\ & & & & & a-d \end{bmatrix}$$

$$\underline{b'} = \begin{bmatrix} k & k & k & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Les huit coefficients de l'état de contrainte triaxial doivent être déterminés. Sept d'entre eux (k, l, a, b, d, e, e') peuvent être déterminé à partir de la réponse prédéfinie pour les chemins triaxiaux de compression, d'extension, isotrope et pseudo-isotrope. Le dernier coefficient h n'est pas accessible sur ces chemins. Par contre, il joue un rôle, dont on se sert, dans l'analyse en bifurcation.

Les quatre chemins de référence précités sont définis à partir de leur réponse, en terme de relation analytique : rapport de contraintes - déformation axiale et déformation volumique - déformation axiale.

7.1.5 Consistance

La consistance à la surface limite interdit toute sortie de l'état de contrainte en dehors de la surface limite (§7.1.2).

Il existe également des conditions de consistance au point isotrope, reliant certains modules de chargement et de déchargement en compression triaxiale aux modules de chargement et déchargement en extension triaxiale, et aux modules de chargement et déchargement en compression isotrope. Ces relations peuvent s'écrire ([38]) :

$$\frac{1+\nu_C}{E_C} = \frac{1+\nu_E}{E_E}$$

$$\frac{1}{E_C} - \frac{1}{E_E} + k\left(\frac{\sqrt{1+2\nu_C^2}}{E_C} + \frac{\sqrt{1+2\nu_E^2}}{E_E}\right) = 0 \tag{7.2}$$

$$E_{ic} = E_C \frac{1 + k\sqrt{3}}{1 - 2\nu_C + 3k\sqrt{1 + 2\nu_C^2}}$$

qui imposent E_E et ν_E, le module d'Young et le coefficient de Poisson à l'origine de l'essai d'extension, à partir de E_C, ν_C et E_{ic}, E_{ic} étant le module de la compression isotrope (cf. §7.1.8.3). k est la première composante du tenseur $\underline{b}'$.

7.1.6 Chemins de référence

7.1.6.1 Compression triaxiale

L'expression analytique servant à définir la réponse du chemin triaxial de compression relie d'une part le rapport de la contrainte axiale sur la contrainte latérale à la déformation axiale. Ces deux contraintes sont exprimées dans le repère des contraintes modifiées (cf. §7.1.3). La relation est de type hyperbolique (Fig. 7.4) :

$$\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*} = 1 + \frac{a_{hc}\,\varepsilon_a}{c_{hc}\,\varepsilon_a + 1}$$

L'asymptote de cette hyperbole $1+\frac{a_{hc}}{c_{hc}}$ doit être consistante avec la surface limite.

Une autre formulation a également été proposée dans le cadre de ce travail, en combinant un premier tronçon linéaire puis un tronçon hyperbolique. Celle-ci a été motivée par le souci de pouvoir diminuer l'angle de frottement de la surface limite tout en permettant une bonne description des courbes expérimentales.

D'autre part, l'expression analytique relie la déformation volumique à la déformation axiale. Contrairement à *CLoE Sable*, la formulation dépend du niveau de contrainte latérale. En effet, la figure 4.18 (p. 89) des résultats expérimentaux sur le grès des Vosges montre clairement la forte sensibilité du comportement volumique. Plus le confinement est fort, moins le matériau est dilatant, on a même une absence de dilatance dans certain cas.

La formulation décompose l'évolution de la déformation volumique en trois tronçons (cf. Fig. 7.4) :

- un premier tronçon décrit par une parabole, dont les paramètres dépendent de la contrainte latérale σ_l. La pente de cette parabole s'écrit :

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} = p_{vc1}(\varepsilon_a) = 2\,a_{pc}\,\sigma_l^{m_{pc}}\,\varepsilon_a + b_{pc}$$

$$\text{pour} \quad 0 < \varepsilon_a < 0,8\,x_{pc}$$

  Par cette formulation, la pente de variation volumique à l'origine (b_{pc}) ne dépend pas du confinement, ce qui est raisonnable expérimentalement.

- un troisième tronçon décrit par une droite de pente négative ou nulle (on interdit la contractance dans cette zone par commodité et parce qu'elle n'est pas observée expérimentalement) :

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} = p_{vc2}(\varepsilon_a) = min \begin{cases} p_{fc0} + \sigma_l \, p_{p_{fc}} \\ 0 \end{cases}$$

$$\text{pour} \quad 1,2\, x_{pc} < \varepsilon_a$$

- un tronçon intermédiaire, défini comme l'interpolation linéaire des deux tronçons précédents :

$$p_{vc} = eps_{r1} \, p_{vc1}(\varepsilon_a) + eps_{r2} \, p_{vc2}(\varepsilon_a)$$

$$\text{pour} \quad 0,8\, x_{pc} < \varepsilon_a < 1,2\, x_{pc}$$

Les coefficients d'interpolation linéaires sont définis par :

$$eps_{r1} = \frac{1,2\, x_{pc} - \varepsilon_a}{0,4\, x_{pc}} \quad \text{et} \quad eps_{r2} = \frac{\varepsilon_a - 0,8\, x_{pc}}{0,4\, x_{pc}}$$

L'abcisse définissant la limite des tronçons dépend également linéairement de la contrainte latérale :

$$x_{pc} = x_{pc0} + \sigma_l \, p_{x_{pc}}$$

D'autre part, la condition de consistance à la surface limite, qui tient compte de la pente de variation volumique du dernier tronçon, devient dépendante de la contrainte moyenne. Il est alors nécessaire de vérifier la consistance, non plus une fois pour toute, mais pour chaque état de contrainte atteint pendant une simulation. Le code source de la loi a été modifié pour que ce calcul soir refait pour les différentes étapes de calcul.

7.1.6.2 Extension triaxiale

La relation reliant le rapport de contrainte à la déformation axiale est aussi de type hyperbolique :

$$\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*} = 1 + \frac{a_{he}\, \varepsilon_a}{c_{he}\, \varepsilon_a + 1}$$

L'asymptote de cette hyperbole doit être également cohérente avec la surface limite.

La relation de déformation volumique est plus complexe. Elle est établie bien sûr pour décrire au mieux les courbes expérimentales, mais aussi pour vérifier la consistance au point isotrope. Cette consistance implique notamment que la pente de chargement en extension est identique à la pente de décharge en compression. La courbe se décompose alors en quatre tronçons (cf. Fig. 7.5) :

- une courbe cubique, permettant de présenter une déformation volumique contractante ou dilatante, et avec une extrémité à pente nulle.

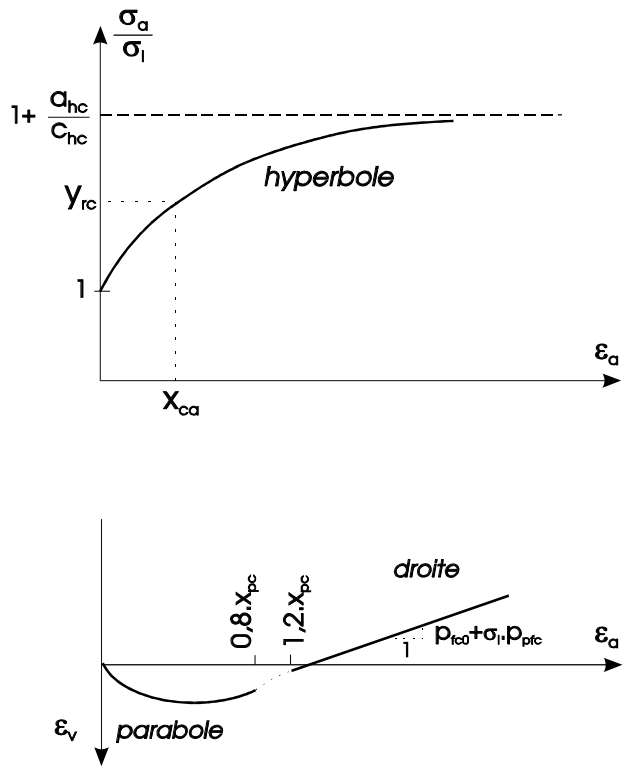


FIG. 7.4 – *Relation rapport de contraintes - déformation axiale et déformation volumique - déformation axiale, sur un chemin de compression triaxiale.*

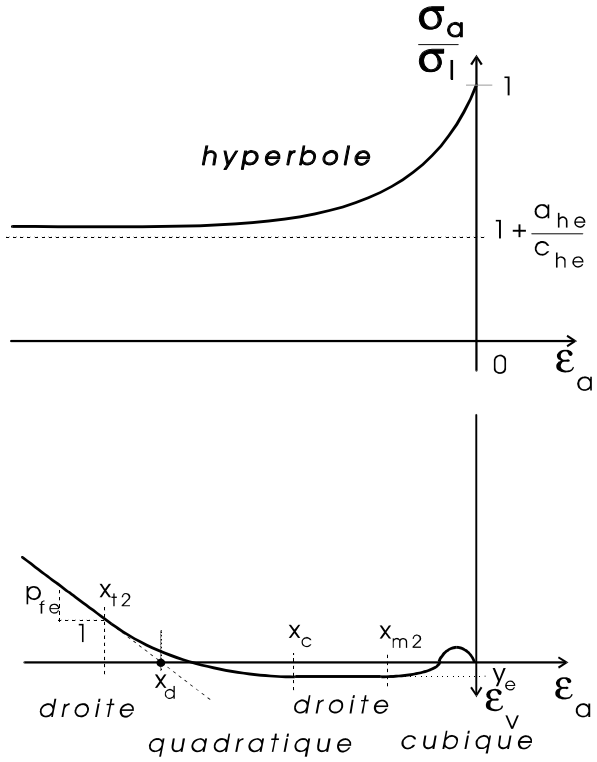


FIG. 7.5 – *Relation rapport de contrainte - déformation axiale et déformation volumique - déformation axiale, sur un chemin d'extension triaxiale.*

- une droite à déformation volumique nulle.
- une courbe bicarrée de transition vers le dernier tronçon.
- une droite de pente fixe.

Contrairement aux chemins de compression, les courbes expérimentales de variation volumique ne montrent pas de dépendance vis-à-vis de la contrainte latérale, dans le domaine étudié (cf. Fig. 4.53, p. 137). Cette dépendance n'est donc pas introduite dans la loi.

7.1.6.3 Compression isotrope

Nous avons évoqué précédemment que les tenseurs de la relation constitutive de la loi *CloE Roche* ne sont pas proportionnels à la contrainte moyenne, contrairement à *CloE Sols* (§7.1). Néanmoins, sur le chemin de compression isotrope, ces tenseurs sont proportionnels à la contrainte moyenne. En conséquence, l'évolution de la contrainte isotrope est exponentielle par rapport à la déformation (Fig. 7.6). En effet, l'écriture

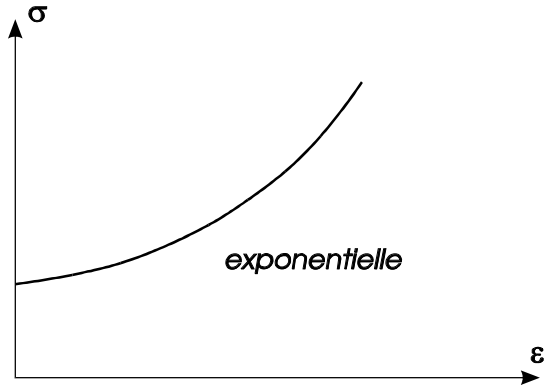


FIG. 7.6 – *Evolution exponentielle de la contrainte vis-à-vis de la déformation, sur un chemin de compression isotrope.*

des tenseurs sur le chemin isotrope impose d'avoir : $\dot{\sigma}_i^* = \Lambda\,\dot{\varepsilon}_i$ avec $\Lambda = \lambda\,\sigma_i$. Par intégration, on obtient : $\sigma_i = \sigma_{iref}\ e^{\lambda(\varepsilon_i - \varepsilon_{iref})}$.

7.1.6.4 Essai pseudo-isotrope

Les essais pseudo-isotropes sont des essais à déviateur de contrainte constant. Le chemin de contrainte est donc parallèle au chemin de compression isotrope, c'est à dire à la trisectrice du repère des contraintes principales. La réponse sur ce chemin n'est pas entièrement prédéfinie par le modèle, par contre, celui-ci prend en compte une certaine anisotropie induite. Cette anisotropie ne dépend que de l'état de contrainte (cf. §7.1.1), et un retour à une contrainte de type isotrope ramène le matériau à un matériau isotrope.

Cette anisotropie est caractérisée par le rapport des vitesses de déformation axiale et latérale obtenues en réponse à un incrément de contrainte isotrope. Ce rapport est fonction de l'état de contrainte, plus précisément du déviateur et ceci différemment en compression et en extension. Le rapport de vitesse est pris en fonction du déviateur de contrainte, en extension et en compression (Fig. 7.7). Ce rapport est pris égal à un lorsque le déviateur est nul, puisque le matériau est supposé isotrope initialement.

7.1.6.5 Comparaison avec CloE Sols

La loi *CloE Roche* permet de prendre un compte un comportement volumique dépendant du niveau de contrainte latérale sur les chemins de référence axisymétriques. La nouvelle formulation sur le chemin de compression a été présentée au paragraphe 7.1.6.1.

CLoE Sols se rapproche d'un cas particulier de *CLoE Roche* si l'on prend les coefficients permettant d'introduire la dépendance par rapport à la contrainte latérale égaux à zéro :

$$p_{x_{pc}} = p_{p_{fc}} = m_{pc} = 0$$

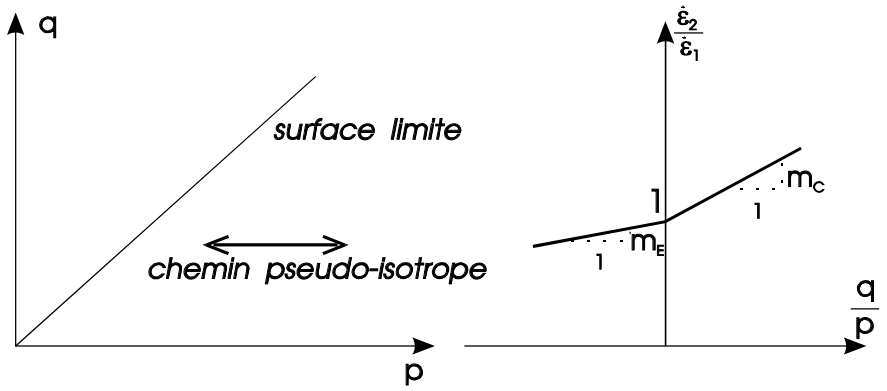


FIG. 7.7 – *Evolution du rapport des vitesses de contrainte latérale sur axiale en fonction du rapport q/p, pour un chemin de compression ou d'extension pseudo-isotrope.*

et que l'on vérifie d'autre part que la pente en fin du premier tronçon parabolique est égale à la pente de la droite du troisième tronçon (car *CloE Sols* n'introduit pas de tronçon intermédiaire entre la parabole et la droite) :

$$p_{fc0} = 2\, a_{pc}\, x_{pc0} + b_{pc}$$

La condition de consistance à la surface limite doit être vérifiée pour chaque état de contrainte atteint pendant la simulation, contrairement à la version antérieur de CloE ou cette vérification se faisait lors de l'identification de la loi, indépendamment de la contrainte moyenne. La modification introduite dans *CloE Roche* n'entraîne cependant pas de changement dans le cas précisé au-dessus. Pour le cas général, la condition de consistance à la surface limite, qui porte sur un coefficient λ_{psi}, le module pseudo- isotrope, est exprimée dans sa nouvelle version au paragraphe 7.1.8.5.

7.1.7 Interpolations de la loi

Sur les chemins de référence, la relation entre contraintes et déformations est clairement explicitée. Pour un état de contrainte quelconque, la loi CLoE prévoit de se référer à des états de contrainte sur ces chemins (les "états images") et de pratiquer des interpolations à partir des tenseurs constitutifs correspondants (les "lois images").

Un état de contrainte quelconque peut être défini par sa contrainte moyenne et sa position dans le plan déviatoire, elle-même définie (en coordonnées polaires) par le déviateur et l'angle de phase (Fig. 7.8). Les axes de ce plan déviatoire correspondent à la projection des chemins triaxiaux de compression ou d'extension, et par raison de symétrie, il est suffisant de n'observer qu'un sixième de ce plan. Les "états images" appartiennent à l'axe de compression et à l'axe d'extension les plus proches, et ont le même déviateur réduit que l'état de contrainte quelconque. Le déviateur réduit

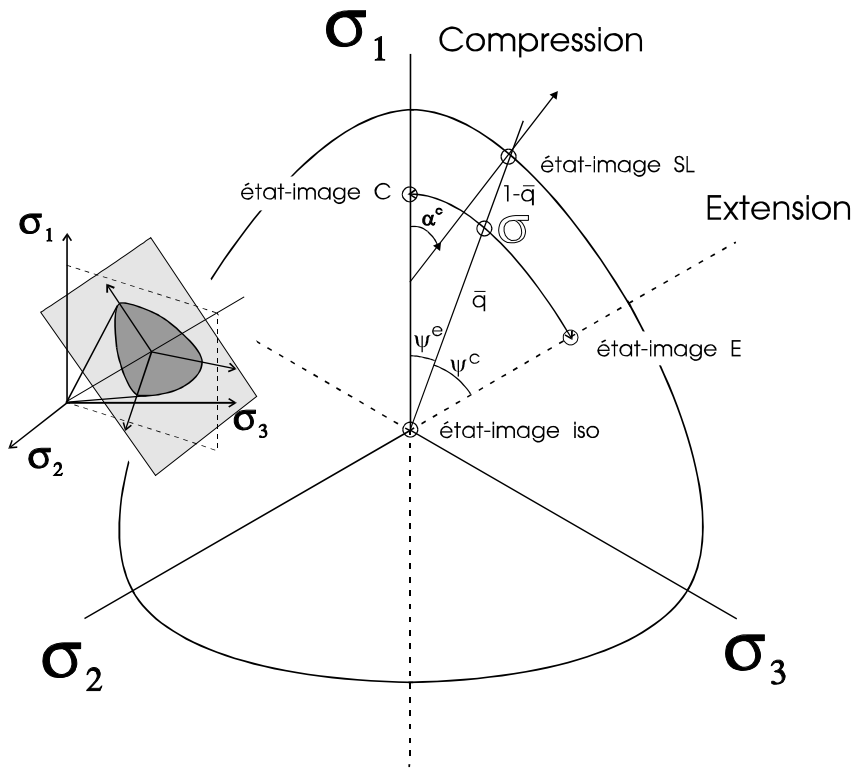


FIG. 7.8 – *Définition des "états images" dans le plan déviatoire.*

se définit par le rapport :

$$\bar{q} = \frac{q}{q_{lim}}$$

q_{lim} étant le déviateur à la surface limite correspondant à l'angle de phase de l'état de contrainte considéré.

D'autre part, il est nécessaire que pour un état de contrainte quelconque, placé sur la surface limite, les tenseurs constitutifs vérifient la condition de consistance 7.1. Une simple interpolation linéaire sur l'angle de phase ne permet pas à priori de respecter cette condition, bien que les "lois images" la respectent. Pour cela, il est nécessaire que les tenseurs constitutifs à l'état de contrainte réel placé sur la surface limite soient multipliés par un tenseur de rotation. Pour que l'évolution des tenseurs, pour un même angle de phase, soit continu vis-à-vis du déviateur réduit, il devient aussi nécessaire de faire une interpolation sur le déviateur.

L'interpolation sur les tenseurs constitutifs se résume donc en trois étapes :

1. Pour un état de contrainte défini par son angle de phase ϕ et son déviateur réduit $\bar{q}$, détermination des "états images" en compression et en extension, pris avec un même déviateur réduit $\bar{q}$. Puis interpolation linéaire par rapport à l'orientation de la normale à la surface limite pour déterminer le tenseur intermédiaire $\underline{\underline{A}}^{R_1}$ et le tenseur $\underline{b'}^{R}$.

2. Calcul des tenseurs constitutifs pour un état de contrainte sur la surface limite, à l'angle de phase ϕ, de façon identique, mais avec en plus un rotation du tenseur $\underline{\underline{A}}$ pour respecter la condition de consistance ($\underline{\underline{A}}^{SL}$).

3. Interpolation linéaire par rapport au déviateur réduit $\bar{q}$, qui conserve le tenseur intermédiaire $\underline{\underline{A}}^{R_1}$ si $\bar{q} = 0$, et qui renvoie le tenseur calculé à la surface limite $\underline{\underline{A}}^{SL}$ si $\bar{q} = 1$

Ces trois étapes sont explicitées ci-après

7.1.7.1 Interpolation de A sur l'angle de phase

Il s'agit de la première étape. Le tenseur $\underline{\underline{A}}$ est déterminé pour deux états images ($\underline{\underline{A}}^E$, $\underline{\underline{A}}^C$) , avec deux angles de phase ϕ^e et ϕ^c, différents de l'angle réel ϕ^r. La première opération consiste à effectuer une rotation autour de la trisectrice depuis l'angle de définition de ϕ^e et ϕ^c vers l'angle réel ϕ^r.

Les angles d'interpolation linéaire sont définis par :

$$\theta^C = \frac{\alpha^C}{\pi/6}$$

$$\theta^E = 1 - \theta^C$$

Avec α^C l'angle définissant la normale à la surface limite, par rapport à la normale en compression pure, au point image sur la surface limite du point réel (Fig. 7.8).

Le tenseur intermédiaire s'écrit alors :

$$\underline{\underline{A}}^{R1} = \theta^E \underline{\underline{A}}^E + \theta^C \underline{\underline{A}}^C$$

7.1.7.2 Interpolation de b' sur l'angle de phase

Le principe de l'interpolation linéaire vis-à-vis de l'angle de phase n'est pas retenu pour des problèmes de régularité. Une interpolation sur les tenseurs normés est utilisée :

$$\underline{b'}^R = \frac{\theta^E \frac{\underline{b'}^E}{\|\underline{b'}^E\|} + \theta^C \frac{\underline{b'}^C}{\|\underline{b'}^C\|}}{\left\|\theta^E \frac{\underline{b'}^E}{\|\underline{b'}^E\|} + \theta^C \frac{\underline{b'}^C}{\|\underline{b'}^C\|}\right\|} (\theta^E \|\underline{b'}^E\| + \theta^C \|\underline{b'}^C\|)$$

Sur la surface limite, on a bien $\|\underline{b'}^{R.SL}\| = 1$

7.1.7.3 Interpolation de A sur le déviateur

Il s'agit de la deuxième et troisième étapes définies précédemment. Le tenseur intermédiaire $\underline{\underline{A}}^{R1}$ ne respecte pas la relation de consistance à la surface limite. Pour cela, il faut le multiplier par un tenseur de rotation $\underline{Q}$. Ce tenseur $\underline{Q}$ ne doit pas changer les valeurs propres, mais seulement les directions propres.

$\underline{Q}$ est déterminé de la façon suivante :

Soit : $x_{mn} = \frac{\partial \psi}{\partial \sigma_{kl}} A_{klmn}$

La consistance (éq. 7.1) implique d'avoir : $x_{mn} = -\lambda\, b'^{R.SL}_{mn}$

Le tenseur $\underline{Q}$ est calculé pour provoquer la rotation de $\underline{x}$ vers $\underline{b'}$, c'est à dire :

$$\lambda\, \underline{b'}^{R.SL} = \underline{x}.\underline{Q}$$

Si on définit la base locale :

$$\begin{aligned} \underline{v}_1 &= \underline{x} \wedge \underline{b'} \\ \underline{v}_2 &= \underline{v}_1 \wedge \underline{b'} \\ \underline{v}_3 &= \underline{b'} \end{aligned}$$

Les vecteurs de cette base sont par la suite normés. La rotation se réalise autour de $\underline{v}_1$. L'angle de rotation vaut :

$$\alpha = \frac{\arccos(\underline{x}.\underline{b'}^T)}{||\underline{x}||\,||\underline{b'}||}$$

Dans le trièdre local, le tenseur s'écrit :

$$\underline{Q}^l = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

Soit dans le repère global : $\underline{Q}^G = [\underline{v}_1, \underline{v}_2, \underline{v}_3]\underline{Q}^l[\underline{v}_1, \underline{v}_2, \underline{v}_3]^T$

A la surface limite, le tenseur s'écrit alors : $\underline{\underline{A}}^{R.SL} = \underline{\underline{A}}^{R1}\underline{Q}^G$

Ce qui amène à écrire l'interpolation suivant $\bar{q}$ de la forme suivante :

$$\underline{\underline{A}}^R = \underline{\underline{A}}^{R1}((1-\bar{q})\underline{\underline{I}} + \bar{q}\underline{Q}^G)$$

La matrice de rotation $\underline{Q}^G$ est sans effet sur les chemins de référence (c'est la matrice identité car la relation de consistance y est déjà vérifiée par principe), ce qui fait que l'interpolation sur le déviateur réduit $\bar{q}$ ne modifie pas les réponses sur les chemins de référence (compression et extension triaxiales).

7.1.7.4 Interpolation du module de cisaillement

L'un des huit coefficients des tenseurs constitutifs sur chemins triaxiaux n'est pas accessible depuis les chemins de référence (cf. §7.1.4), dans lesquels les directions principales de vitesse de déformation et de contrainte sont superposées. Le module de cisaillement j rentre en jeu sur ces chemins lors de l'analyse en bifurcation. D'autre part, il est clairement défini sur le chemin de compression isotrope ($j_0 = a - d$). Le cas d'un module constant étant exclu, car on souhaite pouvoir ajuster ce paramètre au vu des résultats de l'analyse en bifurcation, la loi de variation la plus simple en fonction du déviateur est choisie : une loi linéaire sous la forme :

$$j = j_0(1 - \omega\bar{q})$$

Cette interpolation contribue à l'aspect non-coaxial de la loi CLoE. Le paramètre constant ω fera l'objet d'une détermination lors de l'étude en bifurcation.

7.1.8 Identification de la loi : principe

La loi CLoE, après l'étape d'identification, possède ses propres paramètres internes, qui n'ont pas nécessairement une signification physique évidente pour un géomécanicien. La phase d'identification se fait à l'aide d'un logiciel **CLoEId**. Ce logiciel, écrit en Fortran, demande une série de paramètres à l'utilisateur, ayant eux une signification physique plus accessible et calcule les paramètres internes (par ailleurs certains paramètres internes peuvent être affectés à des valeurs par défaut). L'identification se fait en plusieurs phases, à la fin desquelles il est possible de comparer graphiquement la modélisation avec des données expérimentales.

Elle suit un ordre logique dans la détermination des paramètres. La figure 7.9 en présente l'organigramme.

7.1.8.1 Surface limite

La procédure d'identification commence par demander les angles de frottement en compression φ_c et en extension φ_e de la surface limite. Le paramètre n qui participe à déterminer la courbure de la surface, peut être modifié. Par défaut, sa valeur est affectée à -0,229. Les paramètres a et b de l'expression de la surface limite $\frac{II_\sigma}{I_\sigma} = a(1 + b\cos(3\phi))^n$ (ϕ est l'angle de phase) sont définis par les relations :

$$b = \frac{\left(\frac{\bar{r}_C}{\bar{r}_E}\right)^{\frac{1}{n}} - 1}{\left(\frac{\bar{r}_C}{\bar{r}_E}\right)^{\frac{1}{n}} + 1}$$

$$a = \frac{\bar{r}_C}{(1+b)^n}$$

avec :

$$\bar{r}_C = \sqrt{2}\frac{2\sin\varphi_C}{3 - \sin\varphi_C}$$

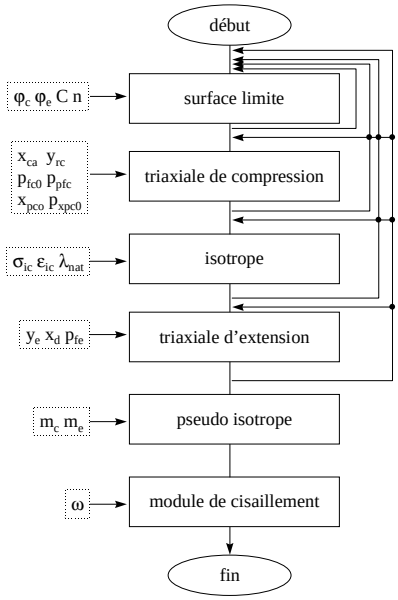


FIG. 7.9 – *Etapes et données demandées pour l'identification des paramètres internes de CLoE Roche.*

$$\bar{r}_E = \sqrt{2}\frac{2\sin\varphi_E}{3+\sin\varphi_E}$$

La convexité est testée. Si la condition n'est pas vérifiée, CLoEId propose de modifier les angles de frottement.

7.1.8.2 Triaxial de compression

L'asymptote de l'hyperbole décrivant le rapport $\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*}$ est déjà définie par l'angle de frottement en compression : $y_{infc} = \tan^2(\pi/4 + \varphi_C/2)$. Les coordonnées d'un point de cette hyperbole sont demandées (x_{ca} et y_{rc}). Les paramètres de l'hyperbole sont calculés par :

$$c_{hc} = \frac{y_{rc} - 1}{x_{ca}(y_{infc} - y_{rc})}$$

$$a_{hc} = c_{hc}(y_{infc} - 1)$$

La définition des paramètres de la courbe de déformation volumique n'est pas encore implémentée dans CLoEId. La détermination actuelle est empirique. Les paramètres internes p_{fco}, $p_{p_{fc}}$, x_{pco} et $p_{x_{pc}}$ (§7.1.6.1) sont facilement identifiables à partir des courbes expérimentales, et seront demandés par CLoEId. Les trois paramètres a_{pc}, b_{pc} et m_{pc} sont plus délicats à déterminer. La détermination se fera automatiquement par CLoEId en utilisant un algorithme sur la méthode des moindres carrés,

pour minimiser le résidu entre la courbe prédéfinie (Fig. 7.4) et les mesures expérimentales. Plutôt que de prendre un algorithme de Newton, on préférera prendre l'algorithme de Davidson (Martin [102]), plus fiable pour les fonctions non linéaires comme c'est le cas ici.

7.1.8.3 Compression isotrope

Le paramètre à déterminer est le paramètre λ_c (§7.1.6.3) de la relation :

$$\sigma_i = \sigma_{ir}\, e^{\lambda_c(\varepsilon_i - \varepsilon_{ir})}$$

avec ε_i et σ_i les valeurs propres des tenseurs de déformation et contrainte. Par dérivation, on obtient :

$$\dot{\sigma}_i = \lambda_c\, \sigma_{ir}\, e^{\lambda_c(\varepsilon_i - \varepsilon_{ir})} \dot{\varepsilon}_i$$

au point de référence $(\sigma_i = \sigma_{ir}, \varepsilon_i = \varepsilon_{ir})$:

$$\dot{\sigma}_i = \lambda_c\, \sigma_{ir}\, \dot{\varepsilon}_i$$

d'où :

$$\lambda_c = \frac{1}{\sigma_{ir}} \frac{\dot{\sigma}_i}{\dot{\varepsilon}_i} = E_{ic}$$

CLoEId demande à l'utilisateur la pression de référence $p_{ir} = \sigma_{ir}$, la déformation volumique de référence $\varepsilon_{v.ir} = 3\,\varepsilon_{ir}$, puis la pente de la courbe contrainte moyenne - déformation volumique au point de référence : $\lambda_{nat} = \dot{p}/\dot{\varepsilon}_v$. On a alors :

$$\lambda_c = E_{ic} = \frac{1}{\sigma_{ir}} \times 3 \times \lambda_{nat}$$

D'autre part, on impose, par des considérations expérimentales, que le module isotrope soit supérieur au module d'Young en compression : $\lambda_{nat} > \frac{1}{3} a_{hc} \times \sigma_{ir}$

De même, les modules de chargement et déchargement sont reliés entre eux par la relation ([38]) :

$$E_{id} = E_{ic} \frac{1 - k\sqrt{3}}{1 + k\sqrt{3}}$$

Pour que le module de décharge soit plus fort que le module de charge (ce qui est nécessaire), il faut avoir : $-1\sqrt{3} < k < 0$, avec $k = 0$ pour un comportement réversible.

7.1.8.4 Triaxial d'extension

Les modules initiaux sont imposés par les relation 7.2 (p. 245).

L'asymptote de $\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*}$ est également définie par l'angle de frottement en extension : $y_{infe} = \tan^2(\pi/4 + \varphi_E/2)$.

D'où :

$$a_{he} = E_e$$

$$c_{he} = \frac{a_{he}}{y_{infe} - 1}$$

CLoEId demande ensuite les valeurs de y_e la déformation volumique au maximum de contractance, p_{fe} la pente finale de dilatance en déformation volumique, x_d la déformation axiale à l'intersection de la droite finale de variation volumique avec l'axe des déformation axiale (cf. Fig. 7.5). Les limites de la portion isochorique de la courbe de déformation volumique sont imposés par défaut : $x_{m2} = x_d/5$ et $x_c = x_d/4$ Les constantes de la partie cubique s'écrivent :

$$c_1 = 1 - 2\nu_E \quad , \quad b_1 = \frac{3y_e - 2c_1 x_{m2}}{x_{m2}^2} \quad \text{et} \quad a_1 = \frac{-c_1 - 2b_1 x_{m2}}{3x_{m2}^2}$$

Pour la partie quadratique :

$$c_b = y_e \quad , \quad x_{t2} = \frac{4}{3}\left(\frac{y_e}{p_{fe}} - \frac{x_c}{4} + x_d\right) \quad \text{puis enfin} \quad a_d = \frac{p_{fe}}{4(x_{t2} - x_c)^3}$$

7.1.8.5 Essai pseudo-isotrope

Le programme d'identification demande les paramètres m_E et m_C de la relation du rapport de vitesse de déformation en fonction du rapport du déviateur - contrainte moyenne (Fig. 7.7, p. 251).

Le module pseudo isotrope λ_{psi} (courbe $\dot{p}, \dot{\varepsilon_v}$) est imposé à la surface limite pour respecter la condition de consistance à la surface limite. Ce calcul sur chemin de compression et d'extension triaxiaux dépend dorénavant de la pression moyenne du fait de la nouvelle formulation de la variation volumique en compression triaxiale. Pour un état isotrope, ce module doit être égal à λ_c. Pour un état intermédiaire, le module est interpolé linéairement entre ces deux valeurs λ_{psi} et λ_c, par rapport au déviateur réduit.

Le module sur la surface limite s'écrit, dans le cas du chemin de compression triaxiale (le calcul en extension triaxiale est similaire) :

$$(\lambda_{psiSL})_C = \frac{\frac{1}{2}\alpha y(1 + \zeta_1 k + 2\zeta_2 l)}{\frac{1}{3}p(\zeta_1 + 2\zeta_2)(\alpha + 2\beta)}$$

avec : α et β les composantes de la normale à la surface limite sur l'axe de compression issue des dérivées de la fonction de Van Eekelen, et :

$$y = \frac{-1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}_{d11}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{d22}^2}}$$

qui dépend directement de la formulation en compression triaxiale, dans le dernier tronçon linéaire de la déformation volumique, de par les vitesses de déformation :

$$\dot{\varepsilon}_{d11} = \frac{-1}{\sigma_3\, a_{he}} \quad \text{et} \quad \dot{\varepsilon}_{d22} = 0,5(p_{fc0} + \sigma_l\, p_{p_{fc}} - 1)\dot{\varepsilon}_{d11}$$

Mais si : $p_{fc0} + \sigma_l.p_{p_{fc}} > 0$ (cas de la déformation volumique contractante à la surface limite, cas qui est exclu, cf. §7.1.6.1), alors on prend simplement : $\dot{\varepsilon}_{d22} = -0,5\ \dot{\varepsilon}_{d11}$

D'autre part :

$$\zeta_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + 2(1 + m_C \frac{q}{p})^2}}$$

$$\zeta_2 = (1 + m_C \frac{q}{p}) \sqrt{\frac{1}{1 + 2(1 + m_C \frac{q}{p})^2}}$$

L'écriture en extension n'est pas modifiée par rapport à la loi *CloE Sable*.

7.1.8.6 Module de cisaillement

Le module de cisaillement est interpolé linéairement par la relation :

$$j = j_0(1 - \omega \bar{q})$$

Le programme CLoEId demande simplement une valeur pour ω. Si $\omega > 1$, on aura avant d'atteindre la surface limite un module de cisaillement négatif, ce qui n'est pas souhaitable. Par contre, ce module de cisaillement intervient dans l'analyse en bifurcation. Si la bifurcation a lieu avant que le module soit négatif, alors il devient tolérable d'avoir $\omega > 1$.

Ce paramètre ω est le seul degré de liberté permettant d'intervenir sur la condition de bifurcation, sans changer la réponse intrinsèque du matériau sur les chemins de référence (essais triaxiaux). Cependant, le résultat de la bifurcation fournit deux réponses : le moment de la bifurcation au cours du chargement, et l'angle d'inclinaison de la bande de cisaillement. Pour caler ces deux caractéristiques, il est possible dans un premier temps de modifier la paramètre ω, et si nécessaire, d'intervenir sur les autres paramètres de la loi.

7.2 Identification de CLoE sur le grès des Vosges

Plusieurs identifications ont été effectuées en vue de la prospection paramétrique sur la bifurcation. Nous présentons ici un exemple d'identification.

La liste des paramètres rentrés pour le logiciel CLoEId, correspondant à l'exemple présenté ici, est donnée dans le tableau 7.1, tandis que la liste des paramètres internes, dont a besoin la loi *CLoE Roche* figure sur le tableau 7.2.

7.2.1 Identification de la surface limite

Le modèle CLoE considère une surface limite conique. Dans l'optique de cette loi, la surface limite représente les états de contrainte accessibles pour le matériau, si

celui-ci pouvait rester homogène, sans voir l'apparition de zones d'endommagement localisé correspondant à la bifurcation d'équilibre. Ainsi, la courbe enveloppe d'une étude expérimentale représente approximativement pour CLoE les points de bifurcation, et non pas l'allure de sa surface limite. Cependant, les deux courbes sont homothétiques dans la cadre de l'homogénéité d'ordre un de la relation constitutive (version *CLoE Sable*). Pour le grès, la courbe enveloppe est fortement non linéaire (Fig. 4.17, p. 88). On exclut alors de faire une identification sur toute la gamme des pressions de confinement, et on choisit de ne s'intéresser qu'aux confinements entre 10 et 60 MPa.

La détermination de l'angle de frottement est délicate, et sera influencée à posteriori par l'étude en bifurcation. L'identification présentée est réalisée avec un angle de frottement en compression de 35°, et un angle de frottement en extension de 32°. Il convient aussi de déterminer la cohésion. Celle-ci est choisie de telle sorte que les courbes de contrainte normalisées (évolution de $\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*}$) des essais triaxiaux de compression soient les plus regroupées possible, pour pouvoir les modéliser par l'unique courbe d'identification (Fig. 7.4). C'est le terme $C.cotan\phi_C$ qui est déterminant ici. La figure 7.10 montre les courbes expérimentales normalisées, en prenant $C.cotan\phi_C = 120\ MPa$. La mise à l'écart des essais uniaxiaux s'y justifie. On remarquera que par ce choix, on introduit une dimension en contrainte dans le modèle. Lors de l'identification, on introduit la valeur de cohésion correspondante, $C = 84\ MPa$, et qui n'a pas la signification physique habituelle[2].

Le paramètre n influençant la courbure de la surface de Van Eekelen est pris à $n = -0,2$, proche de sa valeur par défaut qui offre un maximum de liberté pour le choix des angles tout en permettant de conserver la convexité de la section dans le plan déviatoire (Van Eekelen [149]).

L'allure de la surface limite dans le plan déviatoire est représentée sur la figure 7.11. Sa trace dans le plan déviateur de contrainte - contrainte moyenne (q, p) est dessinée sur la figure 7.12. La surface limite est nettement au-dessus des courbes expérimentales, dont les pics aux confinements intermédiaires sont plutôt alignés selon une droite correspondant à un angle dans le plan de Mohr de 15°.

7.2.2 Identification en compression triaxiale

L'identification est faite à partir de trois résultats d'essais triaxiaux, pour des confinements de 10, 30 et 60 MPa. Le calage des paramètres est choisi pour se rapprocher de ces trois courbes à la fois. La comparaison est présentée sur la figure 7.13. La phase post-pic des essais n'est pas simulée, puisqu'elle correspond à un comportement post-bifurcation.

Pour le comportement en volume, la simulation représente bien l'aspect dilatant du grès à faible confinement, et l'aspect non dilatant pour le plus fort confinement (Fig. 7.14). Les courbes expérimentales sont tracées après le pic, mais cette dernière

2. rappelons que ce n'est pas ici l'intersection de la courbe enveloppe du matériau avec l'axe des ordonnées dans le plan de Mohr.

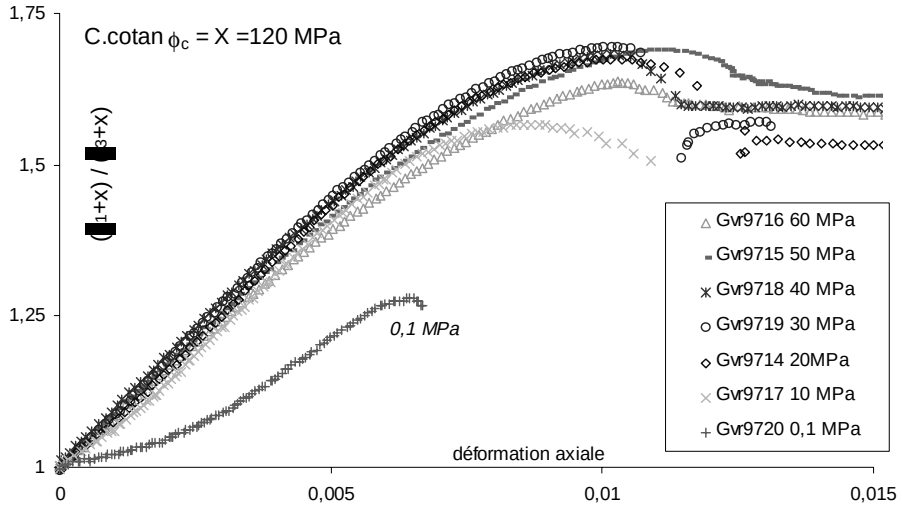


FIG. 7.10 – *Normalisation des courbes de contraintes pour les essais triaxiaux de compression : évolution de* $\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*}$ *avec* $C.cotan\phi_C = 120\ MPa$.

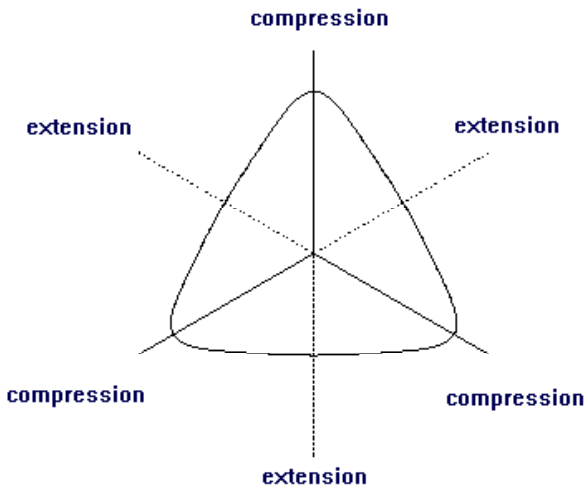


FIG. 7.11 – *Identification de la surface limite - plan déviatoire en contrainte.*

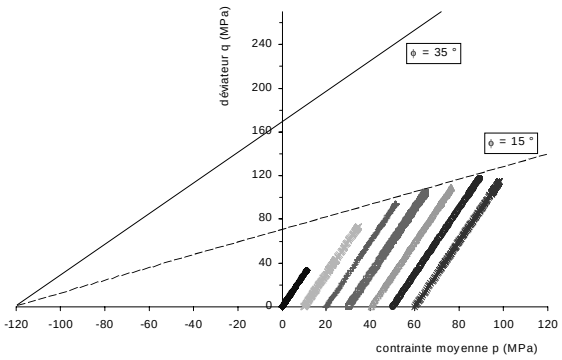


FIG. 7.12 – *Trace de la surface limite dans le plan q-p, la droite à* 15° *est tracée comme repère visuel.*

portion n'est plus significative d'un comportement intrinsèque qu'il serait intéressant de simuler dans le cadre de la pré-localisation.

Un exemple de simulations de décharges pour un confinement 40 MPa, à différents stades de déformation axiale, se montre réaliste par rapport à un essai expérimental comportant des cycles de déchargement (Fig. 7.17).

7.2.3 Identification en compression isotrope

La formulation théorique en compression isotrope suit une courbe exponentielle, qui ne permet pas une simulation correcte sur toute la gamme de pression. D'autre part, on a choisi de ne s'intéresser qu'aux confinements supérieurs à 10 MPa. Les paramètres d'identification de la compression isotrope sont donc choisis pour que la courbe simulée soit proche de la courbe expérimentale, en ne considérant que la partie au-dessus de 10 MPa (Fig. 7.15) (l'état de déformation expérimental à 10 MPa est défini arbitrairement comme référence). On sait que notre identification ne conviendra pas pour les faibles pressions, et qu'il faudrait pour cela procéder à une autre identification dans cette gamme de pression.

La valeur du module isotrope λ_{nat} est choisie au mieux, mais doit permettre de vérifier que le module de décharge est plus fort ou égal au module de charge. On prend la valeur quasiment la plus faible qu'il est possible de prendre, ce qui donne un taux de réversibilité de 98 %. La courbe simulée est alors un peu plus "rigide" que la courbe expérimentale.

7.2.4 Identification en extension triaxiale

Le calage des paramètres définissants la courbe de contrainte sont déjà définis par l'angle de frottement en extension de la surface limite et les conditions de consistance au point isotrope. Les paramètres de la courbe de déformation volumique sont choisis pour que la partie initiale non linéaire de la courbe soit restreinte, et que la

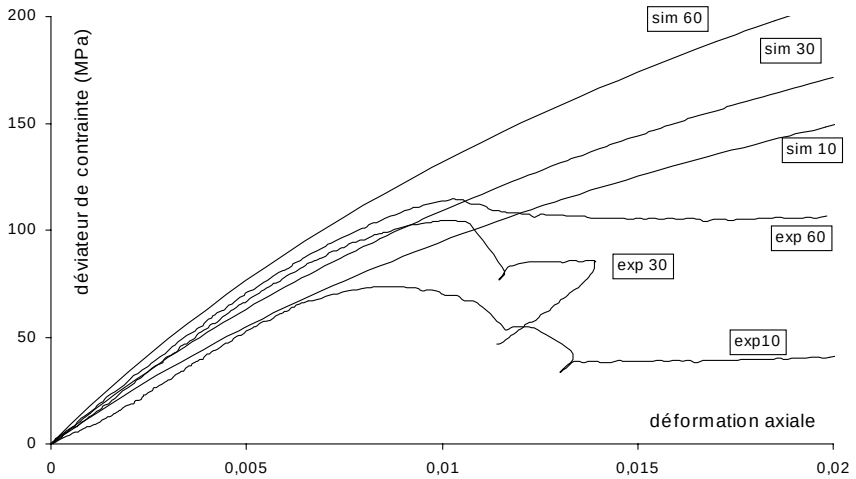


FIG. 7.13 – *Identification de la compression axiale - comparaison des courbes de contrainte déviatorique expérimentales et simulées à 10, 30 et 60 MPa de confinement.*

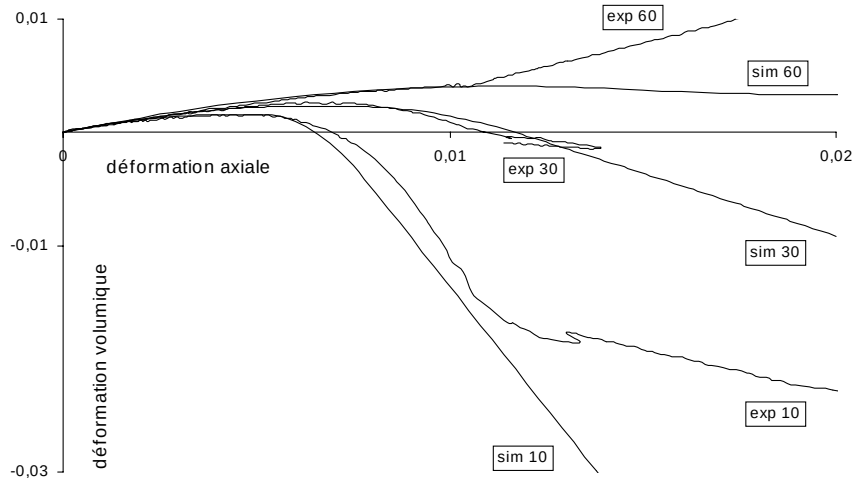


FIG. 7.14 – *Identification de la compression axiale - comparaison des courbes de déformation volumique expérimentales et simulées à 10, 30 et 60 MPa de confinement.*

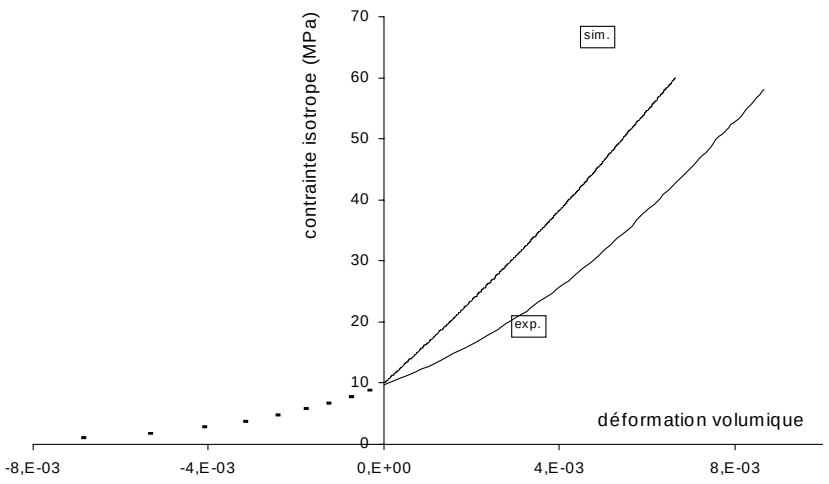


FIG. 7.15 – *Identification de la compression isotrope - comparaison de la courbe expérimentale et simulée pour les contraintes isotropes au-dessus de 10 MPa.*

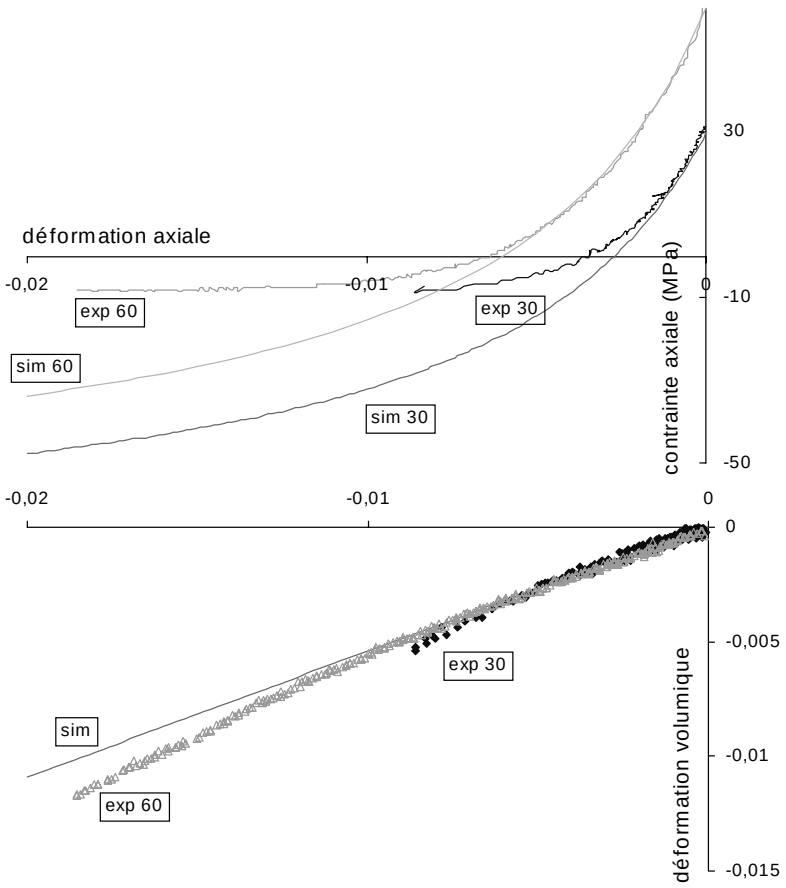


FIG. 7.16 – *Identification de l' extension axiale - comparaison des courbes de contrainte axiale expérimentales et simulées, et des courbes de déformation volumique à 30 et 60 MPa de confinement.*

déformation soit linéaire sur sa majeure partie. La figure 7.16 compare les courbes simulées et expérimentales pour les confinements de 30 et 60 MPa.

7.2.5 Identification sur chemin pseudo-isotrope

La pente m_C des courbes $\frac{\dot{\varepsilon_2}}{\dot{\varepsilon_1}} - \frac{q}{p}$ a déjà été mesurée dans la partie expérimentale, page 145. Elle est prise égale à 0,7. La pente m_E, à défaut de mesure expérimentale, est prise égale à zéro, c'est à dire qu'aucune influence sur l'aspect anisotrope du comportement n'est prise quand la contrainte axiale est plus faible que la contrainte latérale.

phase d'identification	paramètres d'identification		jeu GV-35
surface limite	angle de frottement en compression	ϕ_C	35
	angle de frottement en extension	ϕ_E	32
	coefficient de courbure	n	-0,2
	cohésion (MPa)	C	84
compression triaxiale	déformation axiale du point caractéristique	x_{ca}	0,0065
	rapport de contrainte $\frac{\sigma_a^*}{\sigma_l^*}$ en ce point	y_{rc}	1,52
	abscisse de changement de phase, à confinement nul	x_{pc0}	0,16
	variation de cette abscisse vis-à-vis du confinement	$p_{x_{pc}}$	-0,0182
	pente de dilatance, à confinement nul	p_{fc0}	-25,1
	variation de cette pente vis-à-vis du confinement	$p_{p_{fc}}$	0,16
compression isotrope	contrainte de référence	σ_{ir}	5
	déformation de référence	ε_{ir}	0,0075
	module isotrope	λ_{nat}	6000
extension triaxiale	contractance maximum	y_e	-0,0002
	pente finale	p_{fe}	0,55
	déformation axiale	x_{m2}	0,0002
	déformation axiale	x_c	0,0002
	déformation axiale	x_d	0
pseudo - isotrope	pente	m_C	0,7
	pente	m_E	0

TAB. 7.1 *Paramètres d'identification du grès des Vosges : exemple avec un angle de frottement en compression de* 35°.

ahc	chc	apc	mpc	bpc	pfc0	ppfc	xpc0	pxpc
99,17	36,86	$-1,8.10^8$	-3	0,7	-25,1	0,16	-0,0182	0,00019
ahe	che	a1	b1	c1	xm2	xc	abi	cbi
101,3	-146,2	$-3,35.10^7$	-8410	0,658	-0,0002	-0,0002	$-1,32.10^{10}$	-0,0002
xt2	pfe	lambdc	psimco	psimex	asl	bsl	nsl	ccotfi
-0,00042	0,55	144	0,857	0	0,478	-0,813	-0,2	120

TAB. 7.2 – *Paramètres internes de CLoERoche du grès des Vosges : exemple avec un angle de frottement en compression de* 35°.

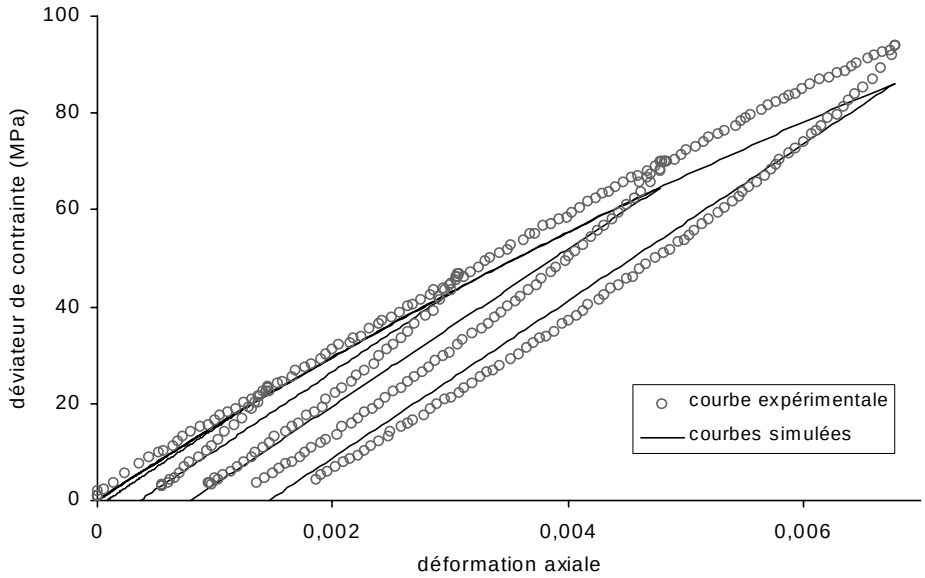


FIG. 7.17 – *Identification de la compression axiale - comparaison d'un essai triaxial de compression à 40 MPa de confinement avec quatre cycles de déchargement, avec une superposition de quatre essais simulés comportant une décharge, chacun à différents stades de déformation axiale.*

7.3 Conclusion

Un exemple d'identification de la loi *CLoE Roche* a été présenté sur le grès des Vosges. La calage sur les chemins de référence peut être considéré comme satisfaisant, bien que l'on ait choisi de modéliser le matériau sur une large gamme de pression (de 10 à 60 MPa), avec un comportement du matériau assez différent aux deux bornes du domaine, comme on a pu le constater dans la partie expérimentale de ce mémoire.

La phase normale suivante serait de vérifier la modélisation sur d'autres chemins que les chemins d'identification. On ne dispose actuellement pas de tels essais. On peut envisager de faire d'autre essais triaxiaux avec des sollicitations différentes. Des chemins non-axisymétriques seraient également intéressants dans ce cadre. On peut penser par exemple aux essais biaxiaux, triaxiaux vrais (les valeurs des trois contraintes principales sont différentes).

Il est possible, après cette phase d'identification, d'évaluer la réponse de l'analyse en bifurcation du modèle. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 8

Etude paramétrique du critère de bifurcation

Les critères de bifurcation dans le cas de CLoE ont été explicités et discutés dans le chapitre 2 (p. 11).

L'enjeu de l'analyse en bifurcation réside principalement sur deux points :

- obtenir une surface de bifurcation similaire à la surface de rupture du grès dans l'espace de contrainte. Expérimentalement, nous ne disposons que de quelques points de cette surface compris entre 10 et 60 MPa, suivant les six plans correspondants aux essais triaxiaux de compression et d'extension. Nous concentrerons donc notre étude sur ces plans. Et plus fortement sur les essais de compression, car c'est sur ces chemins que la courbe enveloppe est la moins linéaire. Dans un premier temps, la stratégie sera de voir l'influence du paramètre ω. On peut penser qu'une dépendance de ce paramètre vis-à-vis de la contrainte moyenne pourrait permettre assez simplement d'obtenir une non linéarité de la courbe de bifurcation.

- obtenir des angles prédits proches des angles mesurés expérimentalement. Ces angles varient fortement et assez linéairement avec la pression moyenne. L'étude se limitera également aux chemins de compression et d'extension. Une recherche paramétrique sera nécessaire pour cela, car il parait peu plausible de prime abord d'avoir à la fois une forte non linéarité de la courbe de bifurcation, et une telle dépendance des angles. Les principaux paramètres a étudier, et dont on suppose qu'ils ont une influence notable, sont, outre ω, les paramètres de décharges, l'angle de dilatance, la cohésion et les angles de frottement.

L'angle des bandes est défini entre la normale à la bande et la direction de la contrainte principale majeure. La figure 8.1 explicite les cas de la compression et de l'extension. Les angles de bande dans cette partie sont les angles complémentaires de ceux présentés dans la partie expérimentale (Fig. 4.44, p. 123).

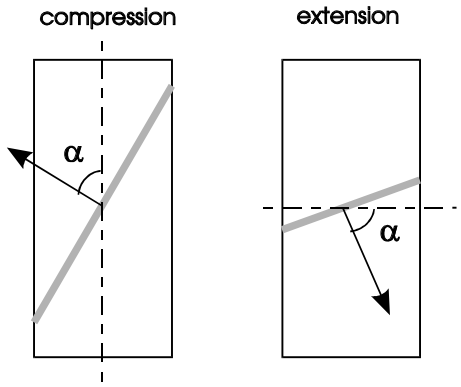


FIG. 8.1 – *Définition de l'angle d'orientation des bandes de cisaillement par rapport à la direction de contrainte principale majeure : cas de la compression et de l'extension.*

Des analyses en bifurcation sur le modèle de *CLoE Sols* (i.e. sans dépendance de la dilatance / contractance vis-à-vis de la contrainte moyenne) ont été menées sur la marne de Beaucaire (Tillard [144], El Hassan [59]) et sur une marne raide à hydrobies ([59]). Une des difficultés est d'avoir une évolution progressive de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase de l'état de contrainte, lorsqu'on va du chemin de compression jusqu'au chemin d'extension. Il arrive couramment pour ces matériaux, si l'on ne prend pas certaines dispositions sur ω, que l'angle de bande prédit passe d'une valeur à une autre assez éloignée pour deux angles de phase proches. Ce point sera étudié en plus de ceux mentionnés ci-dessus.

L'étude qui suit est donc une prospection paramétrique des possibilités du modèle à prévoir la rupture par l'analyse en bifurcation. On cherche à savoir quels en sont les capacités, pour ensuite hypothéquer sur les directions dans lesquelles faire évoluer ce modèle, toujours dans notre objectif de modéliser les roches.

Un logiciel écrit en fortran, appelé Activ, permet de simuler une réponse homogène par rapport à une sollicitation homogène que l'utilisateur peut définir lui même. De plus, Activ mène au fur et à mesure du chargement l'analyse du critère de bifurcation. Les chemins utilisés sont dans la plupart des cas décrits par cent pas de calcul.

8.1 Influence de ω

On utilise l'identification présentée dans le chapitre précédent, avec un angle de frottement en compression de 35°. L'influence du paramètre ω va être observée, il conditionne l'interpolation du module de cisaillement :

$$j = j_o(1 - \omega\bar{q})$$

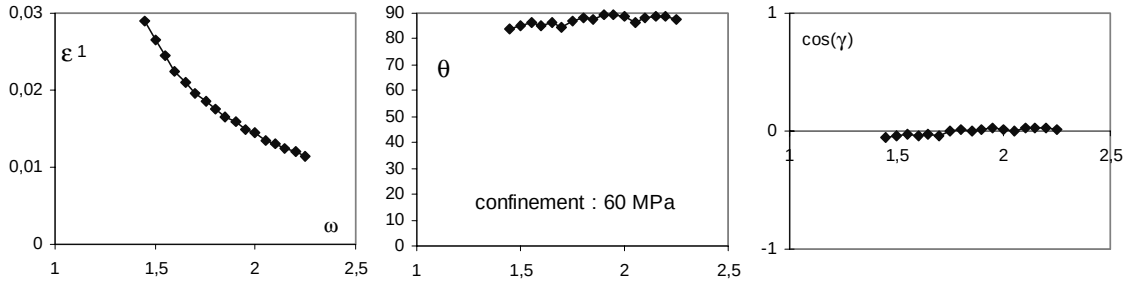


FIG. 8.2 – *Evolution de la déformation axiale, de l'angle de bande et du* $\cos\gamma$ *vis-à-vis du paramètre* ω*, au premier moment bifurqué lors du chargement en compression triaxiale à* 60 MPa *de confinement.*

avec j_o le module de cisaillement à l'état isotrope. Dès la conception de CLoE, le paramètre ω a été vu comme devant jouer un rôle de paramètre de contrôle dans l'analyse en bifurcation.

Dans une première phase, l'influence de ω est observée sur un chemin de compression triaxiale, avec un confinement de 60 MPa. Le chargement est interrompu pour une déformation axiale de 0,03. Cette valeur est nettement au-dessus des valeurs expérimentales de déformation, qui elles sont proches de 0,01. Pour ce chemin, on fait varier ω de 0 à 3. Pour $\omega > 1$, le module de cisaillement deviendra négatif avant d'atteindre la surface limite, cependant on peut le tolérer si la bifurcation intervient avant que ce module soit négatif. Les valeurs de ω qui ne respectent pas cette condition sont rejetées.

L'influence de ω sur la déformation axiale, sur l'angle de la bande de cisaillement prédit, et sur la valeur $\cos\gamma$ est représentée sur la figure 8.2. L'angle γ est l'angle entre les vecteur $\vec{g}$ et $\vec{n}$ présentés lors de l'étude du critère de localisation au chapitre 2 (p. 11). Il indique le mécanisme de bande. Pour une valeur négative du cosinus, la bande fonctionne avec de la fermeture, et pour une valeur positive, avec de l'ouverture.

La déformation axiale prédite au premier état du chargement bifurqué est très au-dessus des valeurs expérimentales pour un $\omega < 2$, et devient raisonnable au-delà. La prédiction de l'angle se situe entre 80 et 90°, ce qui est très loin des valeurs expérimentales (à 60 MPa, l'angle est proche de 40°). La bande fonctionne essentiellement en cisaillement. Les données expérimentales nous manquent pour faire cette comparaison.

A priori, la simple étude sur ω ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants en compression pour l'identification utilisée.

On considère dans une seconde phase, non plus un essai de compression triaxiale, mais l'ensemble des états de contrainte entre la compression et l'extension triaxiale.

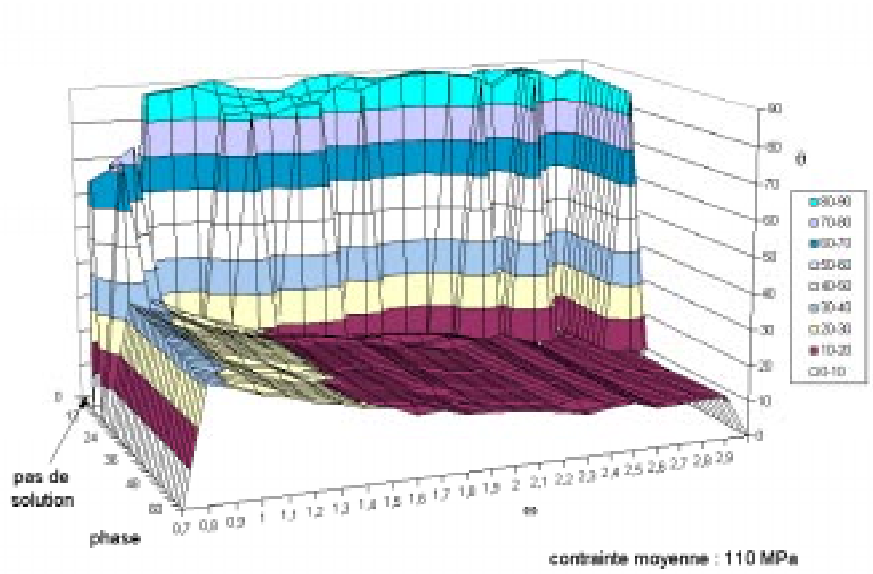


FIG. 8.3 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 110 MPa *de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre* ω.

Pour cela on fixe la contrainte moyenne, et on balaye le plan déviatoire, en faisant varier l'angle de phase. Pour des raisons de symétrie, il est suffisant de ne s'intéresser qu'à un sixième du plan. Par conséquent, l'angle de phase peut osciller entre 0° (compression) et 60° (extension). La contrainte moyenne est importante puisque la loi *CLoE Roche* admet une dilatance / contractance dépendante de celle-ci. Dans le prolongement des graphes précédents, la contrainte moyenne est fixée à 110 MPa qui est la valeur correspondant approximativement à la rupture du grès en compression pour un confinement de 60 MPa.

Le graphe 8.3 présente l'évolution de l'angle de bande vis-à-vis de la phase de l'état de contrainte et du paramètre d'interpolation ω. La surface représentée pourrait s'appeler surface des orientations, nous utiliserons cette dénomination dans la discussion qui suit. Il existe deux paliers (un palier haut et un palier bas), chacun correspondant à un des deux pics du critère de bifurcation représenté sur la figure 2.3 (p. 17). Néanmoins, sur ces deux paliers, l'angle de bande peut varier de façon substantielle. La discontinuité de l'angle de bande, correspondant au passage d'un palier à un autre, n'est pas acceptable expérimentalement.

On considère à présent un confinement inférieur, 10 MPa, à l'autre extrémité du domaine de validité de l'identification; ce qui correspond à une contrainte moyenne lors de la rupture en compression de l'ordre de 30 MPa. L'influence de ω sur le chemin de compression est similaire au cas précédent (Figs. 8.4 -8.5). L'angle de bande est encore plus élevé (un angle de 90° correspond à des bandes verticales sur un échantillon comprimé) et le mécanisme de bande reste entièrement cisaillant.

Ce changement de confinement revient à étudier l'influence de l'angle de dilatance

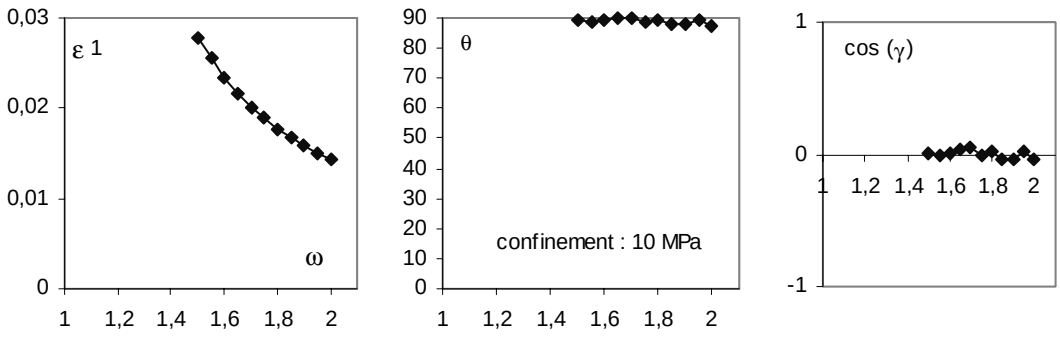


FIG. 8.4 – *Evolution de la déformation axiale, de l'angle de bande et du* $\cos\gamma$ *vis-à-vis du paramètre* ω*, au premier moment bifurqué lors du chargement en compression triaxial à* 10 MPa *de confinement.*

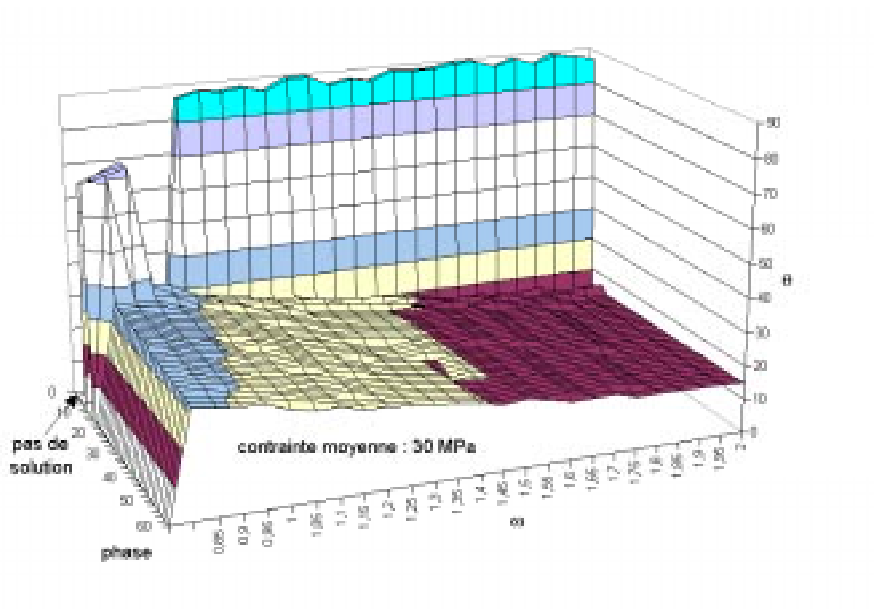


FIG. 8.5 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 30 MPa *de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre* ω*.*

sur la bifurcation. En effet, dans la loi *CLoE Roche*, par sa formulation, les seuls paramètres non linéaires par rapport à la contrainte moyenne sont les paramètres caractérisant la formulation en volume sur le chemin de compression. En changeant le confinement, on change simplement l'angle de dilatance. Celui-ci est reconnu comme un facteur influant sur l'angle de bande dans le cadre des modèles élasto-plastiques (Molenkamp [108]). Dans notre cas, et pour l'identification utilisée, on constate que plus la dilatance est forte (le confinement diminue), et plus l'angle de bande prédit est élevé. Cependant, les variations restent faibles, de l'ordre de quelques degrés.

Pour chiffrer la variation de l'angle de dilatance, on a tracé sur les figures 8.6 et 8.7 l'angle de dilatance mobilisé, calculé à partir de la vitesse de déformation simulée, ainsi que l'angle de frottement mobilisé, défini par l'état de contrainte correspondant. Sur ces figures, viennent se superposer également les courbes de contrainte axiale en fonction de la déformations axiale, courbes simulées et expérimentales, ainsi que les points de première bifurcation apparue au cours du chargement. Sur ces deux graphes, on constate que plus ω augmente (plus le terme de non-coaxilté augmente) et plus la bifurcation devient précoce. L'angle de frottement mobilisé tend (par définition) vers l'angle de frottement à la surface limite qui est, pour l'identification testée ici, de 35°; l'intervalle de déformation des deux graphes n'est pas assez large cependant pour le constater et la courbe reste encore loin de son asymptote. L'angle de dilatance mobilisé est négatif quand la déformation volumique est contractante (vitesse de déformation positive), et il est positif dans le cas de la dilatance (vitesse de déformation négative). Sur la figure 8.7, les trois tronçons de la formulation de déformation volumique (cf. §7.1.6.1, p. 246) se distinguent clairement sur la courbe de l'angle de dilatance mobilisé. Sur la figure 8.6, l'angle de dilatance lors de la bifurcation est plus faible que sur la figure 8.7, et on notera d'autre part qu'il est possible d'avoir un paramètre ω plus grand avant que le module de cisaillement ne s'annule. Autrement dit, le caractère plus "non-standard" aux forts confinements qu'aux faibles confinements permet d'obtenir une bifurcation plus précoce. Mais, un changement de l'angle de dilatance de 45° n'a fait évoluer l'angle de bande que d'environ 5°.

Toutefois, on verra ultérieurement que le chemin de compression axisymétrique sur lequel on vient de raisonner rend difficile la bifurcation en théorie, le critère de bifurcation y est plus difficilement atteint que sur d'autres chemins. Expérimentalement, cette résistance particulière du chemin triaxial axisymétrique n'est pas nécessairement observée; en effet un échantillon n'est pas un point matériel, il peut laisser libre cours à l'approche de la rupture à divers modes hétérogènes du type déformation plane, éventuellement distribués de façon à vérifier *grosso modo* les contraintes de symétrie auxquelles ils sont soumis. L'étude de Desrues *et al.* [56] sur des échantillons de sable montre des exemples de tels mécanismes. Nous avons observé le même type de mécanisme de localisation sur un calcaire d'Anstrude (Fig. 1.1, p. 8).

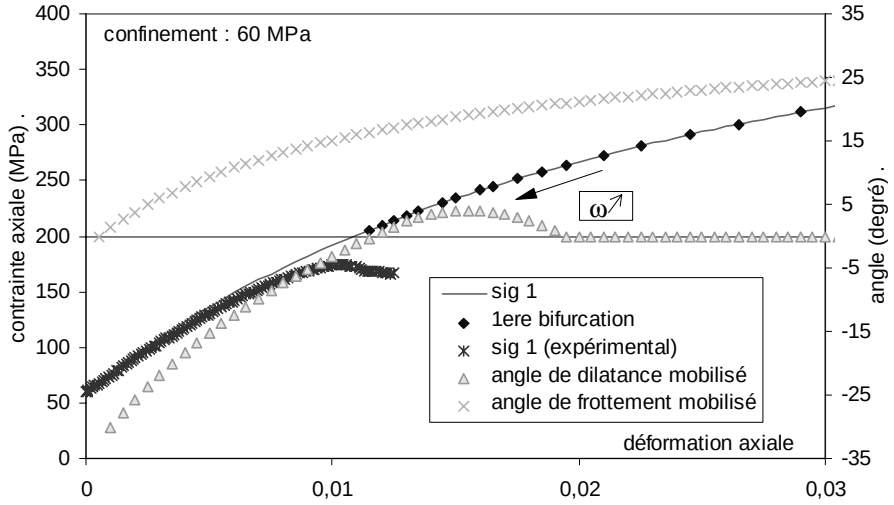


FIG. 8.6 – *Evolution au cours du chargement en compression triaxiale avec un confinement de* 60 MPa *de la contrainte axiale superposée avec les points d'apparition de la bifurcation, et des angles de dilatance et de frottement mobilisés.*

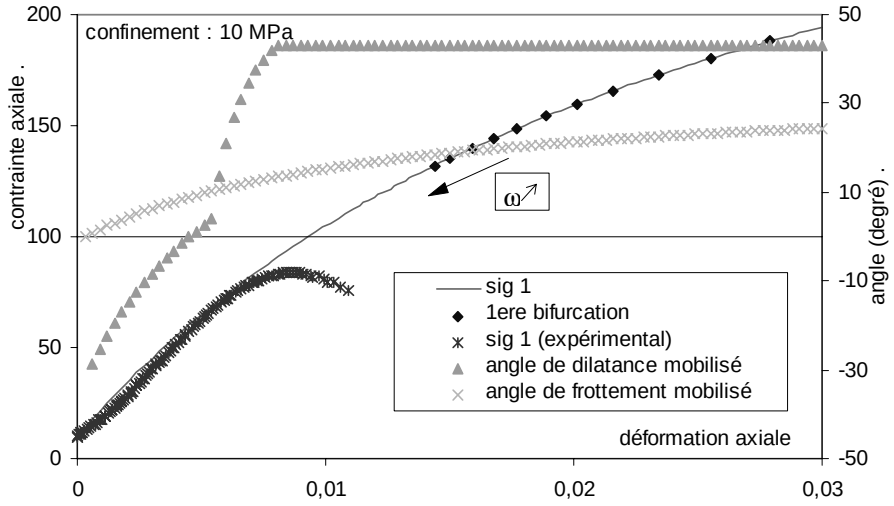


FIG. 8.7 – *Evolution au cours du chargement en compression triaxiale avec un confinement de* 10 MPa *de la contrainte axiale superposée avec les points d'apparition de la bifurcation, et des angles de dilatance et de frottement mobilisés.*

8.2 Influence de l'angle de frottement

L'influence des angles de frottement a encore été assez peu étudiée sur CloE. Les différents paramètres étudiés jusqu'à présent (El Hassan [59]) ont essentiellement modifiés la déformation à la bifurcation et l'interpolation de l'angle de bande sur l'angle de phase, permettant d'avoir une continuité de l'angle de bande vis-à-vis de la phase des différents chemins radiaux du plan déviatoire.

Pour diminuer l'angle de frottement de façon substantielle, il était nécessaire de revoir la formulation du chemin de contrainte. En effet, en conservant le terme $C.cotan\phi$ égal à 120 MPa, qui est la valeur permettant de regrouper au mieux les courbes expérimentales de contrainte normalisées aux différents confinements (cf. §7.2.1, p. 259), et en abaissant l'angle de frottement, les hyperboles des chemins de contrainte vont s'éloigner des courbes expérimentales.

On propose une nouvelle formulation du chemin de contrainte, avec un premier tronçon linéaire et un second tronçon hyperbolique. L'angle de frottement en compression est pris égal à 20°, qu'il convient de comparer avec la droite à 15° représentée sur la figure 7.12 (p. 262).

Le résultat de l'identification est comparé sur quelques chemins en compression, et extension et en compression isotrope, avec les résultats expérimentaux, sur la figure 8.8. L'angle en extension est fixé à 24°, ce qui fait que la section de la surface limite est presque circulaire. Cette formulation permet une modélisation des chemins de référence plus proche des résultats expérimentaux que la formulation précédente.

La prédiction de la bifurcation pour cette nouvelle identification, sur un chemin de compression triaxiale avec un confinement de 60 et 10 MPa, est représentée sur la figure 8.9, en terme de déformation axiale et d'angle d'inclinaison de la bande de cisaillement, pour plusieurs valeurs du paramètre d'interpolation ω. La déformation axiale est plus proche de la réalité pour les différentes valeurs de confinement. L'angle de bande est également un peu diminué pour le confinement de 60 MPa et pour les plus faibles valeurs de ω.

Les deux graphes de la figure 8.10 présentent différemment les points de bifurcation, selon la courbe de contrainte simulée et en comparaison avec la courbe de contrainte expérimentale. Les angles de dilatance mobilisés et de frottement mobilisés sont également représentés. Pour l'essai au confinement de 60 MPa, l'angle de dilatance est plus faible qu'à 10 MPa, et d'autre part la bifurcation est plus précoce. Cela confirme l'observation faite pour l'exemple d'identification précédent, ou l'aspect d'avantage "non-standard" avait favorisé la bifurcation. Dans ce cas de figure (diminution de l'angle de frottement et nouvelle formulation du chemin de compression) le moment d'apparition de la localisation est amélioré par rapport au cas antérieur.

L'évolution de l'angle de bande en fonction de la phase sur le plan déviatoire à contrainte moyenne de 110 MPa et en fonction du paramètre d'interpolation ω est représentée sur la figure 8.11. Il existe toujours deux paliers, correspondants au deux maximums du critère de bifurcation.

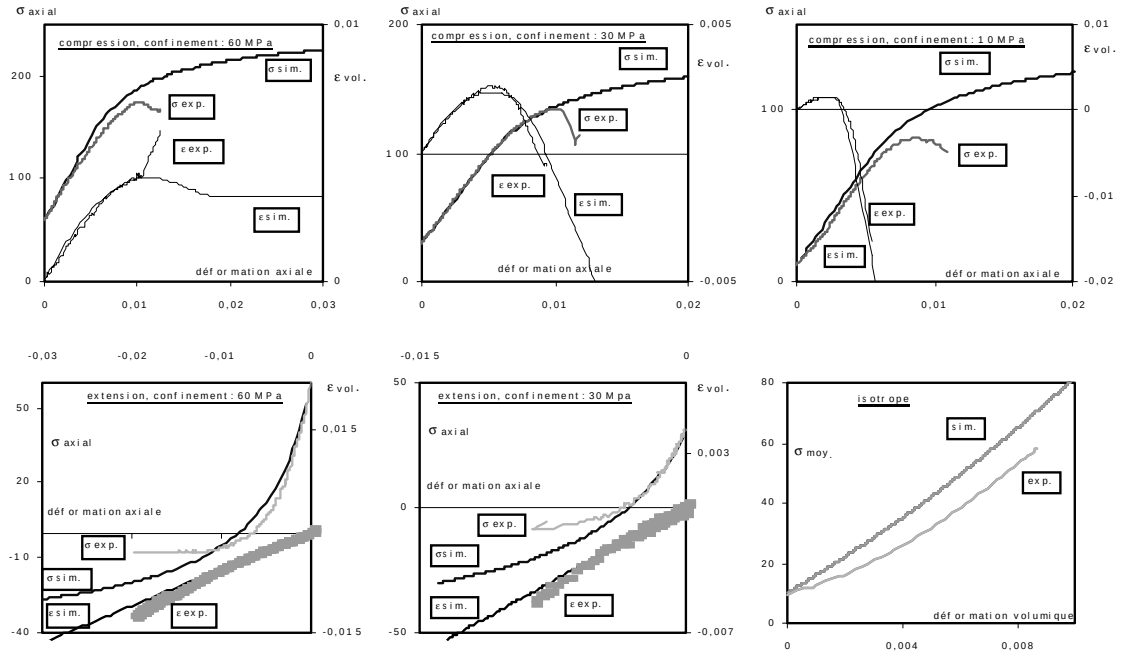


FIG. 8.8 – *Comparaison courbes simulées et expérimentales avec la formulation de la compression triaxiale en contrainte en deux tronçons linéaire - hyperbolique, pour différents confinements, sur les chemins de compression, d'extension et isotrope.*

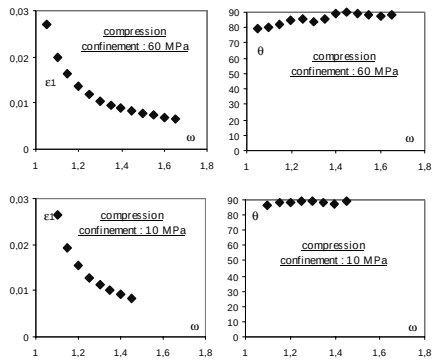


FIG. 8.9 – *Evolution de la déformation axiale et de l'angle de bande en fonction de ω, sur les chemins de compression, à 60 et 10 MPa de confinement.*

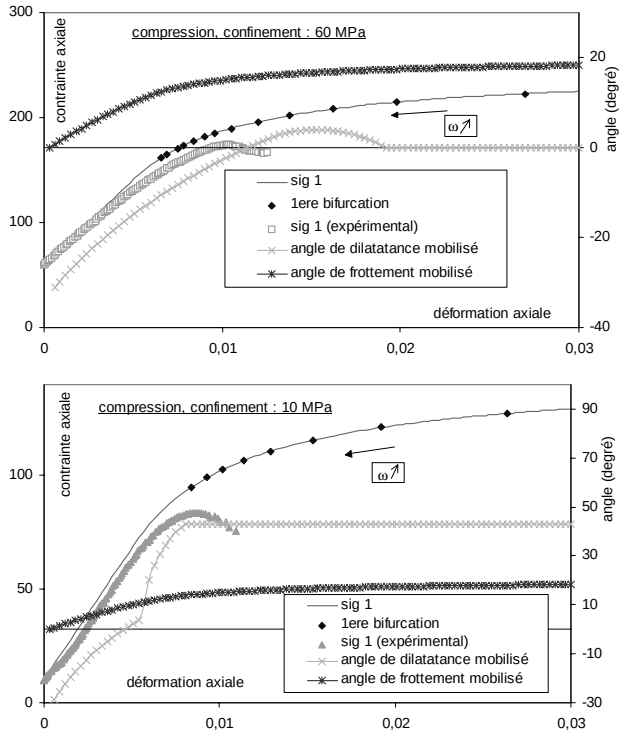


FIG. 8.10 – *Evolution des angles de dilatance et de frottement mobilisés, et des points de bifurcation selon ω, pour les essais de compression à 60 et 10 MPa de confinement.*

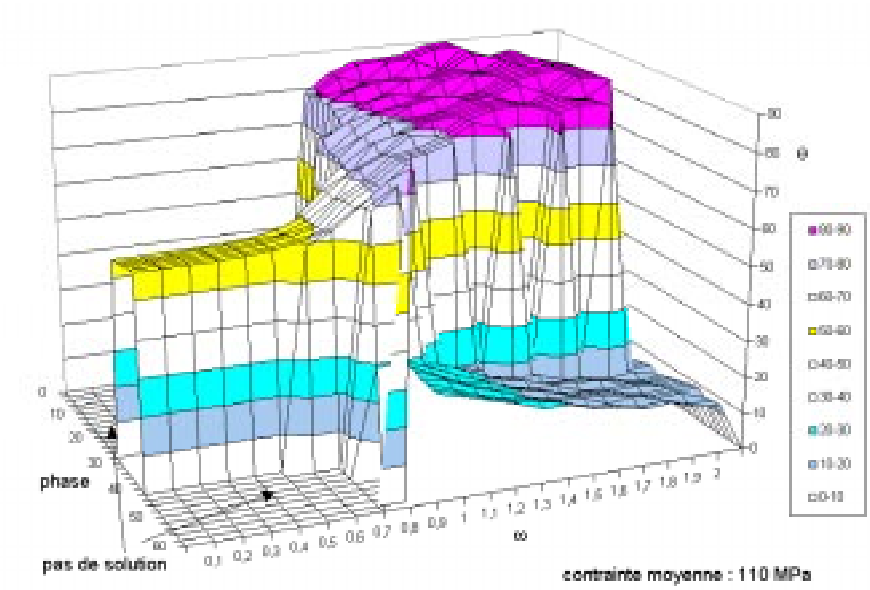


FIG. 8.11 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 110 MPa *de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre* ω*, pour la nouvelle formulation en contrainte (linéaire - hyperbolique) (angle de frottement de* 20°*).*

Aux faibles valeur de ω, il existe des solutions bifurquées pour certaines valeurs de phase, appartenant au palier haut, et d'autre part, les angles de bande sont plus faibles que la valeur moyenne de ce palier. Quand ω augmente, le passage d'un palier à un autre se fait pour un angle de phase plus fort que dans l'identification précédente. L'influence de ω, déjà observée sur les essais de compression (phase nulle), s'observe également sur les deux paliers. Plus ω croit et plus l'angle de bande augmente sur le palier le plus haut, et au contraire, plus l'angle de bande diminue sur le palier le plus bas. D'autre part, les deux paliers se sont rapprochés sensiblement des valeurs expérimentales. On constate donc également une amélioration des résultats de la bifurcation en terme d'angle de bande.

Pour poursuivre l'étude de l'influence des angles de frottement de la surface limite, une identification de la loi a été faite pour un angle de frottement en compression de 1° avec l'ancienne formulation en contrainte sur le chemin de compression (pas de tronçon initial linéaire). La valeur de l'angle de frottement est très faible, mais a pour intérêt de se rapprocher de l'angle de la tangente à la surface limite dans la plan de Mohr pour les forts confinements de l'ordre de $50 - 60$ MPa. Il n'est pas possible dans ce cas de modéliser le matériau sur une large gamme de pression. L'identification est effectuée pour un confinement de 60 MPa, et une comparaison sur le chemin de compression est présentée sur la figure 8.12.

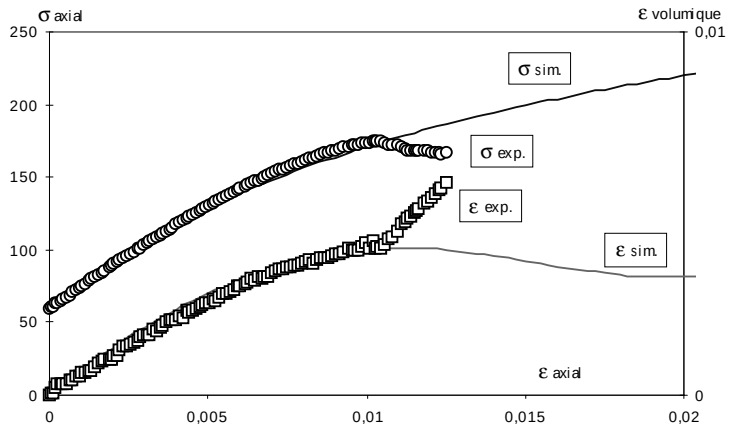


FIG. 8.12 – *Comparaison des courbes simulées et expérimentales pour un angle de frottement en compression de* 1°*, à un confinement de* 60 MPa.

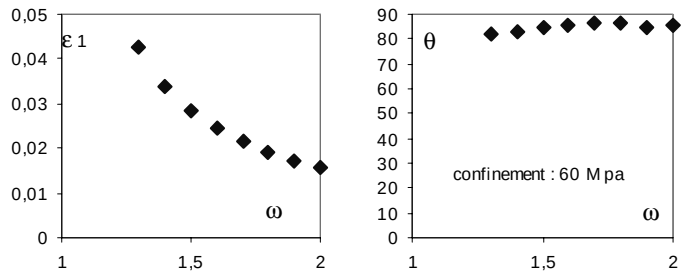


FIG. 8.13 – *Evolution de la déformation axiale et de l'angle de bande vis-à-vis du paramètre* ω*, au premier moment bifurqué lors du chargement en compression triaxial à* 60 MPa *de confinement (angle de frottement en compression de* 1°*).*

Les résultats de l'analyse en bifurcation sur ce chemin sont présentés sur la figure 8.13, tandis que l'étude pour différents angles de phase sur le plan déviatoire à la contrainte moyenne de 110 MPa est présentée sur la figure 8.14.

L'évolution est similaire à celle observée entre l'identification avec un angle de frottement à 35° et celle avec un angle de frottement de 20°. La déformation axiale en compression à la bifurcation est cependant un peu plus forte, ce qui n'est pas satisfaisant. Et les solutions existantes pour les faibles valeurs de ω, à certains angles de phases, ne sont plus l'extension du palier haut, mais du palier bas.

Une identification avec un angle de frottement en compression de 50° a également été réalisée, pour modéliser le comportement sur toute la gamme de confinement entre 10 et 60 MPa. Sur la figure 8.15 représentant l'évolution de l'angle de bande en fonction de la phase et du paramètre ω, il existe un premier palier pour $\omega < 1$. Il n'y a pas de solution pour les angles de phase inférieur à 6° (compression). Quand ω augmente, les solutions se divisent à nouveau en deux plateaux, un pour les phases faibles et le second pour les phases supérieures à environ 6°.

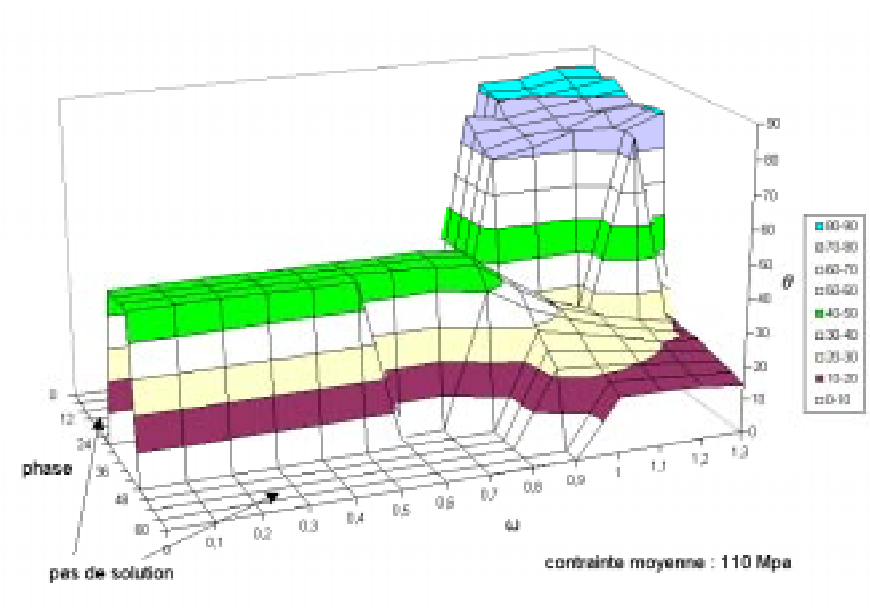


FIG. 8.14 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 110 MPa *de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre* ω*, pour l'identification avec un angle de frottement de* 1°.

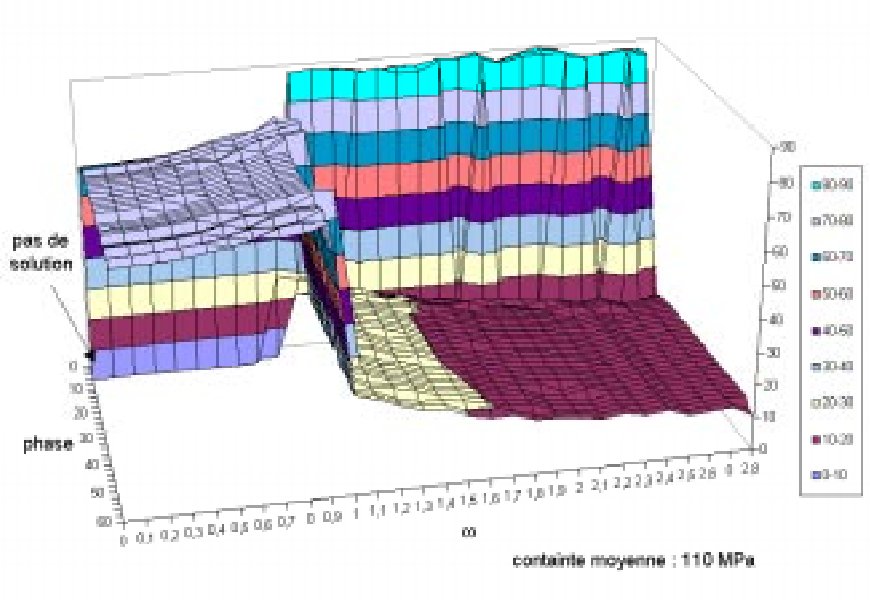


FIG. 8.15 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 110 MPa *de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre* ω*, pour l'identification avec un angle de frottement de* 50°.

Conclusion sur l'influence de l'angle de frottement :

L'angle de frottement modifie fortement l'existence de solutions bifurquées pour les faibles valeur de ω. Pour certains angles, il peut ne pas exister de solution, ou exister des solutions pour quelques angles de phase seulement. Par contre, pour les valeurs de ω supérieures, permettant l'existence de solutions bifurquées sans que le module de cisaillement ne devienne négatif, il n'y a peu de changement.

Ce paramètre ne permet pas, à lui seul, de modifier l'angle de bande ni d'assurer la continuité des solutions pour les différentes phases du plan déviatoire.

Il apparaît que la zone du plan déviatoire correspondant à un faible angle de phase offre une réponse très différente du reste du plan (cas proches d'un chemin de compression axisymétrique). Pour un faible ω, il n'existe pas de solution, et pour $\omega > 1$, les angles prédits sont très forts. Pour cette raison, on ne peut se contenter d'étudier la réponse uniquement sur les chemins de compression, mais il faut considérer l'ensemble des états de contrainte.

8.3 Influence des modules de décharge

Les modules de décharge sont imposés au point isotrope par les relations de consistance en ce point. Lorsque le déviateur de contrainte n'est pas nul, il est possible de modifier ces modules. La formulation proposée par El Hassan [59] est reprise.

Pour le module de décharge en contrainte (courbe $\sigma_a^*/\sigma_l^* - \varepsilon_a$), en compression, le module est pondéré par un coefficient *impq* par rapport au module de charge en extension au point isotrope :

$$p_{1d_C} = p_{1c_E}(1 + impq\ \bar{q})$$

avec $\bar{q}$ le déviateur réduit. Au point isotrope, la relation de consistance est bien vérifiée, et à la surface limite, le module de décharge vaut : $p_{1c_E}(1 + impq)$

Pour le module de décharge de la variation volumique (courbe $\varepsilon_v - \varepsilon_a$), la formulation initiale de CLoE prenait une interpolation entre le module de charge en extension au point isotrope et le module de charge en compression au point courant :

$$p_{2d_C} = p_{2c_C}\bar{q} + p_{2c_{iE}}(1 - \bar{q})$$

La nouvelle formulation pondère cette interpolation par le coefficient *diff* :

$$p_{2d_C} = p_{2c_C}\bar{q}(1 + diff) + p_{2c_{iE}}(1 - \bar{q})$$

D'un point de vue expérimental, l'ancienne interpolation (i.e. *impq*=*diff*=0) convient assez bien. Par contre il est intéressant de voir l'influence de ces deux paramètres sur l'analyse en bifurcation.

Pour $impq = 2$, la surface représentant l'inclinaison des bandes (Fig. 8.16) voit apparaître un premier palier pour les valeurs de ω faibles. Les solutions quand ω est plus fort donnent des angles sensiblement plus forts, en comparaison des valeurs fournies avec $impq = 0$ (Fig. 8.3). De plus, il existe une solution continue vis-à-vis de l'angle de phase, représentée par la droite tracée, correspondant à ω non constant. Pour cela, il est possible dans le logiciel *Activ* de faire varier ω en fonction de la phase. La figure 8.17 montre les solutions en terme d'angle de bande, vis-à-vis de la phase, en prenant un paramètre ω variable. Celui-ci est interpolé entre la valeur 0,85 en compression (phase 0°) et 0,4 en extension (phase 60°). Il n'y a pas de solution en compression pure. Cependant, l'évolution de l'angle de bande par rapport à l'angle de phase est intéressante. La mesure expérimentale en compression est tracée, ainsi que l'interpolation de l'angle en extension, pour cette contrainte moyenne, à partir du graphe 4.61 (p. 145). La valeur de $\cos\gamma$ prévoit un mécanisme de cisaillement avec de l'ouverture, tandis qu'expérimentalement, du moins après une phase post-pic prolongée, on observe de la contractance dans la bande.

D'une manière générale, la bifurcation en compression triaxiale avec de faibles valeurs de ω est plus difficile a obtenir avec CLoE. Cependant l'expérimentation sur les matériaux granulaires montre également que la localisation des déformations est toujours plus tardive en compression triaxiale, qu'en compression biaxiale par exemple. On peut penser qu'il en est de même pour les roches.

Une simulation avec la contrainte moyenne de 30 MPa, pour le même coefficient de décharge fournit une interpolation très similaire à celle obtenue avec la contrainte moyenne de 110 MPa. La variation d'inclinaison de bande mesurée expérimentalement, due au changement de contrainte moyenne, ne pourra pas être obtenue avec uniquement ce paramètre.

D'autres simulations, avec $impq = 4$ et $impq = 6$, non représentées ici, font disparaître le premier palier correspondant aux faibles valeurs de ω. D'autre part, les angles obtenus sur le palier bas sont en moyenne plus faibles que pour $impq = 2$.

La paramètre *diff* pris à -1 (module de décharge plus faible que le module de charge) n'a pas changé de façon notable les angles, par contre, $diff = 4$ diminue fortement les valeurs des angles du palier bas, ce qui n'est pas souhaitable.

Il faut noter que ces paramètres d'interpolation des modules de décharge ne modifient pas la réponse en chargement sur les chemins de référence, mais influent quand même sur les chemins à phase intermédiaire. Par exemple, la trace d'un chemin de compression biaxiale (déformation suivant la direction de la contrainte principale intermédiaire nulle) est dessinée sur le plan déviatoire pour deux valeurs du coefficient $impq$ (0 et 2) sur la figure 8.18.

8.4 Influence de la pente de dilatance

On étudie ici l'influence de la pente de dilatance du chemin en extension triaxiale, appelée p_{fe}. Celle-ci a été choisie dans l'identification pour simuler au mieux les

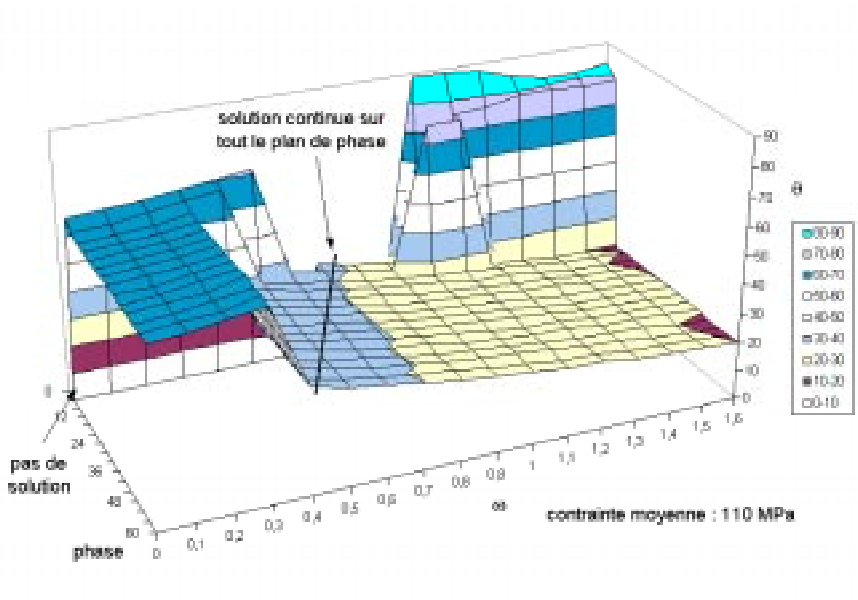


FIG. 8.16 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 110 MPa *de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre* ω*, (angle de frottement de* 35°*, coefficient d'interpolation impq* $= 2$*).*

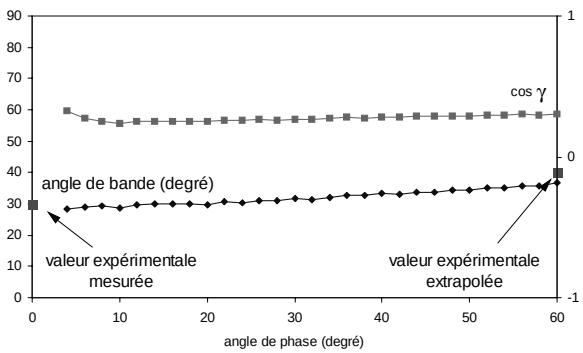


FIG. 8.17 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à* 110 MPa *de contrainte moyenne, pour* ω *interpolé entre 0,85 en compression et 0,4 en extension.*

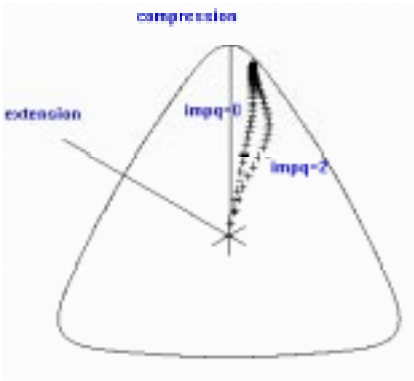


FIG. 8.18 – *Trace des chemins de déformation plane dans le plan déviatoire en contrainte, avec le paramètre impq égal à 0 et 2.*

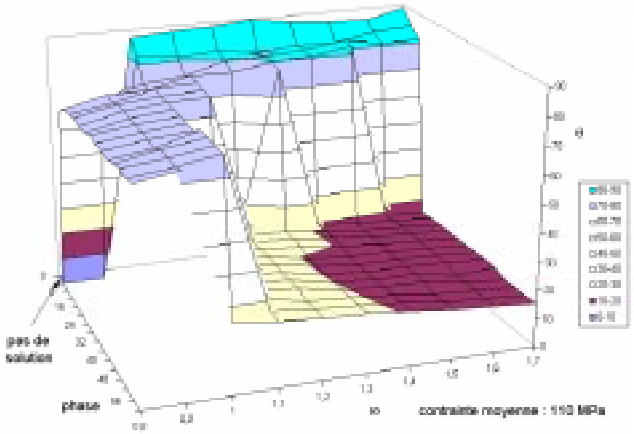


FIG. 8.19 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à 110 MPa de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre ω, (angle de frottement de 35°, pente de dilatance en extension de 0,3).*

réponses expérimentales. Cependant, ce paramètre s'est montré, dans les études antérieures sur CLoE, avoir une influence importante sur la continuité de l'angle de bande vis-à-vis de l'angle de phase.

Dans l'identification initiale, la pente est fixée à 0,55 (Tab. 7.1, p. 265). La simulation effectuée avec une pente égale à 0,3 montre une solution continue sur un plateau haut (Fig. 8.19). Ce plateau est au-dessus des valeurs d'angles mesurées expérimentalement. Un calage du paramètre ω sur ce plateau posera des difficultés pour obtenir une variation progressive de l'angle vis-à-vis de la contrainte moyenne. Une autre simulation avec une pente de dilatance de 0,8 ne montre pas de plateau particulier pour les faibles valeurs du paramètre ω, mais au contraire une évolution progressive de l'angle de bande, depuis 45° jusqu'à environ 15°. Ce résultat est intéressant puisque la plage de variation de l'angle s'est étendue. Ce n'est cependant pas suffisant et à ce titre, nous étudions à présent l'influence conjuguée de cette pente

en extension p_{fe} et du coefficient modifiant la pente de décharge en compression $impq$.

8.5 Influence conjuguée des modules de décharge en compression et de la pente de dilatance

Le couplage entre une pente $p_{fe} = 0,8$ et un coefficient de décharge $impq = 2$ est représenté sur la figure 8.20, pour une contrainte moyenne de 110 MPa, on a gardé *diff*=0. On n'observe pas de discontinuité dans la surface des orientations, en dehors de l'axe de compression axisymétrique. L'angle varie de façon continue entre 60° et 20°. La variation du paramètre ω, vis-à-vis de l'angle de phase va permettre de faire varier l'angle progressivement sur toutes les phases. De plus, comme le résultat de l'interpolation aux faibles contraintes moyennes est assez similaire, en rajoutant une dépendance du paramètre ω par rapport à la contrainte, il sera possible de faire progresser l'angle de bande depuis les fortes valeurs à faible confinement jusqu'aux faibles valeurs à fort confinement. Il y a seulement une interpolation simple de ω à ajouter dans *CLoE Roche* pour obtenir une dépendance de l'angle de bande vis-à-vis de la contrainte moyenne.

Un essai de simulation en prenant ω dépendant de la contrainte moyenne est présenté sur la figure 8.21. Le tableau 8.1 donne les valeurs intermédiaires de ω utilisées en fonction de la contrainte. Cette interpolation de ω montre bien la sensibilité de l'angle prédit par rapport à la contrainte moyenne. Une meilleure simulation à faible contrainte pourra être obtenu en corrigeant les paramètres p_{fe} et $impq$.

			valeur de ω	
σ_m [a]	$\sigma_{3.C}$ [b]	$\sigma_{3.E}$ [c]	compression	extension
30	10	60	0,3	0
70	30	100	0,5	0,08
110	60		0,8	0,4

TAB. 8.1 – *Valeurs intermédiaires de ω pour différents niveaux de contrainte.*

[a] contrainte moyenne (MPa)
[b] contrainte de confinement de l'état image en compression (MPa)
[c] contrainte de confinement de l'état image en extension (MPa)

8.6 Conclusion de la prospection paramétrique

L'étude paramétrique entreprise montre que la simple étude du paramètre ω ne suffit pas pour obtenir des prédictions réalistes. La difficulté majeure, en tenant compte des études paramétriques antérieures sur CLoE, était d'obtenir une forte variation de l'angle de bande en fonction de ω pour permettre un calage sur ω pour

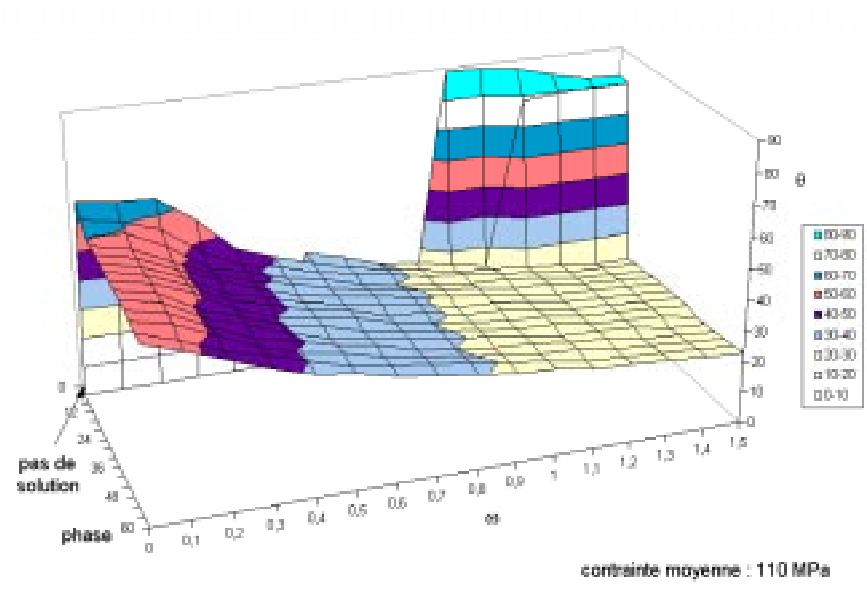


FIG. 8.20 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à 110 MPa de contrainte moyenne, et en fonction du paramètre ω, (angle de frottement de 35°, pente de dilatance en extension de 0,8 et coefficient de décharge impq = 2).*

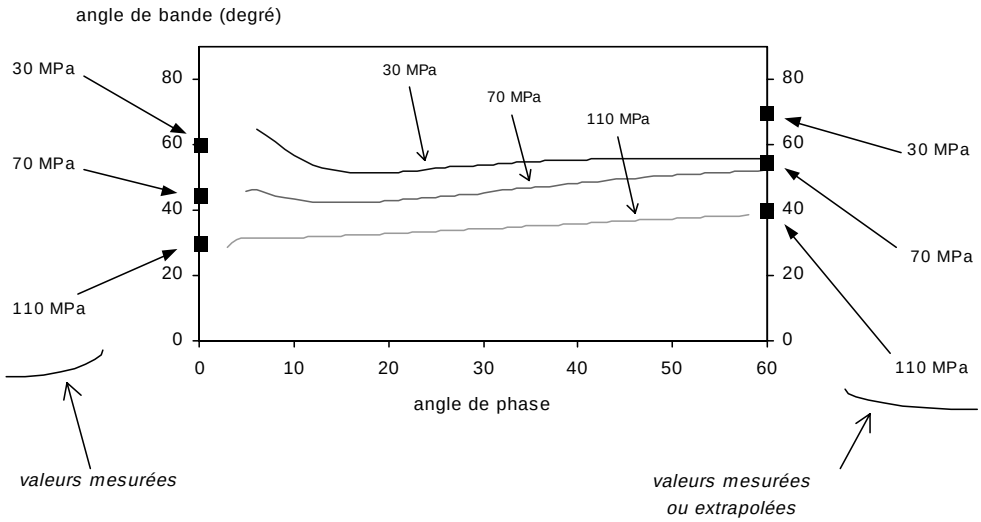


FIG. 8.21 – *Evolution de l'angle de bande en fonction de l'angle de phase sur le plan déviatoire à différentes contraintes moyennes (30, 70 et 110 MPa), avec le paramètre ω dépendant linéairement de la contrainte, (angle de frottement de 35°, pente de dilatance en extension de 0,8 et coefficient de décharge impq = 2).*

les différents confinements. Il apparaît que le module d'interpolation en contrainte pour la décharge en compression ($impq$) et la pente de dilatance en extension (p_{fe}) ont tous les deux une grande influence sur la valeur de l'angle prédit. Un bon choix de ces deux paramètres permet d'étendre la plage des angles de bifurcation possibles pour les différentes phases dans le plan de contrainte déviatoire. A partir de ce moment, l'introduction d'une dépendance de ω vis-à-vis de la contrainte permet alors d'obtenir des prédictions dépendantes de la contrainte moyenne. Il faut cependant noter que la modification des deux paramètres $impq$ et p_{fe} change la réponse du modèle. La suite de l'étude paramétrique devra évaluer jusqu'à quelle proportion il faut dégrader l'identification des paramètres pour obtenir ces prédictions réalistes.

Il reste néanmoins une petite zone du plan déviatoire, contenant le chemin de compression triaxiale ou il n'existe pas de solution bifurquée. Il est nécessaire d'affiner la recherche paramétrique, dans la direction précédemment décrite, pour étendre le domaine de solution à tous les angles de phase. Il faut noter cependant que ce chemin de compression triaxial est peu propice à une bifurcation d'équilibre comme en témoigne les travaux de Rudnicki et Rice [124]. Cette constatation d'ordre théorique n'est pas contredite par les observations expérimentales sur les essais de compression dits axisymétriques. En effet, les essais ne peuvent pas réaliser idéalement la condition d'axisymétrie, et au voisinage de la rupture un certain nombres de mécanismes de la déformation plane apparaissent, comme on l'a discuté page 272. Il existe donc une incertitude sur la position des points de bifurcation expérimentaux vis-à-vis des angles de phase au voisinage des chemins axisymétriques.

Quand les solutions théoriques seront étendues vers le chemin de compression triaxial, il sera possible de comparer les seuils de localisation en compression avec les résultats expérimentaux. Cependant, ce calage du seuil, aux vu des études antérieures (El Hassan [59]) semble plus facile à résoudre, car certains paramètres internes de la loi influent essentiellement sur la position de ce seuil, et non pas sur l'angle de bande.

Dès à présent, la surface de bifurcation n'est plus homothétique de la surface limite, i.e. le déviateur réduit à la bifurcation n'est plus identique quel que soit le niveau de contrainte, mais dépend de la contrainte moyenne. La figure 8.22 donne un exemple de cette surface à la contrainte moyenne de 70 et de 110 MPa, obtenu avec les valeurs du paramètre ω mentionnées dans le tableau 8.1.

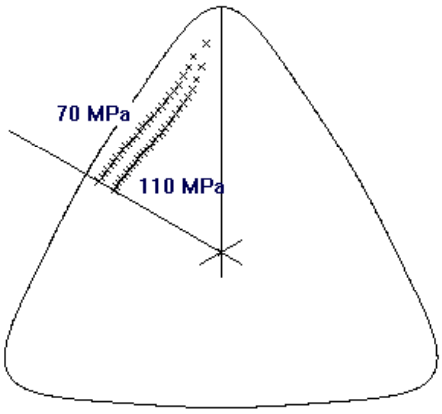


FIG. 8.22 – *Evolution des seuils de bifurcation en fonction de l'angle de phase, sur le plan déviatoire en contrainte, pour deux niveaux de contrainte moyenne (70 et* 110 MPa*).*

Conclusion de l'étude théorique

Une nouvelle loi *CLoE Roche* est née. Elle est directement inspirée du modèle de loi CLoE, développé initialement pour les matériaux granulaires. C'est un modèle de type incrémental non linéaire, permettant de décrire les chargements monotones. Il admet un critère de bifurcation explicite. Ce critère prévoit le moment d'apparition de la localisation sous forme de bande en cisaillement, et prévoit également l'orientation de cette bande.

La loi *CLoE Roche* prend en compte la variation de la dilatance / contractance vis-à-vis de la contrainte moyenne qui est très forte pour les roches, lorsqu'on les considère sur un large domaine de contrainte. L'identification sur le grès des Vosges montre que cette loi permet une bonne description sur les chemins de référence, depuis le comportement fragile jusqu'au comportement intermédiaire vers le domaine ductile. Cette nouvelle loi respecte le principe de consistance à la surface limite, initialement à la base de la création du modèle CLoE.

L'étude paramétrique sur le critère de bifurcation a permis de montrer la possibilité d'une prédiction de l'angle de bifurcation réaliste, et ce sur un large domaine de contrainte (une contrainte moyenne allant de 30 à 110 MPa, et un angle de bande en compression variant de près de 30°). L'étude de certains paramètres permet d'obtenir une variation progressive de l'angle de bande par rapport à l'angle de phase dans le plan déviatoire et à la contrainte moyenne.

Les premières directions d'étude ont été établies, et celles-ci pourront servir pour une étude paramétrique plus développée. Elle devra s'attacher dans un premier temps à étendre le domaine où existe une solution en bifurcation jusqu'au chemin de compression triaxiale. A partir ce moment, le seuil de localisation pourra être calé à partir des résultats expérimentaux en compression et en extension. Certains des paramètres de la loi se montrant influant sur ce seuil pourront éventuellement devenir dépendant de la contrainte afin d'améliorer la prédiction du moment de bifurcation.

Des modèles incrémentaux non linéaires du type de CloE, mais simplifiés avec un nombre restreint de paramètres existent ou sont en cours de développement au laboratoire. Une étude paramétrique du critère de bifurcation plus systématique que sur *CloE Roche* sera possible sur ces modèles, et permettra peut-être de dégager des tendances générales de l'analyse en bifurcation en fonction des différents paramètres. Il sera possible par la suite d'appliquer à *CloE Roche* ces observations.

Conclusion générale et perspectives

Nous avons abordé dans ce mémoire le comportement homogène et localisé de roches tendres ou de sols indurés. Deux aspects ont été traités :

- Dans la première partie de ce mémoire, une étude expérimentale a été présentée. Trois matériaux bien différents ont été testés, un grès des Vosges très poreux, une siltite, matériau peu poreux et raide, et une marne argileuse tendre et poreuse. Des aspects liés à la rupture, à la localisation des déformations, à la propagation des fissures où bien à l'évolution de la perméabilité au cours du chargement ont été observés.

- Dans la seconde partie, une étude théorique de la rupture par localisation des déformations a été développée. Un modèle de comportement a été crée à partir d'une classe de modèles déjà existante, pour modéliser le comportement des roches. L'étude du critère de bifurcation sur le modèle, en l'occurrence calibré pour le grès des Vosges étudié dans la première partie, a été d'autre part initiée.

Les études expérimentales présentée en première partie, sur trois matériaux bien différents, ont montrés que le concept de bande de cisaillement était intéressant pour décrire la rupture dans ces matériaux. De ce fait, la campagne expérimentale apporte des arguments supplémentaires en faveur de la théorie de bifurcation.

Le grès des Vosges a été le matériau le plus amplement étudié dans ce mémoire, à l'aide d'une cellule triaxiale axisymétrique. Par des instrumentations de mesure de déformation spécialement développées dans le cadre de ce travail, les déformations dans la phase homogène des essais et la perte de l'homogénéité de ces déformations considérée comme un précurseur de la rupture ont été examinées avec attention, sur des chemins de compression ou d'extension. La perte d'homogénéité devient de plus en plus précoce vis-à-vis du pic de la contrainte axiale lorsque le niveau de confinement augmente, révélant une influence notable de la contrainte moyenne sur la rupture dans le grès. L'accès à la rupture en extension a nécessité de mettre au point une technique particulière, permettant d'atteindre des états de contrainte de traction dans l'échantillon.

L'inclinaison des bandes de cisaillement observées après rupture des échantillons, par rapport à la direction de la contrainte principale majeure, est très sensible à la contrainte latérale, dans le cas des essais triaxiaux. Cette inclinaison devient de

plus en plus importante quand le niveau de confinement augmente. D'autre part, la structure de la localisation évolue fortement. Sans considérer le cas *a priori* particulier de l'essai uniaxial, la rupture se manifeste généralement par une bande unique aux faibles confinements, puis par un nombre croissant de bandes parallèles puis conjuguées quand le confinement augmente.

La courbe enveloppe du grès des Vosges est fortement non linéaire, et à l'approche du domaine de rupture ductile, la pente de la courbe enveloppe dans le plan de Mohr est horizontale voire légèrement négative. Si l'on compare l'influence du déviateur de contrainte par rapport à un état de contrainte isotrope, on constate que dans le domaine de rupture fragile, en compression ou en extension, le déviateur impose une dilatance relative par rapport à l'état isotrope. Par contre, au plus fort confinement accessible dans la cellule, correspondant à un domaine de transition entre la rupture fragile et la rupture ductile, le déviateur de contrainte n'implique plus de dilatance relative, mais joue un rôle neutre en terme de variation de volume, du moins jusqu'à l'apparition de la rupture.

L'étude *post mortem* des échantillons au scanner à rayons X[1]montre que les bandes deviennent contractantes dans cette zone de transition des modes de rupture, alors qu'elles sont dilatantes dans le domaine fragile. L'observation microscopique confirme ces mesures, mais montre cependant une composition des bandes plus complexe. Notamment dans les bandes contractantes, on constate que la partie centrale de la bande, où les grains sont fortement broyés, est au contraire plus poreuse que le restant de la bande, qui lui même est moins poreux que le matériau avoisinant.

La siltite du Gard a été testée par des essais de compression uniaxiaux sur une presse spécialement rigidifiée pour l'occasion par une technique de piliers pour observer le mode de rupture. Les essais de fracturation, observés par une méthode de mesure du champ de déformation en surface des échantillons parallélépipédiques, ont montré l'existence dans certains cas d'une zone de localisation de la déformation en amont des fractures, lorsque celle-ci se propage. Cette observation ouvre la question sur le mécanisme de fracturation : peut-on considérer ou non que la fracturation macroscopique se forme dans des bandes de cisaillement, comme cela a pu être observé sur le grès? Elle serait alors une conséquence de la localisation des déformations. Au moment de la rupture finale des échantillons, le relâchement élastique des différents morceaux de l'échantillon a pu être observé par la méthode de stéréophotogrammétrie de faux relief.

L'évolution de la perméabilité dans la marne de Beaucaire au cours des essais isotropes ou déviatoriques a été mesurée. La perméabilité montre une forte dépendance vis-à-vis de la porosité, et son évolution est très bien décrite par l'évolution de la porosité. Si l'on considère les échantillons écrasés avec un déviateur de contrainte,

1. cette étude au scanner à rayon X, tout comme l'étude microscopique, a l'inconvénient d'être limitée à deux échantillons, mais l'aspect reproductible de l'ensemble des essais laisse penser de la bonne représentativité de ces deux échantillons.

la présence de bandes de cisaillement a été observée dans tous les cas testés, bien que les essais aient été effectués à des niveaux de contrainte très au-dessus de la contrainte de préconsolidation de matériau, dans un domaine de rupture ductile.

Dans la seconde partie de ce mémoire, une nouvelle loi *CloE Roche*, développée à partir du modèle de loi CLoE existant, a été présentée en vue de modéliser le comportement des matériaux cohésifs sur de larges plages de contrainte moyenne. La loi de comportement a montré qu'elle était suffisamment flexible pour modéliser correctement le grès des Vosges étudié précédemment.

L'étude en bifurcation suivant le critère de Rice généralisé et explicité dans le cas de CLoE, en étudiant l'influence de plusieurs paramètres de la loi, a permis d'obtenir des angles de bifurcation réalistes pour différents niveaux de contrainte et différentes phases du plan déviatoire de contrainte. Ces angles sont particulièrement sensibles vis-à-vis des modules de décharge en contrainte sur les chemins de compression, et de la pente de dilatance sur le chemin d'extension. Une interpolation du module de cisaillement par rapport à la contrainte moyenne, abordée dans cette étude, permet d'avoir une dépendance de l'angle de bande vis-à- vis de la contrainte moyenne.

Une poursuite de l'étude paramétrique devra permettre d'obtenir des seuils de bifurcation corrects.

Perspectives

D'un point de vue expérimental, la notion de bande de cisaillement contractante semble avoir été peu étudiée jusqu'à présent. Il sera intéressant d'aborder plus spécifiquement ce point, en augmentant notamment le niveau de confinement des essais, et d'observer le mode de transition entre la rupture fragile et la rupture ductile. Rappelons que celle-ci se manifeste par un broyage et un effondrement des pores considéré en général comme quasi homogène. Le processus semble assez similaire au mécanisme existant dans les bandes de cisaillement dans le domaine fragile et une continuité entre ces deux modes existe peut-être.

L'existence de bandes de cisaillement contractantes est importante également en terme de perméabilité et il semble intéressant de comparer l'évolution de la perméabilité au cours des essais dans ces conditions, par rapport aux mesures avec des bandes dilatantes. Existe-t-il une réduction de la perméabilité du fait de la compaction dans la bande?

Un appareil biaxial roche s'avère également être un projet intéressant. Si celui-ci permet une visualisation de l'échantillon au cours de l'essai, pour une observation par stéréophotogrammétrie de faux relief, il sera possible d'obtenir une base de données encore inexistante d'après nos connaissances. De plus, un appareil biaxial permet de réaliser des essais dont le chemin de contrainte est plus proche des états de contrainte rencontrés dans les structures du génie civil, comme les tunnels ou les trous de forage

pétrolier. L'analyse en bifurcation est intéressante sur ce chemin, car elle permet une comparaison entre les études numériques et les résultats expérimentaux, ce que ne permettent pas aisément, rappelons-le, les essais de compression triaxiaux.

Annexe A

Capteurs de déformation internes

L'étude théorique de la déformation des corps des deux types de capteurs, et son influence sur les jauges de déformation, est formulée dans le cadre de l'hypothèse des petites déformations.

A.1 Etude théorique du capteur axial

Le capteur axial présente une symétrie évidente par rapport au plan horizontal moyen. L'étude se limite donc à la demi lame supérieure. Cette partie du capteur peut être décomposée en deux tronçons, comme représenté sur le figure A.1. On note y_1 et y_2 les flèches respectives des deux tronçons. La force de contact entre le crochet et le capteur F est considérée verticale, parallèle à la ligne reliant les deux extrémités du capteur. L'abscisse sur les deux tronçons est notée x_1 et x_2.

Le moment fléchissant le long de la lame est :

$$M_1(x_1) = -Fx \quad \text{et} \quad M_2(x_2) = -Fe$$

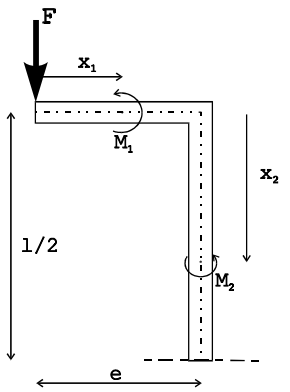


FIG. A.1 – *Demi-lame du capteur : tronçons 1 et 2*

On a alors :

$$EI(\frac{d^2y_1}{dx_1^2}) = -Fx \quad \text{et} \quad EI(\frac{d^2y_2}{dx_2^2}) = -Fe$$

En intégrant les deux équations précédentes et en écrivant la condition de continuité de la lame, c'est à dire que $\frac{dy_1}{dx_1}(e) = \frac{dy_2}{dx_2}(0)$ puis que par symétrie $\frac{dy_2}{dx_2}(\frac{l}{2}) = 0$, on obtient les équations :

$$EI(\frac{dy_1}{dx_1}) = -\frac{1}{2}Fx^2 + Fe\frac{l+e}{2} \text{ et } EI(\frac{dy_2}{dx_2}) = -Fex + Fe\frac{l}{2}$$

En faisant l'hypothèse que $y_2(0) \approx 0$ car $y_2(0)$ est très petit devant $y_2(\frac{l}{2})$, ce qui peut être vérifié a posteriori, et en écrivant que la flèche $y_1(e)$ correspond au raccourcissement dans la direction axiale du tronçon 2, c'est-à-dire :

$$y_1(e) \approx \int_0^{l/2} \sqrt{(1 + \left(\frac{dy_2}{dx_2}\right)^2)\, dx} - \frac{l}{2}$$

qui peut être approximé par

$$y_1(e) \approx \frac{l}{2}\int_0^{l/2} (dy_2/dx_2)^2\, dx$$

on obtient alors :

$$EIy_1(x) = -\frac{Fx^3}{6} + \frac{Fe(l+e)x}{2} + \frac{Fe^3}{6} - \frac{Fe^2(l+e)}{2} + \frac{F^2e^2l^3}{48EI}$$

$$EIy_2(x) = -\frac{Fex^2}{2} + \frac{Felx}{2}$$

Soit Δ le raccourcissement de la distance entre les deux extrémités du capteur, on a $y_1(0) = \Delta/2$. On pose :

$$A = \frac{e^2l^3}{48EI}, \quad B = \frac{e^2}{2}(\frac{e}{3} - (l+e)) \; et \;\; C = -EI\frac{\Delta}{2}$$

D'où on déduit :

$$F = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad \text{car B<0 et que F=0 quand } \Delta = 0$$

La déformation à la surface du deuxième tronçon, mesurée par les jauges est :

$$\varepsilon = \frac{t}{2}\frac{d^2y_2}{dx_2^2} = -\frac{teF}{2EI}$$

t étant l'épaisseur de la lame, d'où :

$$\varepsilon = \frac{te}{2EI}\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \text{ , ce qui est une solution en racine de } (1 + \alpha\Delta)$$

Soit encore : $\varepsilon = \frac{te}{2EI}\frac{B}{2A}(1 - \sqrt{1 - \frac{4AC}{B^2}})$

Si l'on considère que Δ reste petit, il est possible de faire un développement limité au premier ordre, on obtient :

$$\varepsilon = \frac{te}{2EI}\frac{C}{B} + o(\Delta)$$

Soit :

$$\boxed{\varepsilon \approx -\frac{te}{4B}\Delta}$$

avec B un terme purement géométrique.

A.2 Etude théorique du capteur radial

Le tronçon supérieur de la partie verticale du capteur est considéré comme infiniment rigide devant le tronçon inférieur. De même, la déformation de la partie horizontale, du fait de l'orientation de la force de contact avec l'échantillon supposée horizontale, est négligée. Seule est prise en compte la déformation au niveau du tronçon inférieur (cf. Fig. A.2). Le moment fléchissant s'écrit alors :

$$M(x) = F(l - x) \quad \text{d'où} \quad EI\frac{d^2y}{dx^2} = F(l - x)$$

En intégrant deux fois l'équation et en considérant les conditions d'encastrement : $\frac{dy}{dx}(0) = 0$ et $y(0) = 0$, on obtient :

$$EI(\frac{dy}{dx}) = Fx(l - \frac{x}{2}) \quad \text{puis} \quad EIy(x) = F\frac{x^2}{2}(l - \frac{x}{3})$$

Soit Δ le déplacement en tête du capteur, on a : $\Delta = y(e) + (l - e)(\frac{dy}{dx})(e)$, d'où :

$$F = EI\frac{\Delta}{\frac{e^2}{2}(l - \frac{e}{3}) + (l - e)e(l - \frac{e}{2})}$$

La déformation mesurée sur une jauge est estimée à la déformation sur la surface de la lame au niveau du centre de la jauge. Donc le déformation mesurée par les jauges dont le centre est à l'abscisse x s'écrit :

$$\varepsilon = \frac{d^2y}{dx^2}(x)\ \frac{t}{2}$$

D'où on a :

$$\boxed{\varepsilon = \frac{t}{2}\ \frac{(l - x)}{e[\frac{e}{2}(l - \frac{e}{3}) + (l - e)(l - \frac{e}{2})]}\ \Delta}$$

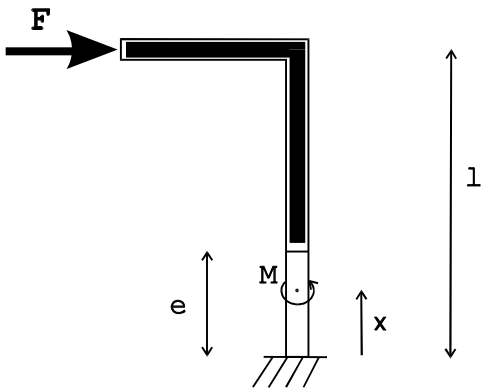


FIG. A.2 – *Capteur radial: tronçon flexible et tronçon rigide*

Annexe B

Montage de préparation des échantillons

La rectification des échantillons est réalisée sur une rectifieuse à axe de rotation vertical. L'échantillon est fixé sur un porte échantillon, avec un positionnement en V long. Le support est retourné pour rectifier les deux faces, sans que l'échantillon ne soit démonté entre les deux opérations, afin d'assurer un meilleur parallélisme entre faces (Fig. B.1).

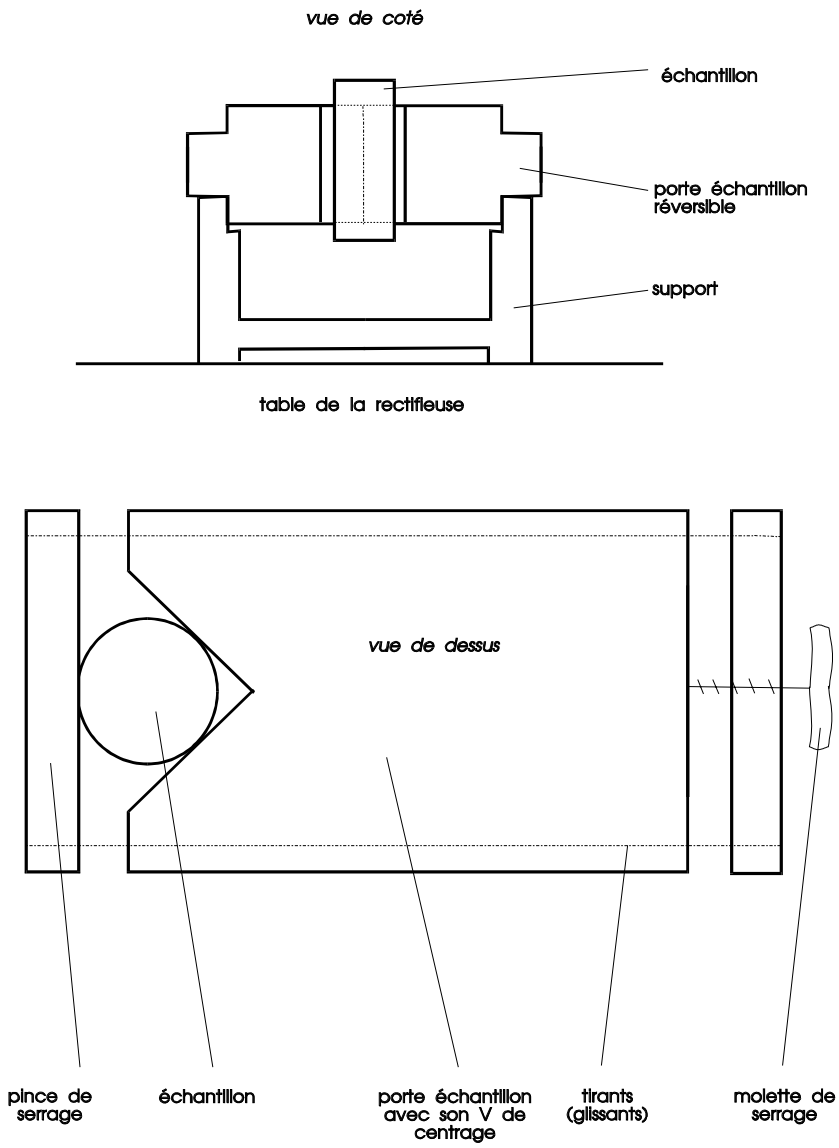


FIG. B.1 – *Schéma de principe du montage d'usinage pour la rectification des extrémités des échantillons.*

Annexe C

Détermination des angles des plans de cisaillement

On veut montrer ici que l'orientation de la bande de cisaillement peut être mesurée à partir des traces déposées sur la membrane au niveau de ces zones d'intense déformation.

On considère un cylindre traversé par un plan incliné, d'un angle η, avec la position symbolisée sur la figure suivante. Le plan est supposé être perpendiculaire au plan (X, Y). Un point sur l'intersection du plan et du cylindre a pour coordonnées, dans le repère (X, Y, Z) : $Y = Y_0 + X\tan(\eta)$ et d'autre part on a $\gamma = -\arcsin(\frac{X}{R})$

Soit α et β les coordonnées du point sur la développée, on a :

$$\begin{cases} \alpha & = -R.\gamma & = R\arcsin(\frac{X}{R}) \\ \beta & = Y & = Y_o + X\tan(\eta) \end{cases}$$

d'où : $\beta = Y_o + R\tan(\eta)\sin(\dfrac{\alpha}{R})$, ce qui est bien l'équation d'une sinusoïdale.

La pente de la courbe par rapport à l'horizontal est donnée par :

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \tan(\eta)\cos(\frac{\alpha}{R})$$

Au point d'inflexion $\dfrac{d^2\beta}{d\alpha^2} = 0$, le terme en cosinus est égal à 1 ou -1, ce qui fait qu'en ce point, $\left|\dfrac{d\beta}{d\alpha}\right| = \tan(\eta)$. On a bien directement l'angle d'inclinaison du plan de cisaillement en mesurant l'angle de la tangente à la courbe au niveau du point de changement d'inflexion.

Si à présent on considère un échantillon déformé en "tonneau" (Fig. C.2). On suppose que la rayon s'écrit sous la forme : $R(Y) = R\,(1 + a\sin(\pi Y/H))$. De plus, la

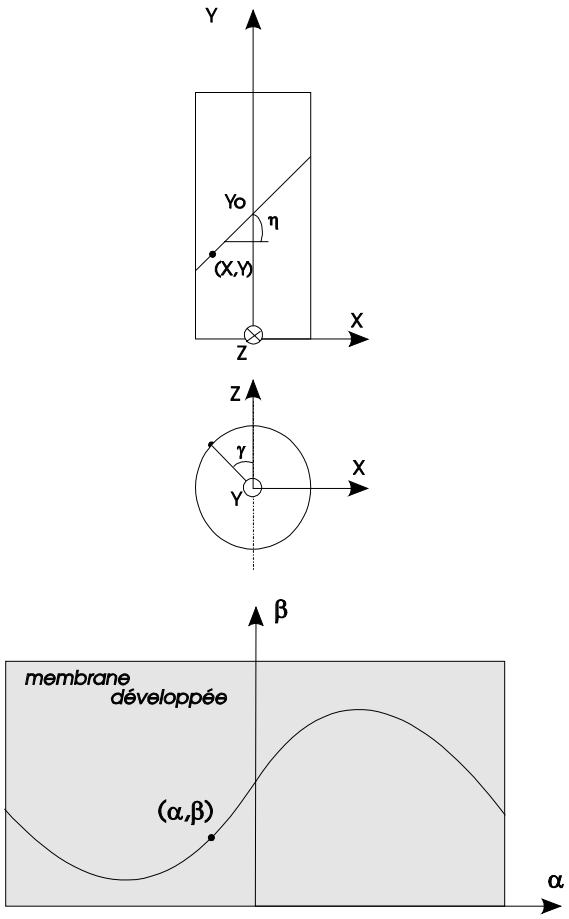


FIG. C.1 – *Schématisation d'un plan de cisaillement traversant un échantillon cylindrique et développée de l'intersection des deux surfaces.*

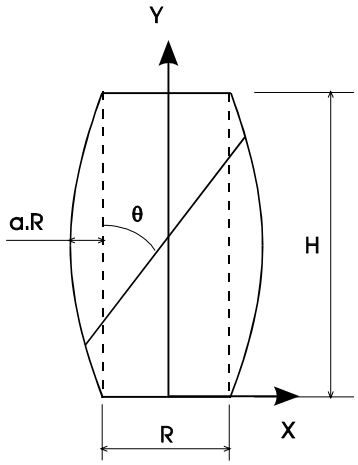


FIG. C.2 – *Coupe d'un échantillon déformé en "tonneau" et emplacement de la bande de cisaillement.*

bande est supposée se croiser avec l'axe vertical de l'échantillon sur le plan médian de ce dernier ($Y_o = H/2$). Alors la relation des deux coordonnées (α, β) de la développée de l'intersection du plan avec la surface de l'échantillon s'écrit :

$$\alpha = R\,(1 + a\sin(\pi\beta/H))\arcsin\left(\frac{(\beta - H/2)\tan\theta}{R(1 + a\sin(\pi\beta/H))}\right)$$

Les développées pour trois angles d'inclinaison (θ = 30, 40 et 50 degrés), et pour plusieurs valeurs de renflements (a=0 pour un cylindre, et a= 1/20 et 1/5) sont tracées sur la figure C.3 (on prend $H = 80\ mm$ et $R = 40\ mm$). On constate que la forme en tonneau perturbe peu la déformée quand la bande est peu inclinée par rapport à l'axe de l'échantillon. Au contraire, elle est modifiée dans ses parties extrêmes pour les inclinaisons plus fortes. Dans l'ensemble des cas, la pente de la développée au point d'inflexion n'est pas modifiée.

La même observation peut être faite en supposant la bande légèrement décentrée (par exemple de 10 %) par rapport au plan médian (Fig. C.4).

On peut considérer aussi que la bande de cisaillement n'est pas parfaitement plane, mais s'apparente plus à une portion de cylindre incliné, dont le diamètre $\mathcal{R}$ est très supérieur au diamètre de l'échantillon R. On revient à l'hypothèse que l'échantillon reste cylindrique. Dans ce cas, les coordonnées de la développées s'écrivent :

$$\beta - \beta_o = \left[R\sin(\alpha/R) + \mathcal{R}\left(1 - \cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{\mathcal{R}}\cos(\frac{\alpha}{R})\right)\right)\right)\right]\mathrm{cotan}(\theta)$$

La figure C.5 présente les développées pour différents rapports entre $\mathcal{R}$ et R, et pour un angle d'inclinaison θ du cylindre de cisaillement égal à 50 degrés. Plus

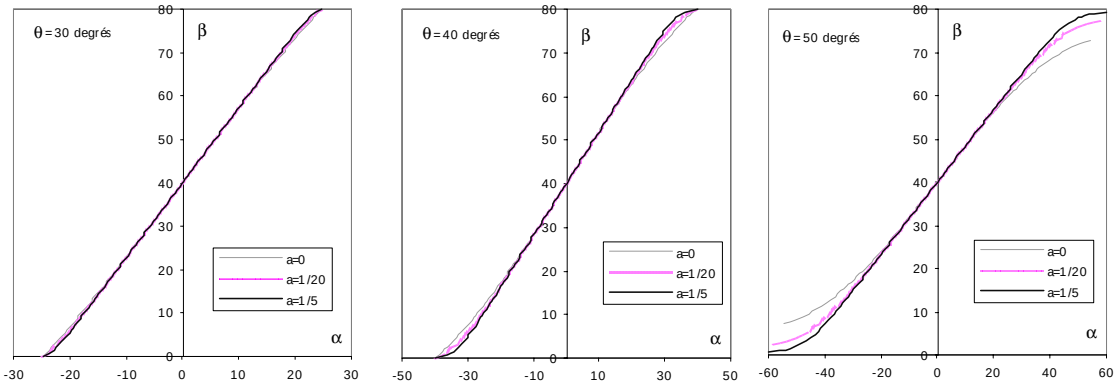


FIG. C.3 – *Plan de cisaillement traversant un échantillon en forme de "tonneau" (cas centré): portion de la développée de l'intersection des deux surfaces pour différents angles de bande et différents renflements (a) du profil.*

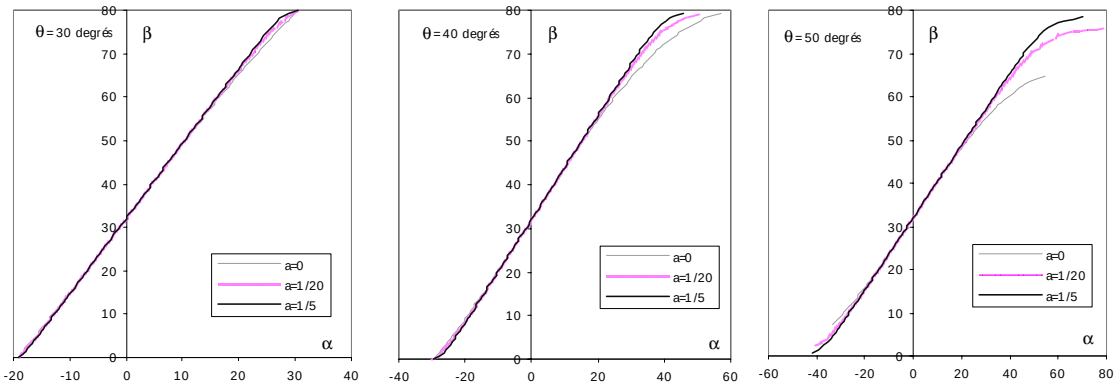


FIG. C.4 – *Plan de cisaillement traversant un échantillon en forme de "tonneau" (cas décentré) : portion de la développée de l'intersection des deux surfaces pour différents angles de bande et différents renflements (a) du profil.*

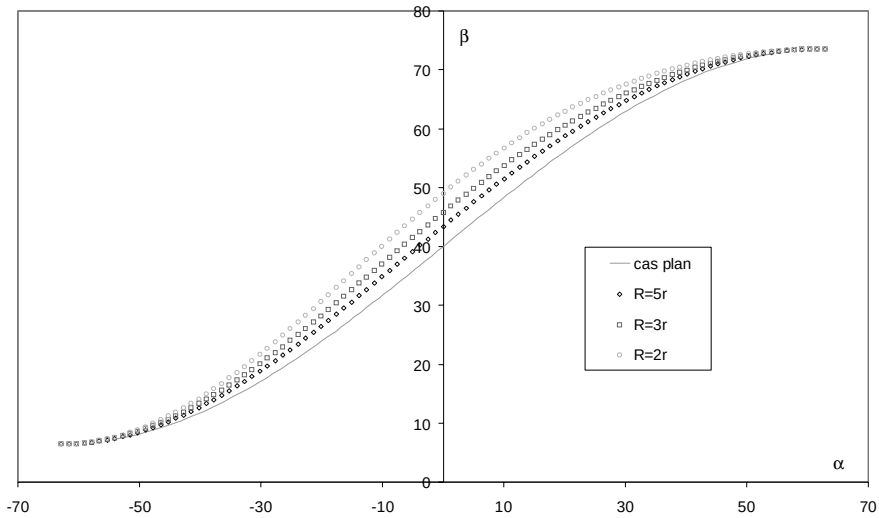


FIG. C.5 – *Cylindre de cisaillement traversant un échantillon cylindrique : développée de l'intersection des deux surfaces pour différents rayon du cylindre de cisaillement.*

le rapport diminue et plus la développée s'éloigne de la courbe sinusoïdale obtenue dans le cas d'un plan de cisaillement. Cependant, l'angle d'inclinaison, au point d'inflexion est peu modifié (modification de 3° entre le cas d'un plan et le cas d'un rapport de rayon de seulement 2).

Annexe D

Essais triaxiaux : résultats

D.1 Essais triaxiaux de compression

Les essais sont classés par confinement croissant. Pour chaque confinement, le classement est le suivant : les essais sur échantillons secs à l'air, sur échantillons secs étuvés en élancement 2 puis les essais secs étuvés en élancement 1.

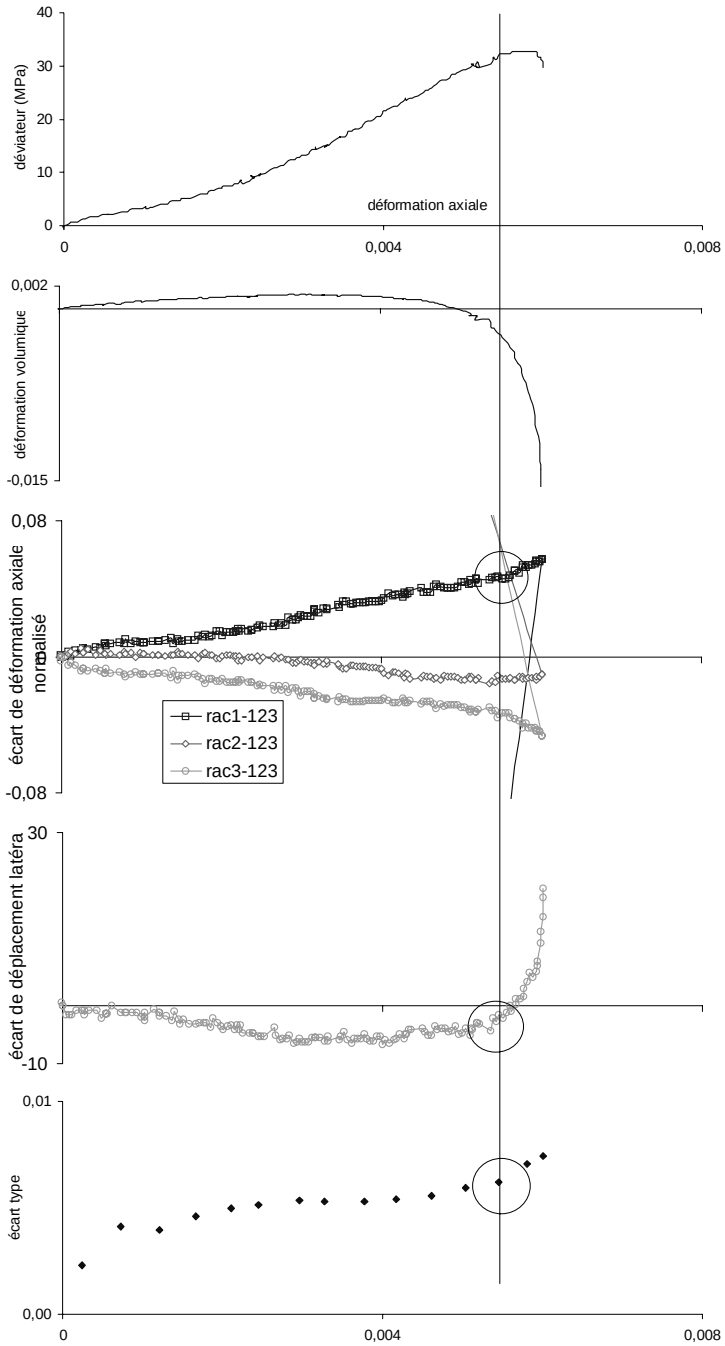


FIG. D.1 – *Essai 9711 : 0MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

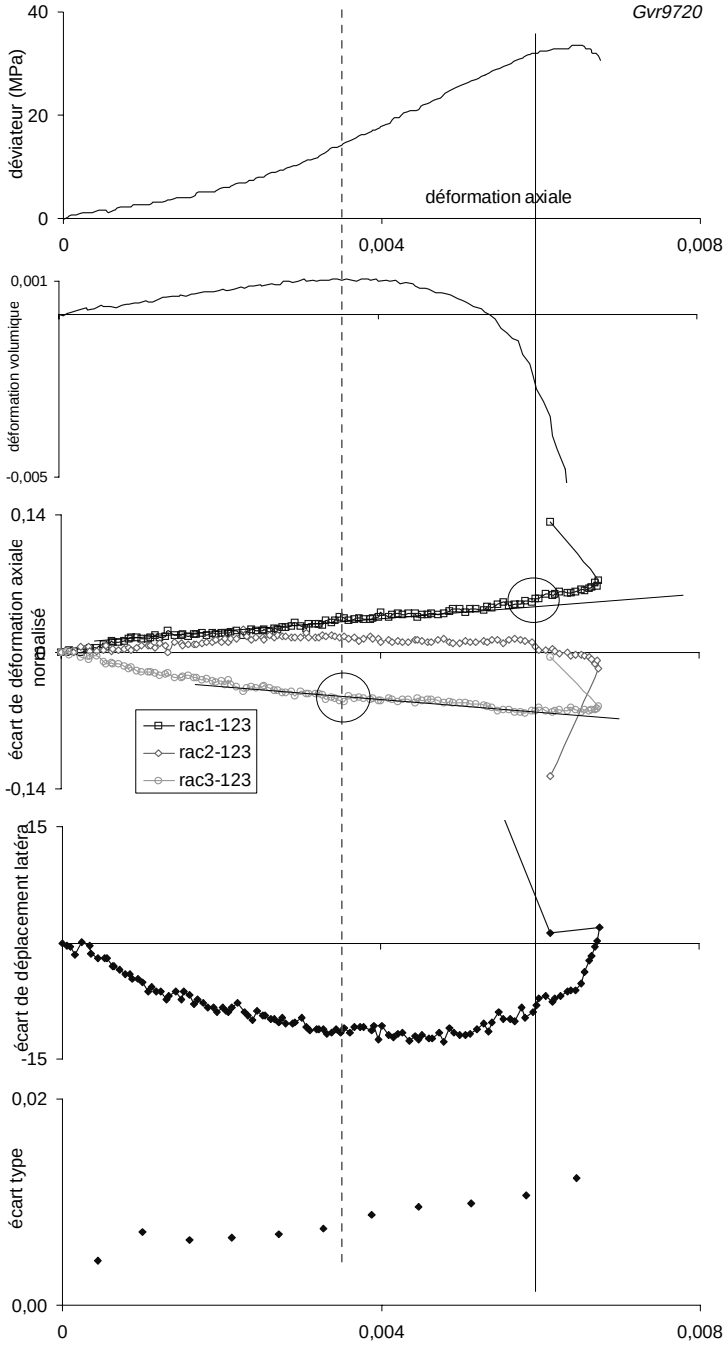


FIG. D.2 – *Essai 9720 : 0MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

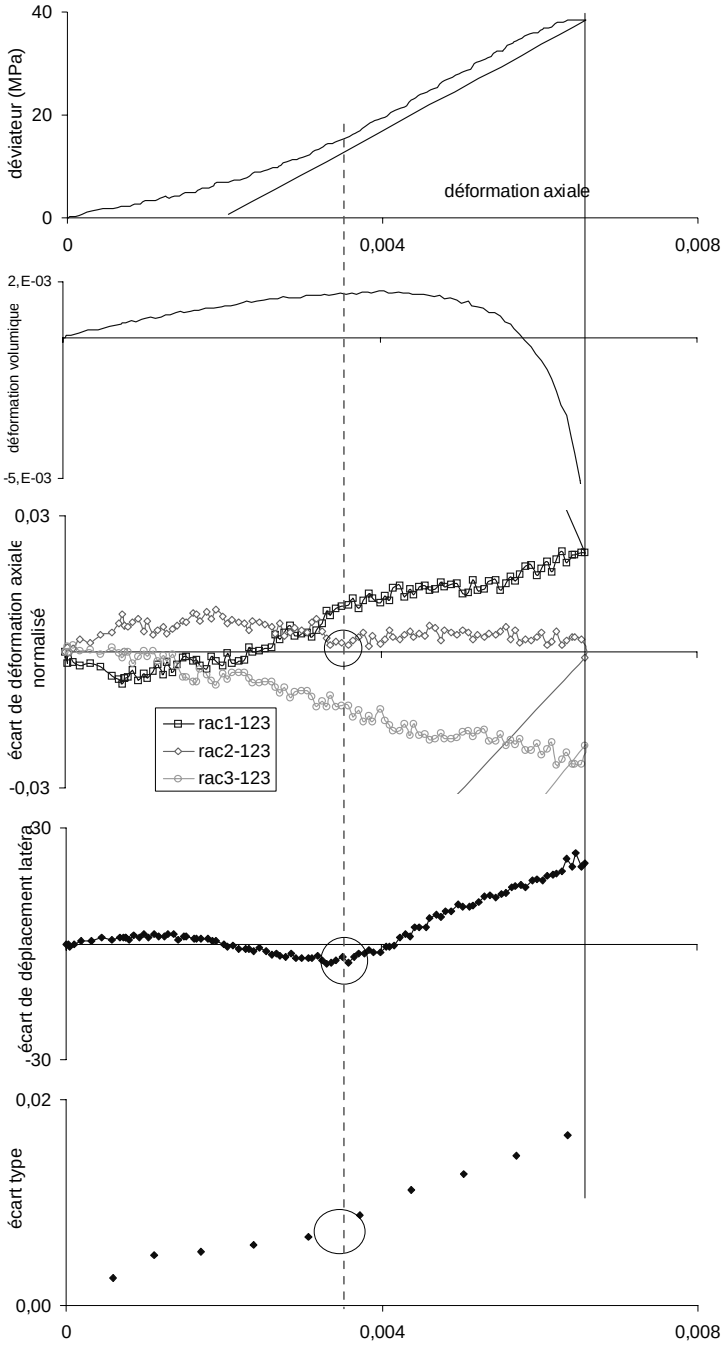


FIG. D.3 – *Essai 9731 : 0MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

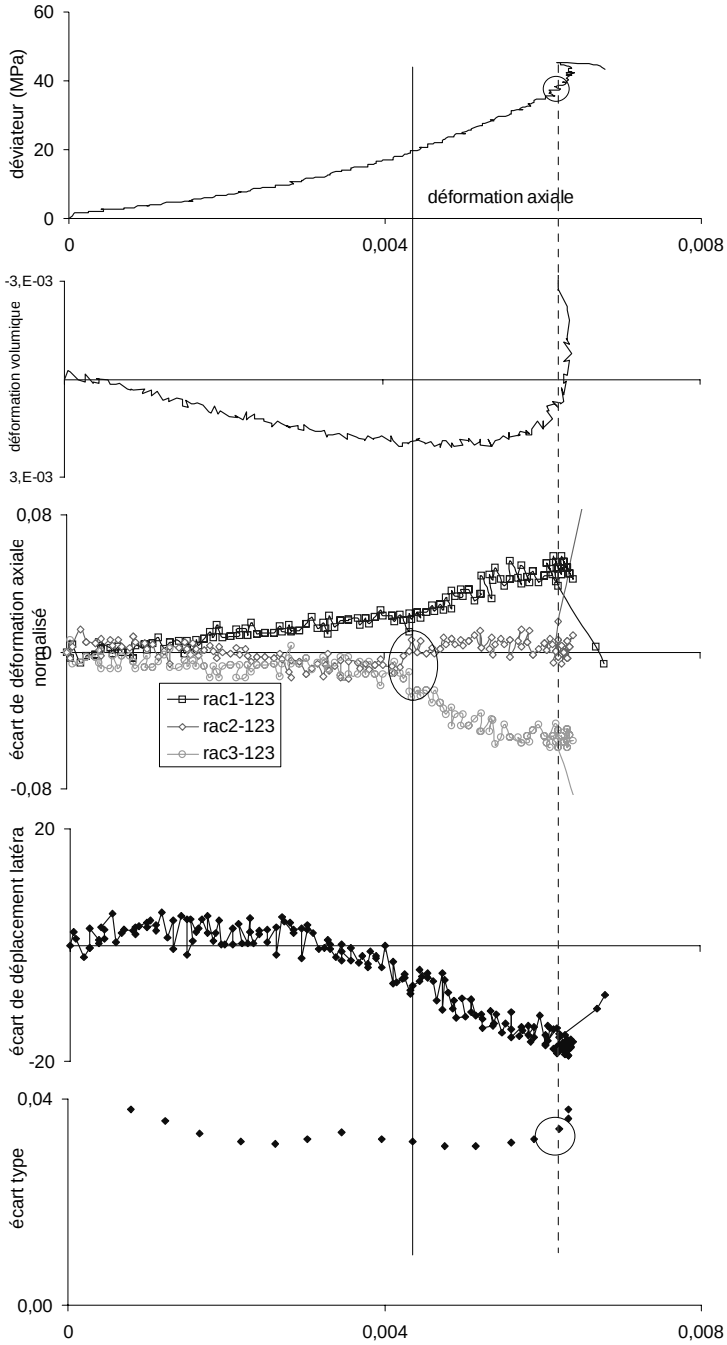


FIG. D.4 – *Essai 9745 : 0MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

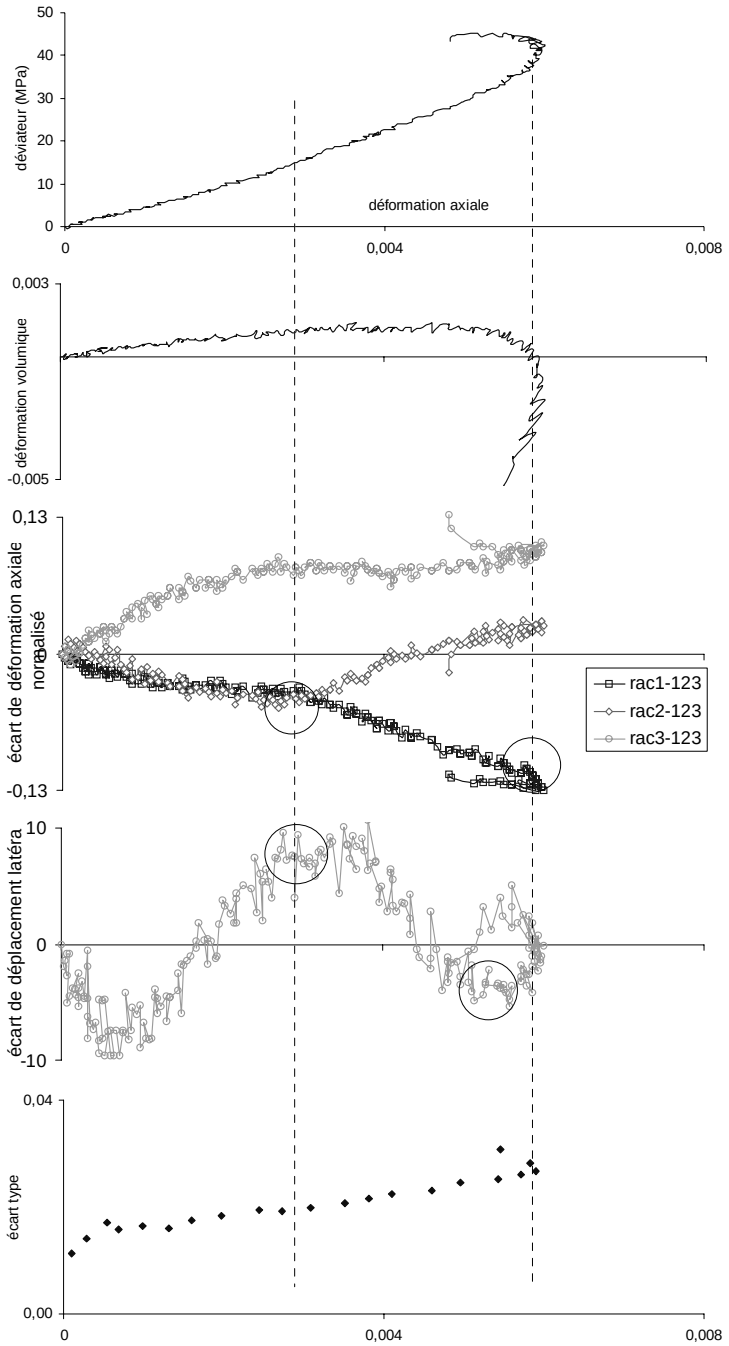


FIG. D.5 – *Essai 9751 : 0MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

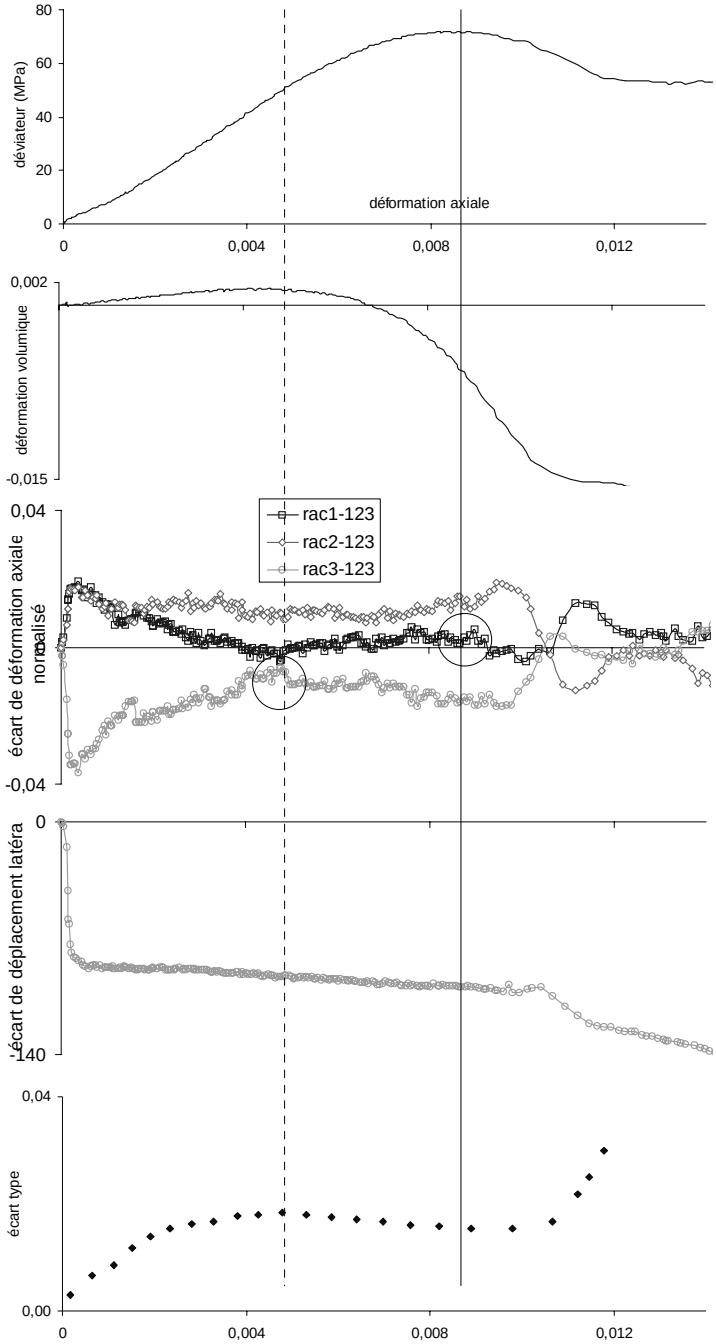


FIG. D.6 – *Essai 9710 : 10MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

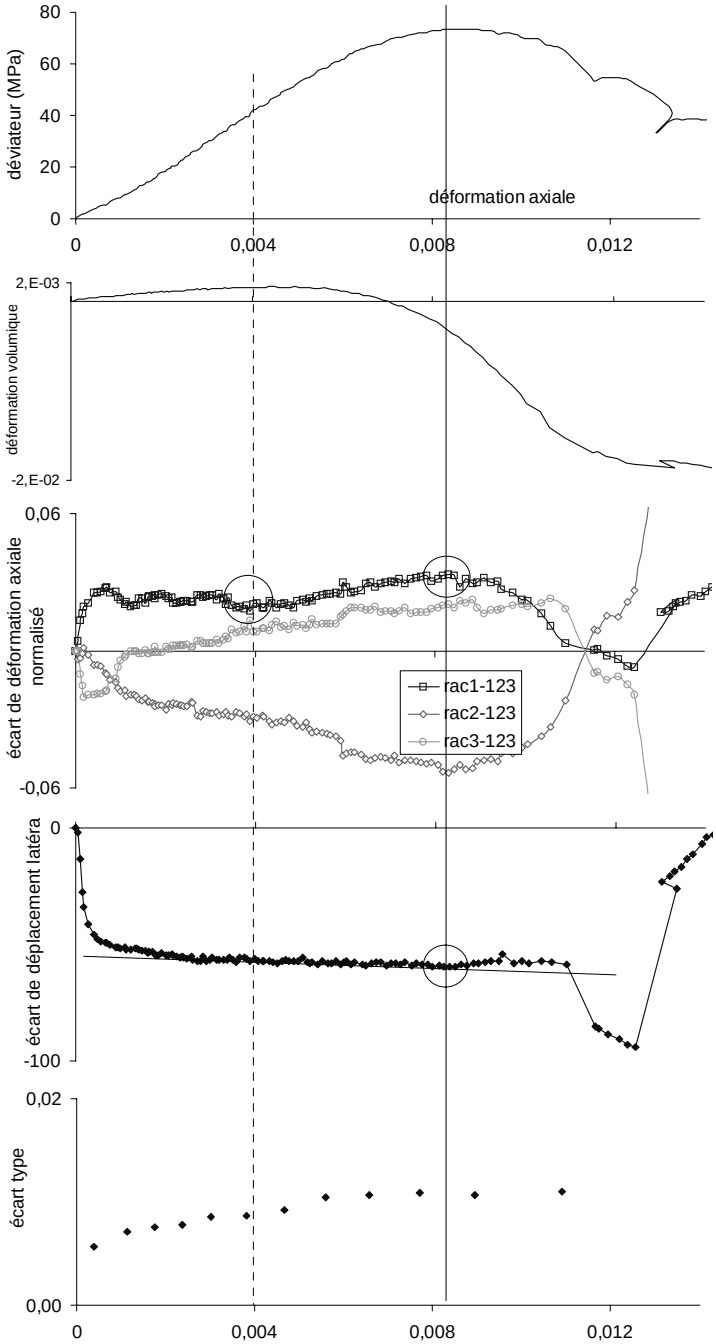


FIG. D.7 – *Essai 9717: 10MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

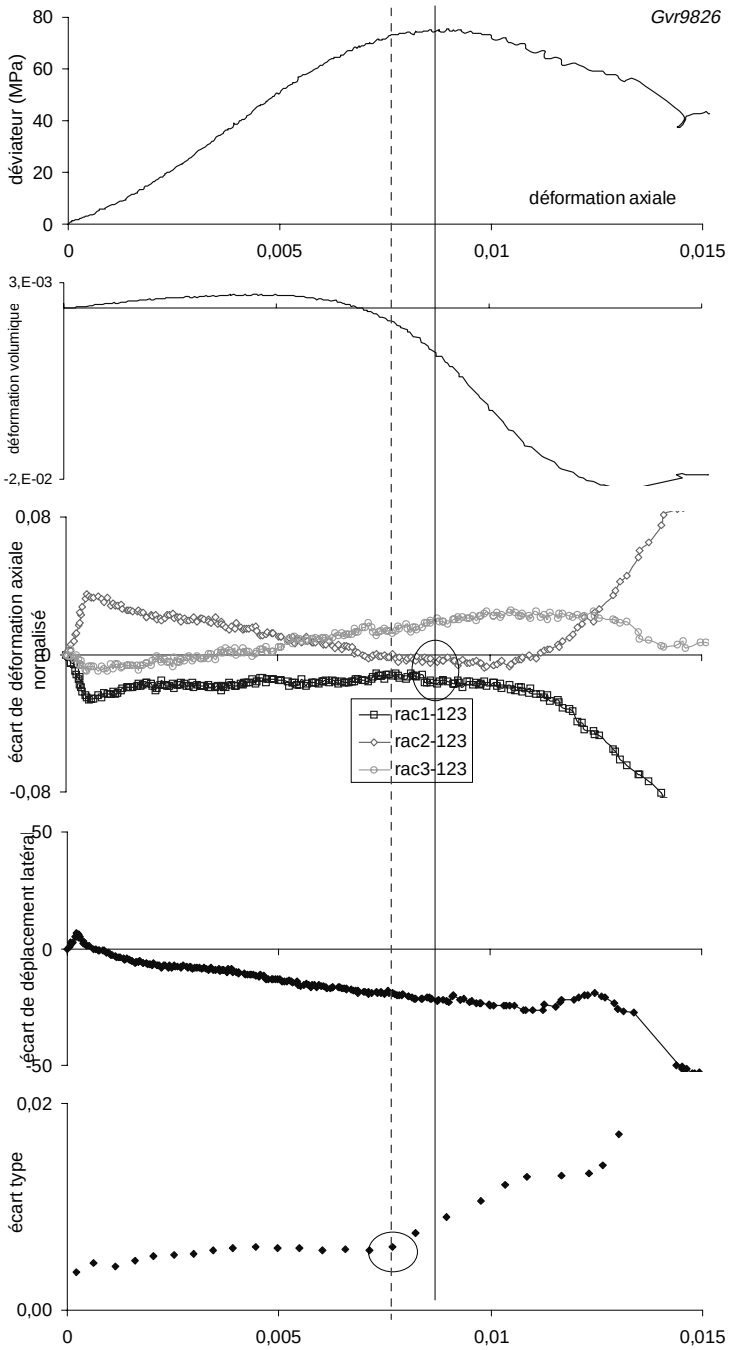


FIG. D.8 – *Essai 9726 : 10MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

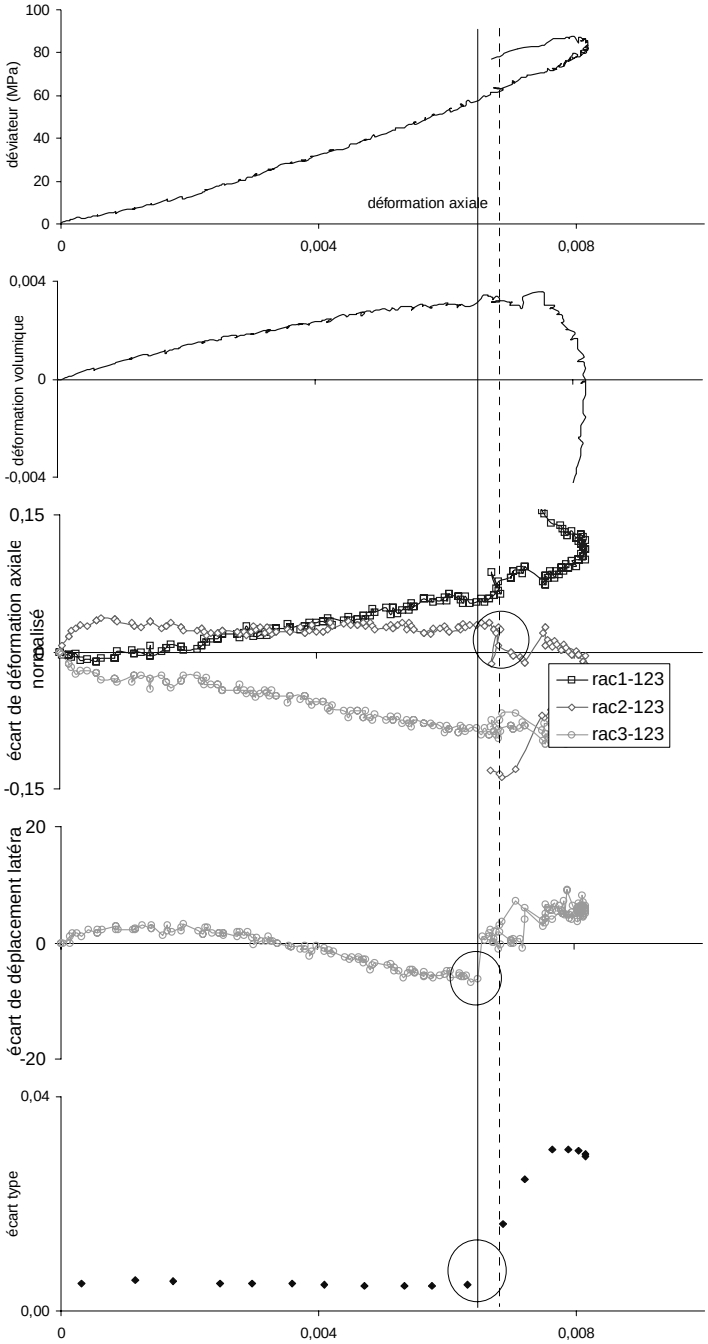


FIG. D.9 – *Essai 9744 : 10MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

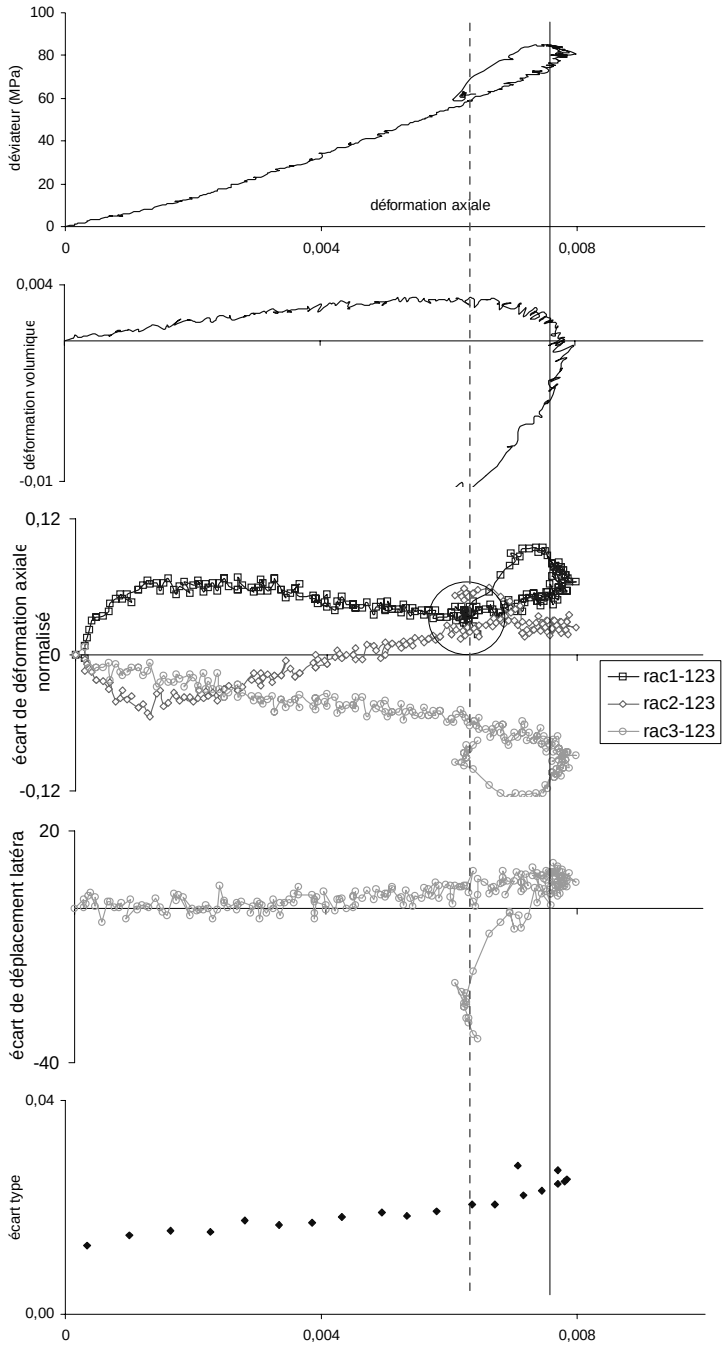


FIG. D.10 – *Essai 9750 : 10MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

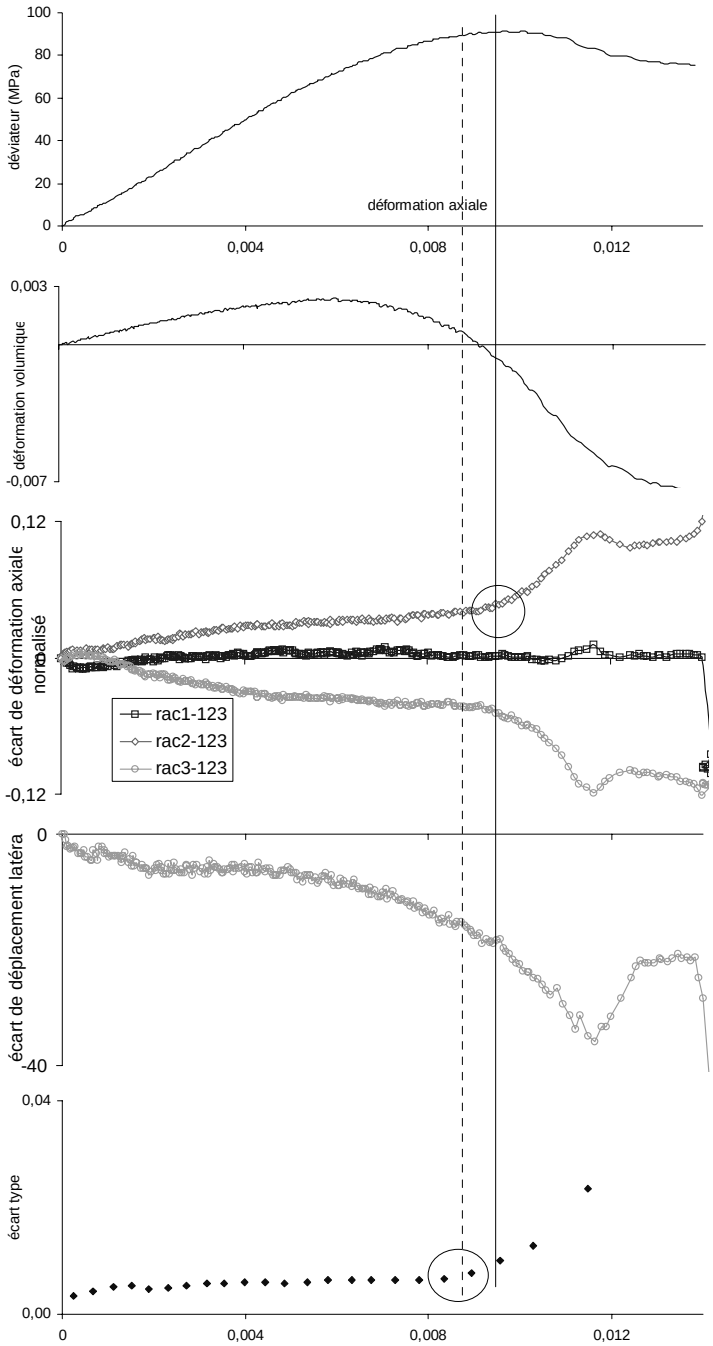


FIG. D.11 – *Essai 9712 : 20MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

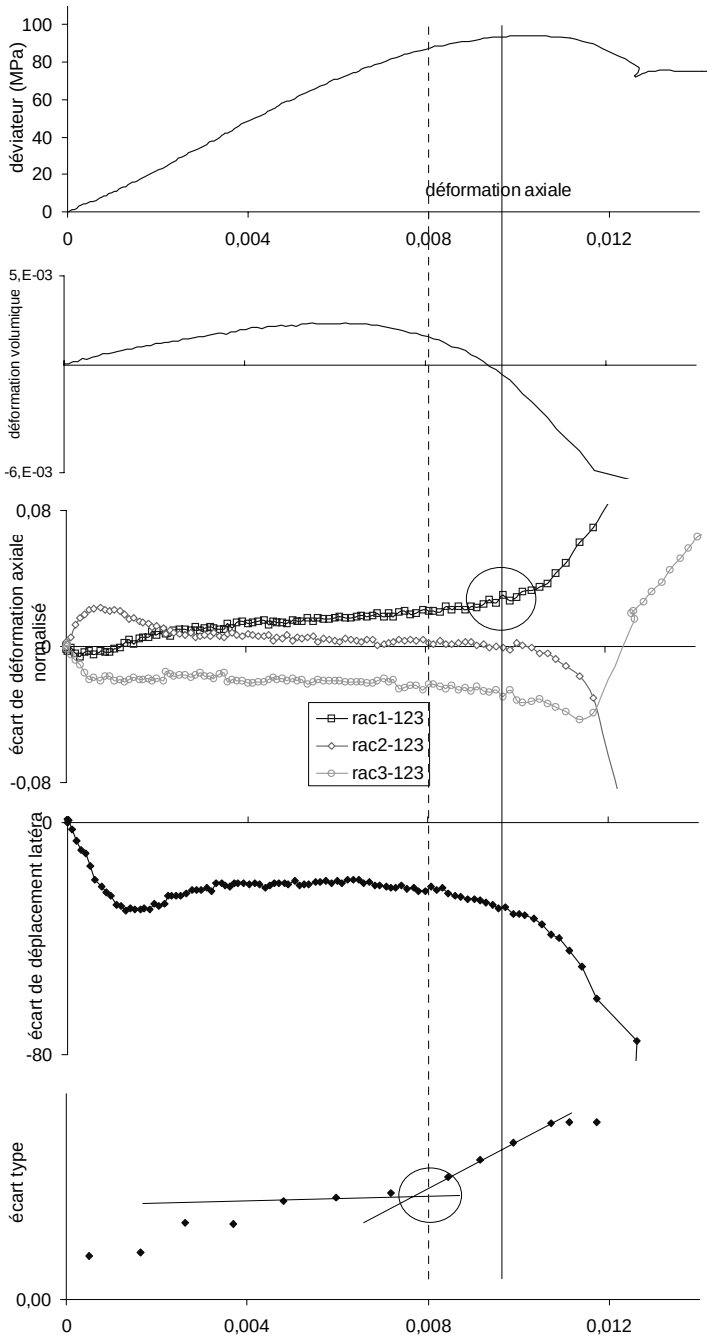


FIG. D.12 – *Essai 9714 : 20MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

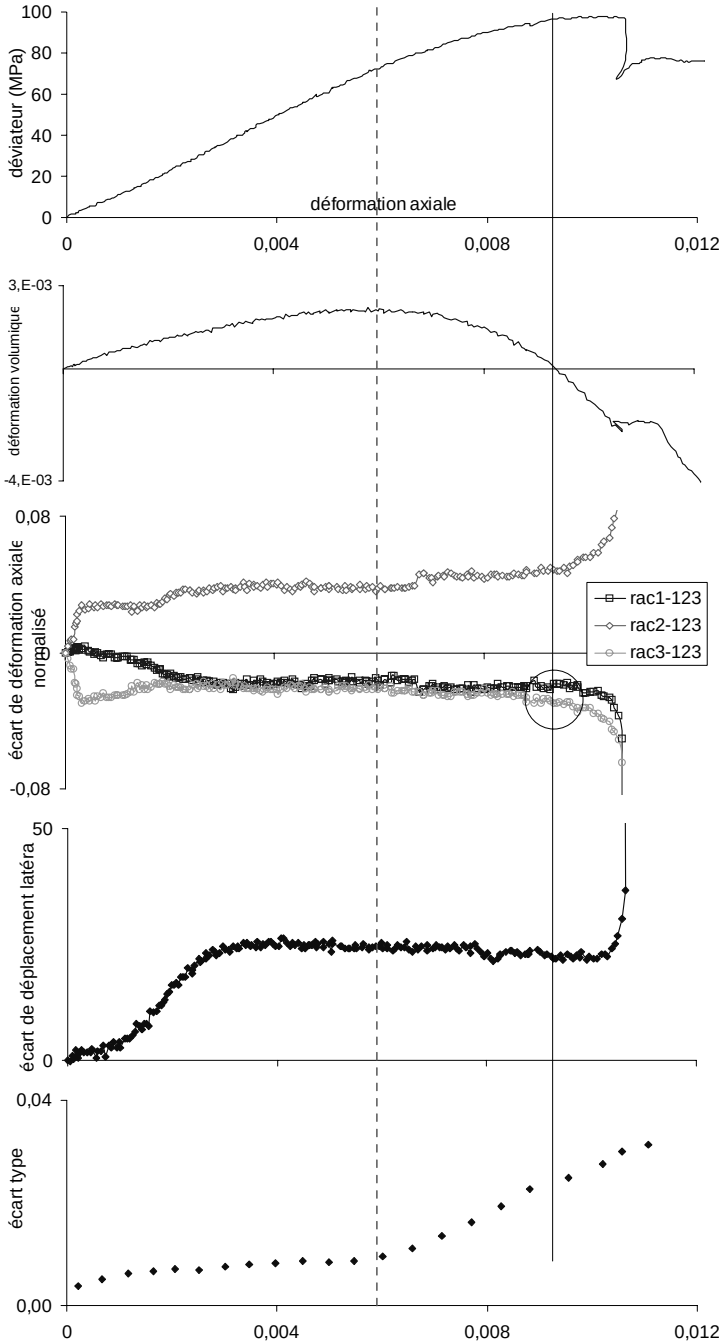


FIG. D.13 – *Essai 9725 : 20MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

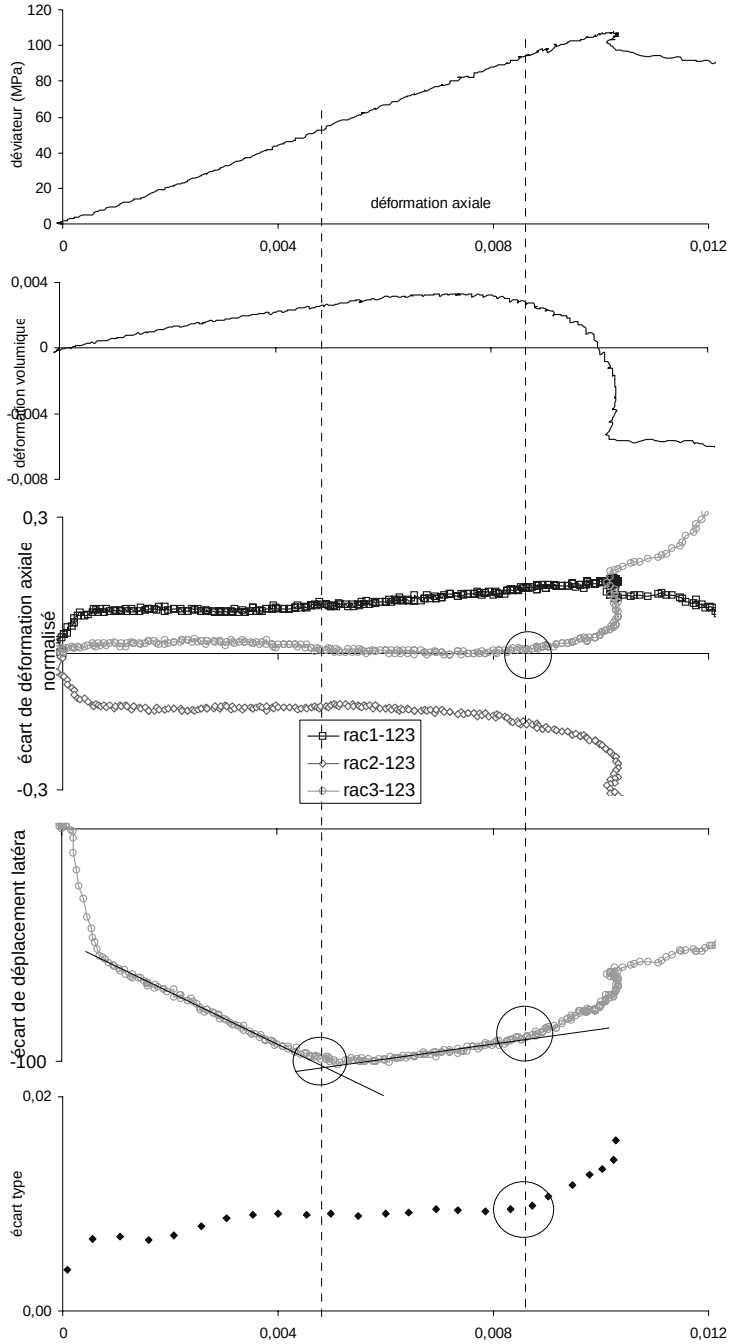


FIG. D.14 – *Essai 9742 : 20MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

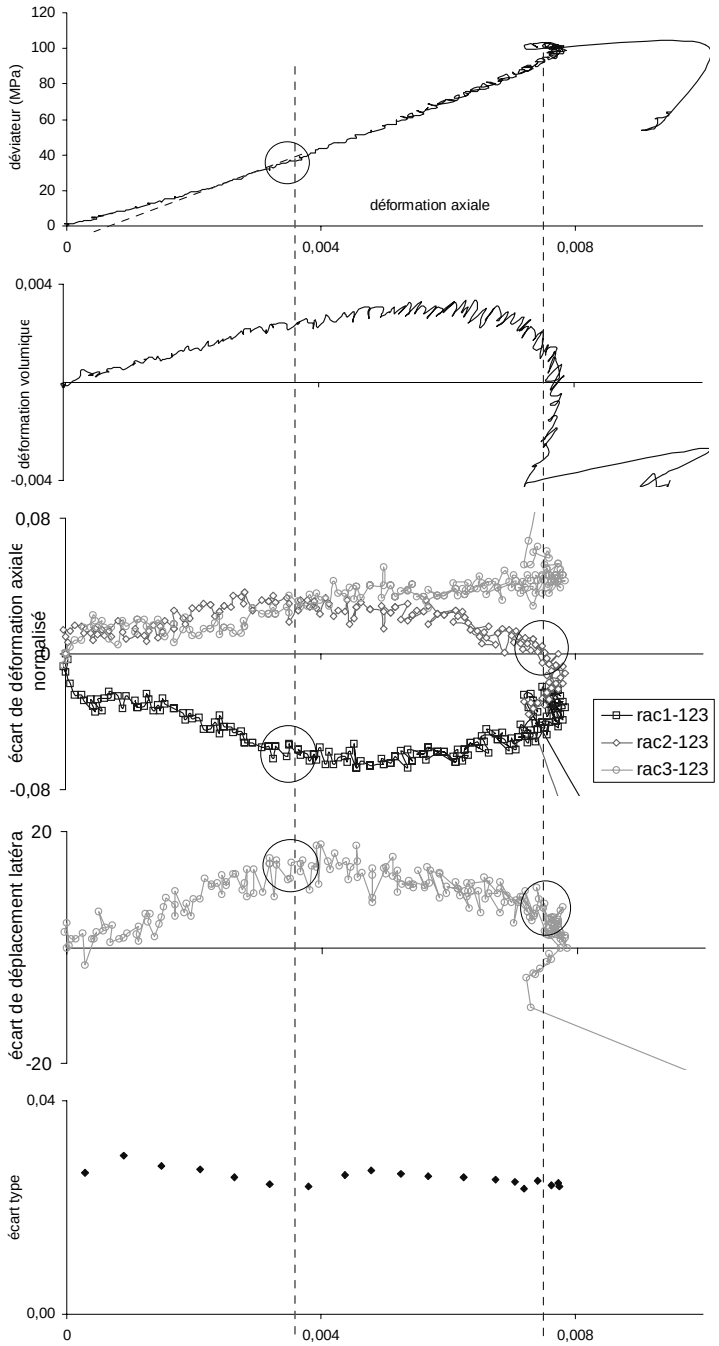


FIG. D.15 – *Essai 9749 : 20MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

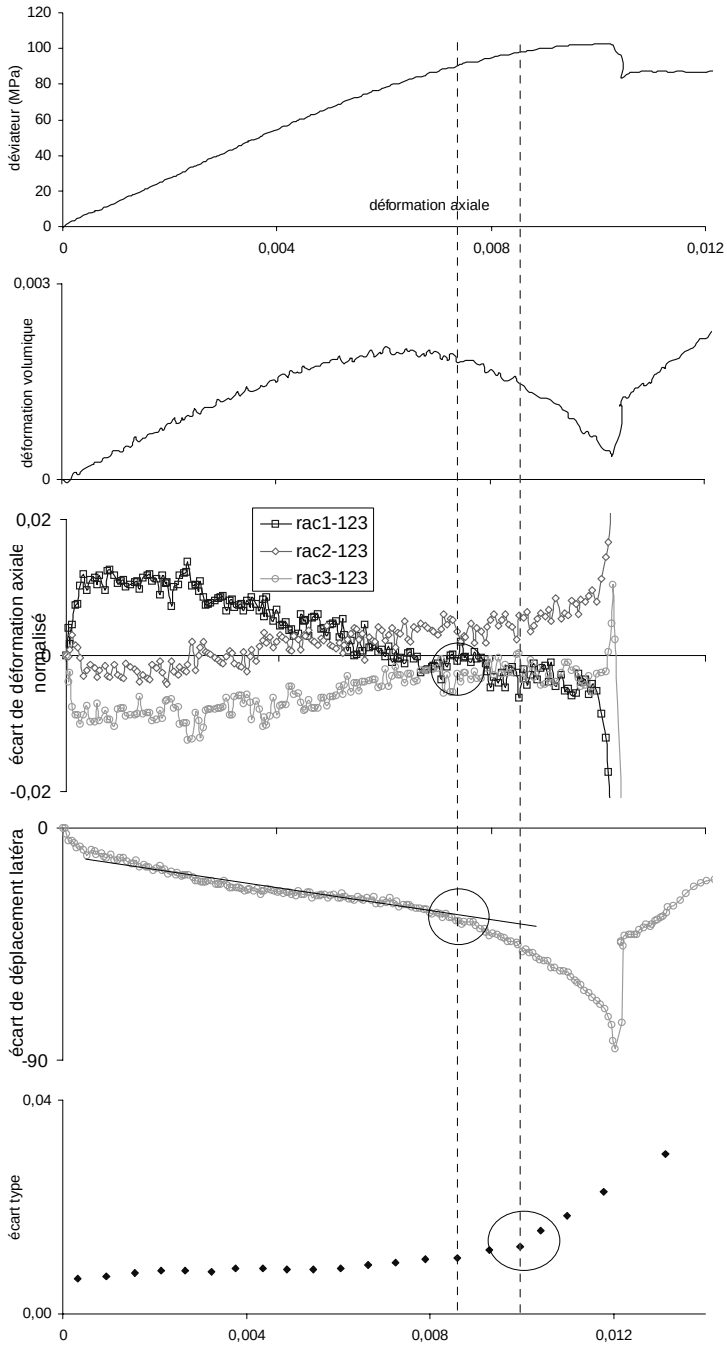


FIG. D.16 – *Essai 9709 : 30MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

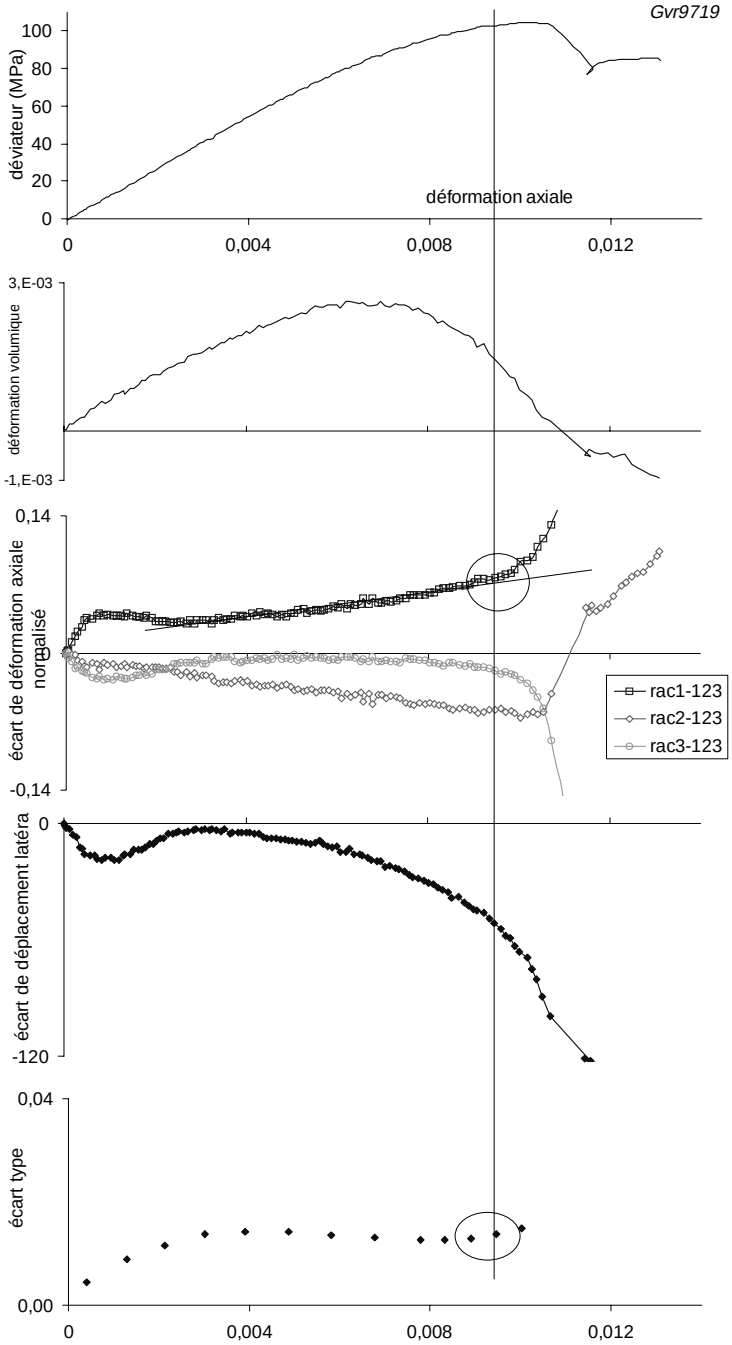


FIG. D.17 – *Essai 9719 : 30MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

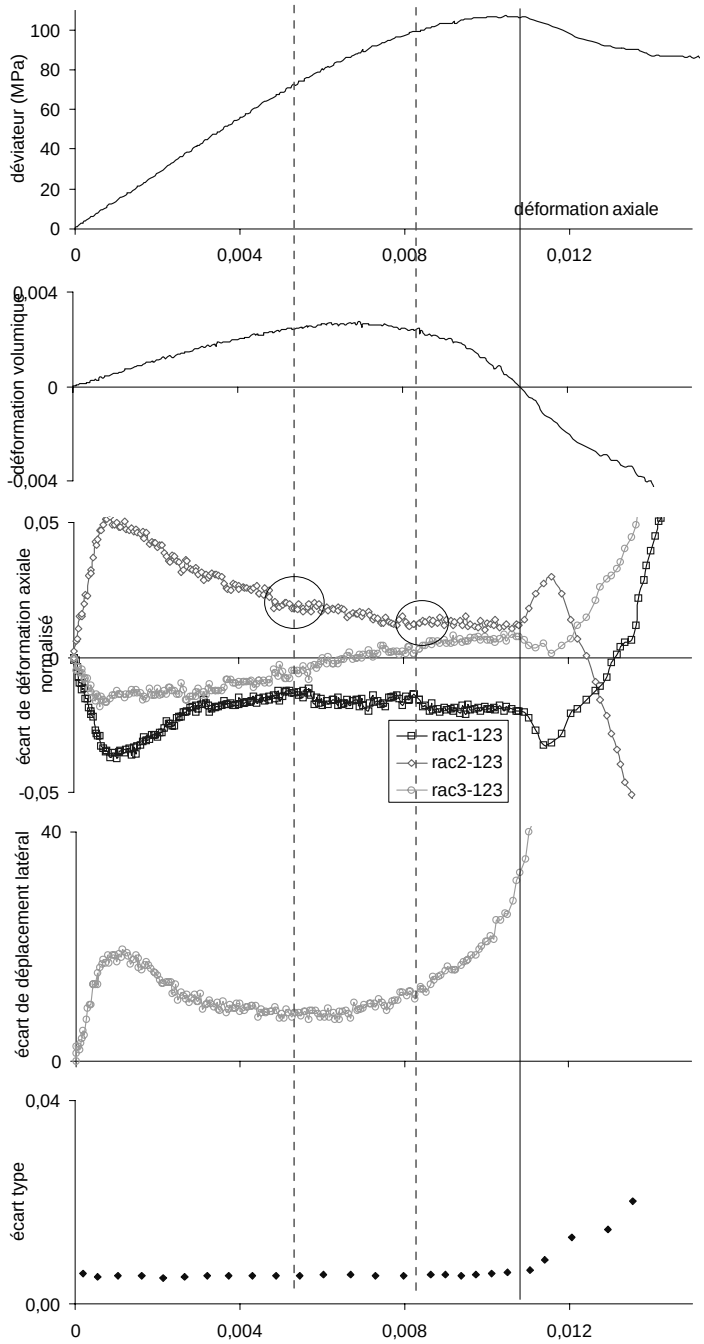


FIG. D.18 – *Essai 9724 : 30MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

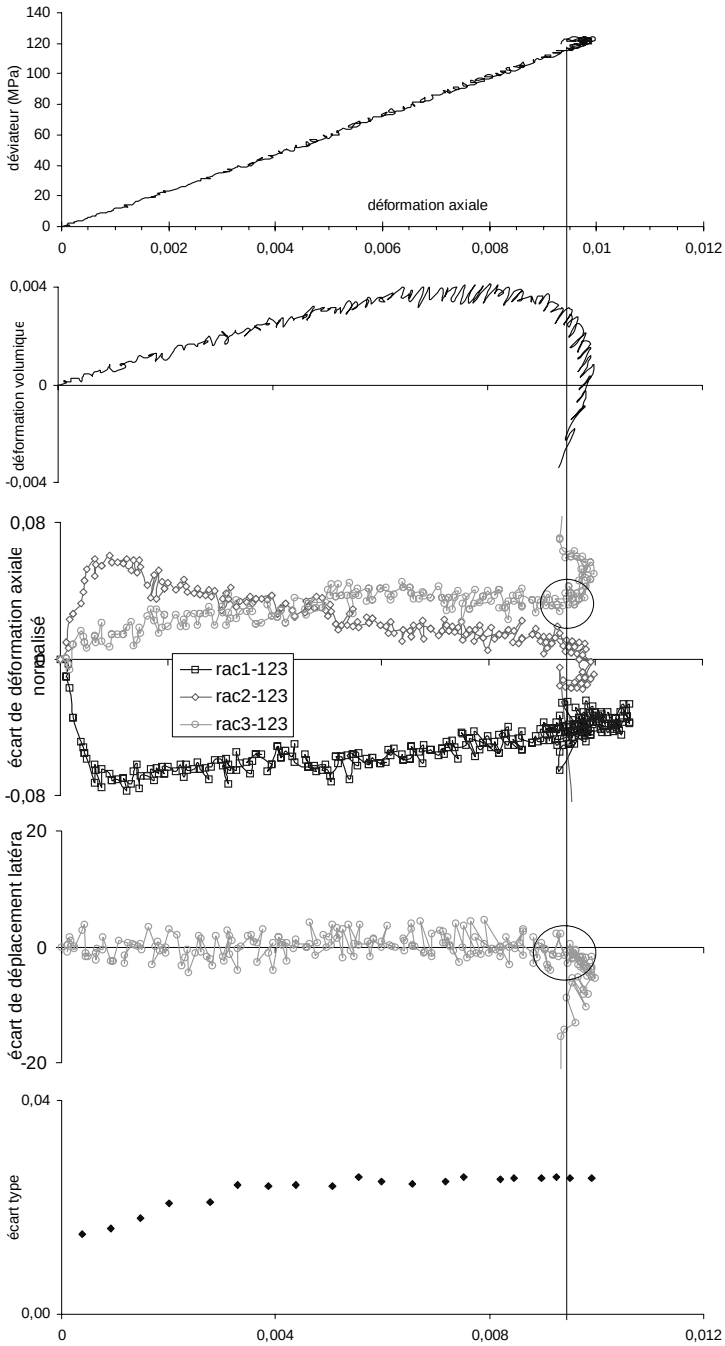


FIG. D.19 – *Essai 9748 : 30MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

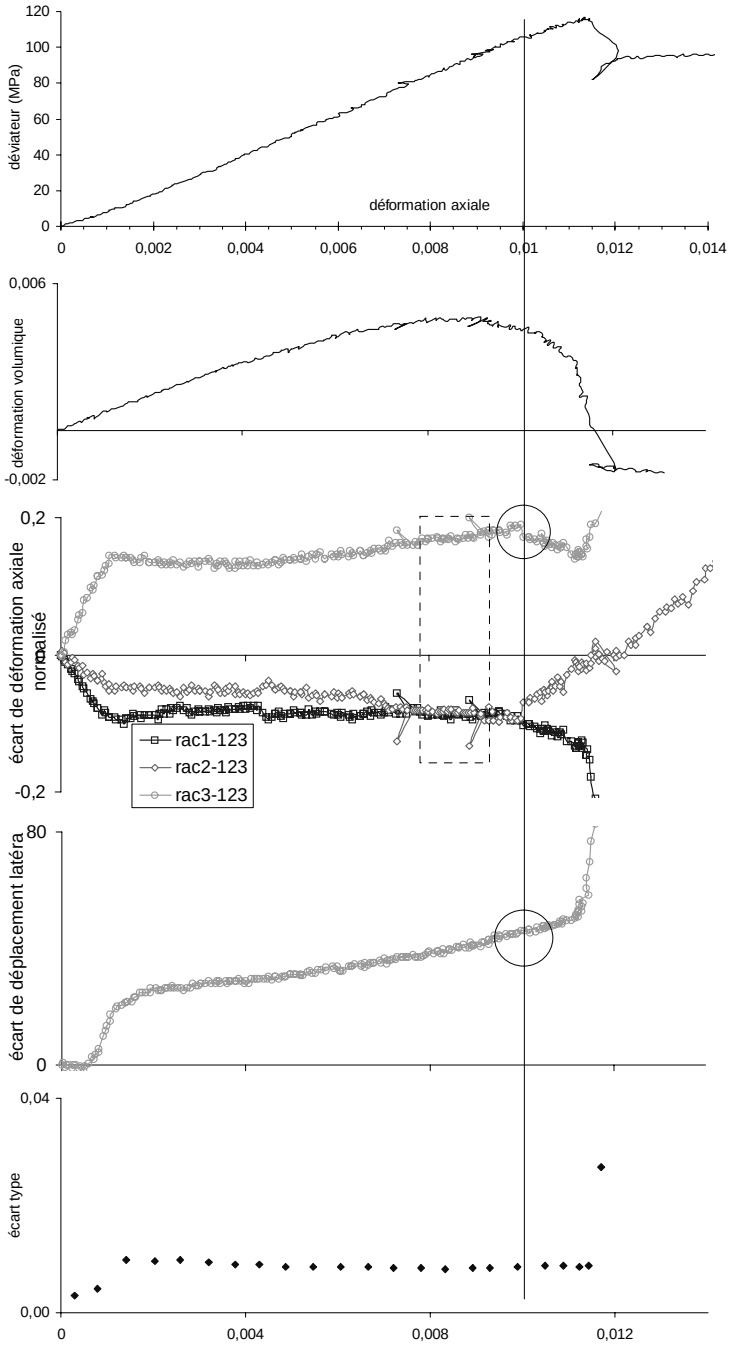


FIG. D.20 – *Essai 9741 : 30MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine. Le rectangle indique une plage où les mesures de déformations sont incertaines.*

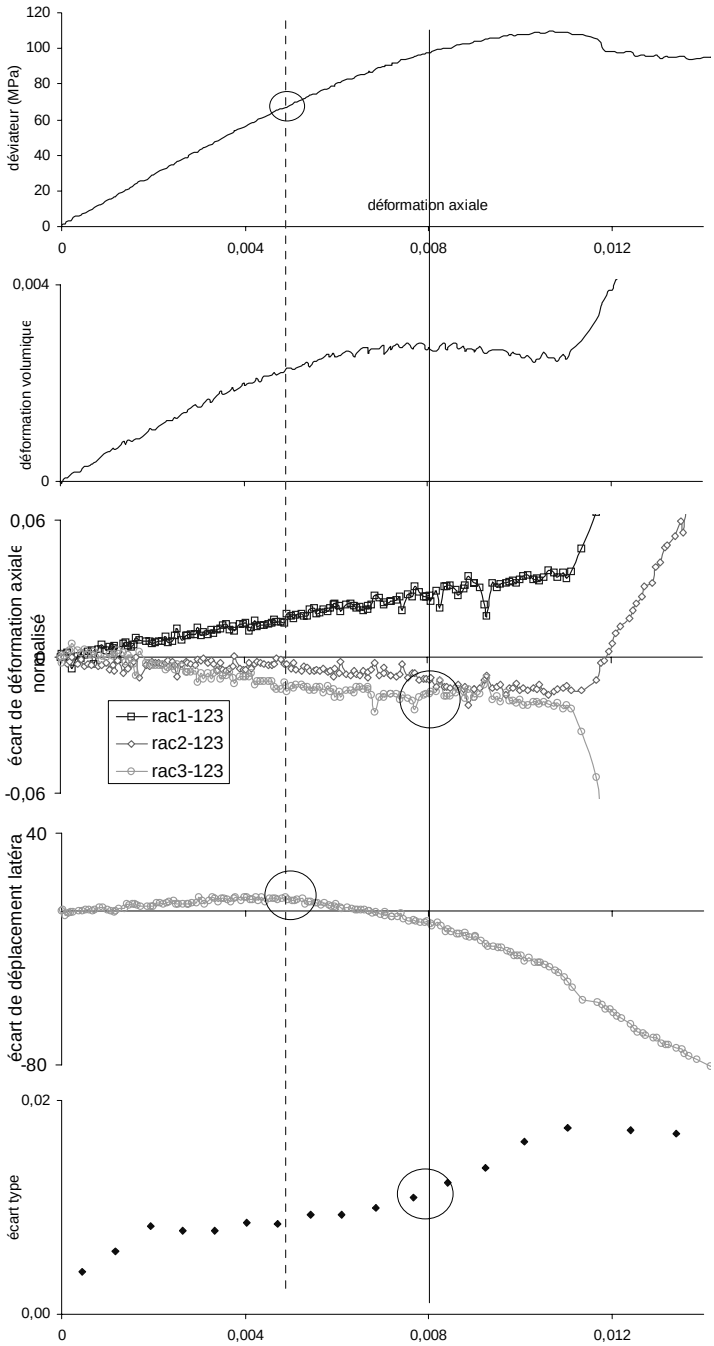


FIG. D.21 – *Essai 9708 : 40MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

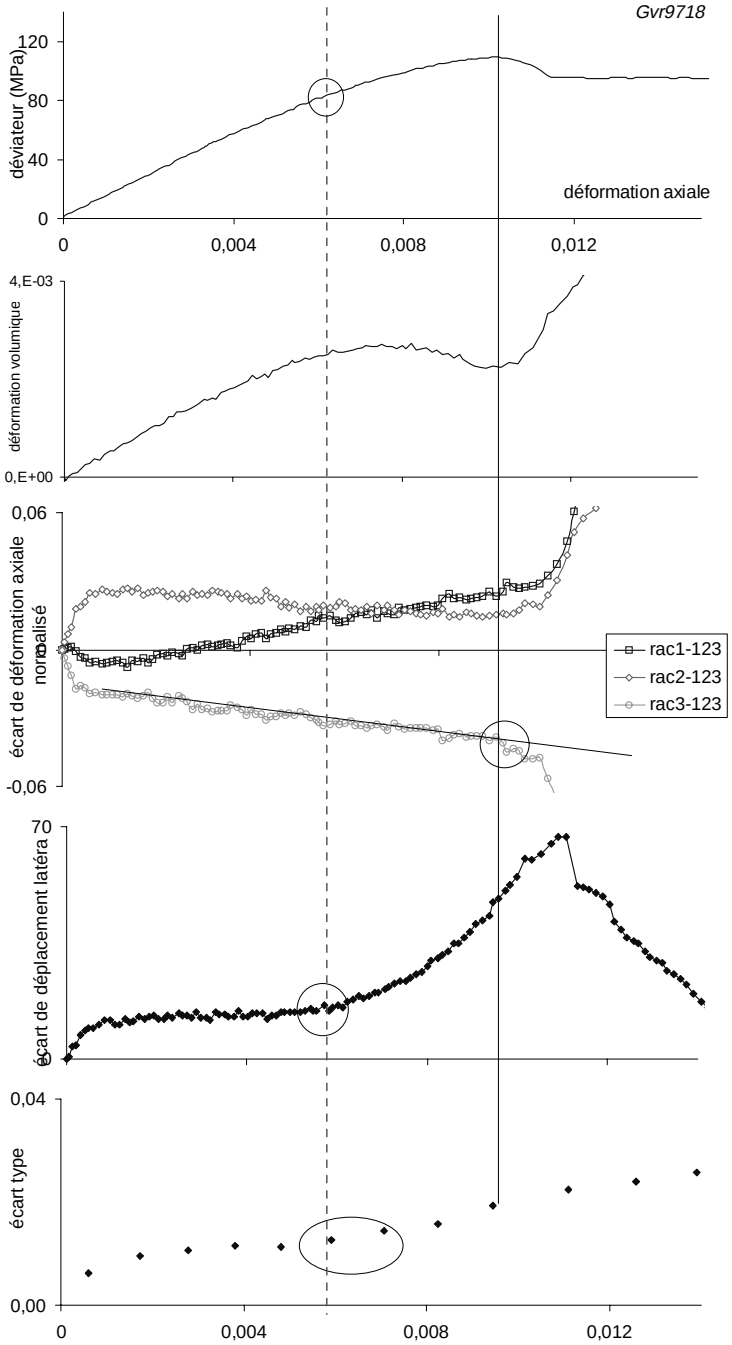


FIG. D.22 – *Essai 9718 : 40MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

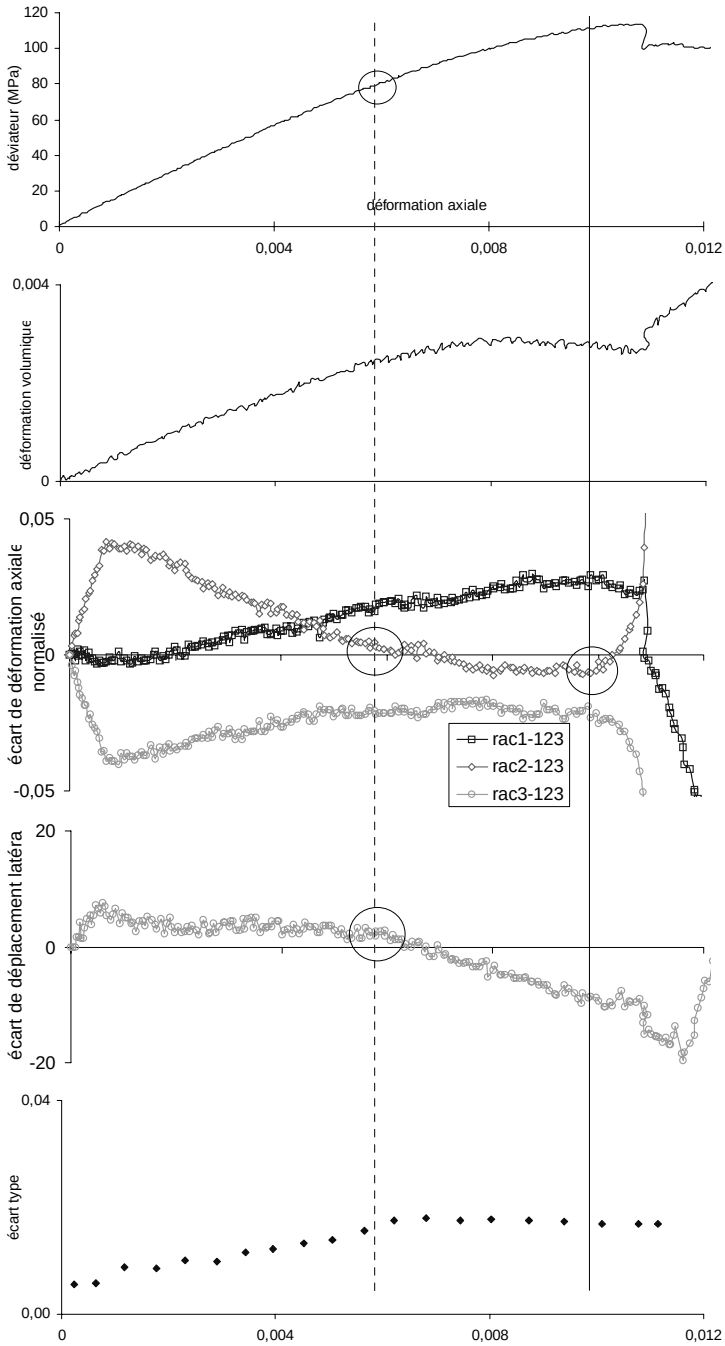


FIG. D.23 – *Essai 9723 : 40MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

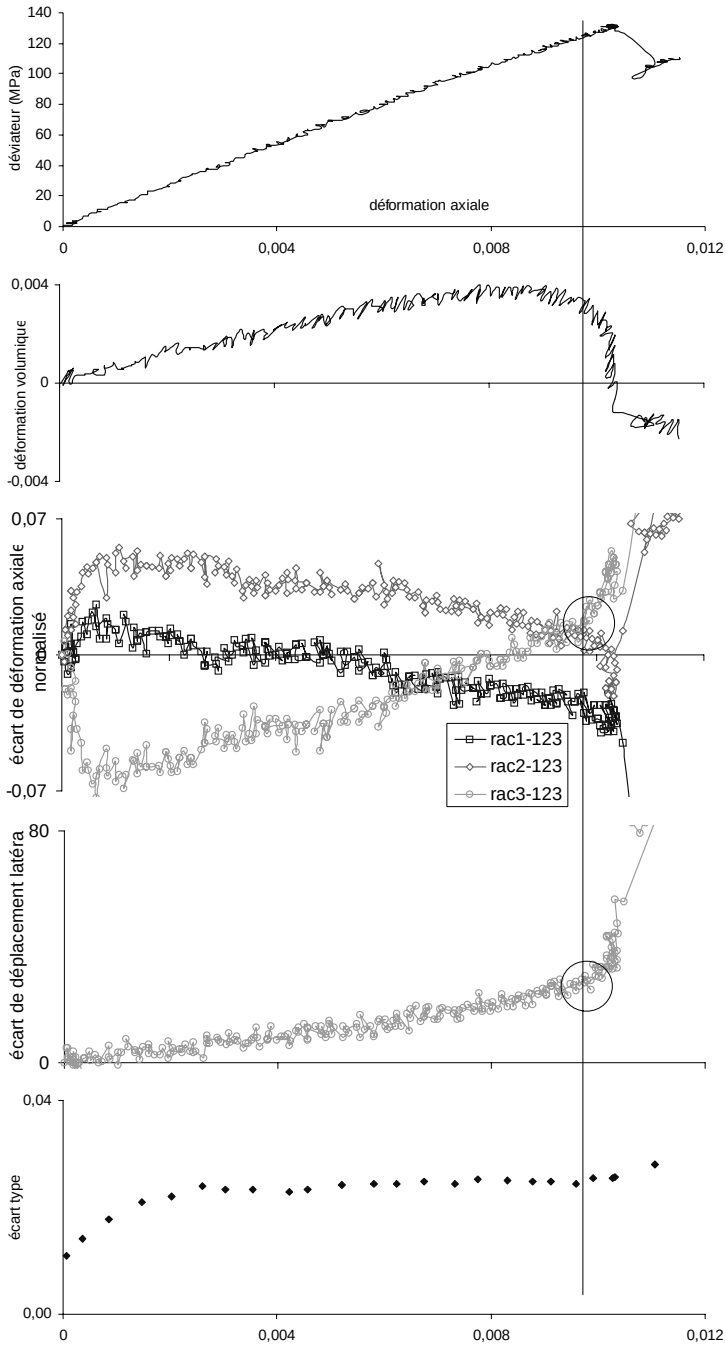


FIG. D.24 – *Essai 9747: 40MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

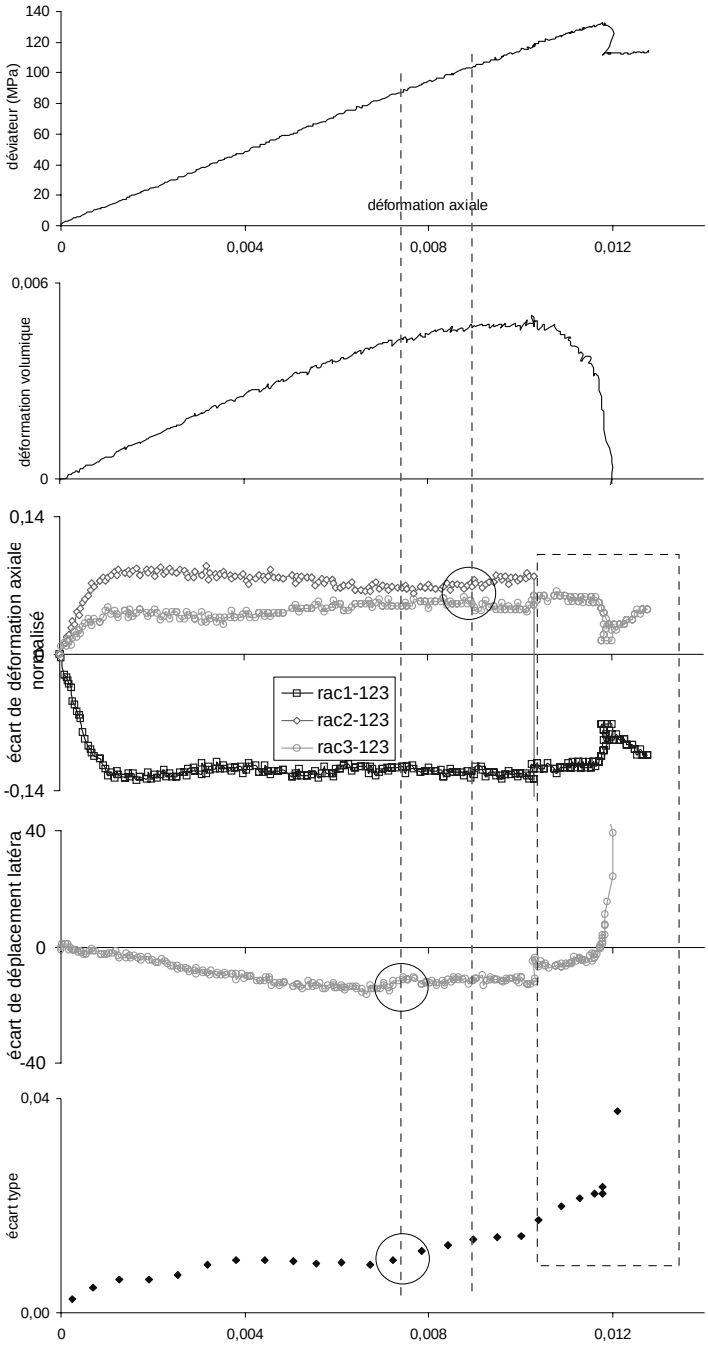


FIG. D.25 – *Essai 9740 : 40MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine. Le rectangle indique une plage où les mesures de déformations sont incertaines.*

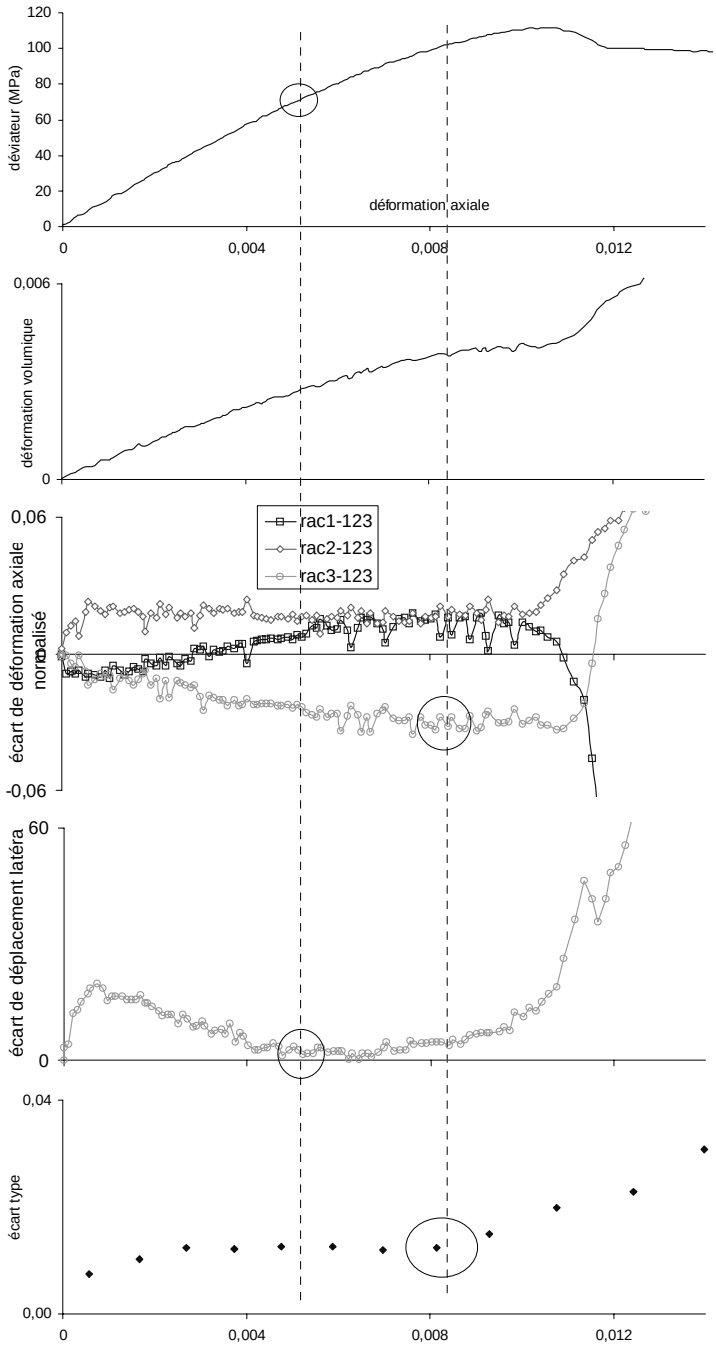


FIG. D.26 – *Essai 9707: 50MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

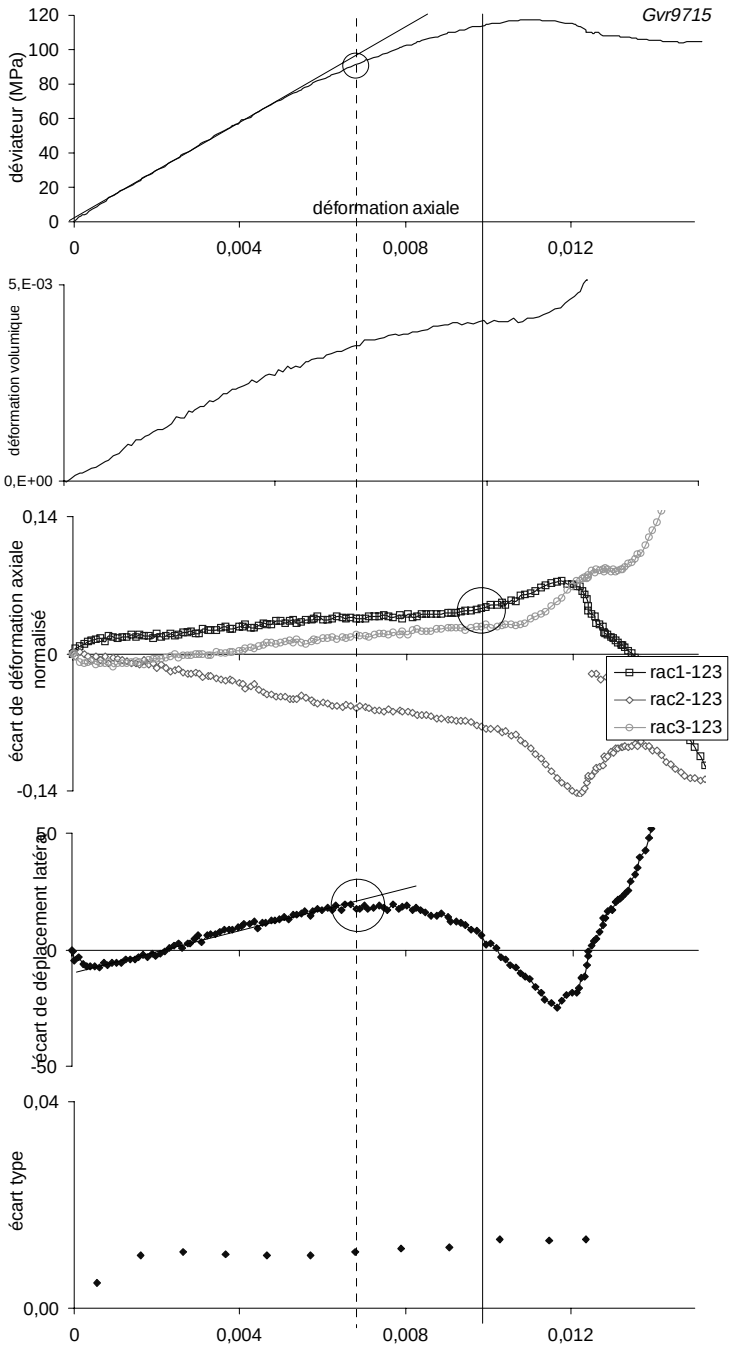


FIG. D.27 – *Essai 9715 : 50MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

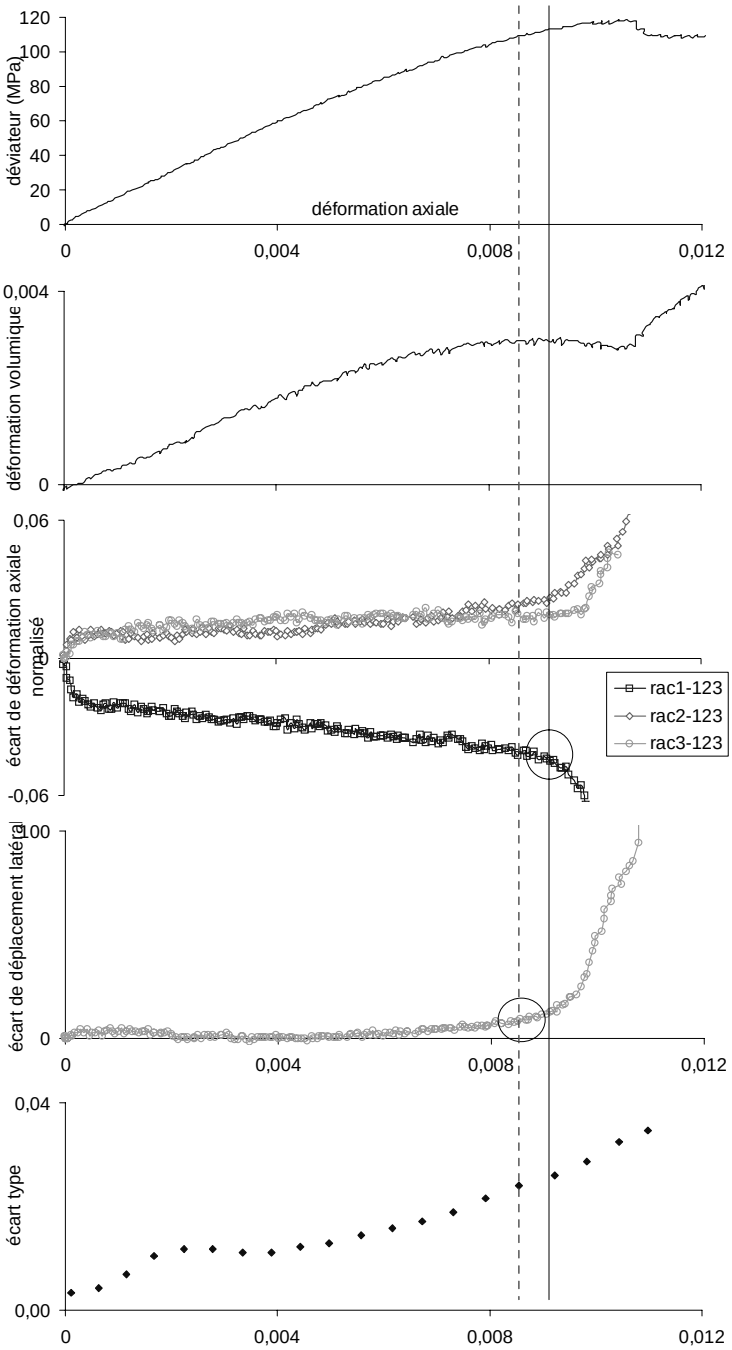


FIG. D.28 – *Essai 9722 : 50MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

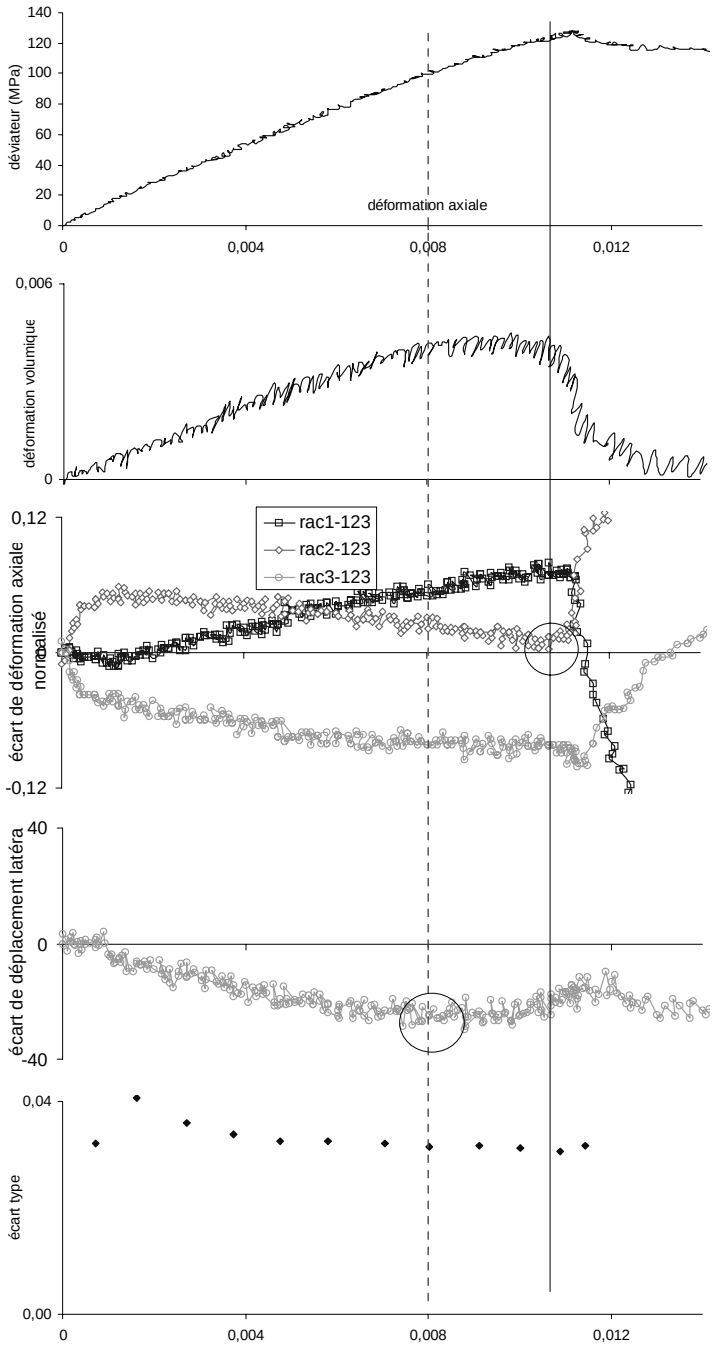


FIG. D.29 – *Essai 9746 : 50MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

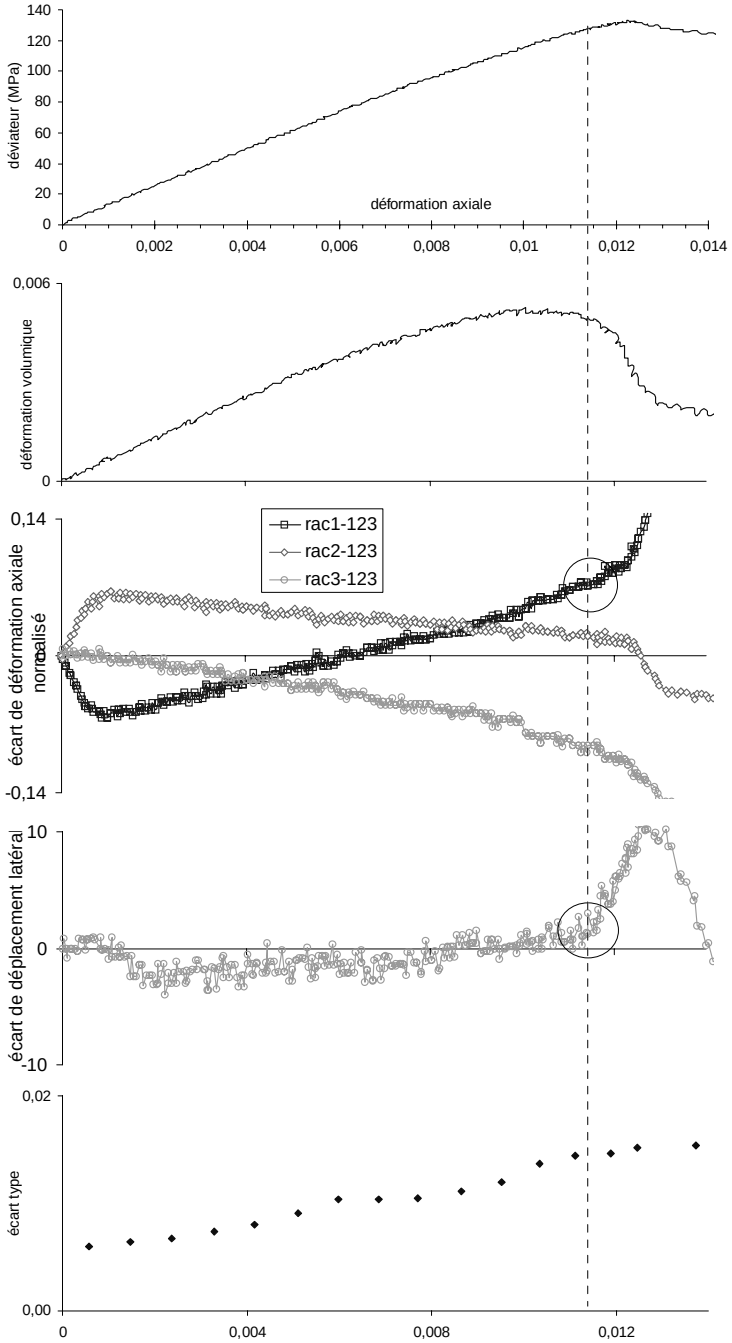


FIG. D.30 – *Essai 9739 : 50MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

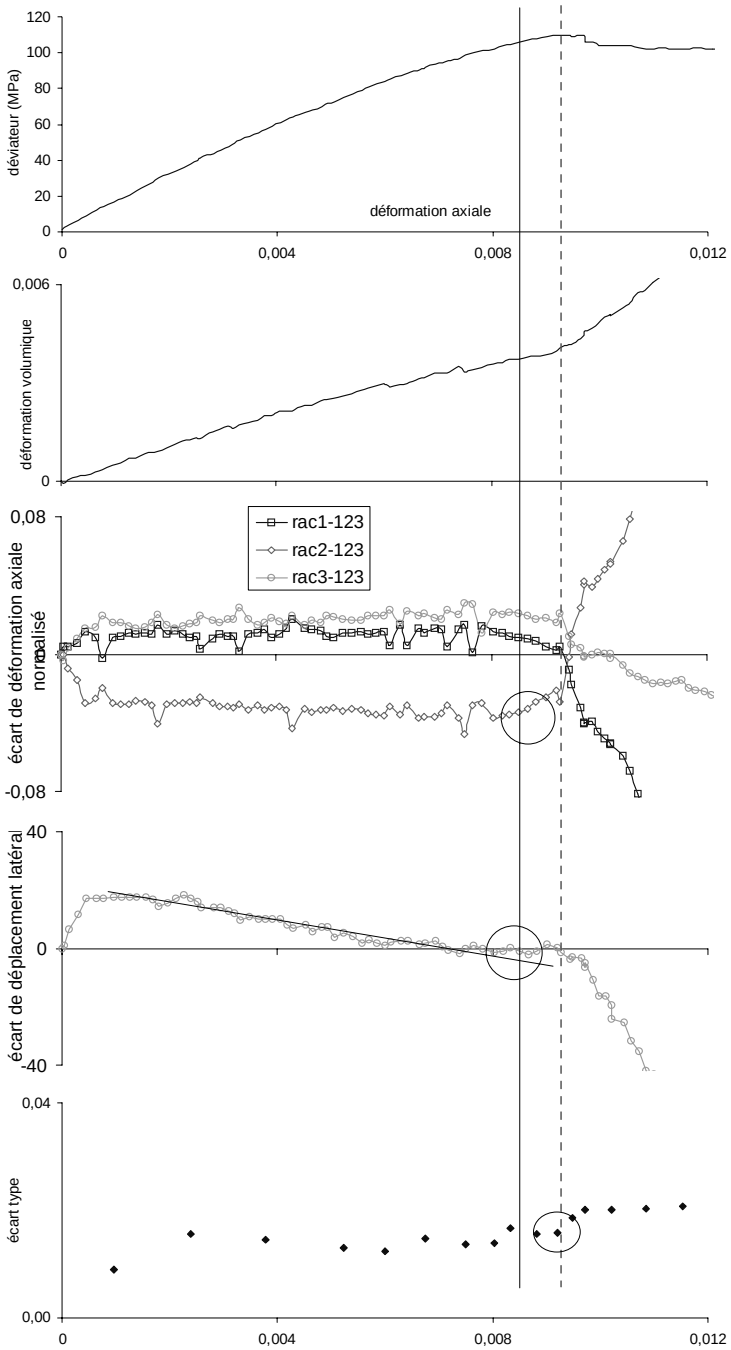


FIG. D.31 – *Essai 9706 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

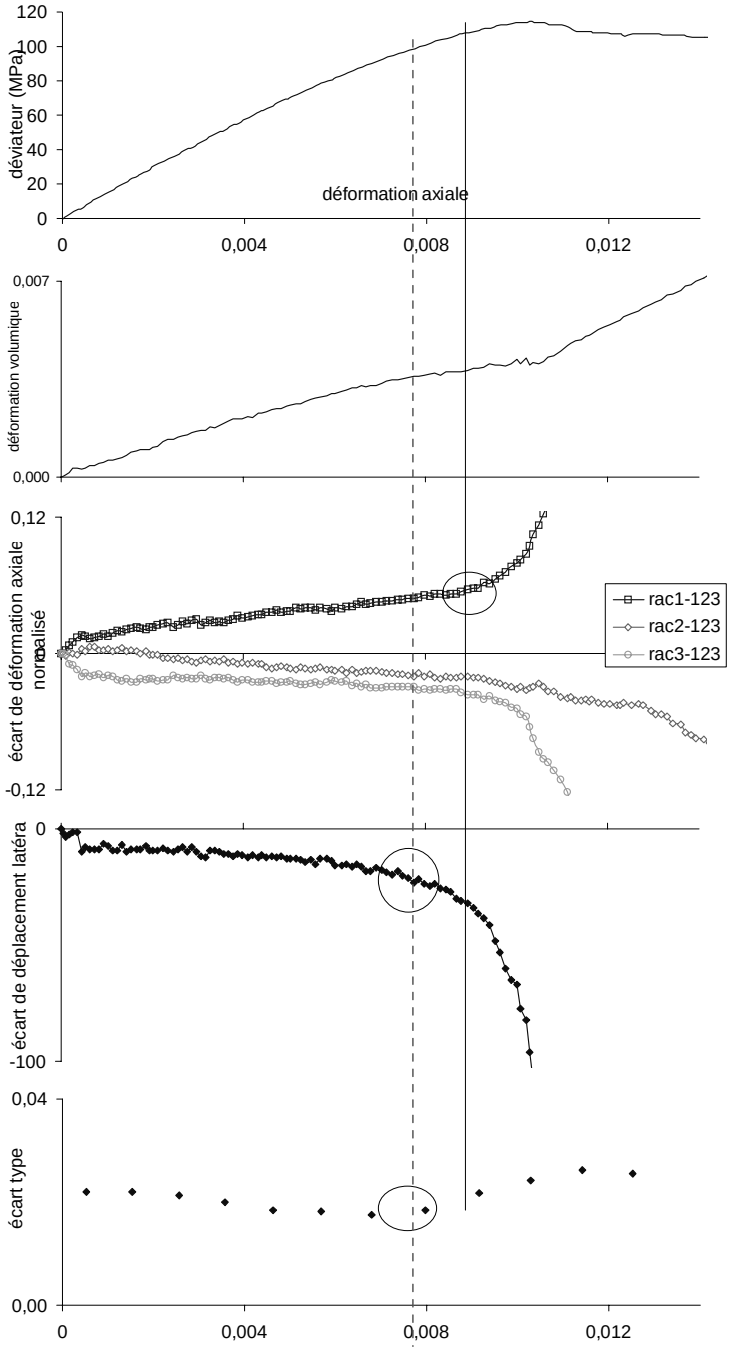


FIG. D.32 – *Essai 9716 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

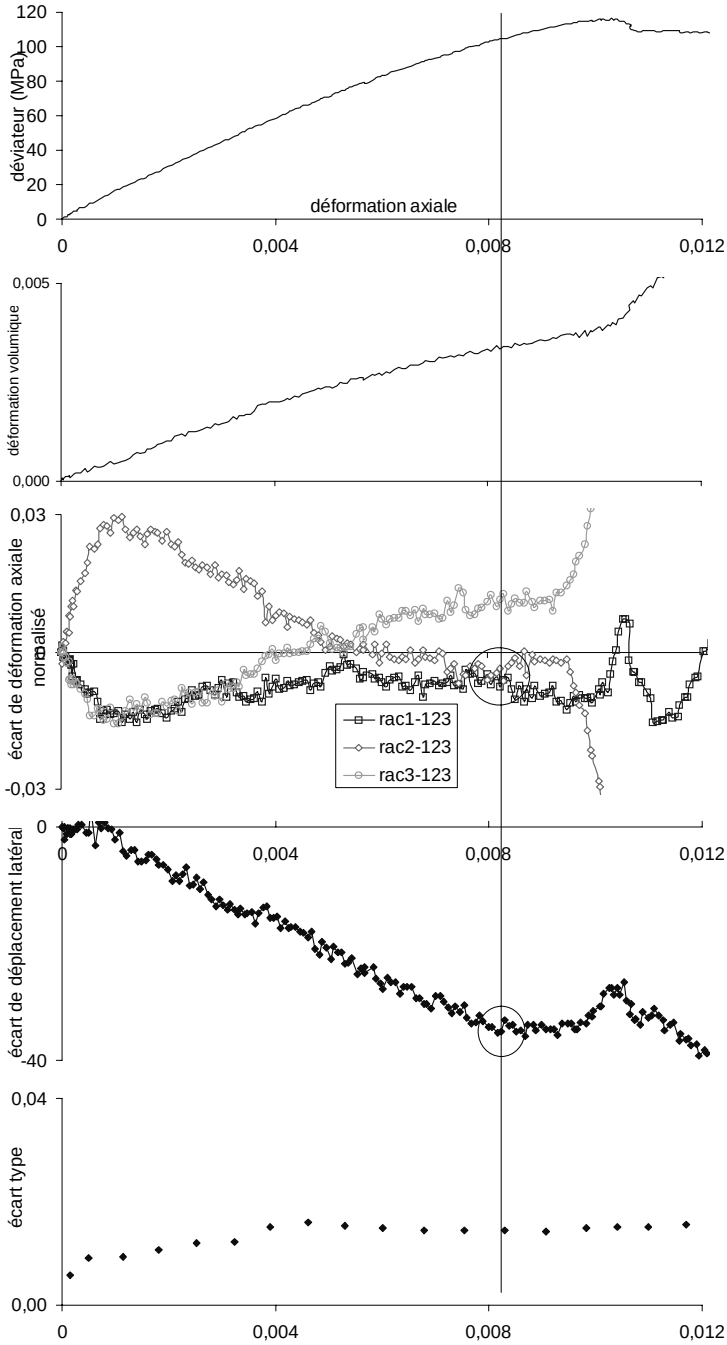


FIG. D.33 – *Essai 9721 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

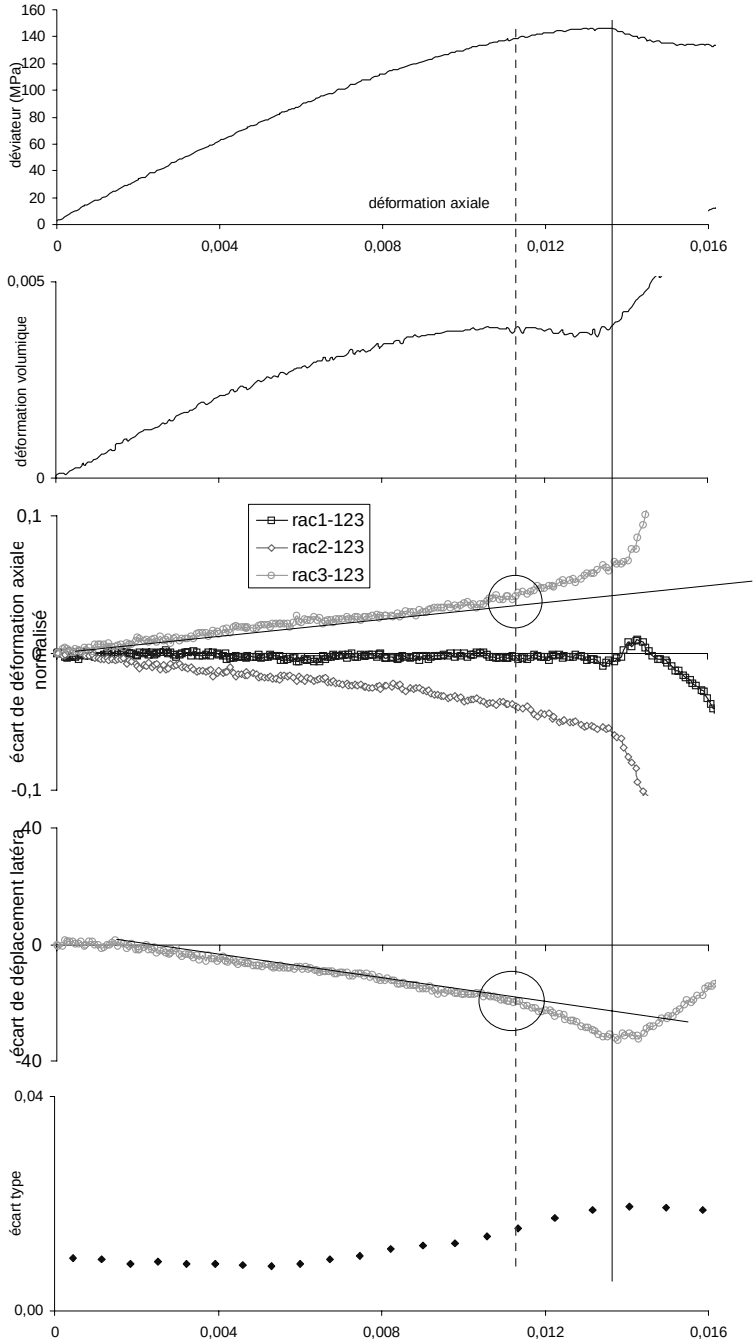


FIG. D.34 – *Essai 9728 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

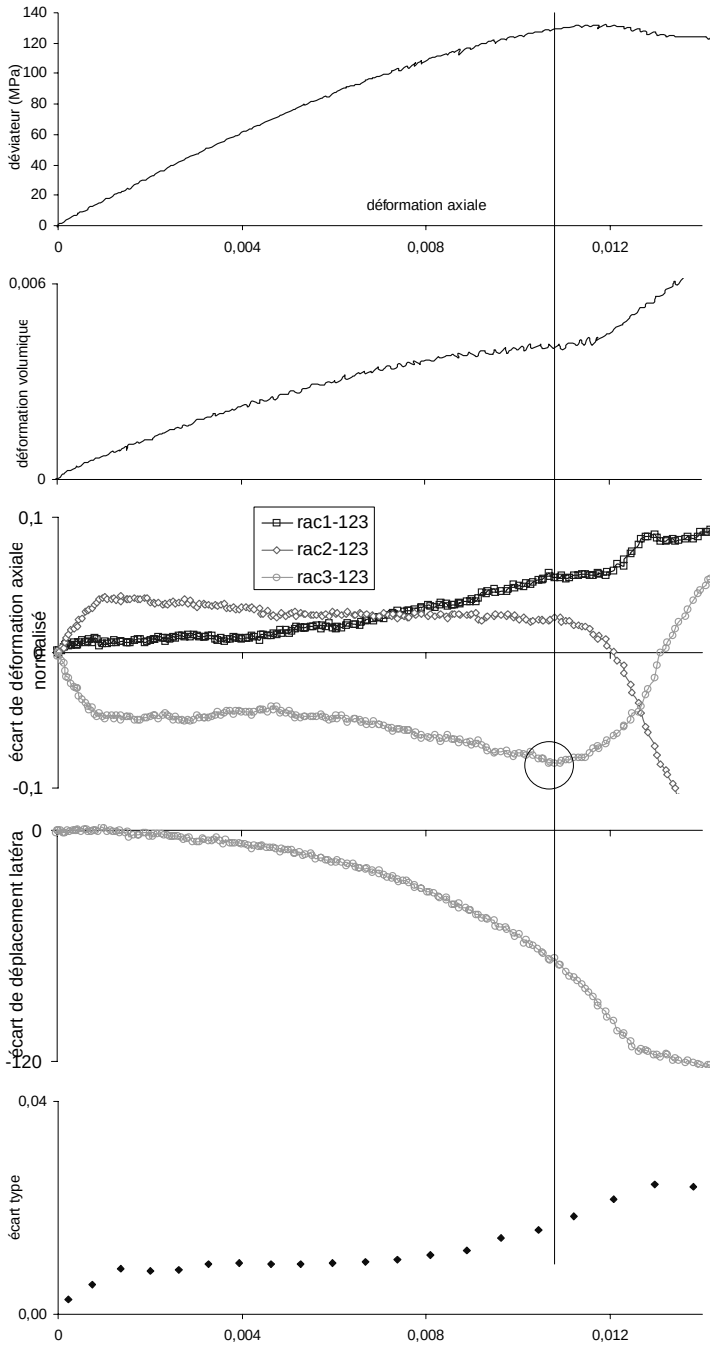


FIG. D.35 – *Essai 9730 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

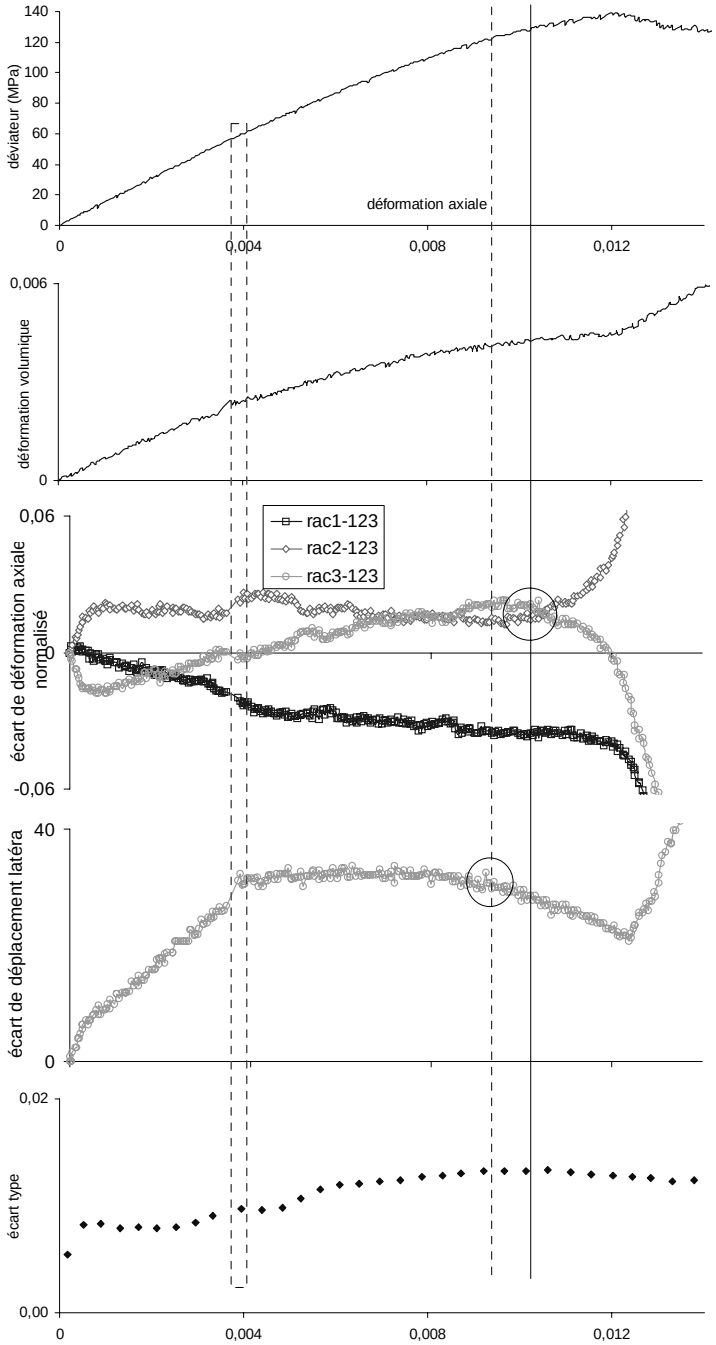


FIG. D.36 – *Essai 9732 : 60MPa, élancement 2. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine. Le rectangle indique une plage où les mesures de déformations sont incertaines.*

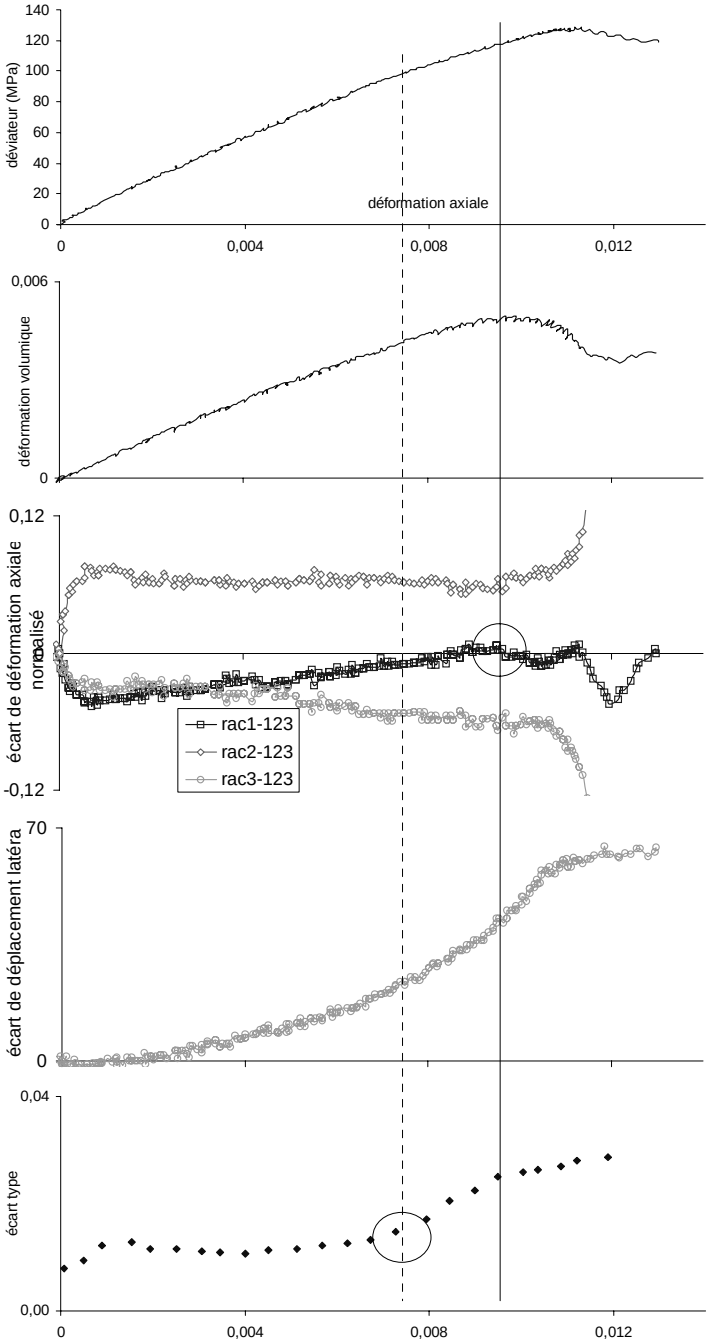


FIG. D.37 – *Essai 9743 : 60MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

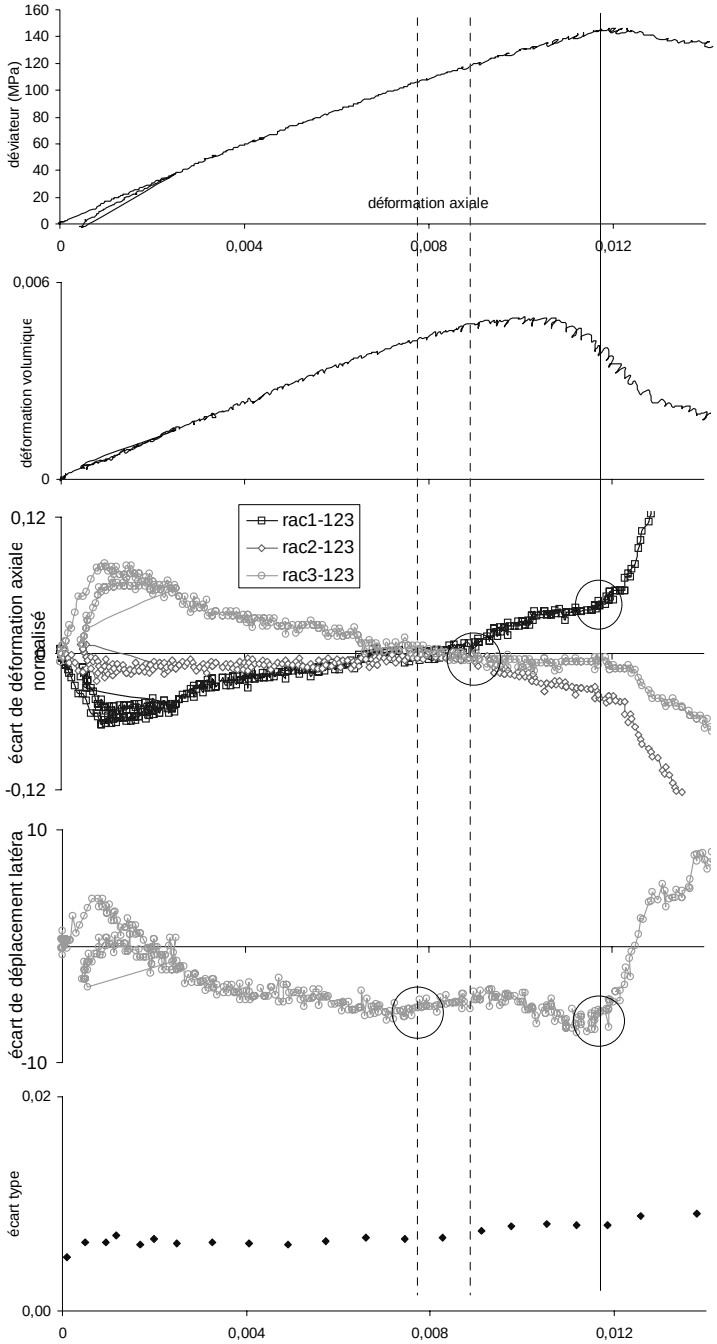


FIG. D.38 – *Essai 9738 : 60MPa, élancement 1. Courbes déviateur de contrainte - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, écarts des déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires en pourcentage de la variation de diamètre au pic, écart type de la fonction déf. radiale vis-à-vis de la déf. radiale perpendiculaire par rapport à la droite de moindre carré passant par l'origine.*

D.2 Essais triaxiaux d'extension

Les essais d'extension sont classés par ordre croissant de niveau de confinement, de 10 à 60 MPa.

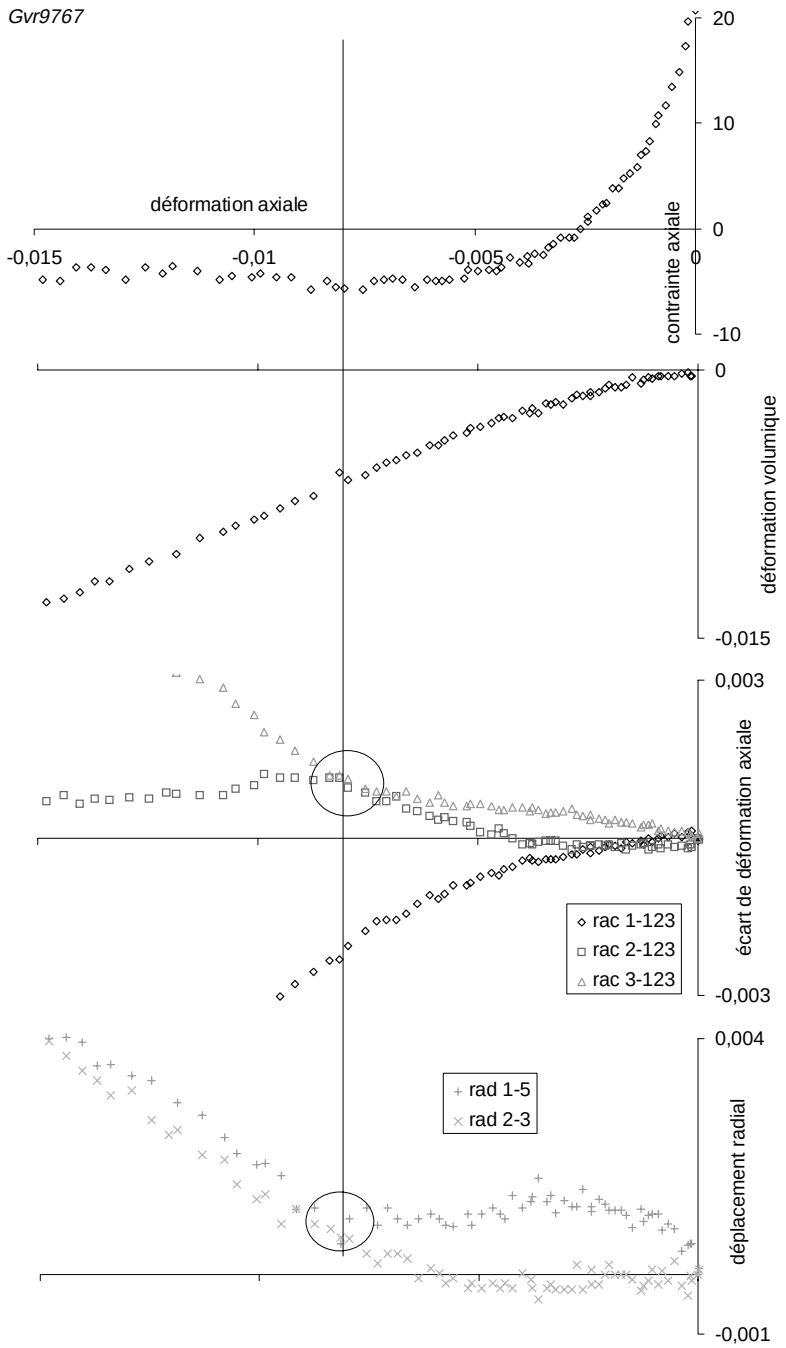


FIG. D.39 – *Essai 9767: 20MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

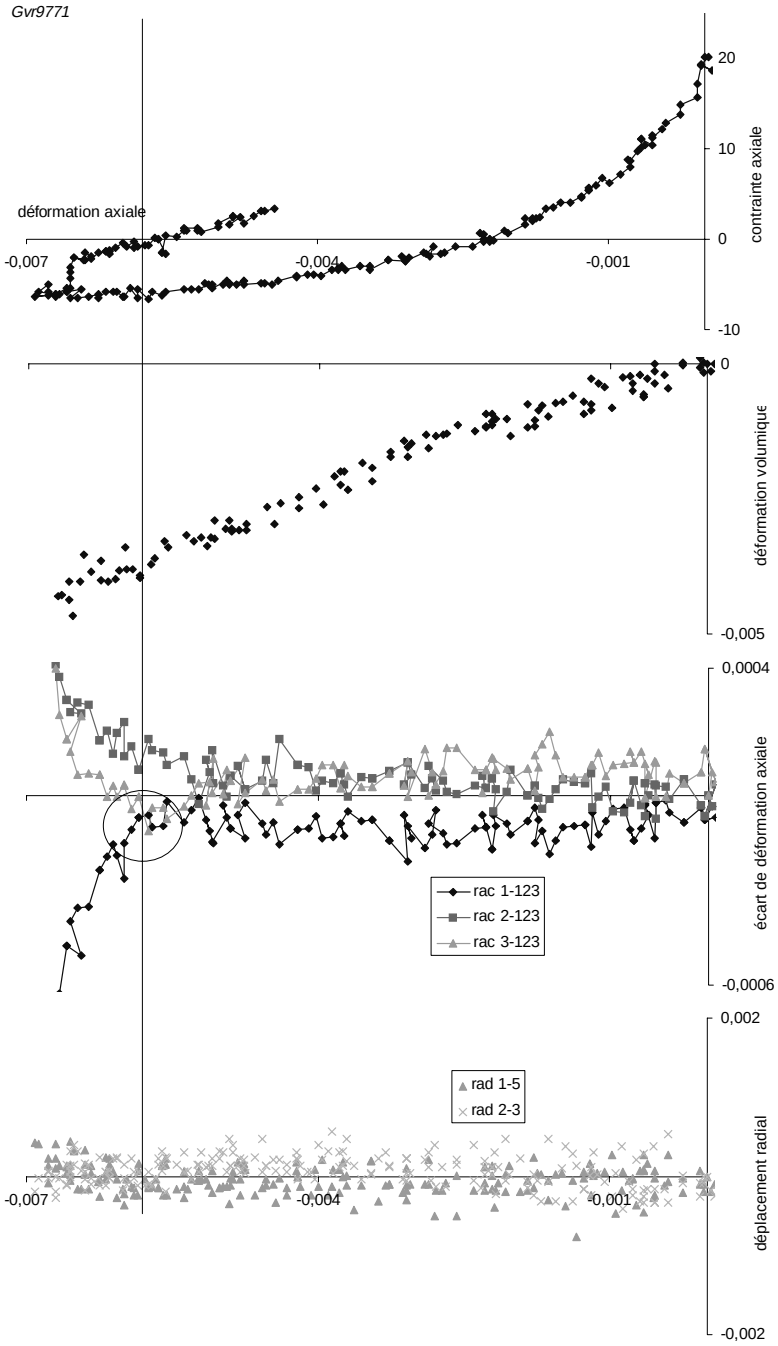


FIG. D.40 – *Essai 9771 : 20MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

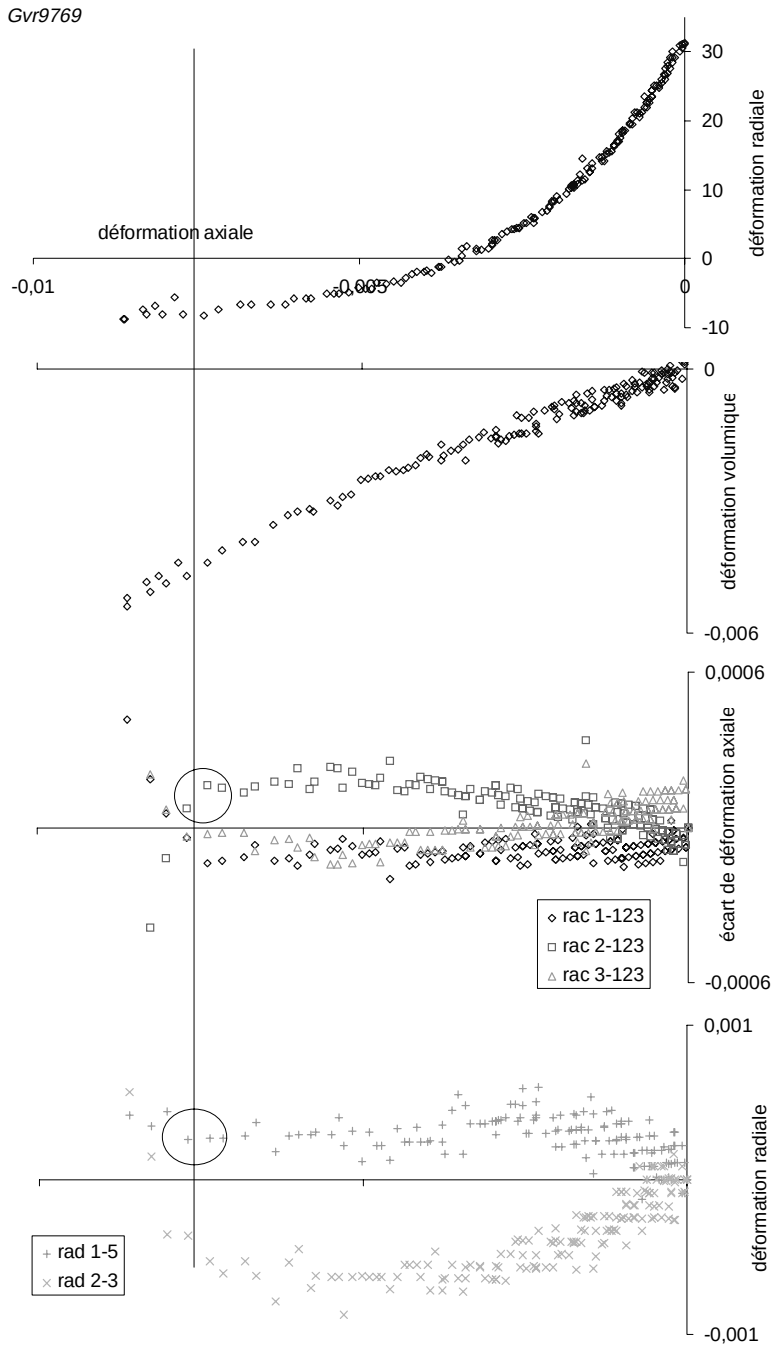


FIG. D.41 – *Essai 9769 : 30MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

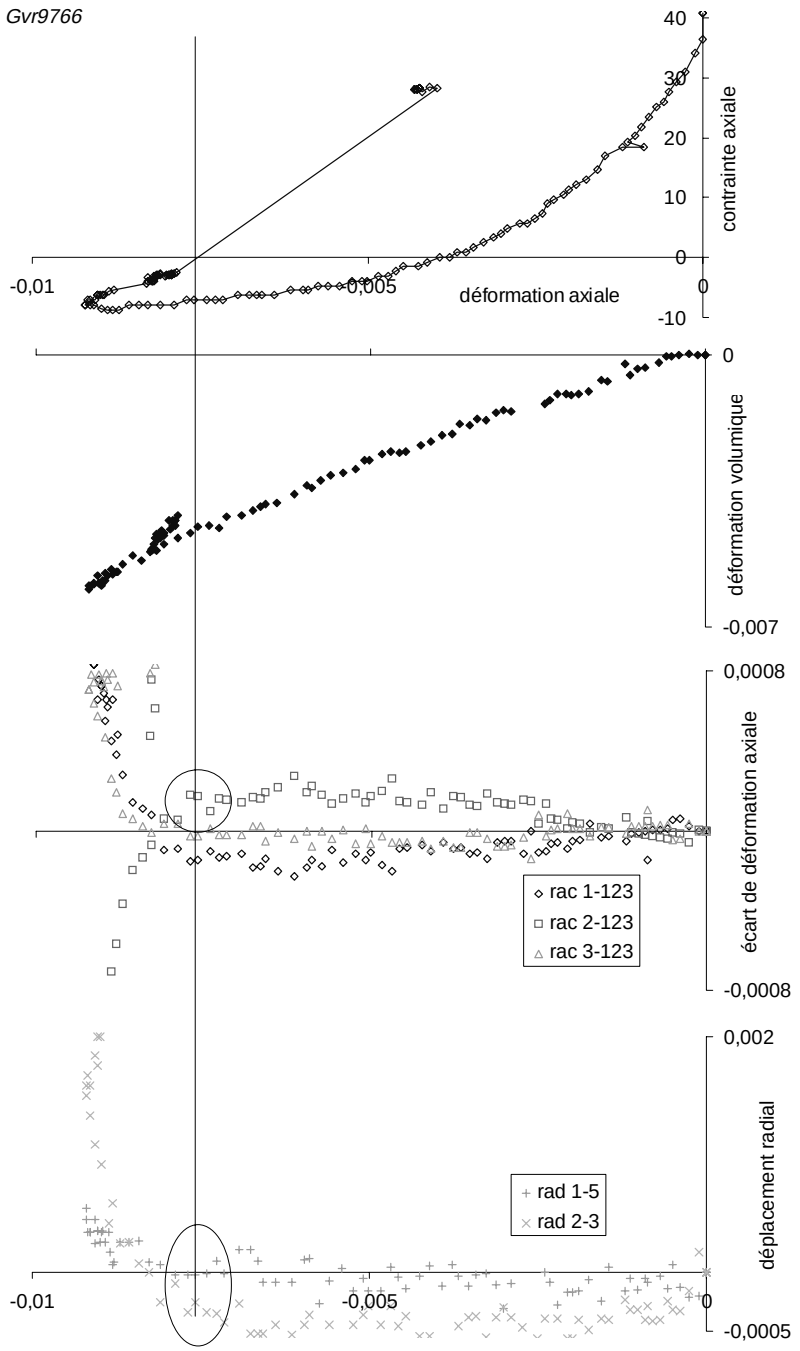


FIG. D.42 – *Essai 9766 : 40MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

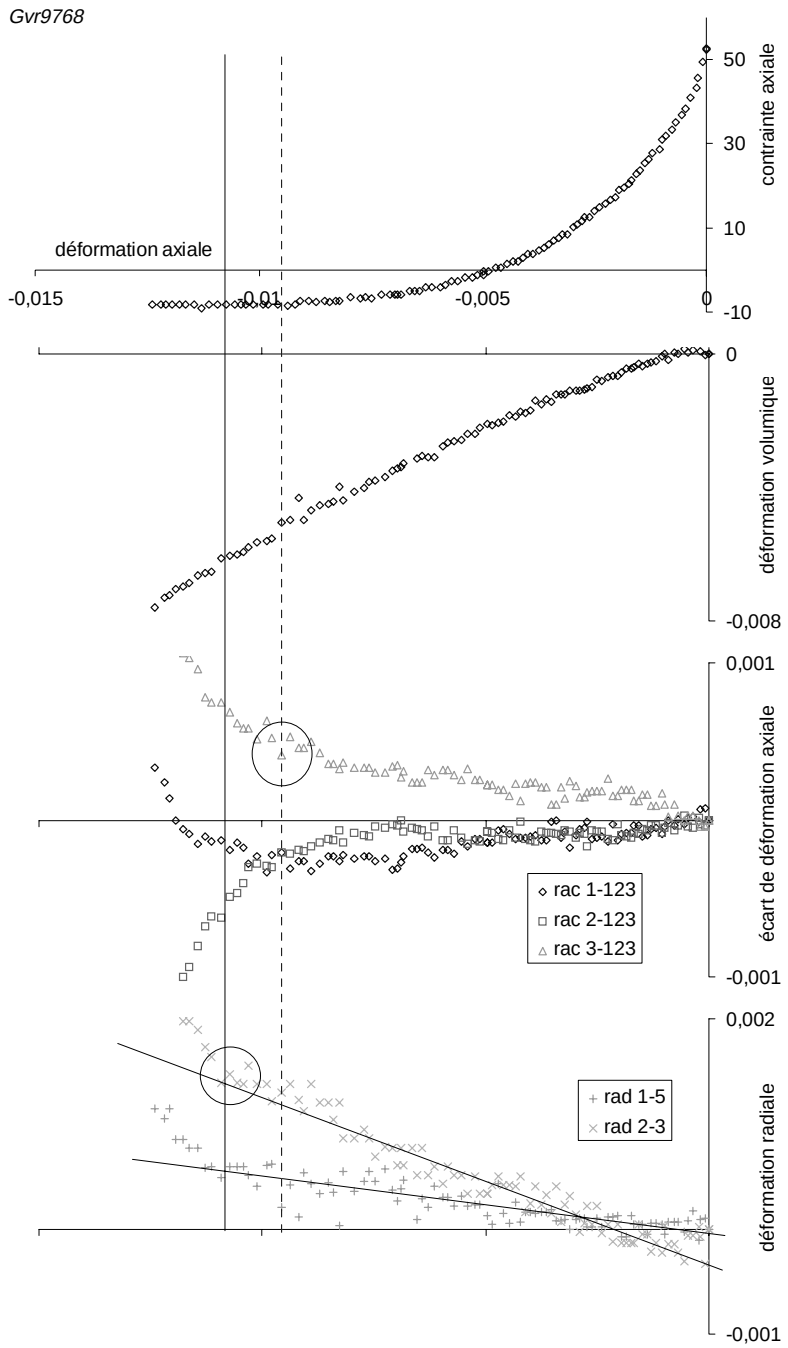


FIG. D.43 – *Essai 9768 : 50MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

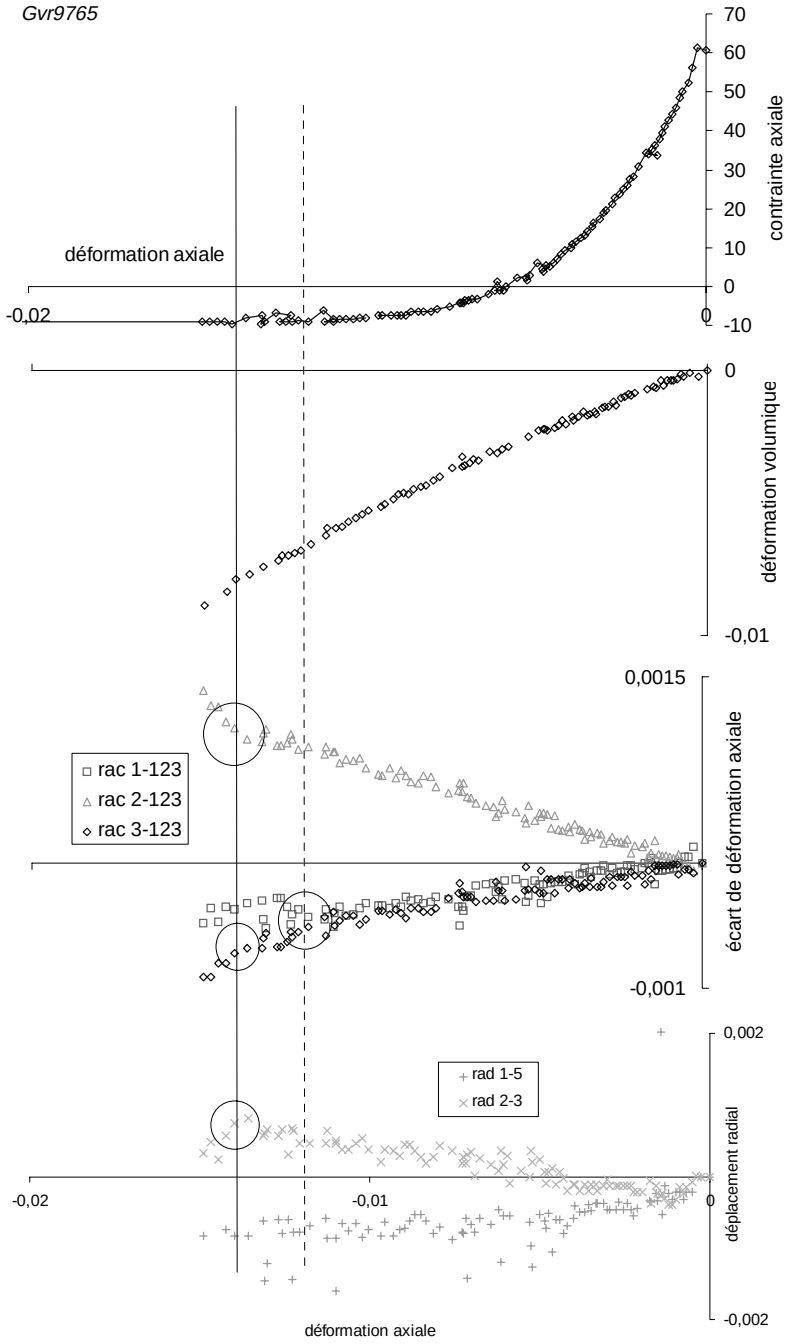


FIG. D.44 – *Essai 9765 : 60MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

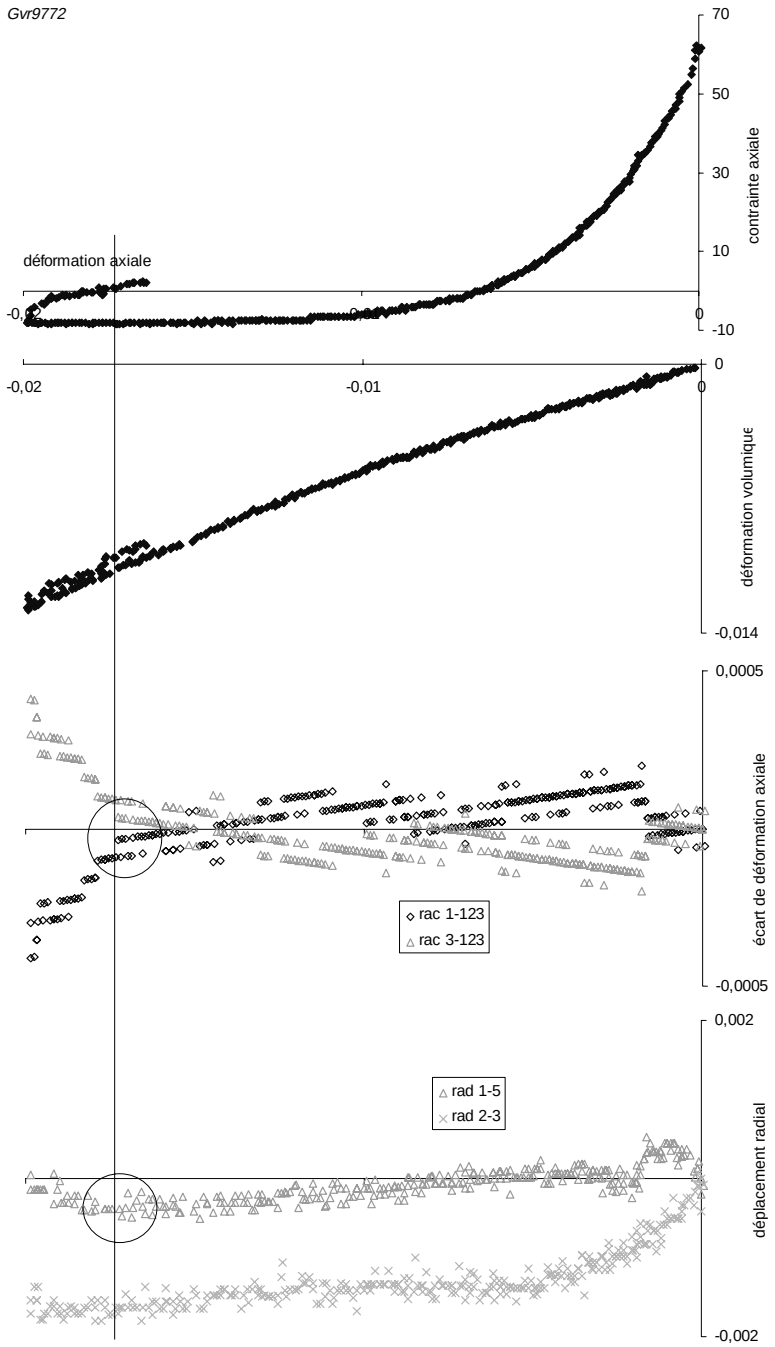


FIG. D.45 – *Essai 9772 : 60MPa. Courbes contrainte axiale - déformation axiale, déformation volumique - déf. axiale, écarts des déf. axiales par rapport à la déf. axiale moyenne, déplacements radiaux dans les 2 directions perpendiculaires.*

Annexe E

Principe des mesures de percolation

La mesure de perméabilité est mesurée à partir de deux phases de percolation. En partant d'une phase de consolidation (C) (Fig. E.1), le gradient est imposé dans un sens (P1), puis dans l'autre sens (P2).

On note V_B^C et V_H^C les volumes sortant en bas et en haut de l'échantillon, dus à la phase de consolidation. Ces volumes peuvent être différents si l'on considère une certaine dissymétrie dans le circuit hydraulique. On note également $V_B^{P_1}$ et $V_H^{P_1}$ les volumes sortants dus au gradient imposé dans la phase (P1), ces volumes sont égaux en valeur absolue et de signes opposés, et $V_B^{P_2}$ et $V_H^{P_2}$ les volumes lors de la phase (P2), également opposées. De plus, ces dernièrs sont également opposées respectivement aux volumes correspondants de la phase (P1).

Si l'on fait le bilan des volumes pour les différentes phases, on a :

Phase (C) :

$$V_B = V_B^C$$
$$V_H = V_H^C$$

Phase (P1) :

$$V_B = V_B^C + V_B^{P_1}$$
$$V_H = V_H^C + V_H^{P_1}$$

avec :

$$V_B + V_H = V_B^C + V_H^C + V_B^{P_1} + V_H^{P_1} = V^C$$
$$V_B - V_H = V_B^C - V_H^C + V_B^{P_1} - V_H^{P_1} = V_B^C - V_H^C + 2\,V^{P_1}$$

Phase (P2) :

$$V_B = V_B^C + V_B^{P_2}$$
$$V_H = V_H^C + V_H^{P_2}$$

avec :

$$V_B + V_H = V_B^C + V_H^C + V_B^{P_2} + V_H^{P_2} = V^C$$
$$V_B - V_H = V_B^C - V_H^C + V_B^{P_2} - V_H^{P_2} = V_B^C - V_H^C - 2\,V^{P_1}$$

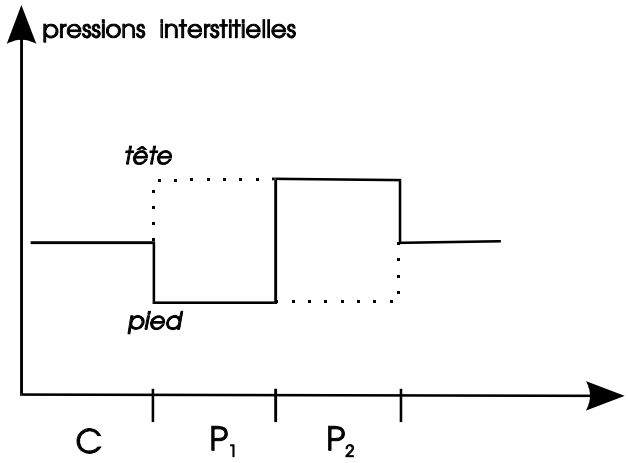


FIG. E.1 – *Principe de mesure de perméabilité. Le gradient de pression interstitielle change de sens lors des phases P1 et P2.*

On en déduit alors :

$$V^P = \frac{1}{4}\left[(V_B - V_H)^{P_1} - (V_B - V_H)^{P_2}\right]$$

$$V^C = V_B + V_H$$

Il est donc possible de connaître les composantes du volume expulsé, dues respectivement au gradient hydraulique et à la consolidation, malgré la dissymétrie supposée de cette dernière.

Bibliographie

[1] ACKERLY S.K., HELLINGS J.E. and JARDINE R.J., 1987, Discussion on : A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. *Géotechnique*, Vol. 37:3, pp. 413-417.

[2] ANDRA , 1995, *Rapport interne de l'ANDRA, CNT A SEA 95-136/A*, p. 12.

[3] ANTONELLINI M.A., AYDIN A. and POLLARD D.D., 1994, Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, Vol. 16:7, pp. 941-959.

[4] ASHBY M.F. and HALLAM S.D., 1986, The failure of brittle solids containing small cracks under compresive stress states. *Acta Metall.*, Vol. 34, pp. 497-510.

[5] ATKINSON J.H., Rate of loading in drained and undrained stress path and triaxial tests. *Research report of the geotechnical research centre, The city University*, p. 25.

[6] BALLIVY G., DAOUD M. and SALEH K., 1992, Comportement physico-mécanique des roches sous l'effet de l'humidité relative ambiante. In *Actes du colloque René Houpert : structure et comportement mécanique des géomatériaux, Nancy (France)*, 10-11 Septembre 1992, pp. 247- 256.

[7] BAZANT Z.P., 1978, Endochronic inelasticity and incremental plasticity. *Int. J. Solids Structures*, Vol. 14, pp. 691-714.

[8] BENAIJA E.H., BOULAY C., DELAHOUSE, DUBUET, TORRENTI J.M., BERTAUD Y. et FOND C., 1990, Etude de la localisation dans un grès. *Rapport scientifique, Gréco géomatériaux*, pp. 181-184.

[9] BENAIJA E.H., 1992, Application de la stéréophotogrammétrie au béton : cas de la compression simple. *Thèse de doctorat de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris.*

[10] BÉNÉFICE P. and BOEHLER J.P., 1979, The application of stereophotogrammetry to the analysis of displacement fields in solids mechanics. In *Proc. Of the IUTAM symposium on optical methods in mechanics of solids* (edited by A. Lagarde) ed. Poitiers.

[11] BESCOND B. et SERRATRICE J.F., 1986, Comportement mécanique d'une marne en compression et extension. *Rapport interne FAER 106533 du laboratoire CETE Méditerranée.*

[12] BÉSUELLE P., DESRUES J. and MAZEROLLE F., 1995, Etude tomographique de la localisation dans un sable. In *Actes du colloque GEO'95, Aussois (France)*, 11-15 Décembre 1995, ed. GEO Réseau de laboratoires, pp.264-266.

[13] BÉSUELLE P., 1995, Comportement homogène et localisé dans les géomatériaux : quelques développements expérimentaux concernant les marnes et les sables. *Mémoire de D.E.A.*, p.74.

[14] BÉSUELLE P. and DESRUES J., 1998, Internal instrumentation for strain measurements on soft rocks tested in an axisymmetric triaxial cell. In *2nd Int. Symp. Hard Soils and Soft Rocks : The geotechnique of hard soils and soft rocks, Napoli, october 1998*, ed. by Evangelista A. and Picarelli L., Balkema, Vol. 1, pp. 45-48.

[15] BÉSUELLE P. and DESRUES J., 1998, Homogeneous and localised deformation in sandstone specimens tested in a triaxial cell. In *2nd Int. Symp. Hard Soils and Soft Rocks : The geotechnique of hard soils and soft rocks, Napoli, october 1998*, ed. by Evangelista A. and Picarelli L., Balkema, Vol. 1, pp. 37-44.

[16] BEYNET J.M. et TRAMPEZYUSKI W., 1977, Application de stéréophotogrammétrie à la mesure des déplacements et à l'étude de l'écoulement des matériaux. *Matériaux et constructions*, Vol. 10:9, pp. 281-283.

[17] BIENAWSKI Z.T., DENKHAUS H.G. and VOGLER U.W., 1969, Failure of fractured rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 6, pp. 323-341.

[18] BISHOP A.W. and HENKEL D.J., 1957, The measurement of soil properties in the triaxial test. *Edward Arnold (Publishers) Ltd, London*, p. 227.

[19] BISHOP A.W., EL-RUWAYIH A. and KUMAPLEY N.K., 1975, The influence of pore-water tension on the strength of clay. *Proc. Royal Society of London*, vol. 278, A. 1286, p. 511-554.

[20] BLUMENFELD S.M. and GLOVER G., 1981, Spacial resolution in computed tomography. In *Radiology of the skull and brain-technical aspects of computed tomography* (edited by T.H. Newton and D.G. Potts) London: C.V. Mosby, Vol. 5, pp. 3918-3940.

[21] BOMBOLAKIS E.G., 1968, Photoelastic investigation of brittle crack within a field of uniaxial compression. *Tectonophysics*, Vol. 4, pp. 343-351.

[22] BOMBOLAKIS E.G., 1968, Photoelastic study of initial stages of brittle fracture in compression. *Tectonophysics*, Vol. 6, pp. 461-473.

[23] BONNEVAL H., 1972, Photogrammétrie générale. Paris : Eyrolles.

[24] BOSSI R.H., FRIDELL K.D. and LOWREY A.R., 1990, Computed tomography. In *Non-destructive testing of fibre-reiforced plastic composites* (edited by J. Summerscales) London: Elsevier, Vol. 2, pp. 201-252.

[25] BRACE W.F. and MARTIN R.J., 1968, A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 5, pp. 415-426.

[26] BRACE W.F., 1978, Volume changes during fracture and frictionnal sliding: a review. *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 116, pp. 603-614.

[27] BRADY B.T., DUVALL W.I. and HORINO F.G., 1971, A study of post-failure characteristics of brittle rock. In *Rock fracture proc. Int symposium rock mechanic, Nancy*, II-21.

[28] BRADY B.T., DUVALL W.I. and HORINO F.G., 1973, An experimental determination of the true uniaxial stress-strain behavior of brittle rock. *Rock mechanics*, Vol. 5, pp. 107-120.

[29] BURLAND J.B. and SYMES M., 1982, A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus. Technical note. *Géotechnique*, Vol. 32:1, pp. 62-65.

[30] BUTTERFIELD R., HARKNESS R. and ANDRAWES K.Z., 1970, A stereophotogrammetric method for measuring displacement fields. *Géotechnique*, Vol. 20:3, pp. 308-314.

[31] CAILLERIE D., BÉSUELLE P., DESRUES J. et LEFIK M., 1998, Equations incrémentales de la consolidation d'un milieu poreux saturé. *Rapport scientifique GdR Géomécanique des roches profondes.*

[32] CAQUOT A. Et KERISEL J., 1966, Traité de Mécanique des Sols. Paris : Gauthier-Villars.

[33] CASAGRANDE, 1936, The determination of the preconsolidation load of its practical significance. In *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Cambridge Masson, p. 60.

[34] CHAMBON R., 1989, Bases théoriques d'une loi de comportement incrémentale consistante pour les sols. *Rapport de recherche du groupe COSM.*

[35] CHAMBON R., 1989, Une classe de lois incrémentalement non linéaires pour les sols non visqueux, résolution de quelques problèmes de cohérence. *C.R.A.S. Paris*, Vol. 308, pp. 1571-1576.

[36] CHAMBON R., DESRUES J., CHARLIER R. and HAMMAD W., 1994, CLoE, a new rate type constitutive model for geomaterials: theoretical basis and implementation. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geom.*, Vol. 18:4, pp. 253-278.

[37] CHAMBON R., DESRUES J. and TILLARD D., 1994, Shear modulus identification versus experimental localisation data. In *Localisation and bifurcation theory for soils and rocks* (ed. by Chambon R., Desrues J. and Vardoulakis I.), Balkema, Rotterdam, pp. 101- 111.

[38] CHAMBON R., DESRUES J., HAMMAD W. et CHARLIER R., 1995, CLoE, Consistance et Localisation Explicite : une loi incrémentale non linéaire. *Rapport interne du groupe géomécanique du Laboratoire Sols,Solides,Structures (IMG), version v1.02*, p. 185.

[39] CHAMBON R. and CAILLERIE D., 1998, Existence and uniqueness theorems for boundary value problems involving incrementally non linear models. *International Journal of Solids and Structure (accepté).*

[40] CLAYTON C.R.I., KHATRUSH S.A., BICA A.V.D. and SIDDIQUE A., 1989, The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical testing journal*, Vol. 12:1, pp. 69-76.

[41] COLLIAT J.L., DESRUES J. and FORAY P., 1989, Triaxial testing of granular soil under elevated cell pressure. In *Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP977* (edited by Donaghe R.T., Chaney R.C. and Silver M.L.), Philadelphia : American Society for testing and material, pp. 290-310.

[42] CONCIANI W., SOARES M.M. and CRESTANA S., 1995, Geotechnical use of a mini tomography. In *Proceedings of the first int. conf. on Unsatured Soils, UNSAT'95, Paris* (ed. By Alonso E.E. and Delage P.), Rotterdam: Balkema, Vol. 2, pp. 447-452.

[43] COQUARD P. and BOISTELLE R., 1994, Water and solvent effects on the strength of set plaster. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31:5, pp. 517- 517.

[44] COUSIN I., LEVITZ P. and BRUAND A., 1996, Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distributions. *European Journal of Soil Science*, Vol. 47, pp. 439-452.

[45] CROCHEPEYRE S., 1998, Contribution à la modélisation numérique et théorique de la localisation et de la post-localisation dans les géomatériaux. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[46] CUCCOVILLO T. and COOP M.R., 1997, The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs. Technical note. *Géotechnique*, Vol. 47:1, pp. 167-171.

[47] DARVE F. and LABANIEH S., 1982, Incremental constitutive law for sand and clays: simulation of monotonic and cyclic tests. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geom.*, Vol. 6, pp. 243-275.

[48] DARVE F. , 1987, Les lois incrémentales non linéaires. In *Manuel de rhéologie des géomatériaux* (ed. par Darve F.), Presses ENPC, Paris, pp. 215-234.

[49] DARVE F. , 1987, An incrementally non-linear constitutive law of the second order and its application to localisation. In *Int. Conf. Laws Eng. Mat., Tuscon.*

[50] DAVID C., WONG T.-F., ZHU W. and ZHANG J., 1994, Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust. *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 143, pp. 425-456.

[51] DELAGE P. and GRAHAM J., 1996, Mechanical behaviour of unsatured soils: understanding the behaviour soils requires reliable conceptual models. In *Proceedings of the first int. conf. on Unsatured Soils, UNSAT'95, Paris* (ed. by Alonso E.E. and Delage P.), Rotterdam: Balkema, Vol. 3, pp. 1223-1256.

[52] DESRUES J., 1984, La localisation de la déformation dans les matériaux granulaires. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[53] DESRUES J. et DUTHILLEUL B., 1984, Mesure du champ de déformation d'un objet plan par la méthode de stéréophotogrammétrie de faux relief. *Journal de mécanique théorique et appliquée*, Vol. 3:1, pp. 79-103.

[54] DESRUES J. and CHAMBON R., 1989, Shear band analysis for granular materials: the question of incremental non-linearity. *Ingenieur-Archiv*, Vol. 59, pp. 187-196.

[55] DESRUES J., 1995, Analyse stéréophogrammétrique de la fissuration progressive. In *Photomécanique 95. Etude du comportement des matériaux et des structures* (ed. par Berthaud Y., Paraskevas D. et Taroni M.), Eyrolles, pp. 149-162.

[56] DESRUES J., CHAMBON R., MOKNI M. and MAZEROLLE F., 1996, Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, Vol. 46:3, pp. 529-546.

[57] DESRUES J. , 1998, Localisation patterns in ductile and brittle geomaterials. In *Material Instabilities en Solids* (ed. par de Borst R and van der Giessen E.), John Wiley & Sons Ldt., ch. 10, pp. 137-158.

[58] DUNN D.E., LAFOUNTAIN L.J. and JACKSON R.E. , 1973, Porosity dependence and mechanism of brittle fracture in sandstones. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 78:14, pp. 2403-2417.

[59] EL HASSAN ASSOUM N., 1997, Modélisation théorique et numérique de la localisation dans les géomatériaux. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[60] FAIRHURST C. and COOK N.G.W., 1967, Rock splitting parallel to the direction of maximum compression with some pratical implications. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, Springer: Vienna, 1967.

[61] GENS A., 1982, Stress-strain and strength charactristics of a low placticity clay. *PhD thesis, University of London.*

[62] GOTO E.C., TATSUOKA F., SHIBUYA S., KIM Y.-S. and SATO T., 1991, A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory. *Soils and Foundations*, Vol. 31:1, pp. 169-180.

[63] GRIFFITH A.A., 1924, Theory of rupture. In *Proc. First Int. Congr. Applied Mech.*, Vol. 1, p. 55.

[64] HADAMARD J., 1903, Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l'hydrodynamique. Hermann, Paris.

[65] HADLEY K. , 1975, Azimuthal variation of dilatancy. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80:35, pp. 4845-4850.

[66] HAIED A., 1995, Etude expérimentale de la rupture en mode localisé dans un grès. *Thèse de doctorat de l'Université de Lille, France.*

[67] HAIED A, KONDO D. and HENRY J.P., 1997, Caractérisation expérimentale de la rupture en mode localisé d'un grès. *Revue française de géotechnique*, N. 78, pp. 21-29.

[68] HALLAM S.D. and ASHBY M.F., 1990, Compressive brittle fracture and construction of multi-axial failure maps. In *Deformation processes in minerals, ceramics and rocks* (edited by Barber D.J. and Meredith P.G.), Unwin Hyman, pp. 84-108.

[69] HAMMAD W., 1991, Modélisation non linéaire et étude expérimentale des bandes de cisaillement dans les sables. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[70] HENRY J.P., 1980, Plaque percée d'un trou et soumise en compression. Etude des conditions de propagation de la fissure en traction. *Thèse de doctorat de l'Université de Lille, France.*

[71] HICHER P.Y., WAHYUDI H. and TESSIER D., 1994, Microstructural analysis of strain localisation in clay. *Computers and Geotechnics*, Vol. 16, pp. 205-222.

[72] HILL R., 1962, Acceleration waves in solids. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 10, pp. 1-16.

[73] HILL R. and HUTCHINSON J.W., 1975, Bifurcation phenomena in the plane tension test. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 23, pp. 239-264.

[74] HORII H. and NEMAT-NASSER S., 1985, Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure. *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 3105-3125.

[75] HOUPERT R., 1974, Comportement fragile en compression simple et structure des roches. In *Proceedings of the 2nd int. congr. of the int. assoc. eng. geol.*, Sao Paolo, Aug. 78, Vol. 1, pp. IV:25.1-25.10.

[76] HUDSON J.A., CROUCH S.L. and FAIRHURST C., 1972, Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure. *Engineering geology*, Vol. 6, pp. 155-189.

[77] ISRM, 1979, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, pp. 137- 140.

[78] ISRM, 1983, Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression : revised version. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20:6, pp. 283- 290.

[79] JARDINE R.J., SYMES M.J. and BURLAND J.B., 1984, The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. *Géotechnique*, Vol. 34:3, pp. 323-340.

[80] JARDINE R.J. and BROOKS N.J., 1984, The use of a new axial displacement gauge for the determination of rock stiffness. *?*, Vol. ?, pp. 323-340.

[81] JOHNS R.A., STEUDE J.S., CASTANIER L.M., and ROBERTS P.V., 1993, Non-destructive measurements of fracture aperture in cristalline rock cores using X ray computed tomography. *Journal of geophysical research*, Vol. 98:B2, pp. 1889-1900.

[82] JOUNIAUX L. and POZZI J.-P. , 1995, Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress: consequences for electrotelluric anomalies prior to earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100:B6, pp. 10197-10209.

[83] KEANEY G.M.J., MEREDITH P.G. and MURRELL S.A.F., 1998, Laboratory study of permeability evolution in a "tight" sandstone under non-hydrostatic stress conditions. In *Eurock'98, Trondheim (Norway), 1998*, p. 7.

[84] KIRKPATRICK W.M. and KHAN A.J., 1986, The effects of stress relief on some overconsolidated clays. *Géotechnique*, Vol. 36:4, pp. 511-525.

[85] KOLYMBAS D., 1981, Bifurcation analysis for sand sample with non-linear constitutive equation. *Ingenieur-Archiv*, Vol. 50, pp. 131-140.

[86] KOLYMBAS D., 1987, A novel constitutive law for soils. In *Constitutive laws for engineering materials* (ed. by Desay C.S.), Elsevier, New-York, pp. 319-326.

[87] KOLYMBAS D. and WU W., 1989, A device for lateral strain measurement in triaxial tests with unsatured specimens. Technical note. *Geotechnical testing journal*, Vol. 12:3, pp. 227-229.

[88] KONDO D. and HENRY J.P., 1990, Etude expérimentale de la localisation des déformations. *Rapport scientifique GRECO Géomatériaux*, pp. 201-204.

[89] KONDO D., HAIED A., HENRY J.P., JOUNIAUX L. and POZZI J.P., 1991, Détection expérimentale de l'apparition de bandes de cisaillement dans les roches : mesures extensométriques et mesures électriques. *Rapport scientifique GRECO Géomatériaux*, pp. 219-227.

[90] KRANZ R.L., 1983, Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, Vol. 100, pp. 449-480.

[91] KÜNTZ M., BÉSUELLE P., VIGGIANI G. et DESRUES J., 1996, Observation de la rupture des siltites du Gard en compression biaxiale. *Rapport Andra, (rapport interne BRP 0.IMG 96.001).*

[92] LABUZ J.F. and BRIDELL J.M., 1993, Reducing frictionnal constraint in compression testing through lubrification. Technical note. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30:4, pp. 451- 455.

[93] LABUZ J.F., DAI S.-T. and PAPAMICHOS E., 1996, Plane-strain compression of rock-like materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 33:6, pp. 573- 584.

[94] LAJTAI EZ. and LAJTAI V.N., 1975, The collapse of cavities. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 12, pp. 81-86.

[95] LAJTAI E.Z. and BIELUS L.P., 1986, Stress corrosion cracking of lac du Bonnet granite in tension and compression. *Rock mechanics and rock engineering*, Vol. 19, pp. 71-87.

[96] LATIÈRE H.J. and MAZEROLLE F., 1987, The X-ray scanner. A tool for the examination of the intravoluminal crystalline state of aluminium. *Engng Fract. Mech.*, Vol. 27:4, pp. 413-463.

[97] LEROUEIL S. and VAUGHAN P.R., 1990, The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, Vol. 40:3, pp. 467-488.

[98] LOCKNER D.A., WALSH J.B. and BYERLEE J.D., 1977, Changes in seismic velocity and attenuation during deformaton of granite. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82:33, pp. 5374-5378.

[99] LOCKNER D.A., BYERLEE J.D., KUKSENKO V., PONOMAREV A. and SIDORIN A., 1992, Observation of Quasistatic fault growth from acoustic emission. In *Fault mechanics and transport properties of rock* (ed. by Evans B. and Wong T.-f.), Academic Press - London and New-York, pp. 3-31.

[100] LOCKNER D., 1993, The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30:7, pp. 883- 899.

[101] MANDEL J., 1966, Cours de mécanique des milieux continus. Gauthiers-Villard : Paris.

[102] MARTIN B.R., 1971, Statistics for Physicists. Academic Press - London and New-York, p. 209.

[103] MEYER M.D. and SPETZER H.A., 1976, Materials properties using holographic interferometry. *Exp. Mech.*, Vol. 16, pp. 434-438.

[104] MENÉNDEZ B., ZHU W. and WONG T.-f., 1996, Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Berea sandstone. *Journal of Structural Geology*, Vol. 18-1, pp. 1-16.

[105] MILLAR P.J. and MURRAY D.R., 1988, Triaxial testing of weak rocks including use of triaxial extension test. In *Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP977* (ed. by Donaghe R.T., Chaney R.C. and Silver M.L.), Philadelphia : American Society for testing and material, pp. 376-386.

[106] MILLIEN A., 1993, Comportement anisotropique du grès des Vosges : élasto-plasticité, localisation, rupture. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[107] MOKNI M., 1992, Relations entre déformations en masse et déformations localisées dans les géomatériaux granulaires. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[108] MOLENKAMP F., 1985, Comparison of frictionnal material models with respect to shear band formation. *Géotechnique*, Vol. 35:2, pp. 127-143.

[109] MORLIER P., 1970, Rôle des fluides en mécanique des roches. In *Proceedings of the 2nd congress of the int. society for rock mechanics*, Vol. 2, pp. 57-65.

[110] NADAÏ A., 1950, Theory of flow and fracture of solids. Mc Graw-Hill.

[111] NEMAT-NASSER S. and HORII H., 1982, Compressive-induced nonplanar crack extension wih application to splitting, exfoliation and rock-burst. *J. Geoph. Res.*, Vol. 87:B8, pp. 6805-6821.

[112] OHNAKA M. And MOGI K. , 1982, Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87:B5, pp. 3873-3884.

[113] OKA F. and MAEKAWA H., 1993, Triaxial compression test. In *Testing methods of indurated soils and soft rocks, suggestions and recommendations* (ed. by Koichi Akai), Technical committe on indurated and soft rocks, Internationnal society for soil mechanics and foundation engineering, pp. 17-36.

[114] OLSSON W.A., 1999, Theoretical and experimental investigation of compaction bands in porous rock. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104:B4, pp. 7219-7228.

[115] ORD A., VARDOULAKIS I. and KAJEWSKI R., 1991, Shear band formation in Gosford sandstone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 28:5, pp. 397- 409.

[116] ORTEGA-BUCIO DE GARNICA L.G., 1994, Développement d'une cellule triaxiale haute pression pour essais sur roches poreuses saturées. Application aux grès. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[117] PAPAMICHOS E. and VARDOULAKIS I., 1995, Shear band formation according to non-coaxial plasticity model. *Géotechnique*, Vol. 45:4, pp. 649-661.

[118] PATERSON M.S., 1978, Experimental rock deformation - the brittle field. Berlin Heidelberg New-York: Springer-Verlag, p. 254.

[119] PELLEGRINO A., 1970, Mechanical behaviour of soft rocks under high stresses. In *Proceedings of the second int. cong. of ISRM, Belgrad*, Vol. 1, pp. 173-180.

[120] RAYNAUD S., FABRE D., MAZEROLLE F.,GÉRAUD Y. and LATIÈRE H., 1989, Analysis of the internal structure of rocks and characterisation of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics*, Vol. 159, pp. 149-159.

[121] RAYNAUD S., 1995, Fracturation et dissolution sous contrainte des roches. *Thèse de doctorat de l'Université de provence (Aix-Marseille I), France.*

[122] RICE J.R., 1973, The initiation and growth of shear bands. *Symp. On the Role of Plasticity in Soil Mechanics*, ed. by Palmer A.C., Cambridge, pp. 263-274.

[123] RICE J.R., 1976, The localisation of plastic deformation. *Int. cong. of Theoretical and Applied Mechanics*, ed. by Koiter W.T., North-Holland publishing compagny, pp. 207-220.

[124] RUDNICKI J.W. and RICE J.R., 1975, Conditions for the localisation of deformation in pressure sentsitive dilatant materials. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 23, pp. 371-394.

[125] SAMMIS C.G. and ASHBY M.F., 1986, The failure of brittle porous solids under compressive stress states. *Acta. Met.*, Vol. 34, pp. 511-526.

[126] SANTARELLI F.J. and BROWN E.T., 1989, Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 26:5, pp. 401- 413.

[127] SANTARELLI F.J., 1990, Etude expérimentale de la bifurcation dans les roches. *Rev. Franç. Géotech.*, Vol. 50, pp. 61-70.

[128] SATOH T.S., SHIVAKUMAR K., NISHIZAWA O. and KUSUNOSE O., 1996, Precursory localisation and development of microfractures along the ultimate fracture plane in amphibolite under triaxial creep. *Gephysical research letters*, Vol. 23:8, pp. 865-868.

[129] SCAVIA C., 1995, A method foor the study of crack propagation in rock structures. *Géotechnique*, Vol. 45:3, pp. 447-463.

[130] SCHOLEY G.K., FROST J.D., LO PRESTI D.C.F. and JAMIOLKOWSKI M., 1995, A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18:2, pp. 137-156.

[131] SCHOLZ C.H., 1968, Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 73:4, pp. 1447-1454.

[132] SCHOLZ C.H., 1968, Microfracturing and inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 73:4, pp. 1417-1431.

[133] SERRATRICE J.F. and FLAVIGNY E., 1993, Mesure en laboratoire du coeficient Ko sur une marne. In *Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks* (ed. by Anagnostopoulos *et al.*), Balkema, Rotterdam, pp. 787-793.

[134] SHIMADA M., 1991, Comment on "The effect of pressure and porosity on the micromechanics of the brittle-ductile transition in quartzite" by Hirth G. and Tullis J., *J. Geoph. Res.*, Vol. 96:B7, pp. 11877-11879.

[135] SKEMPTON A.W. , 1960, Effective stress in soils, concrete and rocks. In *Conf. on pore pressure and suction in soils proceedings, London*, pp. (*4-16*).

[136] SOBOLEV G., SPETZER H.A. and SALOV B., 1978, Precursors to failure in rocks while undergoing anelastic deformations. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83-B4, pp. 1775-1784.

[137] SPETZER H.A., SCHOLZ C.H. and LU CHI- PING T., 1974, Strain and creep measurements on rocks by holographic interferometry. *Pure Appl. Geophy.*, Vol. 112-3, pp. 571-581.

[138] SPETZER H.A., SOBOLEV G.A., SONDERGELD C.H., SALOV B.G., GETTING I.C. and KOLTSOV A., 1981, Surface deformation, crack formation, and acoustic velocity changes in pyrophyllite under polyaxial loading. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86-B2, pp. 1070-1080.

[139] SULEM J., VARDOULAKIS I., PAPAMICHOS E., OULAHNA A. and TRONVOLL J., 1999, Elasto-plastic modelling of red Wildmoor sandstone. *Mechanics of cohesive-frictionnal materials*, Vol. 4:3, pp. 215-245.

[140] TAPPONNIER P. and BRACE W.F., 1976, Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, pp. 103- 112.

[141] TATSUOKA F. and KIM Y.-S., 1994, Deformation of shear zone in sedimentary soft rock observed in triaxial compression. In *Localisation and bifurcation theory for soils and rocks* (ed. by Chambon R., Desrues J. and Vardoulakis I.), Balkema, Rotterdam, pp. 181- 187.

[142] TATSUOKA F. and KOHAT Y., 1995, Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications. In *Report of the institute of industrial science, The university of Tokyo*, Vol. 38:5.

[143] THOMAS T.Y., 1961, Plastic flows and fracture of solids. Academic Press.

[144] TILLARD D., 1992, Etude de la rupture dans les géomatériaux cohésifs. Application à la marne de Beaucaire. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[145] TORRENTI J.M., DESRUES J., ACKER P. and BOULAY C., 1988, Application of stereophotogrammatry to the strain localisation in concrete in compression. In *France-US workshop on strain localisation and size effect dus ti cracking and damage* (ed. by Mazard J. and Bazant Z.P.), pp. 30-41.

[146] TORRENTI J.M., DESRUES J., PUCH et MALIER Y., 1989, Application de la stéréophotogrammétrie à l'étude de la localisation des déformations dans le béton. *Bull. Liaison labo. P. Et Ch.*, Jan-Fev 1989.

[147] TORRENTI J.M., DESRUES J., BENAIJA E.H. and BOULAY C., 1991, Stereophotogrammatry and localisation in concrete under compression. *J. Eng. Mech.*, Vol. 117, pp. 1455-1465.

[148] UNDERWOOD E.E., 1970, Quantitative stereology. Reading Massachussetts: Addison-wesley Publishing Compagny, p. 274.

[149] VAN EEKELEN H.A.M., 1980, Isotropic yield surfaces in three dimensions for use in soil mechanics. *Int. J. for Num. Anal. Meth. Geomechanics*, Vol. 4, pp. 98-101.

[150] VARDOULAKIS I.,GOLDSCHEIDER M. and GUDEHUS G., 1978, Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem. *Int. J. Num. Anal. Methods Geomach.*, Vol. 2, pp. 99-128.

[151] VARDOULAKIS I., 1984, Rock bursting as a surface instability phenomenon. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 21:3, pp. 137- 144.

[152] VARDOULAKIS I. And GRAF B., 1985, Calibration of a constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments. *Géotechnique*, Vol. 35:3, pp. 299-317.

[153] VARDOULAKIS I. and SULEM J., 1995, Bifurcation analysis in geomechanics. Blackie academic & professional.

[154] VARDOULAKIS I., LABUZ J.F. and TRONVOLL J., 1998, Continuum fracture mechanics of uniaxial compression on brittle materials. *International journal of solids and structures*, Vol. 35:31/32, pp. 4313.

[155] VIGGIANI C., FINNO R.J. and HARRIS W.W., 1994, Experimental observations of strain localisation in plane strain compression of stiff clay. In *Localisation and bifurcation theory for soils and rocks* (ed. by Chambon R., Desrues J. and Vardoulakis I.), Balkema, Rotterdam, pp. 189- 198.

[156] VIGGIANI G. and TAMAGNINI C., 1999, Ground movements around excavations in granular soils: a few remarks on the influence of the constitutive assumptions on FE predictions. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials (soumis).*

[157] VINEGAR H.J., DE WAAL J.A. and WELLINGTON S.L., 1991, CT studies of brittle failure in Castlegate sandstone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 28-5, pp. 441- 448.

[158] VUAILLAT P., 1980, Propriétés visqueuses d'une argile : Expériences et formulation incrémentale. *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, France.*

[159] WALSH J.B. and BRACE W.F., 1966, Cracks and pores in rocks. In *Proceedings of the first int. cong. of ISRM, Lisbon*, Vol. 1, pp. 643-646.

[160] WONG T.-f., 1982, Micromechanics of faulting in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, pp. 49-64.

[161] WONG T.-f., DAVID C. and ZHU W., 1997, The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102-B2, pp. 3009-3025.

[162] YANAGIDANI T., EHARA S., NISHIZAWA O., KUSUNOSE K. and TERADA M., 1985, Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90:B8, pp. 6840-6858.

[163] ZHANG J., WONG T.-F. and DAVIS D.M., 1990, Micromechanics of pressure-induced grain crushing in porous rocks. *J. Geoph. Res.*, Vol. 95:B1, pp. 341-352.

[164] ZHU W., MONTESI L.G.J. and WONG T.-F., 1997, Shear-enhanced compaction and permeability reduction: triaxial extension test on porous sandstone. *Mechanics of materials*, Vol. 25, pp. 199-214.