



HAL
open science

Étude expérimentale de la localisation de la déformation par corrélation d'images sur un analogue de roche soumis à différentes conditions de chargement triaxiaux

Thi Phuong Huyen Tran

► To cite this version:

Thi Phuong Huyen Tran. Étude expérimentale de la localisation de la déformation par corrélation d'images sur un analogue de roche soumis à différentes conditions de chargement triaxiaux. Sciences de la Terre. Université Côte d'Azur, 2016. Français. NNT : 2016AZUR4083 . tel-01447565

HAL Id: tel-01447565

<https://theses.hal.science/tel-01447565>

Submitted on 27 Jan 2017

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.

UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS - UFR SCIENCES

École doctorale n° 364 : Sciences Fondamentales et Appliquées

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur en Sciences

de l'UNIVERSITE de Nice-Sophia Antipolis

Spécialité : Sciences de la Planète et de l'Univers

présentée et soutenue par

Thi Phuong Huyen TRAN

Étude expérimentale de la localisation de la déformation par corrélation d'images sur un analogue de roche soumis à différentes conditions de chargement triaxiaux

Thèse dirigée par : *Stéphane BOUISSOU*

soutenue le 21 octobre 2016

Jury :

M.Pierre VACHER	Professeur	Rapporteur
M.Roger SOLIVA	Maître de conférence, HDR	Rapporteur
M.Christopher WIBBERLEY	HDR (Total)	Examinateur
M.Jérôme FORTIN	Chargé de recherche	Examinateur
M.Alexandre CHEMENDA	Professeur	Examinateur
M.Stéphane BOUISSOU	Professeur	Directeur de thèse

Travaux effectués au laboratoire GEOAZUR
UMR-CNRS 7329, 06560 Sophia Antipolis, France

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire Géoazur à Valbonne au sein de l'équipe « Dynamique des Failles et des Séismes ». Pendant la période passée, j'ai eu la chance d'être accueilli et de rencontrer des personnes généreuses envers lesquelles je voudrais exprimer ma gratitude pour leur soutien.

Je souhaite tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de thèse, Stéphane Bouissou, et Professeur, Alexandre Chemenda, qui ont autant contribué à la réussite de cette thèse. Merci à vous de m'avoir offert la chance de connaître GRAM et de l'avoir appris à jouer avec des photos, de m'avoir consacré le temps de discuter et de partager vos idées, vos connaissances et vos expériences. Merci à Julien Ambre, technicien au laboratoire Géoazur, pour son aide sur les essais expérimentaux. Sa disponibilité, sa patience m'ont permis d'évoluer dans les meilleurs conditions.

Je tiens à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail. J'adresse ma profonde reconnaissance à M. Pierre Vacher et M. Roger Soliva d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, d'avoir attentivement lu mon mémoire. Je remercie également à M. Christopher Wibberley, M. Jérôme Fortin et M. Alexandre Chemenda d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je tiens ensuite à remercier l'ensemble du personnel du laboratoire, à ceux qui m'ont aidé dans mon travail et à tous les autres qui ont contribué à la bonne ambiance du laboratoire. Un grand remerciement s'adresse à M. Riad Hassani pour ses conseils et son encouragement. Merci à Mme. Valérie Mercier-Valero, Mme. Jenny Trevisan, qui m'a aidé avec enthousiasme dans les procédures administratives. Merci à M. Thomas Lebourg pour m'a laissé à utiliser ses dispositifs expérimentaux.

Je remercie évidemment à mes collègues au laboratoire : Monica, Zoé, Maelle, Borhan, Vishnu, Sargis, Edourad, Stéphane, Alexandre, Jinyang, David, Sait, Sadrac . . . pour leur soutien et pour des bons moments passés ensemble. Je n'oublie pas aussi mes "anciens" : aTrong, aDung, Battulga, Alain, Clément, Yevgeniya. Merci pour l'amitié que vous m'avez témoignée.

Je termine ici en remerciant ma famille et mes amis vietnamiens. Leur encouragement et leur assistance morale m'ont permis de passer les moments difficiles :

Con cảm ơn ba mẹ, chị 2 đã luôn tin tưởng và động viên con trong những năm qua. Cảm ơn "bạn" chồng Duy Toàn đã luôn chia sẻ và đồng hành cùng vợ. Con xin cảm ơn ông bà, các O, chú và các dì dượng luôn quan tâm tới con. Dì cũng không quên cảm ơn 2 nhóc Miu và Mượp, nhờ những bài hát của 2 đứa mà giúp dì bớt căng thẳng và quên đi nỗi nhớ nhà. Cảm ơn những người bạn ở Việt Nam : Linh, Hằng, Ly, Hoàng, Dung, Quỳnh Anh luôn nhắc nhở ta là không được lùi bước. Hẹn sớm gặp lại ở VN.

Xin được cảm ơn những người anh, chị, em và bạn bè ở Antibes và Nice : c Nga - a Tuấn, c Linh, Lượng, Lan Anh, Huê, a Mạnh Tuấn, Nhân, a Hùng, a Tân, a Khoa, a Phương, Chi, My, Hùng, Vy, a Phú, Biên, P Anh, Minh Tuấn, Hoàng, Phúc, Hậu, a Đạo, Dũng, Hải, Duy... đã giúp đỡ mình trong thời gian đầu mới đến và trong hơn 4 năm sống ở Antibes. Cảm ơn mọi người đã hỗ trợ chuẩn bị pot rất nhiệt tình giúp mình. Chúc mọi người gặt hái được nhiều thành công trong cuộc sống.

Résumé

Ce travail présente une caractérisation expérimentale de la localisation de la déformation et la rupture sur un matériau synthétique analogue de la roche dans différentes conditions de chargement axisymétrique. L'évolution de la localisation de la déformation a été caractérisée par la technique de corrélation d'images bidimensionnelle. Deux gammes d'essais en compression et en extension ont été réalisées à différentes pressions de confinement P_c . Profitant de la technique DIC et de la caractérisation détaillée des propriétés constitutives de GRAM1 par Mas et Chemenda (2014 [91] ; 2015 [92]), nous montrons que l'initiation de la localisation des bandes de déformation est précédée par la déformation élastique uniforme puis la déformation élastoplastique. La localisation de la déformation est initiée dans le régime de dilatance (la dilatance β est positive) et d'adoucissement (le module d'écrouissage h est négatif). Au cours de l'évolution du chargement, la déformation à l'intérieur de la bande de localisation de la déformation devient compactive ($\beta < 0$) et est accompagnée par un durcissement du matériau ($h > 0$). Ceci provoque dans un premier temps l'élargissement de la bande puis l'apparition de nouvelles bandes qui se forment successivement. La formation de ces nouvelles bandes provoque un ralentissement de la déformation dans les bandes préexistantes, ce qui densifie progressivement le réseau. Dans les essais en extension axisymétrique, les fractures se forment perpendiculaires à la contrainte principale mineure σ_3 sous un état de contrainte extensif à faible P_c puis compressif quand P_c augmente. Nos résultats présentent une transition continue de la fracture extensive à la fracture cisailante avec une augmentation de la contrainte compressive. Ceci est en accord avec les résultats obtenus pour les essais en extension réalisées sur des roches naturelles (Ramsey et Chester (2004) [121], Bobich (2005) [23]).

Mots-clé : localisation de la déformation, transition fragile-ductile, corrélation d'images numérique, dilatance, module d'écrouissage.

Abstract

This work presents an experimental characterization of the strain localization and the rupture on a granular rock analogue material under different conditions of axisymmetric loading. The evolution of the strain localization was characterized by the two-dimensional image correlation technique. Two series of triaxial compression and extension tests were carried out at different confining pressure P_c . Taking advantage of the DIC technique and detailed characterization of GRAM1's constitutive properties by Mas and Chemenda (2014 [91], 2015 [92]), we show that the initiation of deformation localization bands is preceded by the uniform elastic and then elasto-plastic deformation. The strain localization is initiated in the dilatant regime (positive dilatancy factor β) and strain-softening (negative hardening modulus h). During the band evolution, the deformation within it becomes compactive ($\beta < 0$) and is accompanied by the material hardening ($h > 0$), which causes the band to widen and new bands to form successively. The formation of new bands causes a slowing down the deformation within the prior bands, which makes the progressively densified band network to continuously evolve. In axisymmetric extension tests, the fractures are formed perpendicular to the minor principal stress σ_3 in an extensive stress state at low P_c then compressive when P_c increases. Our results show a continuous transition from the extensive fracture to shear fracture with an increase of compressive stress. This is suitable of the results obtained for extension tests performed on natural rocks (Ramsey and Chester (2004) [121]; Bobich (2005) [23]).

Keywords : strain localization, brittle-ductile transition, digital image correlation, dilatancy, hardening modulus.

Table des matières

1	Etat de l'Art	3
1.1	Observations de terrain	3
1.1.1	La fracturation	3
1.1.1.1	Les diaclases ou joints	3
1.1.1.2	Morphologie des diaclases : la fractographie	6
1.1.1.3	Conditions d'apparition des diaclases	10
1.1.1.4	Les fractures cisailantes	12
1.1.2	Localisation de la déformation	13
1.1.2.1	Bande de cisaillement	16
1.1.2.2	Bande de déformation volumique	20
1.2	Approche expérimentale : Influence de la pression de confinement sur la localisation de déformation dans la roche	26
1.2.1	Les résultats des essais en compression	26
1.2.2	Les résultats des essais en extension	30
1.2.3	Utilisation d'un matériau synthétique analogue de roches	33
1.3	Théorie de la bifurcation	39
1.3.1	Théorie de bifurcation pour une mono-bande	40
1.3.1.1	Les équations constitutives :	41
1.3.1.2	Le module d'écroutissage critique et l'orientation de la bande de cisaillement :	42
1.3.2	Formation de réseau de bandes/fracture	44
1.4	Modèles numériques	46
2	Technique de corrélation d'images (DIC Digital Image Correlation)	51
2.1	Caractérisation des mécanismes de déformation : les techniques expérimentales	52
2.1.1	Détection par mesure de déformations	53
2.1.1.1	Capteurs axiaux et radiaux	53
2.1.1.2	Mesures du champ de déformation	53
2.1.1.3	Mesures par tomographie rayons X	54
2.1.2	Détection par émissions acoustiques	54
2.1.3	Détection par observations microscopiques	55
2.2	Méthodes de mesures du champ de déformation complet	57
2.2.1	Méthodes interférométriques	57
2.2.1.1	Interférométrie holographique	57
2.2.1.2	Moiré interférométrique	58
2.2.2	Méthodes non-interférométriques	59
2.2.2.1	Méthodes de grilles	59
2.2.2.2	Méthodes de corrélation d'images numériques bidimensionnelle (DIC-2D)	60
2.2.2.3	Méthodes de flux optique	62

2.3	Corrélation d'images numériques 2D (DIC-2D)	63
2.3.1	Principe de la technique de corrélation d'images	63
2.3.2	Le logiciel de corrélation Sept-D (7D)	64
2.3.2.1	Définitions générales	65
2.3.2.2	Méthode d'auto-adaptation du motif à corrélérer pour déterminer des champs de déplacements	69
2.3.2.3	Paramètres utilisés	70
2.4	Incertitude de mesure par la technique DIC-2D	71
2.5	Quelques exemples d'application de la technique DIC en géomatériaux	72
3	Développements expérimentaux	75
3.1	Matériau synthétique analogue de roches GRAM1	75
3.2	Fabrication des échantillons de GRAM1	76
3.3	Dispositifs et techniques expérimentaux	79
3.3.1	Description du dispositif triaxial	79
3.3.2	Embases de chargement	80
3.3.3	Technique de diminution du frottement entre l'échantillon et l'embase	82
3.3.4	Système de montage de caméra	83
3.3.5	Logiciel de pilotage et d'acquisition des données	83
3.3.6	Nouvelle cellule de pression	83
4	Traitement et analyse des résultats expérimentaux des essais en compression	85
4.1	Synthèse des essais triaxiaux utilisant le matériau GRAM1	86
4.1.1	Détection du point de bifurcation	86
4.1.2	Technique de mesure de l'orientation de bande de déformation pour des essais triaxiaux	87
4.2	Essais de compression axisymétrique	90
4.2.1	Procédure de l'essai	90
4.2.2	Analyses générales	90
4.2.3	Essai C0.2-01T	92
4.2.3.1	Évolution des bandes de déformation	94
4.2.3.2	Vitesse de propagation de bande de déformation	94
4.2.3.3	Evolution de l'épaississement des bandes de déformation	98
4.2.4	Essai C0.3-12T	101
4.2.4.1	Initiation de la localisation de bande de déformation et évolution du réseau de bande de déformation	103
4.2.4.2	Vitesse de propagation des bandes de déformation	109
4.2.4.3	Evolution de l'épaississement de bande de déformation	109
4.2.5	Essai C0.3-08T	111
4.2.5.1	Évolution de bande de déformation	113
4.2.5.2	Épaississement des bandes de déformation et fracturation de l'échantillon	117
4.2.6	Calcul de la déformation volumique inélastique ε^p et de la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$	118
4.3	Discussion	120
4.3.1	Réseau de bandes de déformation à la transition fragile-ductile	120
4.3.2	Initiation et évolution de localisation de déformation à la transition fragile- ductile	120

5	Traitement et analyse des résultats expérimentaux des essais en extension	125
5.1	Forme en bobine des échantillons pour les essais en extension	126
5.2	Procédure de l'essai	127
5.3	Analyses générales	128
5.3.1	Données mécaniques	129
5.3.2	Caractéristiques de la fracture	130
5.4	Mesure de la déformation axiale	134
5.5	Évolution de la déformation au cours du chargement	137
5.6	Discussion	140

Liste des tableaux

- 1.1 Régimes de comportement pour GRAM1, le calcaire de Solnhofen et la grès d'Adamswiller ([98]) 34
- 2.1 Sources d'erreur de DIC-2D ([108]) 71
- 3.1 Coefficient de frottement des lubrifiants (Nguyen (2009), [98]) 82
- 4.1 Référence des essais en compression 90
- 4.2 Essai C0.3-12T. Vitesse de propagation des bandes de déformation majeures 109
- 5.1 Référence des essais en extension 128

Table des figures

1.1	Exemples de diaclases sur terrain à différentes échelles. (a) Le grès Entrada d'âge Jurassique (Vallée de sel Anticline). L'épaisseur de couche est d'environ 20 m. (b) Une couche de grès Permien, Eaglehawk Neck (Tasmania). (c) Calcaire marneux d'Éocène inférieur, Pyrénées espagnoles, zone Baga. L'épaisseur de la couche est de 30 cm. L'espacement moyen entre les diaclases est de quelques mm. (d) Diaclases très fines dans une couche de la mudstone Jurassique de 45 cm d'épaisseur, l'affleurement Matelles, Languedoc, Sud de la France, cité par Jorand (2012) ([76]).	4
1.2	A) Diaclases dans une strate calco-marneuse limitée par des couches de marnes (Eocène, col de Nice, Alpes Maritimes); B) Diaclases d'extension verticale plurimétrique traversant plusieurs couches calcaire d'épaisseur décimétriques (Vallée Tarroutent, Maroc) (Jorand (2007) [75]).	5
1.3	Diaclases continues et faiblement espacées observées sur des flancs du granite du Yosemite parc ([75]).	6
1.4	Surface de diaclase dans une strate et figures fractographiques schématisées classiquement associées. Les domaines du plan de diaclases sont : 1 - le miroir (<i>main joint face</i>); 2 - les franges (<i>fringe zone, border</i>), abruptes en haut de la figure, avec passage graduel des structures plumeuses aux hachures en bas; 3 - zone de transition (<i>mist zone, shoulder</i>). Les principales structures sont : 4 - la zone d'initiation (<i>origin</i>); 5 - la structure plumeuse (<i>plumose structure</i>); 6 - l'axe de la structure plumeuse; 7 - les hachures (<i>twist hackles</i>); 8 - les "cross-fractures"; 9 - les structures conchoïdales (<i>arrest lines, rib marks</i>) (Rives (1992) ([126]), modifié d'après Kulander et al (1990) ([81]).	6
1.5	Exemple d'un point d'initiation observé dans les strates de siltite (<i>siltstone</i>) de la Formation Ithaca, Plateau Appalachian, New York. Le point d'initiation est localisé au coin du creux (<i>groove cast</i>), où la limite de la couche basale change de l'orientation horizontale à verticale (McConaughy et Engelder, (2001) [94]).	7
1.6	Exemple d'un point d'initiation observé dans une trace de fossile. Le point d'initiation est localisé sur le côté à gauche du terrier. Le terrier se distingue de la forme de la couche (<i>bedform</i>) par sa section elliptique et les sédiments argileux contenus dans ce terrier (McConaughy et Engelder, (2001) [94]).	7
1.7	Différents types de structures plumeuses : A. droites, B. courbes, C. rythmiques (Bahat et Engelder, (1984) [11]).	8
1.8	Surfaces de diaclase avec des figures fractographiques : A. Diaclase de longueur horizontale plurimétrique. Les structures plumeuses en relief ont été mises en évidence grâce à de la craie. Série clastique de la formation Ithaca (dévonien, New York, USA) (Photo T. Engelder) (cité par Jorand (2007) ([75])). B. Diaclase composite avec son interprétation en terme de propagation observée dans les siltites (<i>siltstones</i>) (Ithaca, New York, USA). Les traits fins retracent la géométrie des plumoses, les traits épais, perpendiculaire aux plumoses, représente la position du front de la rupture à un restant donné (McConaughy et Engelder, (2001) [94]).	9

1.9	A. Photo d'une surface de diaclase dans calcaire à grains fin au bassin de Lodève montre les structures conchoïdales et les hachures en limite de banc (Photo C. Jorand) ; B. Diagramme représente les relations générales entre la géométrie du plan principal de la diaclase, les fractures en échelon (hachures) et les ruptures de liaisons (Ramsay & Lisle (2000) ([120])), cité par Jorand (2007) ([75]).	10
1.10	Évolution des contraintes dans un sédiment en fonction de la profondeur au cours d'un cycle E.D.D dans un modèle élastique en l'absence de contrainte tectonique, cité par Rives (1992) ([126]).	11
1.11	Fracture cisailante hybride dans un grès de Tasmania, Australie. La photo prise par Steve Cox (Atkinson (2015) [4]).	12
1.12	Classification cinématique de bandes de déformation (Fossen et al., (2007) [60])	14
1.13	Les types principaux de bandes de déformation, basés sur le mécanisme de déformation (Fossen et al., (2007) [60]).	15
1.14	Réseau des bandes de cisaillement-compactantes dans une carrière de grès de Crétacé supérieur du "Bassin du Sud-Est" (Provence, France) à Orange (cité par Chemenda et al. (2012) [38])	17
1.15	Photographies de bandes de cisaillement naturelles dans des grès d'Entrada, San Rafael Desert, Utah. a) Bande de cisaillement de quelques millimètres. b) Zone de bandes de déformation. L'encadré montre la répartition spatiale des bandes les plus développées. c) Réseau conjugué de bandes et de zone de bandes de cisaillement. (Aydin et al., (2006) [7], cité par Jorand (2007) [75]).	17
1.16	Photographies de bande de cisaillement en lames minces observées au microscope optique a) caractérisée par une réduction de taille des grains (zone cataclasée dans les grès d'Entrada, San Rafael, Utah. b) Bande de cisaillement sans cataclase dans les sédiments faiblement consolidés, McKinleyville, northern California. ([7], cité par Jorand (2007) [75]).	18
1.17	Photos d'observations de terrain montrant les trois types de système de bandes de déformation : (a) bandes compactante-cisailantes améliorées (SECB) à Uchaux, (b) bandes cisailante-compactantes (CSB) à Orange, (c) bandes cisailantes normales (SB) à Uchaux (Soliva et al., (2013) [134]).	19
1.18	Modèle résumé de localisation ou de distribution de déformation comme des bandes dominées par cisaillement ou compaction respectivement, en fonction de la contrainte moyenne et différentielle, de la taille des grains, de la porosité, de la pression interstitielle et de l'écroissage. Les flèches grises indiquent le champ de déformation à distance (Soliva et al., (2013) [134]).	19
1.19	Bandes de compaction dans les grès d'Aztec de la vallée Fire State, Nevada. (a) Photo d'une bande de compaction montrant le relief positif par rapport au grès non déformée environnant. Aucun cisaillement macroscopique à travers la bande est détectable. (b) Une photographie montrant un réseau de bandes de compaction au même endroit. (c) Une photographie d'un échantillon avec des bandes de compactions. Échelle à droite en inches. (d) CT scan de l'échantillon à (c) montrant la distribution de porosité inversé de la distribution de densité (Aydin et al., (2006) [7]).	21
1.20	Bandes de compaction pures observées dans le grès de Navajo, Utah par Fossen et al. (2011) ([61]). Photo montrant la variation de la densité des bandes de compaction le long l'écoulement du grain inter-strates.	21
1.21	(a). Bandes de compaction pures (<i>Pure compaction bands - PCB</i>) avec la caractéristique de trace ondulée. Le couteau de poche pour l'échelle. (b). Bandes de compaction en motif de chevron à gauche et bandes de compaction cisailantes-améliorées à droite. Bandes de compaction pures à chevron sont avec/continuent comme les bandes de compaction cisailantes-améliorées (<i>Shear-enhanced compaction bands - SCB</i>) planaires. Bandes de compaction pures et bandes de compaction cisailantes-améliorées observées dans le grès d'Aztec à la vallée de Fire, Nevada par Eichhubl et al. (2010) ([51]).	22

1.22	Bande de compaction pure (section mince) observée dans le grès de Navajo, Utah par Fossen et al. (2011) ([61]).	22
1.23	Image MEB rétrodiffusée d'une bande de compaction pure, montrant des preuves claires de la casse de grain. Fossen et al. (2011) ([61]).	23
1.24	Bandes de dilatance et diaclases (<i>joins</i>) comme des catégories distinctes de la rupture en mode d'ouverture. (a) Les bandes de dilatance sont caractérisées par de grands pores qui poussent apparemment de pores initiaux par le déplacement du grain sur une zone de largeur finie. (b) Les diaclases caractérisées par deux surfaces distinctes qui forment par la fracturation inter- et transgranulaire et se déplacent l'un à l'autre (Du Bernard et al. (2002) ([49])).	23
1.25	Bandes de dilatance dans sable non-consolidé sur la terrasse marine de Savage Creek, McKingleyville, California. (a) Cartographie montrant des affleurements de bandes comprenant deux ensembles de bandes de cisaillement (incliné) et un ensemble de bandes de dilatance (presque horizontale). (b) Détail de (a) marquée par rectangle montrant un ensemble de bandes de cisaillement et un ensemble de bandes de dilatance connectés aux extrémités des segments de bandes de cisaillement. (c) Image de la section mince d'une partie de la bande de dilatance. Les pores dans la bande sont occupés par des minéraux argileux (sombres). (d) Distribution de porosité à travers la section mince déterminée par comptage de points. Le graphique montre une augmentation de 7% ($\pm 3\%$) en squelette ou moins-ciment porosité dans la bande ([49], cité par Aydin et al. (2006) ([7])).	24
1.26	Bandes de dilatance naturelles. (a) Aspect de la surface morphologique sur une diaclase ouverte. (b) Affleurement des diaclases denses dans les dolomicrites (dolomite cube) des couches tabulaires de la frontière du Plateau du Larzac (sud de la France). (c) Aspect de la trace (sur une surface sciée et polie) d'une discontinuité fine parallèle à la couche perpendiculaire aux diaclases avec des marques plumeuses. (d) Image MEB de la discontinuité montrant la bande avec des vides, des grains lâches et porosité augmentée (par rapport à la roche hôte) (Chemenda et al. (2011) ([34])). (e) Bande de dilatance (désagrégation) dans le grès de Nubian, Couches de Tayiba Red, Sinai (Fossen et al. (2007) ([60])). L'épaisseur de la bande est de plusieurs diamètres de grain.	25
1.27	Données mécaniques représentatives pour certains essais en compression triaxiaux sur calcaire de Tavel. (a) La contrainte différentielle est tracée en fonction de la déformation axiale. (b) La déformation volumique est tracée en fonction de la contrainte moyenne, et les données hydrostatiques se présentent par la ligne en pointillés. Le numéro à côté de chaque courbe indique la pression de confinement maintenue pendant l'essai. Les flèches dans la figure 1.27b marquent les contraintes critiques (initiation de la dilatance C' dans l'essai à la pression de confinement de 30 MPa, initiation de la compaction cisailante améliorée C^* et la transition de la compaction cisailante améliorée à la dilatance $C^{*'} dans l'essai à la pression de confinement de 100 MPa (Vajdova et al. (2004) ([153])).$	27
1.28	Schéma récapitulatif des bandes observées sur l'échantillon de grès Vosges par rapport à la pression de confinement pour les essais de compression triaxiaux avec $H/D = 2$ et 1 , respectivement au-dessus et au-dessous de l'axe, où H - hauteur de l'échantillon, D - diamètre de l'échantillon (Bésuelle et al. (2000) [20]).	27
1.29	Pics de contrainte et surfaces de charge au début de la compaction cisaillement-amélioré pour les grès de Darley Dale (a), Berea (b), Rothbach (c) et Bentheim (d) (Baud et al. (2004) ([13])).	28
1.30	Les photos de l'échantillons de grès Bleurswiller déformés à différentes pressions de confinement (P_c). Le diamètre d'un échantillon intact initial était 40 mm et l'hauteur était 80 mm. (1) est l'échantillon déformé sous les conditions hydrostatiques (Fortin et al. (2005) [57]).	29

1.31	Bandes de compaction dans l'échantillon testé à la pression de confinement de 110 MPa. (a) Photo entière d'une section dans la lumière naturelle. La contrainte principale était le long de la direction axiale. (b) Micrographies de la microstructure sous la lumière polarisée dans le microscope optique. Cette vue montre la largeur moyenne d'une bande discrète est de ~ 0.8 mm, ce qui est comparable à la taille des grains. La micrographie à gauche (c) montre en détail des grains écrasés à l'intérieur d'une bande (Fortin et al. (2005) [57]).	30
1.32	Courbes de contrainte déviatorique et de déformation volumique par rapport à déformation axiale dans les essais d'extension triaxiaux sur le grès de Vosges réalisés par Bésuelle et al. (2000) ([20]).	31
1.33	Les motifs des bandes de cisaillement observées sur l'échantillon de grès de Vosges en fonction de la pression de confinement pour les essais d'extension triaxiaux (Bésuelle et al. (2000) [20]).	31
1.34	Photos des échantillons "dog-bone" de marbre de Carrara non-formé et déformés. a) Échantillon "dog-bone" a 90 mm de hauteur, 43 mm de diamètre aux extrémités et 28 mm de diamètre au centre; (b) Échantillons représentatifs montrent le changement progressif de l'orientation de fracture avec l'augmentation de la pression de confinement ([121]).	32
1.35	La résistance à la rupture et l'angle de rupture en fonction de la pression de confinement pour le marbre de Carrara (Ramsey et al. (2004) [121]).	32
1.36	Sections verticales (parallèle à la direction d'extension) au milieu des modèles fracturées. (a) Contrainte moyenne initiale $\sigma_{ini} = 0.4$ MPa. Les contraintes aux bordures du modèles à la fin de l'essai : $\sigma_1 = 0.4$ MPa, $\sigma_2 = 0.37$ MPa, $\sigma_3 = 0.016$ MPa; (b) $\sigma_{ini} = 0.5$ MPa, $\sigma_1 = 0.5$ MPa, $\sigma_2 = 0.31$ MPa, $\sigma_3 = 0.023$ MPa; (c) $\sigma_{ini} = 0.6$ MPa, $\sigma_1 = 0.6$ MPa, $\sigma_2 = 0.4$ MPa, $\sigma_3 = 0.08$ MPa; (d) $\sigma_{ini} = 1$ MPa, $\sigma_1 = 1$ MPa, $\sigma_2 = 0.48$ MPa, $\sigma_3 = 0.28$ MPa; (e) $\sigma_{ini} = 1.5$ MPa, $\sigma_1 = 1.5$ MPa, $\sigma_2 = 0.6$ MPa, $\sigma_3 = 0.43$ MPa. Ψ est l'angle entre les fractures (bandes de déformation) et la direction σ_1 (verticale) (Jorand et al. (2012) ([76])).	33
1.37	Réseaux de fractures/bandes générés dans les modèle de GRAM1 et dans la nature (Jorand (2007) ([75]) cité par Nguyen (2009) ([98])	34
1.38	Comparaison des courbes $q(\varepsilon_{ax})$ et $\varepsilon(\varepsilon_{ax})$ pour des essais en compression de GRAM1 et des roches : calcaire de Solnhofen et grès de Adamswiller (Nguyen et al. (2011) [99])	35
1.39	Echantillons fracturés de GRAM1 dans les essais de compression à différents P_c (zoom sur les photos à haute résolution affiche clairement les fractures (localisation des bandes) représentés dans les dessins sous les photos correspondantes ([99])	35
1.40	Courbes $q(\varepsilon_{zz})$ dans les essais d'extension sur GRAM1 (Nguyen (2009) ([98])).	36
1.41	Évolution de la géométrie de fracturation dans les essais d'extension sur GRAM1 ([98]).	37
1.42	Courbes $(\sigma_3^{rup}, \sigma_1 = P_c)$ et $(\psi, \sigma_1 = P_c)$ pour GRAM1 ([98]) et grès de Berea (Bobich (2005) ([23]).	37
1.43	Échantillons dr GRAM1 fracturés lors d'essais en extension. (a) Vue générale d'un échantillon "dog-bone" fracturé au milieu. (b) à (d) Surfaces de fracture orthogonales à σ_3 générées à différentes pressions de confinement P (Chemenda et al. (2011) ([37]))	38
1.44	Photomosaïque au microscope électronique à balayage (électrons rétrodiffusés) d'une bande de dilatance dans un échantillon de GRAM1 fracturé à $P = 0.6$ MPa. Le matériau a été imprégné avec une résine époxy de basse viscosité qui a pénétré dans et autour de la bande. Après polymérisation (solidification) de la résine, l'échantillon a été scié perpendiculairement à la bande, et la section polie avec soin avant l'observation. Les structures sont caractéristiques et ne peuvent être introduites par le sciage ou le polissage. À l'échelle présentée, la bande apparaît formée par un alignement de vides (V), de zones de grains lâches (LG) où les grains décompactés apparaissent inclus dans la résine grisâtres troubles autour des grains), et par des ponts (B) de matériel apparemment intact (Chemenda et al. (2011) ([34])).	38
1.45	(a) Déformation homogène; (b) Déformation localisée en bande de localisation [98]	40
1.46	Orientations de band prédites comme des fonctions de $\beta + \alpha$ et N ([72])	43

1.47	Réseau régulier de bandes cisailantes. (a) configuration de localisation composée de deux familles de bandes parallèles conjuguées ; (b) cellule élémentaire. d est l'épaisseur des bandes, λ est l'espacement entre les bandes. 1, 2, 3 sont des zones de champs de déformation différents. e_i sont les vecteurs unitaires (Chemenda (2007) ([32]))	44
1.48	Évolution du motif de $\bar{\gamma}_p$ et de l'état mécanique matériel dans le modèle d'une seule couche avec $h_{ini}^{sh} = -0.03$ et $h_{end}^{sh} = 0.3$. Les déformations nominales aux étapes indiquées de l'évolution du modèle sont : (a) $\varepsilon_1 = 10^{-5}$; (b) $\varepsilon_1 = 3.5 \times 10^{-5}$; (c) $\varepsilon_1 = 7.9 \times 10^{-5}$; (d) $\varepsilon_1 = 1.5 \times 10^{-4}$; (e) $\varepsilon_1 = 2.2 \times 10^{-4}$; (f) $\varepsilon_1 = 2.8 \times 10^{-4}$; (g) $\varepsilon_1 = 3.5 \times 10^{-4}$; (h) $\varepsilon_1 = 5.7 \times 10^{-4}$. La contrainte principale majeure σ_1 est horizontale. (Chemenda et al. (2012) ([38])).	47
1.49	Les motifs de $\bar{\gamma}_p$ dans quatre modèles chargés au même raccourcissement horizontal total de $2.8 \times 10^{-2}m$. (a) $E = 5E_2$. (b) $E = E_2$. (c) $E = 0.5E_2$. (d) $E = 0.3E_2$. (e) $E = 0.05E_2$. La couche montrée est prise en sandwich entre deux autres couches non représentées (Chemenda et al. (2014) ([36])).	47
1.50	Les motifs de déformation inélastique cisailante effective accumulée $\bar{\gamma}_p$ pour les étapes successives de l'évolution du modèle numérique sous contrainte compressive axisymétrique à $\alpha = 0.2$, $\nu = 0.3$, $h = -0.36$, $N = 1/\sqrt{3}$ et β croissant linéairement de -0.7 (à $\bar{\gamma}_p = 0$) à 0.18 (à $\bar{\gamma}_p = 2 \times 10^{-7}$) (Chemenda (2009) ([33])).	48
1.51	Évolution de bandes de compaction en terme de $\bar{\gamma}_p$ et de la contrainte majeure σ_{11} qui est verticale. (d)-(e), (f)-(g) correspondent respectivement aux mêmes stades de déformation. (h) Zoom de la bande supérieure dans (f) ; (i) La même bande présentée en terme de la réponse mécanique du matériau : 1. réponse élastique-plastique; 2. réponse élastique. (j) Distribution du taux de déformation de cisaillement à l'intérieur et autour de la même bande que dans (h) et (i) (Chemenda (2011) ([35])).	49
2.1	Contrainte différentielle (courbe solide) et émissions acoustiques cumulées (courbe en pointillés) en fonction de déformation axiale dans grès Bleurswiller à $P_c = 80MPa$ (Fortin et al. (2006) [58])	55
2.2	Distribution d'hypocentre EA pour l'échantillon à $P_c = 80MPa$. (En haut) Une vue regardant vers le bas sur l'échantillon (projection de tous les événements sur le plan (x, y)). (Au centre) Une projection de tous les événements situés entre $-5mm < x < +5mm$ sur le plan (z, y) . (En bas) Une projection de tous les événements situés entre $-5mm < x < +5mm$ sur le plan (z, x) . Chaque point représente un événement EA (Fortin et al. (2006) [58]).	56
2.3	Schéma expérimental de l'interférométrie holographique ([147])	58
2.4	Schéma de principe du moiré interférométrique	59
2.5	Différents motifs de grilles (Doumalin (2000) [48])	60
2.6	Mouchetis par dépôt de peinture	61
2.7	(a) Image de référence, le carré gris est le motif servant pour suivre des déplacements de son point central, les points l'intersection fr la grille rouge déterminent les centres des motifs ou nœuds ; (b) Vecteurs de déplacement des nœuds calculés par corrélation d'images.	63
2.8	Illustration de ressemblance entre deux motifs (Coudert (2005) [41])	64
2.9	Schémas d'interpolation des niveaux de gris : (a) Interpolation bi-cubique, (b) Interpolation bilinéaire ([152]).	65
2.10	Exemple d'une surface indiquant l'évolution de la valeur du paramètre de corrélation C_{ZNCC} selon les deux types d'interpolation des niveaux de gris.	67
2.11	Champ de déplacements $U(x, y)$ et $V(x, y)$ entre l'image de référence et l'image déformée ([152]).	67
2.12	Processus itératif pour calculer un champ de déplacements d'un carré de la grille ([41]).	69
2.13	(a) Échantillon avec une zone d'analyse choisie (en jaune) et la grille (en rouge); (b) Les paramètres de corrélation utilisés : taille de motif de 10×10 pixels ² , pas de la grille de 10 pixels.	70

2.14	Essai Cpir1-E-45-02. (a) et (b) Photos acquises respectivement au début d'essai et à la rupture ; (c) Direction et intensité de déformation principale, pas de la grille de 60 pixels ; (d) et (e) cartes de déformations cisailantes maximales (ε_{s-max}) et volumiques (ε_v), pas de la grille de 40 pixels (Nguyen (2011) [100]).	73
2.15	Courbe contrainte-déformation et cartes des déformations incrémentales pour un essai de compression à la pression de confinement 30 MPa ([84]).	74
3.1	Image SEM de la poudre constituant le matériau GRAM1 (Jorand (2007) [75])	76
3.2	Échantillons de GRAM1 en forme (a) cylindrique pour des essais en compression ; (b) bobine pour des essais en extension.	76
3.3	Différentes étapes de la fabrication des échantillons de GRAM1 : (a) Première étape de remplissage de la poudre dans un moule cylindrique ; (b) Deuxième étape de précompaction de la poudre par pression hydrostatique dans la cellule triaxiale ; (c) Échantillon brut après la compaction ; (d) Troisième étape de taillage pour obtenir des échantillon voulus (Nguyen, (2009) [98]).	77
3.4	Nouveau dispositif de taillage.	78
3.5	Échantillons de GRAM1 couverts par la membrane imperméable en latex sur laquelle un motif des gouttes noires est effectué : (a) mise en place de l'échantillon pour des essais en compression ; (b) pour des essais en extension.	78
3.6	Schéma (a) et photo du montage expérimental. (1) Échantillon de GRAM1 ; (2) Piston vertical transmettant la force verticale ; (3) Capteur externe LVDT ; (4) LEDs ; (5) Caméras ; (6) Membrane en latex ; (7) Embase rigide ; (8) Cellule de confinement.	80
3.7	Schéma de l'échantillon et des embases pour l'essai en compression (selon Nguyen (2009), [98])	81
3.8	Schéma de l'échantillon et des embases pour l'essai en extension ([98])	82
3.9	(a) Cellule de pression cylindrique classique ; (b) Nouvelle cellule de pression.	84
3.10	Cartes de déformation du composant axial obtenues en utilisant (a) Cellule de pression cylindrique classique ; (b) Nouvelle cellule de pression.	84
4.1	Schéma présentant la fixation des LVDTs sur l'échantillon (a) dans la configuration 1, (b) dans la configuration 2 utilisés dans l'étude de Nguyen (2009) [98].	87
4.2	Essai triaxial en compression à la pression de confinement $P_c = 0.2\text{MPa}$ (Nguyen (2009) [98]).	88
4.3	Essai triaxial en compression à la pression de confinement $P_c = 0.3\text{MPa}$ (Nguyen (2009) [98]).	88
4.4	Essai triaxial en compression à la pression de confinement $P_c = 0.5\text{MPa}$ (Nguyen (2009) [98]).	89
4.5	Technique de mesure de l'orientation d'une bande de déformation utilisée par Nguyen (2009) ([98]).	89
4.6	Courbes de contrainte-déformation représentatives $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$. 1, $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est calculée à partir des mesures de déplacement par le capteur externe LVDT ; 2, $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est obtenue en intégrant le champ de déformation axiale à partir de DIC sur toute la hauteur de l'échantillon.	91
4.7	Courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ des essais en compression, $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est donnée par DIC.	91
4.8	Essai C0.2-01T. Courbe contrainte-déformation axiale avec indication des numéros des images utilisées pour l'analyse DIC.	92
4.9	Essai C0.2-01T. (b) Photos de l'échantillon post-mortem observées suivant 4 côtés (montrés à (a)) (c) Cartes de déformations axiales (ε_{ax}) (d) Mesure de l'angle de la fracture/bande de déformation avec des traces sur la membrane.	93
4.10	Essai C0.2-01T. Évolution des déformations axiales cumulées (ε_{ax}) obtenues à partir de DIC entre les stades correspondant au point (0) et les points (n), où $n = 1, 2 \dots 12$ indiqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (Fig. 4.8). Pour chaque point, les paires de cartes de déformations obtenues par deux caméras suivant deux côtés opposés sont présentées. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3}	95

4.11	Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$) et cisailantes maximales incrémentales ($\Delta\gamma_m$) entre les points successifs (n et $n + 1$), où $n = 1, 2 \dots 8$, indiqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (Fig. 4.8). Les valeurs de déformation affichées à l'échelle de couleur sont multipliées par 10^{-3} .	96
4.12	Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$), cisailantes maximales ($\Delta\gamma_m$) et volumiques incrémentales ($\Delta\varepsilon$) entre les points successifs (n et $n + 1$), où $n = 8, 9 \dots 13$, indiqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (Fig. 4.8). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .	97
4.13	Essai C0.2-01T. (a) Photos de l'échantillon post-mortem et (b) de l'échantillon couvert par la membrane au stade final de chargement. Le rectangle rouge indique la zone analysée par DIC. Deux lignes pointillées représentent l'épaisseur final de la bande de déformation; (c) Cartes de déformations axiales (ε_{ax}) et cisailantes maximales accumulées (γ_m) entre l'état initial au début de l'essai et différents stades de chargement correspondant aux images (3), (6), (10), (13) observées dans la zone rectangle rouge; (d) Cartes de déformations axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$) et cisailantes maximales incrémentales ($\Delta\gamma_m$). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .	98
4.14	Essai C0.2-01T. Zoomant la zone rectangle indiquée dans la figure 4.13a.	98
4.15	Essai C0.2-01T. (a) Photo prise à la surface de l'échantillon au côté 2 (cf. Fig. 4.9a); le rectangle rouge indique la zone analysée par DIC; lignes pointillées représentent l'épaisseur final des bandes de déformation obtenu par DIC. (b) Zoomant la zone rectangle; cB - bande de connexion de deux bandes I et c.	99
4.16	Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales et cisailantes maximales accumulées entre l'état initial correspondant au début de l'essai et différents stades de chargement correspondant aux images (4), (5), (8), (12), (13) observées dans la zone en rectangle rouge. Lignes pointillées représentent l'épaisseur final des bandes à la fin d'essai. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .	99
4.17	Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales et cisailantes maximales incrémentales à (6-7), (7-8), (9-10), (11-12), (12-13) observées dans la zone en rectangle rouge. Lignes pointillées représentent l'épaisseur final de la bande à la fin d'essai. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .	100
4.18	Essai C0.2-01T. (a) Superposer la carte de déformations accumulées à la fin d'essai corrélée dans la zone en rectangle rouge; (b) Superposer les cartes de déformations incrémentales à (6-7), (9-10), (12-13) corrélées dans la zone en rectangle rouge sur l'échantillon post-mortem.	100
4.19	Essai C0.3-12T. Courbe contrainte-déformation axiale avec indication des numéros d'images utilisées pour l'analyse DIC.	101
4.20	Essai C0.3-12T. (b) Photos de l'échantillon post-mortem observées suivant 4 côtés (montrés à a); (c) Cartes de déformations cisailantes maximales (γ_m) accumulées entre les stades correspondant à 0 et 13; (d) La surface interne de la membrane montrant des traces des fractures/bandes de déformation.	102
4.21	Essai C0.3-12T. Zone analysée pour étudier l'évolution de bande de déformation. Zone marquée par rectangle rouge pour suivre l'évolution d'épaississement de bande de déformation majeure I.	103
4.22	Essai C0.3-12T. Cartes de déformations axiales au stade de chargement correspondant à l'image (1) par rapport à l'état initial 0.	103
4.23	Essai C0.3-12T. Cartes de déformations accumulées du composant axial (ε_{ax}) et de déformations de cisaillement maximum (γ_m). Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. L'image de référence est au stade (1). Les numéros au-dessus de chaque paire de cartes de déformations indique le stade pour lequel ε_{ax} est présentée. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .	104

4.24	Essai C0.3-12T. Cartes de déformations accumulées du composant axial (ε_{ax}) et de déformations de cisaillement maximum (γ_m). Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. L'image de référence est au stade (1). Les numéros au-dessus de chaque paire de cartes de déformations indique le stade pour lequel ε_{ax} est présentée. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (<i>Suite</i>).	105
4.25	Essai C0.3-12T. Cartes de déformations incrémentales du composant axial et de déformations de cisaillement maximum entre les points successifs ($n-1$ et n) où $n = 1, 2 \dots 13$ présentés sur la courbe contrainte-déformation dans la figure 4.19. Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3}	106
4.26	Essai C0.3-12T. Cartes de déformations incrémentales du composant axial et de déformations de cisaillement maximum entre les points successifs ($n-1$ et n) où $n = 1, 2 \dots 13$ présentés sur la courbe contrainte-déformation dans la figure 4.19. Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. La paire finale de cartes montre les déformations volumiques incrémentales $\Delta\varepsilon$. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (<i>Suite</i>).	107
4.27	Essai C0.3-12T. Présentation 3D des bandes de déformation majeures et une bande secondaire b.	108
4.28	Essai C0.3-12T. Surface de l'échantillon post-mortem zoomant à différentes échelles : (a) L'échantillon complète vu au côté 1 (cf. Fig. 4.20a); (b) dans le rectangle noire; (c) dans le rectangle rouge où la technique DIC sera appliquée pour suivre l'évolution d'épaississement de la bande de déformation I.	110
4.29	Essai C0.3-12T. Comparaison entre les cartes de déformation de la zone en rectangle rouge pour suivre l'évolution de la bande (I) et montre l'augmentation de l'épaississement de la bande. (a) Cartes de déformations accumulées (ε_{ax} et γ_m) aux différentes stades de chargement fait référence aux images (2), (3), (4), (7), (10), (13). L'image de référence est à l'état initial 0; (b) Cartes de déformations incrémentales ($\Delta\varepsilon_{ax}$ et $\Delta\gamma_m$) à (2-3), (3-4), (6-7), (9-10), (12-13). Deux lignes pointillées représentent l'épaisseur final à la fin d'essai.	110
4.30	Essai C0.3-08T. Courbe contrainte-déformation axiale $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ avec indication des numéros d'images utilisées pour l'analyse DIC.	111
4.31	Essai C0.3-08T. (b) Photos de l'échantillon post-mortem observées suivant 4 côtés (montrés à (a)); (c) Carte de déformations axiales (ε_{ax}) et cisailantes maximales (γ_m) cumulées entre le stade 0 et stade 10. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} ; (d) Surface interne de la membrane montre le réseau de bandes de déformation. λ est l'espacement de bande.	112
4.32	Essai C0.3-08T. (a) et (c) Cartes de déformations axiales (ε_{ax}) et cisailantes maximales (γ_m) cumulées entre le stade au début de chargement et les stades (1)-(3); (b) et (d) Cartes de déformations axiales et de cisaillement maximum incrémentales entre les stades (1-2) et (2-3). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3}	114
4.33	Essai C0.3-08T. (a) Cartes de déformations axiales cumulées (ε_{ax}) et (b) incrémentales ($\Delta\varepsilon_{ax}$). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (<i>La suite</i>)	115
4.34	Essai C0.3-08T. (a) Cartes de déformations cisailantes maximales cumulées ($\Delta\varepsilon_{ax}$) et (b) incrémentales ($\Delta\gamma_m$). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (<i>La suite</i>).	116
4.35	Essai C0.3-08T. Le zoom sur le réseau de bandes de déformation. La photo zoomée montre différents types de bandes : bande de déformation majeure (BM), bande de déformation secondaire (BS), brins contribuent à la bande principale (B), zone de saturation de bandes (S), fissure ouverte (FO), décalage de bande (D).	117
4.36	Essai C0.3-08T. (a) Photo de l'échantillon post-mortem, la ligne solide bleu représente une faille/fracture séparant deux compartiments A et B; (b) La surface de rupture de la partie A; (c) La partie B où se trouve le cône; (d) Le matériau en forme de cône vu de haut et (e) horizontalement.	118

4.37	Cartes de déformations axiales accumulées entre les stades correspondant aux points 0 et 3 (a) de l'essai C0.3-12T (comme montrée dans la figure 4.29) et (b) de l'essai C0.2-01T (Fig. 4.13). Le carré bleu (de 3×3 nœuds) présente la zone utilisée pour calculer l'évolution de ε^p et $\bar{\gamma}^p$ à l'intérieur de la bande de déformation I au cours du chargement. Le point rouge est le point central de cette zone.	119
4.38	Échantillons post-mortem déformés à la pression de confinement de transition fragile-ductile $P_c = 0.3$ MPa sous les mêmes conditions, mais avec différents accourcissements totaux (a) C0.3-12T, 2%; (b) C0.3-10T, 2%; (c) C0.3-04G, 2.2% (l'essai de Mugny); (d) C0.3-08T, 9%.	120
4.39	Évolution du réseau de bande de déformation dans le modèle numérique de Chemenda et al. (2012) [38] montre les stades de déformation précoce (la résolution de modèle est 500×500) : (a à e) évolution du motif de $\bar{\gamma}^p$; (f) la même que dans (e), mais à différente échelle de $\bar{\gamma}^p$ (la limite supérieure de $\bar{\gamma}^p$ est réduite de 1.32×10^{-3} à 5×10^{-6}).	121
4.40	Fragments des surfaces (a) $h(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)$ et (b) $\beta(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)$, dérivées d'un grand nombre de tests expérimentaux à différentes P_c par Mas et Chemenda, (2015) [92]. Les plans semi-transparents gris montrent un niveau zéro de h et β . Le couleur rouge des palettes de couleur correspond aux valeurs hautes positives de h et β , et le bleu correspond aux h et β petites/négatives.	122
4.41	Graphiques $h(\bar{\gamma}^p)$, $\beta(\bar{\gamma}^p)$, et $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$, respectivement pour $\sigma_m = \sigma_{bdt} = 0.65$ MPa. $h = [\partial \bar{\tau}(\sigma_m, \bar{\gamma}^p) / \partial \bar{\gamma}^p] G^{-1}$ est le module d'écroutissage normalisé par le module de cisaillement G ; $\beta = \partial \varepsilon^p(\sigma_m, \bar{\gamma}^p) / \partial \bar{\gamma}^p$ est le facteur de dilataance; $\bar{\tau}$ est la contrainte von Mises (Mas et Chemenda, (2015) [92]).	122
4.42	(a) Graphique $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ au sein de la première bande de déformation (bande I, Fig. 4.23) pour l'essai C0.3-12T : 1, points calculés à partir de DIC; 2, la même courbe que sur la figure 4.41c; (b) Évolution de $\bar{\gamma}^p$ dans la première bande en fonction de $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ (points calculés à partir DIC). Le cercle bleu sur le graphique indique l'initiation de la localisation de déformation.	123
4.43	Graphiques $h(\bar{\gamma}^p)$, $\beta(\bar{\gamma}^p)$, et $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$, respectivement pour $\sigma_m = \sigma_{bdt} = 0.5$ MPa (Mas et Chemenda, (2015) [92]).	123
4.44	(a) Graphique $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ au sein de la première bande de déformation (bande I, Fig. 4.10) pour l'essai C0.2-01T : 1, points calculés à partir de DIC; 2, la même courbe que sur la figure 4.43c; (b) Évolution de $\bar{\gamma}^p$ dans la première bande en fonction de $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ (points calculés à partir DIC).	124
5.1	Différentes techniques pour engendrer la contrainte axiale σ_{ax} en tension : (a) Serrage. Les embases serrent les extrémités de l'échantillon (Liao et al (1997) [87]); (b) Collage. L'échantillon est collé aux embases aux extrémités (Okubo et Fukui (1996) [105]); (c) Échantillon en forme de bobine (Ramsey et Chester (2005) [121]).	126
5.2	Différentes formes de bobine d'échantillon utilisé pour un essai en extension : (a) forme I; (b) forme II.	127
5.3	Plan des dimensions d'un échantillon de forme en bobine.	127
5.4	Courbes de contrainte différentielle par rapport le raccourcissement axial mesuré par le capteur LVDT externe $q(\varepsilon_{ax, LVDT})$ pour différentes P_c , indiquées sur les courbes; $P_c = 0.35$ MPa (E0.35-04T); $P_c = 0.5$ MPa (E0.5-05T); $P_c = 0.7$ MPa (E0.7-03T); $P_c = 0.8$ MPa (E0.8-10T); $P_c = 0.9$ MPa (E0.9-0.2T).	129
5.5	Contraintes axiales au pic $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ versus la pression de confinement P_c	130
5.6	Photographie montrant l'angle de la fracture avec l'augmentation de la pression de confinement P_c ; $P_c = 0.25 - 0.6$ MPa (E0.25-02T); $P_c = 0.7$ MPa (E0.7-03T); $P_c = 0.8$ MPa (E0.8-08T); $P_c = 0.9$ MPa (E0.9-02T).	130
5.7	Évolution de l'angle de la fracture Ψ avec la pression de confinement P_c dans les essais en extension : (1) les essais normaux (sans cale); (2) les essais avec une ou des cales collées au centre de l'échantillon.	131
5.8	Fractures générées dans les essais en extension à $P_c = 0.8$ MPa : (a) fracture horizontale (essai E0.8-10T, avec cale); (b) fractures obliques (essai E0.8-06T, sans cale).	132

5.9	Surfaces des fractures orthogonales σ_3 générées à différentes P_c : (a) essai E0.25-02T ; (b) essai E0.5-02T ; (c) essai E0.7-02T ; (d) essai E0.7-06T ; (e) essai E0.8-09T ; (f) essai E0.8-10T ; (g) essai E0.9-02T. Point bleu indique le point d'initiation de la fracture.	133
5.10	Surfaces des fractures dans l'essai à $P_c = 0.8$ MPa (a) essai E0.8-08T qui comprend (b) la surface plumuse de la fracture faible inclinée et (c) la surface pulvérisée de la fracture oblique. Le point bleu indique le point d'initiation de la fracture.	133
5.11	Essai E0.8-10T. Courbes contrainte différentielle - déformation axiale $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$: (1) $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est calculée en divisant la valeur de déplacement mesuré par le capteur LVDT externe par la hauteur initiale de l'échantillon ; (2) $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est la moyenne des déformations dans la zone de 30 mm de hauteur ; (3) dans les deux zone de 30×30 pixels hors de la zone de fracture. Les points A1, A2, A3 sont les mêmes points au même stade de chargement, les points B1, B2, B3 au moment de rupture.	134
5.12	Essai E0.8-10T. (a) Un exemple d'une image enregistrée au cours de l'essai ayant la résolution 1 pixel $\approx 31.2\mu\text{m}$, zone d'analyse en jaune, grille d'analyse en rouge ; (b) échantillon post-mortem ; (c) carte de déformations axiales accumulées entre les stades correspondant à 0 (initial) et point A1 comme indiqué sur la courbe 1 5.11 ; (d) les déformations au profil central le long de hauteur de l'échantillon.	135
5.13	(a) Échantillon post-mortem de l'essai E0.8-10T ; (b) Carte de déformations axiales accumulées entre l'état initial (point 0) et le moment de rupture (point B1 ou B2, B3 sur les courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ 1, 2, 3, respectivement) ; (c) Carte de déformation axiale au profil central le long de la hauteur de l'échantillon. L'épaisseur de la zone fracturé est d'environ 8 mm. Les deux carrés en rouge de 30×30 pixels sont utilisées pour calculer la déformtion globale.	135
5.14	Courbes de contrainte différentielle par rapport la déformation axiale calculée dans les deux carrés de 30×30 pixels ² (illustrés dans la figure 5.13b) $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ pour différentes P_c , indiquées sur les courbes ; $P_c = 0.35$ MPa (E0.35-04T) ; $P_c = 0.5$ MPa (E0.5-05T) ; $P_c = 0.7$ MPa (E0.7-03T) ; $P_c = 0.8$ MPa (E0.8-10T).	136
5.15	Essai E0.7-04T. (b) Surface plumose de la fracture produit dans la partie amincie de l'échantillon en forme de bobine (c) ; (d) (e) Cartes de déformations axiales accumulées et des déformations dans le profil central le long de la hauteur de l'échantillon obtenues à partir de DIC entre les points 0 (au début d'essai) et n ($0 - n$), où $n = 1, 2, \dots, 6$ sont indiqués sur la courbe contrainte-déformation $\sigma_{ax}(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (a).	138
5.16	Essai E0.8-10T. (a) Échantillon mise en place avant le test. La cale est collée à l'extérieur de la membrane à droite ; (b) Échantillon post-mortem avec la fracture horizontale ; (d) Surface plumose de la fracture. Le point d'initiation de fracture coïncide avec l'endroit du collage de la cale ; (e) (f) Cartes de déformations axiales accumulées et des déformations dans le profil central le long de la hauteur de l'échantillon obtenues à partir de DIC entre les points 0 (au début d'essai) et n ($0 - n$), où $n = 1, 2, \dots, 6$ sont indiqués sur la courbe contrainte-déformation $\sigma_{ax}(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (c).	139
5.17	Contraintes axiales au pic $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ versus la pression de confinement P_c dans les essais en extension réalisés avec le matériau GRAM1 : (1) les résultats obtenus par Nguyen, (2009) [98] ; (2) nos résultats.	140

Introduction

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier les mécanismes de rupture des roches sous différentes conditions de chargement. La compréhension de ces processus est importante d'un point de vue fondamental mais aussi du fait des nombreuses applications en génie civil, l'industrie pétrolière ou la prédiction des risques naturels tels que les glissements de terrain ou le fonctionnement des failles sismiques. La rupture des géomatériaux commence par l'apparition de bandes de localisation de déformation (bandes d'extension, bandes de cisaillement et bandes de compaction), mais l'initiation et l'évolution de ces objets demeurent mal comprises. Pour détecter le début de la déformation, y compris le moment et le lieu de l'initiation, il faut accéder au champ de déplacement complet à haute résolution. Dans la plupart des essais triaxiaux réalisés sur des roches naturelles, l'échantillon se trouve dans une cellule de pression en acier, la mesure du champ de déplacement est donc très difficile. Il est en effet nécessaire d'utiliser des techniques de tomographie rayons X (Lenoir et al. (2007) [85], Bésuelle et al. (2010) [25]) ou d'observer la déformation de l'échantillon post-mortem. L'utilisation d'un matériau synthétique analogue de roche mais moins résistant permet de contourner cette difficulté. Ainsi, le matériau granulaire GRAM1 se comportant comme des roches dures, mais avec une résistance deux ordres de grandeur plus faible a été développé au laboratoire Géoazur (Nguyen et al. (2011) [99], Mas et Chemenda (2015) [92]). Ce matériau permet d'utiliser des cellules de confinement partiellement transparente et ainsi d'observer directement l'échantillon pendant le chargement. De ce fait, la technique de corrélation d'images bidimensionnelles a été appliquée sur des séquences d'images de la surface d'échantillons de GRAM1 lors d'essais axisymétriques. La corrélation d'images permet de déduire les champs complets de déplacement, les champs de déformation, et les vitesses de déformation en surface de l'échantillon à différents stades de chargement.

Le présent manuscrit décrivant ce travail est divisé en 5 chapitres. Le premier chapitre correspond à une synthèse bibliographique depuis la présentation des objets géologiques jusqu'aux principaux résultats expérimentaux sur la localisation de déformation. La théorie de bifurcation et les résultats de modèles numériques sont également discutés succinctement.

Le deuxième chapitre présente d'abord un aperçu bibliographique des principales techniques expérimentales utilisées pour caractériser la localisation de déformation. Les méthodes de mesure du champ de déformation complet sont ensuite présentées. Nous présentons en particulier la technique de corrélation d'images numériques 2D (DIC 2D) et le logiciel de corrélation Sept-D (7D) que nous avons utilisé dans le cadre de cette thèse.

Dans le troisième chapitre, une brève présentation du matériau GRAM1 utilisé dans ce travail ainsi qu'une description des dispositifs expérimentaux sera faite. Ces dispositifs comprennent une nouvelle cellule de confinement avec deux fenêtres transparentes, un nouveau protocole expérimental pour la technique de corrélation d'image et une nouvelle machine de taillage pour préparer les échantillons.

Les deux derniers chapitres représentent l'ensemble des essais réalisés et les résultats les plus significatifs. Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de l'initiation et de l'évolution de la localisation de déformation à la transition fragile-ductile dans les essais en compression. Le cinquième chapitre quant à lui est dédié à l'étude réalisée sur des échantillons en forme de bobine pour les essais en extension.

Chapitre 1

Etat de l'Art

Contents

1.1 Observations de terrain	3
1.1.1 La fracturation	3
1.1.1.1 Les diaclases ou joints	3
1.1.1.2 Morphologie des diaclases : la fractographie	6
1.1.1.3 Conditions d'apparition des diaclases	10
1.1.1.4 Les fractures cisailantes	12
1.1.2 Localisation de la déformation	13
1.1.2.1 Bande de cisaillement	16
1.1.2.2 Bande de déformation volumique	20
1.2 Approche expérimentale : Influence de la pression de confinement sur la localisation de déformation dans la roche	26
1.2.1 Les résultats des essais en compression	26
1.2.2 Les résultats des essais en extension	30
1.2.3 Utilisation d'un matériau synthétique analogue de roches	33
1.3 Théorie de la bifurcation	39
1.3.1 Théorie de bifurcation pour une mono-bande	40
1.3.1.1 Les équations constitutives :	41
1.3.1.2 Le module d'écroissage critique et l'orientation de la bande de cisaillement :	42
1.3.2 Formation de réseau de bandes/fracture	44
1.4 Modèles numériques	46

1.1 Observations de terrain

1.1.1 La fracturation

1.1.1.1 Les diaclases ou joints

Les diaclases sont les fractures les plus fréquentes dans les roches de la croûte supérieure. Elles transforment un massif à l'origine monolithique en une juxtaposition de blocs. Elles apparaissent souvent en réseau développé à l'échelle régionale (cf. Figure 1.1) et présentent une surface morphologique distinctive appelée *plumose*. Cette surface morphologique permet d'avoir des indications sur l'initiation, la propagation et l'arrêt de la rupture (Kulander et al., (1979)

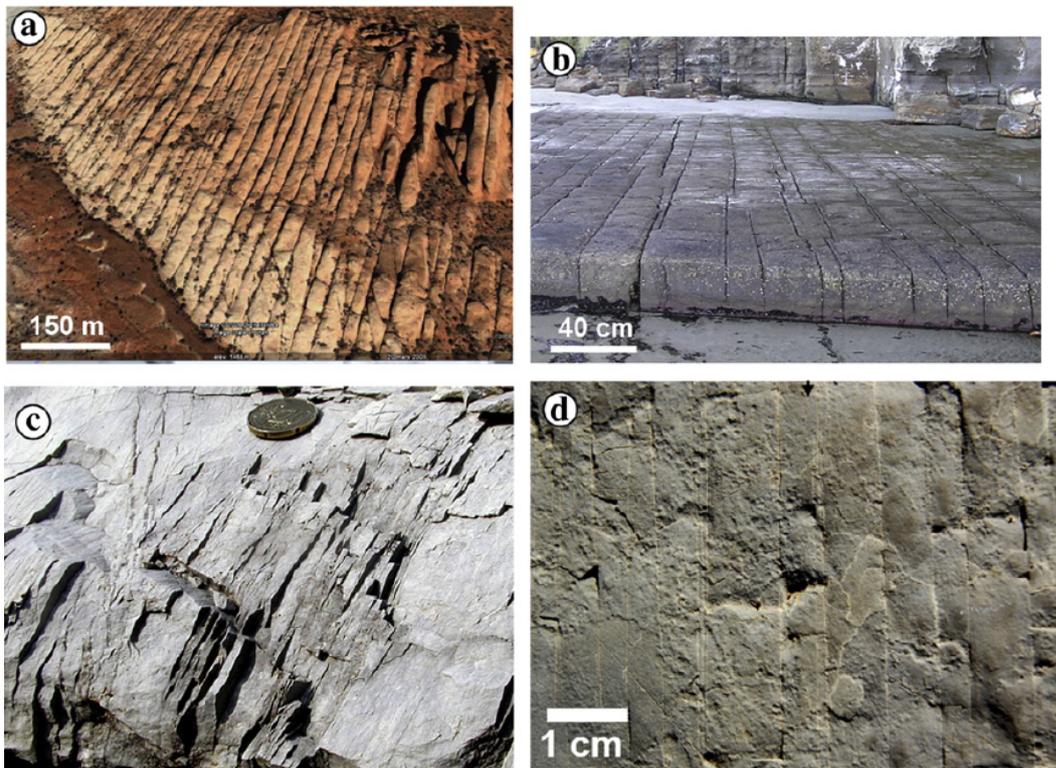


FIGURE 1.1 – Exemples de diaclases sur terrain à différentes échelles. (a) Le grès Entrada d'âge Jurassique (Vallée de sel Anticline). L'épaisseur de couche est d'environ 20 m. (b) Une couche de grès Permien, Eaglehawk Neck (Tasmania). (c) Calcaire marneux d'Éocène inférieur, Pyrénées espagnoles, zone Baga. L'épaisseur de la couche est de 30 cm. L'espacement moyen entre les diaclases est de quelques mm. (d) Diaclases très fines dans une couche de la mudstone Jurassique de 45 cm d'épaisseur, l'affleurement Matelles, Languedoc, Sud de la France, cité par Jorand (2012) ([76]).

[80]).

Selon la définition de Bles and Feuga (1981) ([22]), les diaclases se représentent comme des discontinuités dont les lèvres sont jointives et ne présentent aucune trace de mouvement relatif cisailant. Dû à l'absence de mouvement cisailant, on peut attribuer aux diaclases un mode de propagation en ouverture (mode I). Cependant, la définition de Bles and Feuga (1981) n'implique pas proprement une ouverture puisque les surfaces des blocs de diaclases sont en contact.

Le terme "**joint**" est aussi fréquemment utilisé pour désigner les diaclases mais sa définition est beaucoup plus large. Il comprend les diaclases, les microfailles de grande extension, les fentes de tension et même les joints de stratification, les clivages ou la schistosité (Whitten & Brooks (1972) ([161]), tiré de Rives (1992) ([126])).

Les diaclases peuvent être distinguées en deux types : les diaclases "tectoniques" et les diaclases de décompression (Jorand (2007) [75]), en fonction de leur modalité d'apparition. Les diaclases "tectoniques" sont les diaclases les plus courantes. Ces diaclases s'orientent perpendiculairement aux strates et sont réparties sur l'ensemble d'une région. Les diaclases de décompression (aussi dites de relaxation) sont plus rares et sont d'orientation variables. Elles apparaissent suite à une réduction locale des contraintes induite par l'érosion du relief sus-jacent ou un relâchement des contraintes internes accumulées en profondeur par la roche lorsque celle-ci remonte près de la surface.

— *Les diaclases "tectoniques"*

Généralement les diaclases sont causées par une contrainte tectonique extensive. Elles se forment lorsque la contrainte de traction est supérieure à la résistance de la roche. L'extension verticale de la diaclase peut dépendre de l'épaisseur des strates, des propriétés mécaniques des couches limitrophes et de la nature du contact à l'interface entre les bancs. La figure 1.2A présente un exemple de diaclases au sein d'une strate calcaire comprise entre deux couches marneuses. Ces diaclases sont confinées à l'épaisseur de cette strate. Au contraire, nous pouvons aussi observer les diaclases sur la figure 1.2B qui traversent plusieurs couches calcaires. Un fort couplage entre des strates de nature similaires semble donc être propice à cette propagation verticale.

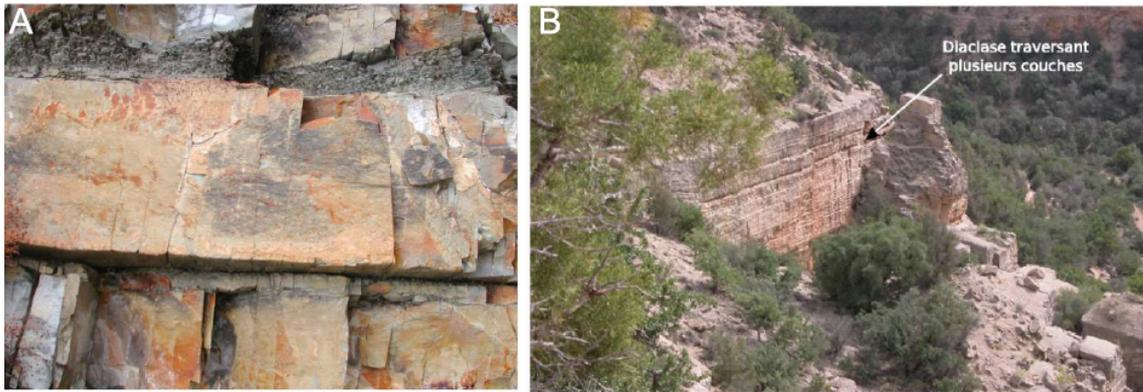


FIGURE 1.2 – A) Diaclases dans une strate calco-marneuse limitée par des couches de marnes (Eocène, col de Nice, Alpes Maritimes); B) Diaclases d'extension verticale plurimétrique traversant plusieurs couches calcaire d'épaisseur décimétriques (Vallée Tarroudent, Maroc) (Jorand (2007) [75]).

La longueur d'une diaclase varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres. La mesure de la longueur d'une diaclase n'est possible que si elle affleure bien en surface de banc. Cependant, il est difficile d'analyser cette trace en surface et d'étudier la distribution de l'ouverture le long d'une diaclase.

— *Les diaclases de décompression*

Les diaclases de décompression ou de relaxation définies par Engelder (1985) ([53]) se forment durant l'exhumation des roches (cf. Figure 1.3). Lorsque les roches en profondeur ont été soumises à une compression, elles ont enregistré des contraintes résiduelles. À la remontée, près de la surface, les contraintes résiduelles sont relâchées et conduisent à la formation de fractures perpendiculaires à la compression minimale (σ_3) subie en profondeur.

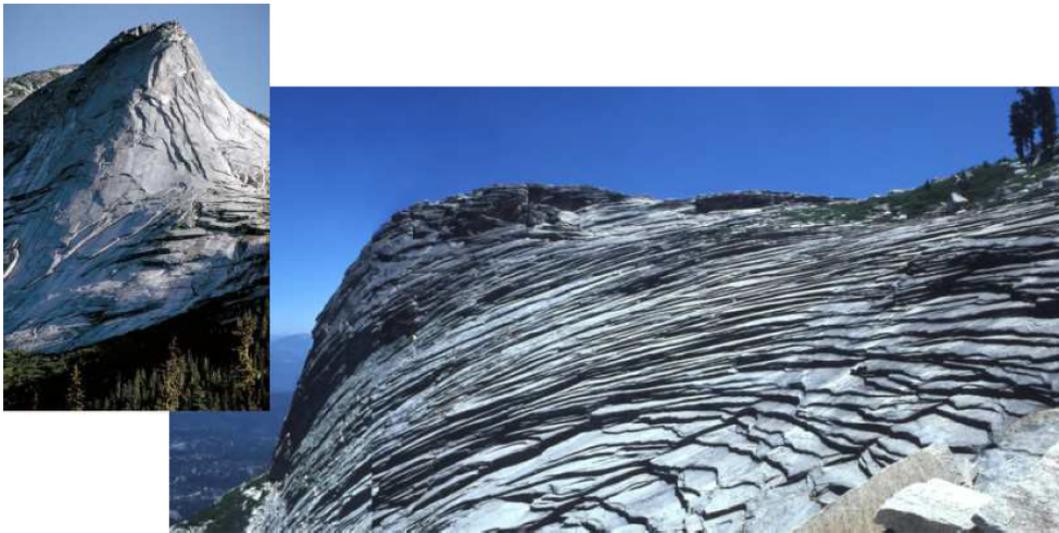


FIGURE 1.3 – Diaclases continues et faiblement espacées observées sur des flancs du granite du Yosémite parc ([75]).

1.1.1.2 Morphologie des diaclases : la fractographie

Le terme "*fractography*" a été utilisé pour la première fois par Zapffe and Clogg (1945) ([165]) comme un nouvel outil pour étudier les fractures dans le métal. L'objectif était de pouvoir interpréter l'histoire dynamique d'une fracture depuis son origine jusqu'à son arrêt.

La figure 1.4 présente une surface représentative de diaclase avec les figures fractographiques associées. Ces dernières constituent des caractéristiques importantes des diaclases car elles permettent de connaître les conditions de développement de ces fractures (Bahat (1991) [10]).

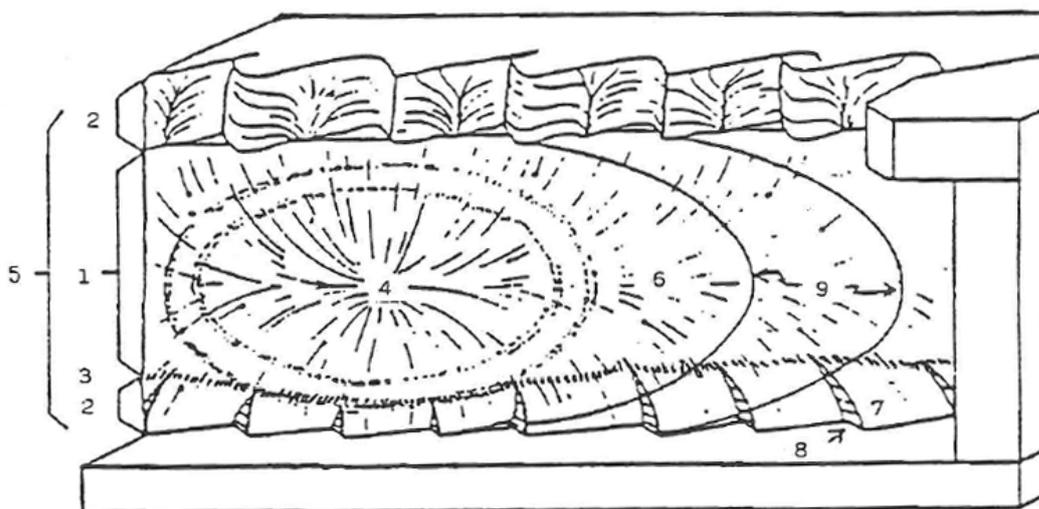


FIGURE 1.4 – Surface de diaclase dans une strate et figures fractographiques schématiquement associées. Les domaines du plan de diaclases sont : 1 - le miroir (*main joint face*); 2 - les franges (*fringe zone, border*), abruptes en haut de la figure, avec passage graduel des structures plumeuses aux hachures en bas; 3 - zone de transition (*mist zone, shoulder*). Les principales structures sont : 4 - la zone d'initiation (*origin*); 5 - la structure plumeuse (*plumose structure*); 6 - l'axe de la structure plumeuse; 7 - les hachures (*twist hackles*); 8 - les "cross-fractures"; 9 - les structures conchoïdales (*arrest lines, rib marks*) (Rives (1992) ([126]), modifié d'après Kulander et al (1990) ([81]).

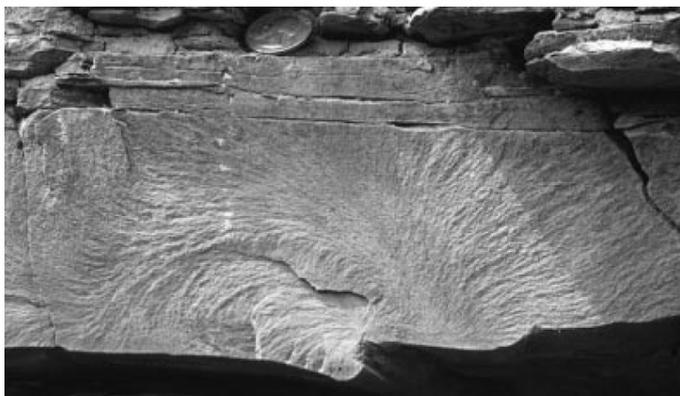


FIGURE 1.5 – Exemple d'un point d'initiation observé dans les strates de siltite (*siltstone*) de la Formation Ithaca, Plateau Appalachian, New York. Le point d'initiation est localisé au coin du creux (*groove cast*), où la limite de la couche basale change de l'orientation horizontale à verticale (McConaughy et Engelder, (2001) [94]).



FIGURE 1.6 – Exemple d'un point d'initiation observé dans une trace de fossile. Le point d'initiation est localisé sur le côté à gauche du terrier. Le terrier se distingue de la forme de la couche (*bedform*) par sa section elliptique et les sédiments argileux contenus dans ce terrier (McConaughy et Engelder, (2001) [94]).

Sur un plan de diaclase (cf. Figure 1.4), on peut distinguer deux domaines : le miroir au centre (*mirror ou main joint face*) (1), et les franges périphériques (*fringe zone ou border*) (2) séparés par une zone de transition (*mist zone ou shoulder*) (3).

Les différentes structures observables sur les plans de diaclases sont présentées ci-dessous :

- **La zone d'initiation** de la fracture (*origin*) (4), qui correspond à une hétérogénéité, est souvent associée à une cavité, un fossile ou une inclusion minérale. Il est souvent observé en un unique point d'initiation, PI, sur une surface continue où le relief est maximal. La position du PI¹ par rapport au soubassement (*bed*) et aussi le type de PI sont associés à structures sédimentaires ([94]). Les figures 1.5 et 1.6 montrent, comme des exemples, deux types de PI observés par McConaughy et Engelder (2001) ([94]) dans les strates de siltite (*siltstone*) de la Formation Ithaca au Plateau Appalachian, New York.
- **Les structures plumeuses** (*plume, plumose structures, feather structures, hackles bars, striations, herringbones, chevrons*) (5) correspondent à de très fines ondulations du plan, visibles en éclairage rasant. Les structures plumeuses ont plusieurs formes et peuvent se classer en plusieurs types : les droites (Straight ou S-type plume) (cf. Figure 1.7A), les courbes (curving ou C-type plume) (cf. Figure 1.7B) et les rythmiques (ryth-

1. point d'initiation

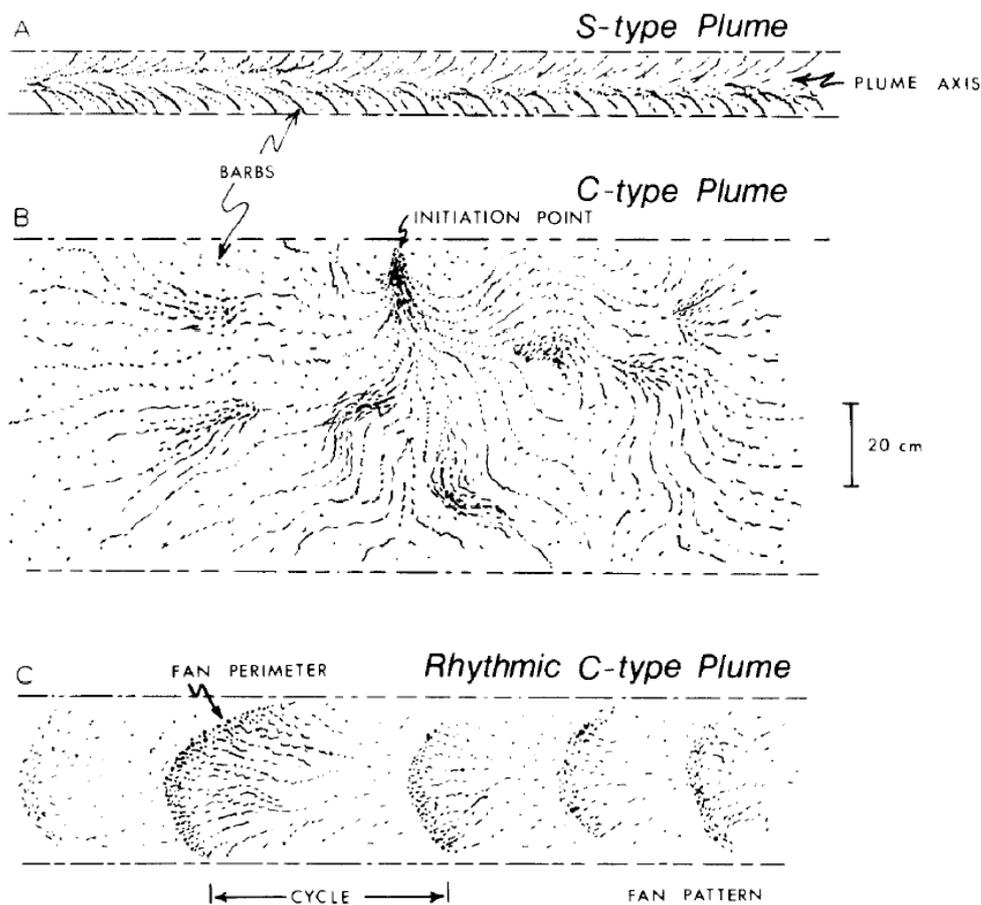


FIGURE 1.7 – Différents types de structures plumeuses : A. droites, B. courbes, C. rythmiques (Bahat et Engelder, (1984) [11]).

mic C-type plume) (cf. Figure 1.7C) (Bahat et Engelder (1984) [11], Rives (1992) [126]).

- Le type droite (S-type plume) a un axe linéaire parallèle à la stratification (*bedding*). La plume est contenue au sein d'une couche individuelle, elle se prolonge horizontalement sur une distance supérieure à la distance verticale (cf. Figure 1.8A). Ses barbes (*barbs*) atteignent l'extérieur à partir de l'axe dans le plan de diaclase vers les limites hautes et bases de la couche.
- Le type courbe (C-type plume) a généralement un axe qui se divise en plusieurs branches. Ces branches ensuite à leur tour peuvent se diviser. Les barbes ont tendance à être plus irrégulière que dans la plume de type-S. De plus, le rapport d'une longueur horizontale et hauteur est inférieur à celui de la plume droite.
- Le type rythmique (rythmic C-type plume) est une variante du type courbe. Ce type se compose d'une série de barbes disposées en éventail de façon répétée le long d'une surface de diaclase. Chaque motif en éventail augmente progressivement en intensité jusqu'à atteindre un périmètre convexe, où le motif en éventail disparaît. Le périmètre est convexe vers la direction de propagation, et signifie un endroit d'arrêt sur la surface de rupture.

Si l'on trace une perpendiculaire en tous points aux ondulations, on obtient une courbe représentant le front de fissure à un instant (cf. Figure 1.8B).

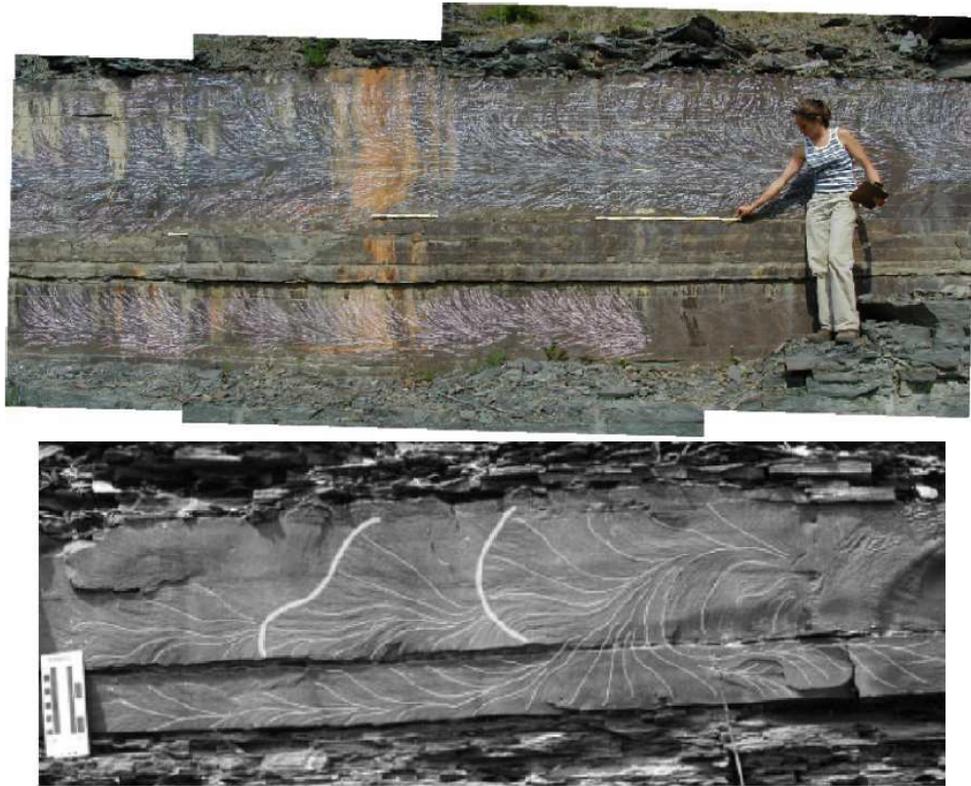


FIGURE 1.8 – Surfaces de diaclase avec des figures fractographiques : A. Diaclase de longueur horizontale plurimétrique. Les structures plumoseuses en relief ont été mises en évidence grâce à de la craie. Série clastique de la formation Ithaca (dévonien, New York, USA) (Photo T. Engelder) (cité par Jorand (2007) ([75])). B. Diaclase composite avec son interprétation en terme de propagation observée dans les siltites (*siltstones*) (Ithaca, New York, USA). Les traits fins retracent la géométrie des plumoses, les traits épais, perpendiculaire aux plumoses, représente la position du front de la rupture à un restant donné (McConaughy et Engelder, (2001) [94]).

- **Les structures conchoïdales** (*arrest lines, rib marks, augen marks, undulations*) (9) (cf. Figure 1.9A) sont des rides courbes qui correspondent à de légers changements dans l'orientation de la surface de rupture. Ces structures sont concaves vers l'origine de la diaclase et sont perpendiculaires en tous points aux ondulations des structures plumoseuses (Rives (1992) [126]).
- **Les hachures** (*twist hackles* (Kulander et al. (1990) [81]), *hackle marks, fringe joints, F-joints* (Ramsey et Huber, (1987) [119]), *river lines, dilatant en échelons cracks* (Pollard et al., (1982) [114])) (7) sont des fractures disposées à la périphérie des plans de rupture où l'on passe de manière continue depuis le plan principal à une série de plans disposés en échelons.

Selon Kulander et al. (1990) ([81]), l'hachure se forme à toute échelle lorsque le front de fracture majeur (*advancing fracture front*) rencontre des orientations de contraintes superposées qui changent brusquement en direction et sont obliques par rapport au plan contenant le front de la fracture. Lorsque cela se produit, l'ensemble du front ne peut pas répondre par une rotation instantanée pour être perpendiculaire à la nouvelle direction de tension principale. Au lieu de cela, le front de fracture se sépare en des hachures en échelon qui continuent du front de fracture majeure. Chaque hachure ensuite se courbe latéralement pour se joindre avec son plus proche voisin (cf. Figure 1.9).

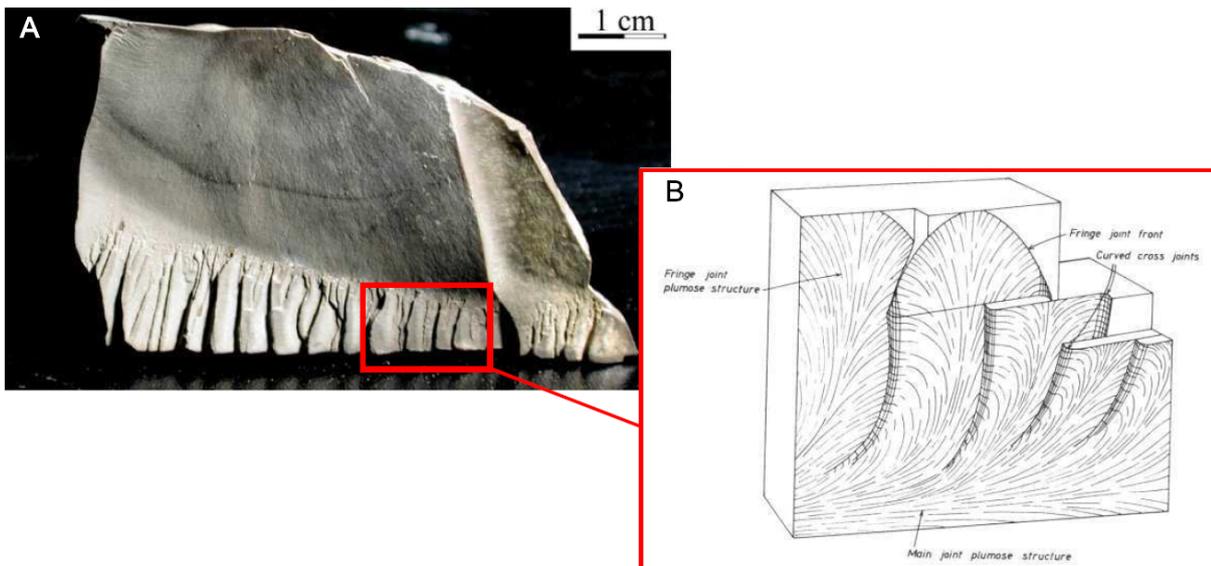


FIGURE 1.9 – A. Photo d’une surface de diaclase dans calcaire à grains fin au bassin de Lodève montre les structures conchoïdales et les hachures en limite de banc (Photo C. Jorand) ; B. Diagramme représente les relations générales entre la géométrie du plan principal de la diaclase, les fractures en échelon (hachures) et les ruptures de liaisons (Ramsay & Lisle (2000) ([120])), cité par Jorand (2007) ([75]).

- **Les fractures orthogonales aux hachures** (*cross-fractures* ou *c-fractures*) (8) sont des fractures très petites qui relient deux hachures successives (cf. Figure 1.9B).

Cependant, ces figures ne sont pas toujours observables. Elles dépendent du type de roche, de la taille des grains, de la porosité, de l’épaisseur, de la famille de diaclases. Les figures fractographiques sont fréquentes dans les roches à grains fins telles que des calcaires micritiques ou des grès fins.

1.1.1.3 Conditions d’apparition des diaclases

Les diaclases sont des fractures qui sont interprétées comme des fractures ne formant en mode I (mode d’ouverture). Il est donc nécessaire que la **traction** (réelles ou effectives) s’exerce sur les lèvres de la fissure pour permettre sa propagation. Les observations de terrain (Hancock et Engelder, (1989) [68]) ou expérimentales (Petit et Barquins, (1988) [112]) indiquent que les diaclases se sont propagées parallèlement à un plan de contraintes principales suivant une trajectoire perpendiculaire à la contrainte principale mineure (σ_3). La question est de savoir quels mécanismes peuvent générer l’ouverture des diaclases et dans quelles conditions géologiques. Ces fractures apparaissent sous un régime tectonique extensif.

En effet, étant donné que les diaclases sont des fractures s’initiant en ouverture, il faut admettre que des contraintes en traction ont agi sur les roches au moment de la rupture. Les contraintes extensives peuvent être générées lors du plissement local des couches ou du régime tectonique extensif à grande échelle.

Dans le premier cas, la traction est générée localement dans une zone d’extrados d’un pli sous un régime de contrainte globalement compressif. Cependant, ce phénomène ne peut pas expliquer la présence de réseaux plurimétriques dans la zones tabulaires ou plissées à très grand rayon de courbure.

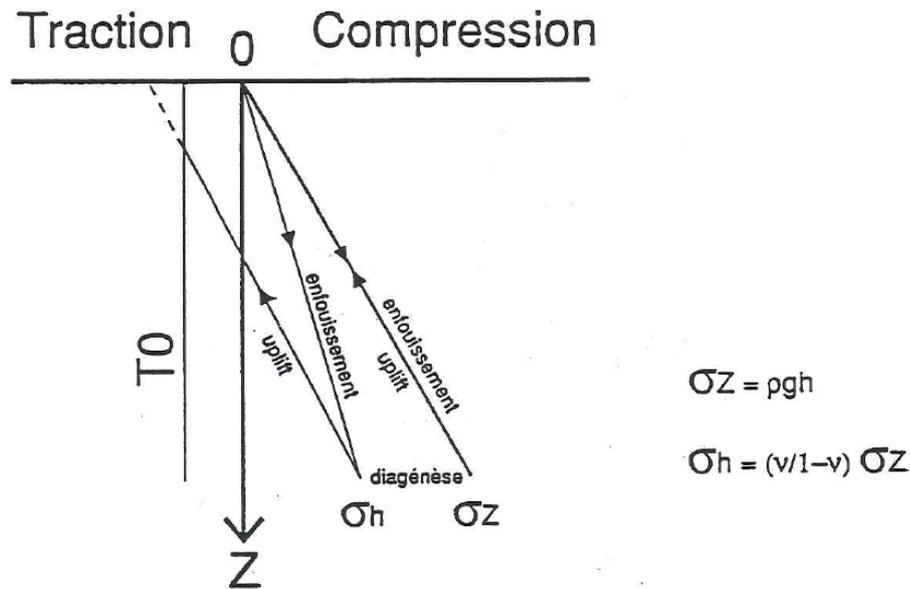


FIGURE 1.10 – Évolution des contraintes dans un sédiment en fonction de la profondeur au cours d'un cycle E.D.D dans un modèle élastique en l'absence de contrainte tectonique, cité par Rives (1992) ([126]).

Dans le deuxième cas, l'extension est répartie à l'échelle régionale avec des variations locales en direction et intensité causées par la préexistence et la réaction d'accidents tectoniques majeurs. Néanmoins, l'intensité de la contrainte extensive diminue avec la profondeur et l'augmentation de la pression lithostatique. Les contraintes principales sont en très grande majorité compressives lorsque l'on ne se situe plus en subsurface. Les mesures de contraintes in situ de Paquin et Froidevaux (1980) ([64]) dans des couches épaisses de calcaire du bassin Parisien et des régions voisines montrent que la traction vraie (la traction liée un allongement des terrains) n'existe que très superficiellement dans des zones géologiquement particulières. Cela signifie que des tractions vraies ne sont pas l'unique phénomène responsable de l'apparition des réseaux de diaclases partout à la surface de la terre et en profondeur.

Une traction induite par une variation des propriétés mécanique de la roche durant son enfouissement

Un modèle proposé par Price (1959) ([117]), repris par Voight et St Pierre (1974) ([159]), propose que l'apparition d'une traction horizontale dans un bassin sédimentaire puisse se produire lors de l'exhumation en l'absence de déplacement latéral, après que la roche ait subi une diagenèse en profondeur (cycle Enfouissement - Diagenèse - Dénudation ou cycle E.D.D). Pendant la diagenèse, la roche est indurée sous la pression d'enfouissement. Les propriétés élastiques de la roche varient (augmentation du module d'Young E et diminution du coefficient de Poisson ν). Il en résulte que la contrainte horizontale mineure σ_h ² lors de la remontée peut passer dans le domaine en traction voire dépasser le seuil de rupture de la roche T_o (cf. Figure 1.10). En se basant sur cette hypothèse, Hancock and Engelder (1989) ([68]) en ont déduit que la profondeur maximale d'enfouissement pour atteindre la rupture selon ce mécanisme est d'environ 1 km.

2. $\sigma_h = [\nu/(1-\nu)] \cdot \sigma_z + \alpha \cdot E \cdot \Delta T / (1-\nu)$ dans une hypothèse purement élastique et en déformation uniaxiale, cité par Rives (1992) ([126]). Où : E - module d'Young, ν - coefficient de Poisson, σ_v - contrainte verticale, α - dilatation thermique de la roche (*thermal expansivity*)

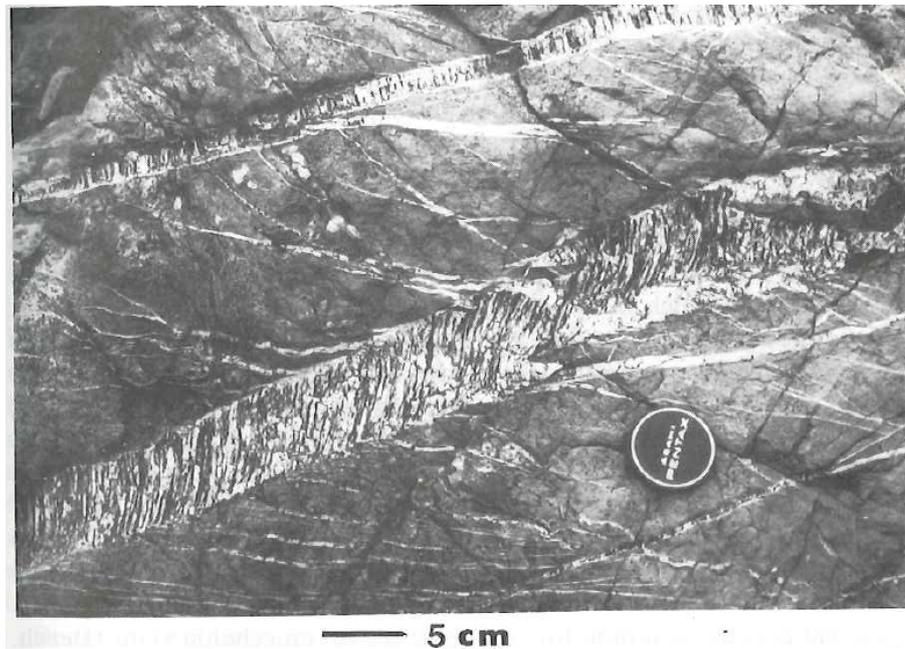


FIGURE 1.11 – Fracture cisailante hybride dans un grès de Tasmanie, Australie. La photo prise par Steve Cox (Atkinson (2015) [4]).

Une traction induite par surpression de fluide

Des diaclases peuvent être causées durant l'enfouissement, en l'absence de toute contrainte tectonique (état lithostatique), par une pression fluide anormale supérieure à la contrainte principale mineure (Engelder (1985) [53]). De telles conditions de pression de pore plus fortes que la pression hydrostatique peuvent se développer lorsque le milieu va devenir imperméable, que la circulation fluide sera réduite et que des fluides peuvent être piégés en profondeur.

1.1.1.4 Les fractures cisailantes

Contrairement aux diaclases, les fractures cisailantes, comme leur nom l'indique, se caractérisent par un mouvement relatif des deux compartiments de la fracture dans le plan de celle-ci.

Les fractures cisailantes peuvent être divisées en plusieurs catégories en fonction de la présence ou non d'un déplacement en ouverture des lèvres de la fissure qui se surimpose au mouvement cisailant. Nous ne montrons ici que deux groupes de fractures :

- Fractures cisailantes hybrides dans le cas où l'ouverture susmentionnée est présente.
- Bandes de cisaillement dans le cas de l'absence d'écartement (ce type des bandes de cisaillement sera présenté en détail dans la partie suivante).

Les fractures hybrides

La figure 1.11 présente un exemple de fracture avec cisaillement-extension observée dans un grès de Tasmanie, Australie (Atkinson (2015) [4]). Au sein des veins, des fibres sont inclinées à la paroi de fracture. On peut supposer que les fibres suivent l'ouverture d'une fissure de mode mixte même que la pointe de la fissure propageait le long du plan soumis à une contrainte de cisaillement. De même, parce que les lèvres de la fissure se tirent lors de la formation, le cataclase

ne se produit pas en cours de décalage de cisaillement. Ces fractures sont aussi connues sous plusieurs dénominations : “*oblique shear fractures*” (Dennis (1987) [46]), “*hybrid shear fracture*”, “*conjugate hybrid joint*”, “*conjugate shear joints*” (Hancock (1985) [67]), “*joints formed in the transitional tensile field*” (Suppe (1985) [143]), “*hybrid shear/dilational fractures*” (Price et Cosgrove, (1990) [118]), “*hybrid members*” or “*hybrid joints*” (Bahat (1991) [10]), “*mixed-mode fractures*” (Twiss et Moores, (1992) [148]), “*fractures that are a combination of extension and shear*” (Davis et Reynolds, (1996) [45]), “*transitional-tensile fractures*” (Marshak et Van der Pluijm, (1997) [90]).

Cependant, les observations sur terrain ne fournissent pas des preuves suffisantes de la présence d’un déplacement à la fois cisailant et en ouverture au moment de la formation de ce type de fracture.

1.1.2 Localisation de la déformation

La rupture des géomatériaux est souvent caractérisée par la formation et la propagation de zones de déformation localisées. Sous chargement mécanique, la déformation d’abord homogène peut bifurquer et évoluer plus ou moins brutalement vers des modes de déformations non - homogènes. Ce phénomène se manifeste par la localisation de déformation dans une zone étroite à l’intérieur de laquelle se concentre des gradients de déplacement, appelée *bande de déformation*. La localisation de bande de déformation est considérée comme l’initiation de la rupture où la structure est discontinue, et se divise en deux surfaces se déplaçant l’une par rapport à l’autre par glissement et/ou écartement. Les phénomènes de localisation étudiés en laboratoire peuvent être liés à des processus à grande échelle, tels que la formation de défauts dans la roche massive, qui peut être produit par des forces tectoniques, ou par des effets anthropiques (génie civil, explorations de pétrole et de gaz).

Les caractéristiques les plus importantes de bandes de déformation (dans le contexte des roches poreuses) sont résumés dans Fossen et al. (2007) ([60]) :

1. La formation et l’évolution d’une bande de déformation implique une quantité importante de rotation et de translation des grains, et ce processus nécessite une certaine quantité de porosité. Si la porosité est trop faible, fractures de tension, stylolites et/ou des surfaces de glissement seront préférentiellement formées.
2. Une bande de déformation ne représente pas une surface de glissement. Cependant, des surfaces de glissement peuvent se former à l’intérieur de bandes ou, plus couramment, à l’intérieur ou le long des zones de déformation de bandes, mais cela représente un stade plus mature dans le développement de la bande de déformation.
3. Des bandes de déformation se produisent hiérarchiquement sous forme de bandes individuelles, des zones de bandes, ou à l’intérieur de zones associées à des surfaces de glissement.
4. Des décalages sur des bandes de déformation individuelles sont rarement supérieures à quelques centimètres, même lorsque les bandes elles-mêmes sont de 100 m de long.
5. Des bandes de déformation s’observent dans la croûte supérieure soumise à différents régimes tectoniques.

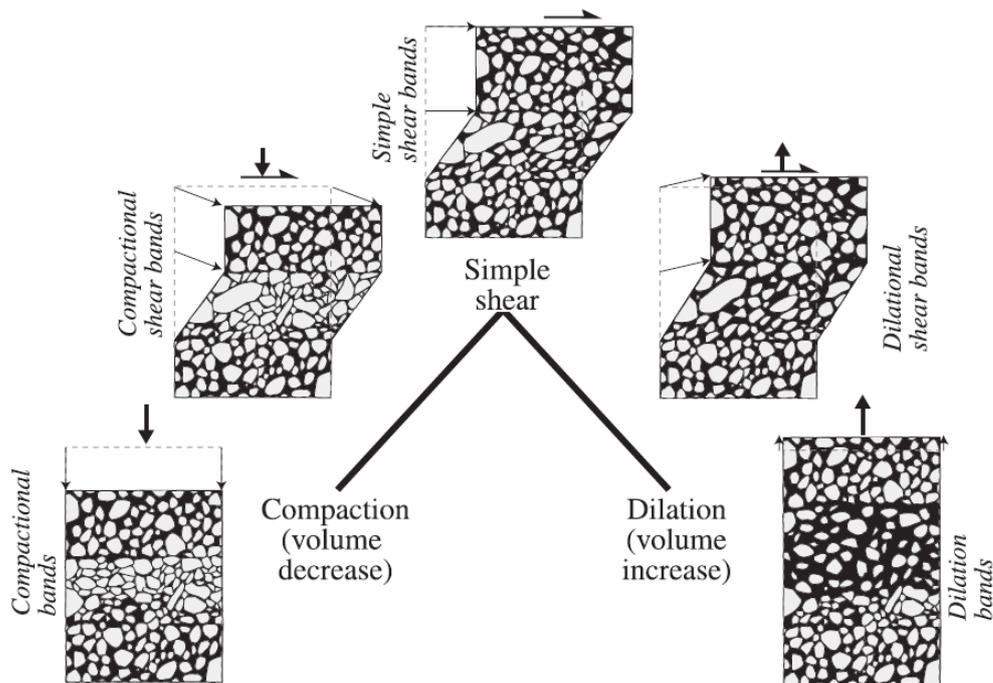


FIGURE 1.12 – Classification cinématique de bandes de déformation (Fossen et al., (2007) [60])

En outre, il y a plusieurs caractéristiques importantes qui distinguent les bandes de déformation des fractures communes (telles que des surfaces de glissement ou des fractures d'extension). En effet la cohésion est perdue ou réduite dans les fractures ordinaires, elle est maintenue ou augmentée dans la plupart des bandes de déformation. De plus, les bandes de déformation engendrent souvent une diminution de la porosité et de la perméabilité, tandis que les surfaces de glissement et des fractures d'extension sont généralement associées à une augmentation de la perméabilité. L'influence du développement des bandes de déformation sur la perméabilité de la roche mère a été analysée par plusieurs études en laboratoire (Zhu et al., (2007) [167], Fortin et al., (2005) [57], Baud et al., (2012) [14]). Les résultats montrent une réduction de la perméabilité lors de la formation des bandes de compaction cataclastique et de cisaillement. Par conséquent, les bandes de déformation présentent un rôle critique dans la gestion de certains réservoirs dans les roches poreuses (Faulkner et al., (2010) [54]).

Selon Aydin et al. (2006) ([7]), les bandes de déformation sont divisées en deux groupes selon leur cinématique : les bandes prédominées par le cisaillement (bandes de cisaillement) et les bandes prédominées par la déformation volumique (bandes de compaction et bandes de dilatante). Ils ([7]) distinguent aussi deux comportements hybrides entre la bande de compaction, bande de cisaillement simple et bande de dilatation, qui sont des bandes de cisaillement-compactantes et des bandes de cisaillement-dilatantes présentant respectivement une diminution ou augmentation du volume (cf. Figure 1.12).

Il est connu que le mécanisme de déformation dépend des conditions internes et externes telles que la minéralogie, la taille des grains, la forme, le tri (*sorting*), la cimentation, la porosité et l'état de contrainte. Différents mécanismes peuvent produire des bandes avec des différents propriétés. Les mécanismes de déformation dominés sont : (1) le fluage granulaire (*granular flow*) (le glissement aux limites de grain et la rotation des grains) ; (2) la cataclase (la fracturation et le broyage ou l'abrasion des grains) ; (3) l'écrasement, l'étalement des phyllosilicats (*phyllosilicate smearing*) ; (4) la dissolution et la cimentation (Fossen et al. (2007) (cf. Figure 1.13) ([60]). Ces différents mécanismes aboutissent à la formation de différent type de bandes :

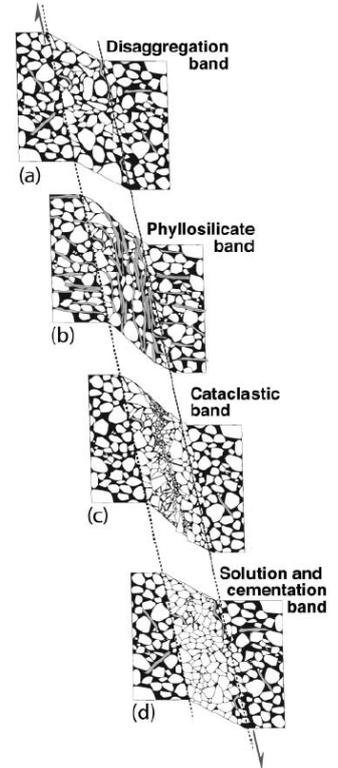


FIGURE 1.13 – Les types principaux de bandes de déformation, basés sur le mécanisme de déformation (Fossen et al., (2007) [60]).

— *Des bandes de désagrégation*

Les bandes de désagrégation (cf. Figure 1.13a) se développent par un cisaillement couplé à une rotation des grains, un glissement aux limites de grain et une cassure des ciments de liaison entre grains. Ce processus est appelé le fluage granulaire (Twiss et Moores, (1992) [148]) ou le fluage de particules (Rawling et Goodwin, (2003) [122]). Les bandes de désagrégation sont généralement trouvés dans les sables et les grès peu consolidés (Du Bernard et al., (2002) [49], Bense et al., (2003) [16]).

— *Des bandes de phyllosilicate*

Des bandes de phyllosilicate (cf. Figure 1.13b) se forment dans le grès dont la teneur en minéraux lamellaires dépasse 10 – 15%. Ce type des bandes peut être considéré comme un type particulier de bande de désagrégation dans laquelle les minéraux lamellaires promeuvent le glissement de frottement aux limites de grain plutôt que la fracturation des grains. En général, les bandes de phyllosilicate peuvent accumuler plus des décalages que d'autres types de bandes de déformation. Ceci est dû à l'étalement des minéraux lamellaires le long des bandes de phyllosilicate qui facilite le glissement.

— *Des bandes cataclastiques*

Les bandes de déformation cataclastiques classiques, décrites par Aydin (1978) ([5]), Aydin et Johnson (1983) ([8]) et Davis (1999) ([44]), sont produites lorsque la rupture des grains est un mécanisme de déformation significatif. Ces bandes comprennent un noyau central cataclastique, généralement dans un volume de roche compactée (cf. Fi-

gure 1.13c). Ce noyau est caractérisé par une grande distribution granulométrique et de nombreux grains dues à la réduction de leur taille. Les grains y sont anguleux et l'espace poreux est quasi-inexistant. Le volume environnant est caractérisé par le compactage et une faible fracturation des grains.

— *La dissolution, cimentation et diagenèse*

La dissolution et la cimentation peuvent se produire préférentiellement le long d'une bande de déformation pendant ou, généralement, après déformation. La dissolution est favorisée par des minéraux argileux aux limites des grains, tandis que la cimentation dans les bandes de déformation est promue par les surfaces hautement réactives formées lors du broyage des grains et/ou du glissement intergranulaire (cf. Figure 1.13d). La cimentation est défavorisée dans le cas les grains de sable recouverts par des minéraux diagénétiques tels que la chlorite (Ehrenberg (1993) [50]) et l'illite (Storvoll et al. (2002) [137]). Ce revêtement empêche la cimentation, sauf s'il est cassé par la fracturation et le glissement pour exposer des surfaces de quartz frais (Hesthammer et al., (2002) [70]).

1.1.2.1 Bande de cisaillement

Sur le terrain, l'aspect macroscopique d'une bande de déformation cisaillement est caractérisée par un décalage décrochant macroscopique le long d'une zone ayant une épaisseur finie. Cet épaisseur est plusieurs ordres de grandeur plus faible que le déplacement cisailant (Aydin et al., (2006) [7]). La plupart de bandes de cisaillement subissent souvent une déformation volumétrique en plus du cisaillement qui peut être compactant ou dilatant.

Le type le plus commun est les bandes de cisaillement-compactantes qui peuvent se définir comme des bandes de cisaillement comportant une quantité de compaction perpendiculaire à la bande. Ce déplacement est clairement inférieure à la composante de cisaillement parallèle à la bande de cisaillement. Un type moins courant est des bandes de compaction cisailantes améliorées (*shear-enhanced compaction bands*), définies par Eichhubl et al. (2010) ([51]) comme des bandes de déformation ayant des quantités de cisaillement et compaction quasi égales. La figure 1.14 présente un exemple de bandes de cisaillement-compactantes formant des motifs régulier dans un carrière de grès du Crétacé supérieur du "Bassin du Sud-Est" (Provence, France) à Orange. Dans ces roches poreuses, les bandes de cisaillement sont caractérisées par une zone d'endommagement macroscopique dont l'épaisseur est millimétrique à centimétrique. Les bandes de cisaillement apparaissent soit en faisceaux de bandes courtes subparallèles et faiblement espacées créant ainsi une bande plus large qui comprend un nombre de petites bandes internes, soit en réseaux de fractures conjugués (figure 1.15).

La nature de la déformation à l'intérieur d'une bande individuelle est contrôlée par les propriétés texturales de la roche. Les grains se déforment de trois manières différentes : (1) la rotation et translation, (2) la dissolution, et (3) une déformation interne dominée par une rupture fragile. Si les contraintes aux contacts des grains excèdent la résistance des grains, les grains se fracturent, aboutissant à une fragmentation et un broyage, associé à la déformation cataclastique. Les pores influencent également la déformation volumique et contrôlent la résistance de la roche. Ils agissent comme des défauts et concentrent les contraintes qui peuvent conduire à la rupture par la croissance et coalescence ou l'effondrement des pores. De plus, la quantité de ciment entre les grains dans la roche joue également un rôle important dans le processus micromécanique au sens de bande. La roche plus cimentée montre une fracturation



FIGURE 1.14 – Réseau des bandes de cisaillement-compactantes dans une carrière de grès de Crétacé supérieur du "Bassin du Sud-Est" (Provence, France) à Orange (cité par Chemenda et al. (2012) [38])

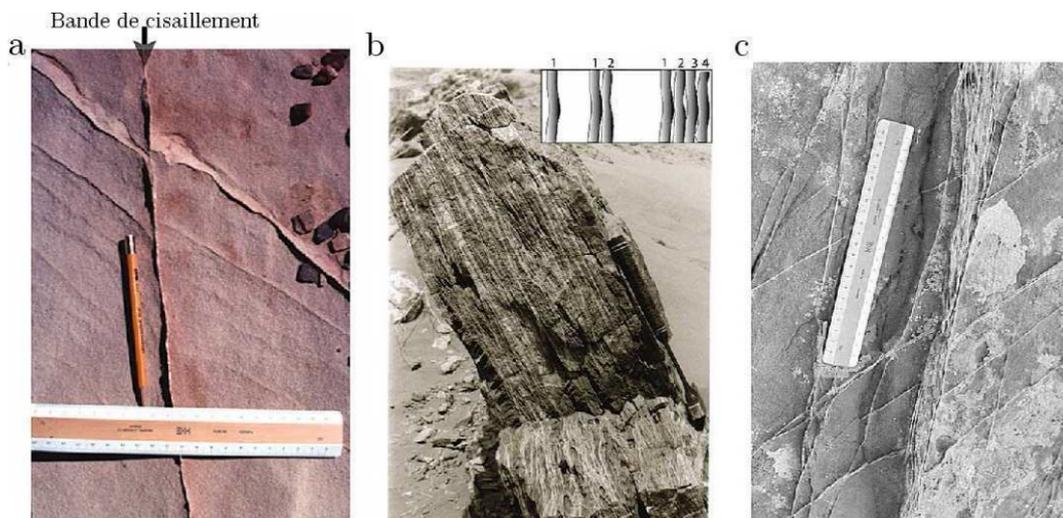


FIGURE 1.15 – Photographies de bandes de cisaillement naturelles dans des grès d'Entrada, San Rafael Desert, Utah. a) Bande de cisaillement de quelques millimètres. b) Zone de bandes de déformation. L'encadré montre la répartition spatiale des bandes les plus développées. c) Réseau conjugué de bandes et de zone de bandes de cisaillement. (Aydin et al., (2006) [7], cité par Jorand (2007) [75]).

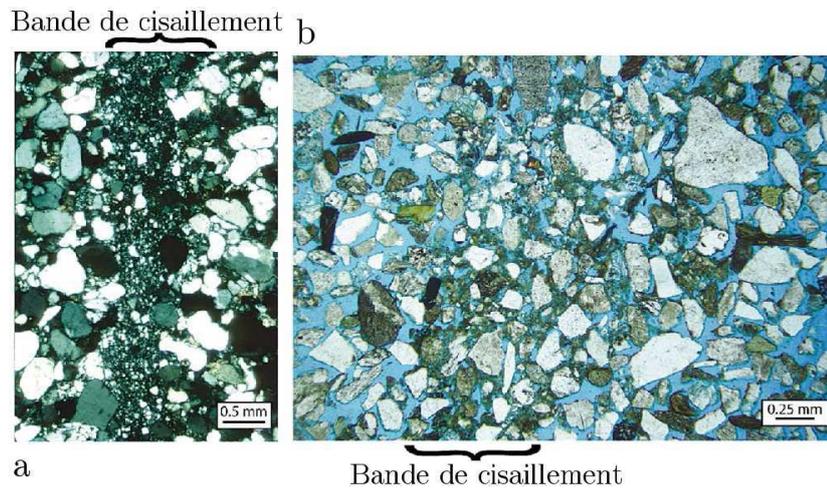


FIGURE 1.16 – Photographies de bande de cisaillement en lames minces observées au microscope optique a) caractérisée par une réduction de taille des grains (zone cataclasée dans les grès d’Entrada, San Rafael, Utah. b) Bande de cisaillement sans cataclase dans les sédiments faiblement consolidés, McKinleyville, northern California. ([7], cité par Jorand (2007) [75]).

des grains et une prédominance à la formation de bandes cataclastiques (figure 1.16a). La roche moins cimentée, en revanche, semble plus propice à la formation de bandes par réorganisation des grains (figure 1.16b).

Les études de Soliva et al. (2013) ([134]) ou de Ballas et al. (2014) ([12]) sur les réseaux des bande de déformation des grès de Provence identifient l’existence de trois différents types de systèmes de bandes de déformation : (1) un réseau de bandes de compaction cisailantes-améliorées (*shear-enhanced compaction bands*) dense et étroitement espacé ; (2) un réseau des bandes de cisaillement compactantes espacé régulièrement et moins dense ; (3) un réseau des bandes cisailantes normales localisées (cf. Figure 1.17). Ses analyses des données sur le terrain montrent que la densité des bandes, leur angles conjuguées, leur rapport cisaillement-compaction³ et la quantité de cataclase au sein des bandes peuvent être exprimés en fonction de la tectonique et des propriétés pétrophysiques. La localisation de la déformation est alors favorisée dans un régime d’extension et se caractérise par des bandes de cisaillement avec un grand rapport cisaillement-compaction et un petit angle entre les bandes conjuguées (cf. Figure 1.18). Au contraire, la distribution de déformation, se caractérisant par des bandes compactante-cisailantes améliorées ou cisailante-compactantes, est favorisée dans un régime compressif. Ces bandes ont alors un faible rapport cisaillement-compaction et un grand angle entre les bandes conjuguées.

3. Le rapport Cisaillement-Compaction est le rapport de déplacement cisailant net $Ds(net)$ et la compaction Dc : $Ds(net)/Dc$. $Ds(net) = Ds - Oc$ est le déplacement de cisaillement mesuré le long des bandes en tant que des décalage de marqueurs stratigraphiques en tenant en compte de la correction de compaction. Dc est estimée à partir d’épaisseur de bande et de la comparaison de la porosité mesurée entre la roche mère et la bande ; (lire Soliva et al. (2013) ([134]) pour l’explication en détail).

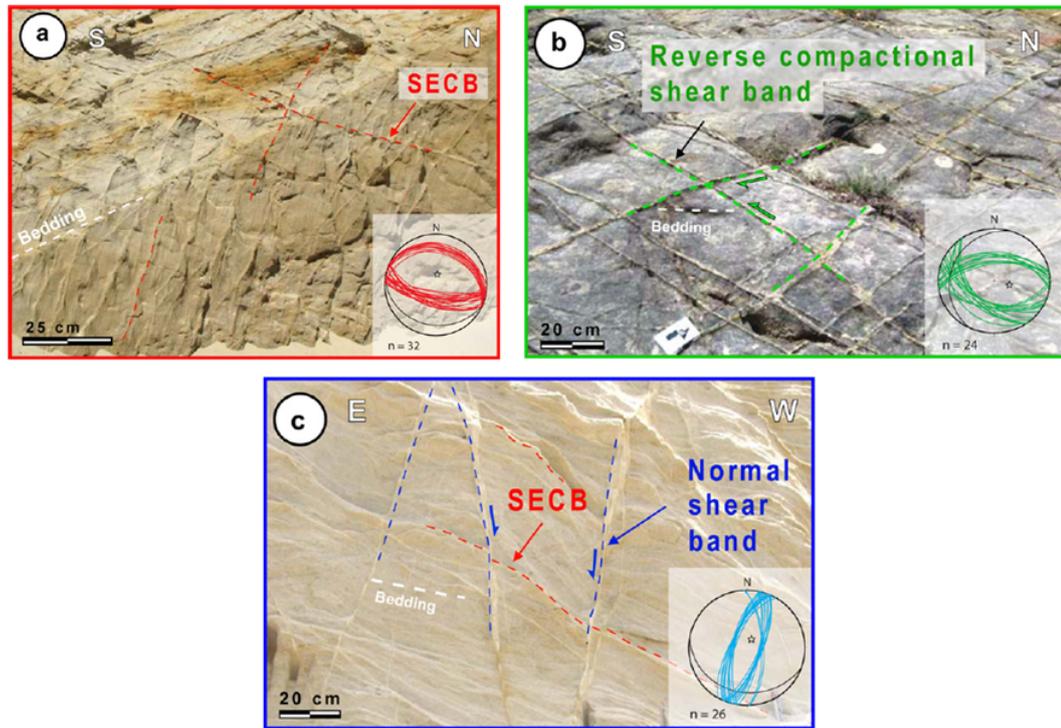


FIGURE 1.17 – Photos d'observations de terrain montrant les trois types de système de bandes de déformation : (a) bandes compactante-cisailantes améliorées (SECB) à Uchaux, (b) bandes cisailante-compactantes (CSB) à Orange, (c) bandes cisailantes normales (SB) à Uchaux (Soliva et al., (2013) [134]).

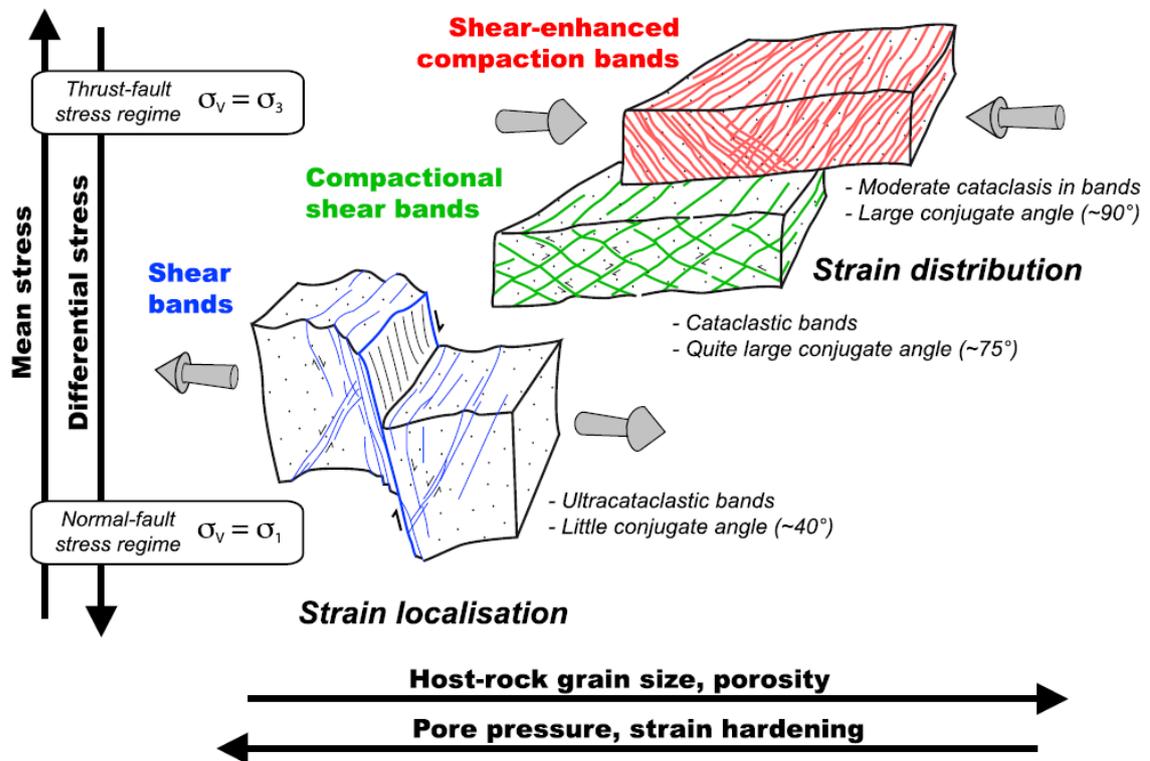


FIGURE 1.18 – Modèle résumé de localisation ou de distribution de déformation comme des bandes dominées par cisaillement ou compaction respectivement, en fonction de la contrainte moyenne et différentielle, de la taille des grains, de la porosité, de la pression interstitielle et de l'écroissage. Les flèches grises indiquent le champ de déformation à distance (Soliva et al., (2013) [134]).

1.1.2.2 Bande de déformation volumique

Lorsque la déformation ne comporte pas de composante cisailante, les bandes obtenues correspondent à de la diminution ou de l'augmentation du volume. On parle alors de *bandes de compaction* et de *bandes de dilatance* respectivement.

Bande de compaction

Le terme "Bande de compaction" a été proposé par Mollema et Antonellini (1996) ([97]) pour décrire "*...une zone tabulaire de déformation localisée ...qui accommodent compaction pure*" dans grès, et qui constituent "*...analogues pour anticracks ...telles que les surfaces de la solution de pression,*" à la suite de l'analyse de Fletcher et Pollard (1981) ([56]). La première découverte de bande de compaction dans des grès d'Aztec de la vallée Fire State Park (Nevada) est rapportée par Hill (1989) ([71]). Des structures similaires ont été constatés par Mollema et Antonellini (1996) ([97]), Schultz (2009) ([131]) et Fossen et al. (2011) ([61]) dans le grès de Navajo (Utah), par Sternlof et al. (2005) ([136]) et Aydin et Ahmadov (2009) ([6]) dans la Vallée de Fire State Park. Suite de la découverte des bandes de compaction sur le terrain, il y a eu de nombre d'études sur ce type de déformation basées sur des approches expérimentales (Baud et al., (2004) [13], Fortin et al., (2006) [58], (2009) [59], Stanchits et al. (2009) [135]), théoriques (Issen et Rudnicki, (2001) [72], Sternlof et al., (2005) [136]), ou de modélisation numérique (Chemenda (2009) [33], Chemenda (2011) [35]).

La figure 1.19 montre une bande de compaction à différentes échelles. Les bandes de compaction se distingue en deux types (Mollema et Antonellini, (1996) [97], Eichhubl et al., (2010) [51]) : (1) les bandes droites, très longues, épaisses (cf. Figure 1.19a,b, Figure 1.20) et (2) les bandes ondulés ou en géométrie en chevron ou zigzag, de faible longueur (cf. Figure 1.21). Les bandes de compaction pures sont suposées se former perpendiculairement à la direction de chargement maximum. Elles présentent une perte de porosité et l'absence de cisaillement accommodé par le réarrangement granulaire, la fissuration de grain, l'indentation et le broyage des grains est limité. La figure 1.19d montre une diminution de la porosité mesurée dans la bande de compaction par rapport à la porosité moyenne de la roche mère. La réduction est d'environ 20% à environ 5%. En ce qui concerne les bandes de compaction naturelles linéaires , leur épaisseur diminue à partir des segments des bandes centrales vers les extrémités (Mollema et Antonellini, (1996) [97], Sternlof et al., (2005) [136]). Ceci suggère que la forme des bandes de compaction et leur mécanisme de propagation sont similaire à celle prédite à partir de la théorie d'anti-fissure sous chargement élastique utilisant la mécanique de la rupture élastique linéaire.

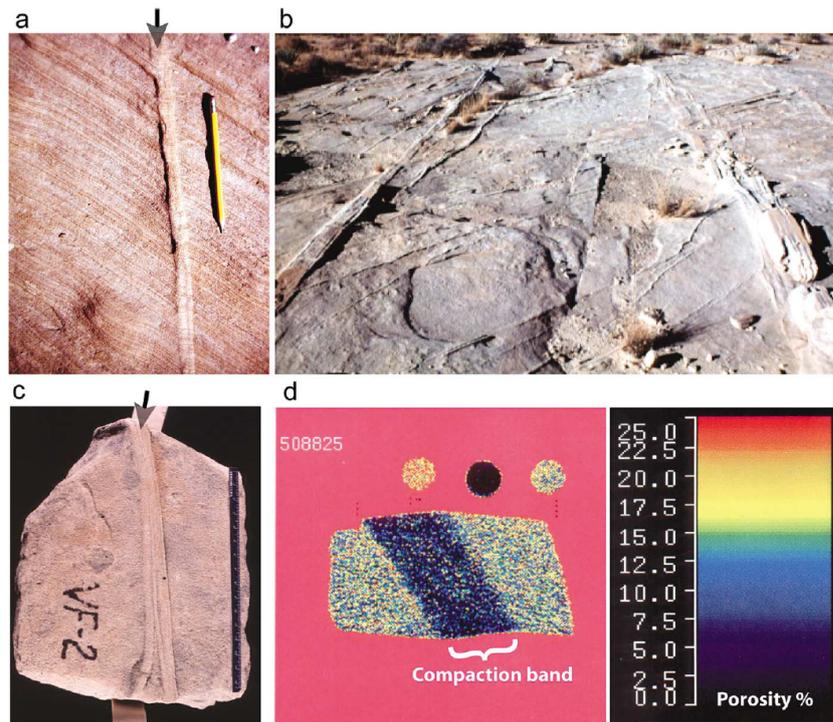


FIGURE 1.19 – Bandes de compaction dans les grès d’Aztec de la vallée Fire State, Nevada. (a) Photo d’une bande de compaction montrant le relief positif par rapport au grès non déformée environnant. Aucun cisaillement macroscopique à travers la bande est détectable. (b) Une photographie montrant un réseau de bandes de compaction au même endroit. (c) Une photographie d’un échantillon avec des bandes de compactions. Échelle à droite en inches. (d) CT scan de l’échantillon à (c) montrant la distribution de porosité inversé de la distribution de densité (Aydin et al., (2006) [7]).



FIGURE 1.20 – Bandes de compaction pures observées dans le grès de Navajo, Utah par Fossen et al. (2011) ([61]). Photo montrant la variation de la densité des bandes de compaction le long l’écoulement du grain interstrates.

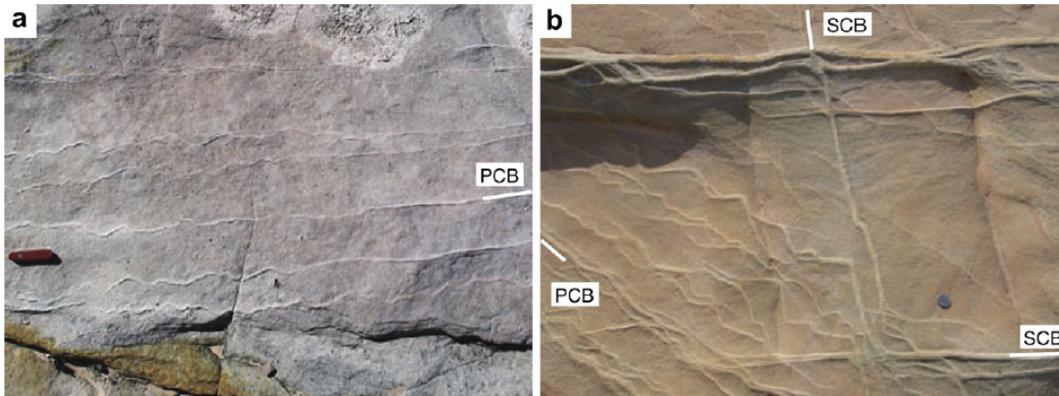


FIGURE 1.21 – (a). Bandes de compaction pures (*Pure compaction bands - PCB*) avec la caractéristique de trace ondulée. Le couteau de poche pour l'échelle. (b). Bandes de compaction en motif de chevron à gauche et bandes de compaction cisailantes-améliorées à droite. Bandes de compaction pures à chevron sont avec/continuent comme les bandes de compaction cisailantes-améliorées (*Shear-enhanced compaction bands - SCB*) planaires. Bandes de compaction pures et bandes de compaction cisailantes-améliorées observées dans le grès d'Aztec à la vallée de Fire, Nevada par Eichhubl et al. (2010) ([51]).

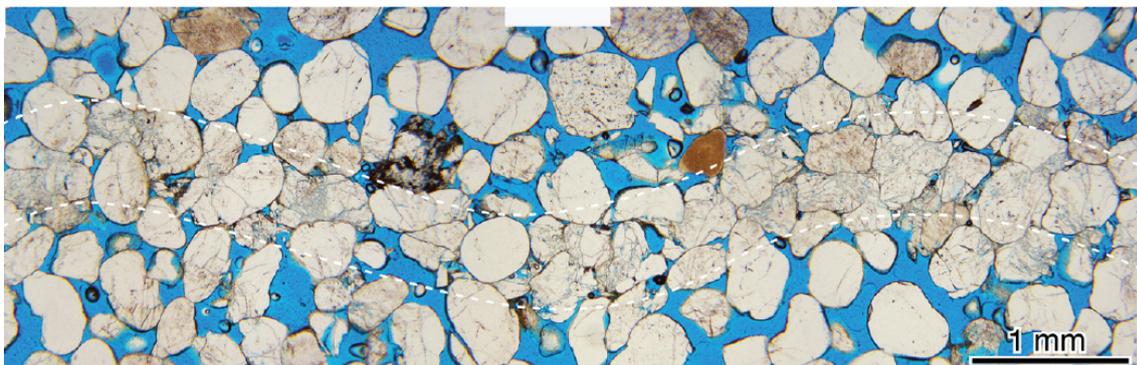


FIGURE 1.22 – Bande de compaction pure (section mince) observée dans le grès de Navajo, Utah par Fossen et al. (2011) ([61]).

En observant au microscope optique et microscopie électronique à balayage (MEB) sur une section mince, les bandes de compaction montrent une réduction de la porosité marquée qui implique la dissolution aux points de contact des grains (cf. Figure 1.22) ainsi que certaines fractures de grain (cf. Figure 1.23) (Fossen et al., (2011) [61]). La figure 1.22 présente une bande de compaction pure observée dans le grès de Navajo (Utah) par Fossen et al. (2011) ([61]) dont l'épaisseur est d'environ 1 mm et la longueur d'onde est typiquement d'environ 0.5-2 cm (diamètre de 15 grains).

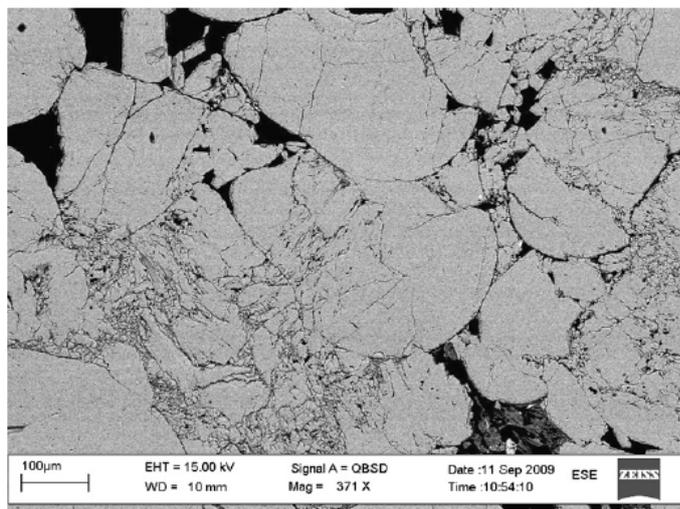


FIGURE 1.23 – Image MEB rétrodiffusée d'une bande de compaction pure, montrant des preuves claires de la casse de grain. Fossen et al. (2011) ([61]).

À partir des observations sur les bandes de déformation à la vallée de Fire (Nevada), Eichhubl et al. (2010) ([51]) déduisent que la formation des bandes de compaction pures demande une porosité initiale élevée, bon granoclassement, des conditions de chargement quasi-axisymétriques, et des contraintes principales compressives maximales efficaces de l'ordre de 20 MPa. Ces considérations sont clarifiées par l'étude de Fossen et al. (2011) à Utah ([61]). Ses études montrent que les bandes de compaction pures n'existent que dans les couches dont la perméabilité est supérieure à plusieurs (10 ± 7) darcy et la porosité est supérieure à $29 \pm 3\%$. Dans de telles couches à porosité élevée, la fréquence des bandes de compaction pures se trouve augmenter avec une augmentation de la porosité de la roche hôte.

Bande de dilatance

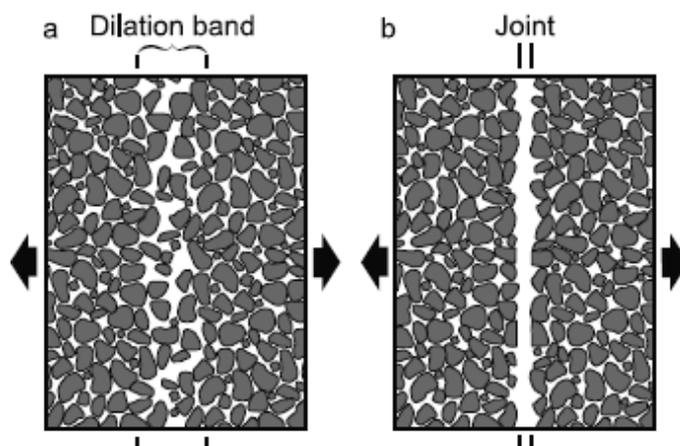


FIGURE 1.24 – Bandes de dilatance et diaclases (*joints*) comme des catégories distinctes de la rupture en mode d'ouverture. (a) Les bandes de dilatance sont caractérisées par de grands pores qui poussent apparemment de pores initiaux par le déplacement du grain sur une zone de largeur finie. (b) Les diaclases caractérisées par deux surfaces distinctes qui forment par la fracturation inter- et transgranulaire et se déplacent l'un à l'autre (Du Bernard et al. (2002) ([49])).

À micro-échelle, les bandes de dilatance représentent une surface non plane, constitué d'une épaisseur de plusieurs grains de matériau endommagé. Ce matériau de la bande a subi la dé-

cohésion hétérogène et la décompaction entraînant ainsi l'augmentation de la porosité, qui correspond à la dilatance, définie par Reynolds (1885) ([124]) comme une augmentation du volume/porosité inélastique du matériau provoquée par sa déformation. Ces bandes de dilatance se forment en mode d'ouverture principalement, et les deux surfaces de la fissure ne sont pas séparées (cf. Figure 1.24a) (Du Bernard et al. (2002) [49], Chemenda et al. (2011) [34]). Elles sont distinctes des fractures planaires en mode d'ouverture avec deux surfaces discrètes ([49]) (cf. Figure 1.24b).

Les bandes de dilatance avec l'augmentation de porosité par rapport à l'état non-déformé et sans décalage de cisaillement macroscopique ont été rapportés par Du Bernard et al. (2002) ([49]). La figure 1.25 montre ce type de bande de la localisation de la déformation à différentes échelles. Les bandes de dilatance sont parallèles ou faiblement inclinées par rapport à la stratigraphie et sont connectées aux extrémités des segments de bandes de cisaillement. Ceci indique que les bandes de dilatance ont été soumises à des contraintes de traction maximales (1.25a,c). Les bandes de dilatance ont une épaisseur de $1 \div 2\text{ mm}$ soit 5 à 10 diamètres de grain. Espace poreux dans la bande est rempli par les minéraux d'argile sombres et de la matière organique. Cela est considéré comme le résultat de l'infiltration de particules lié à l'écoulement d'eau (1.25c). Le graphique dans la figure 1.25d montre une augmentation de la porosité d'environ de 7% ($\pm 3\%$) dans la bande.

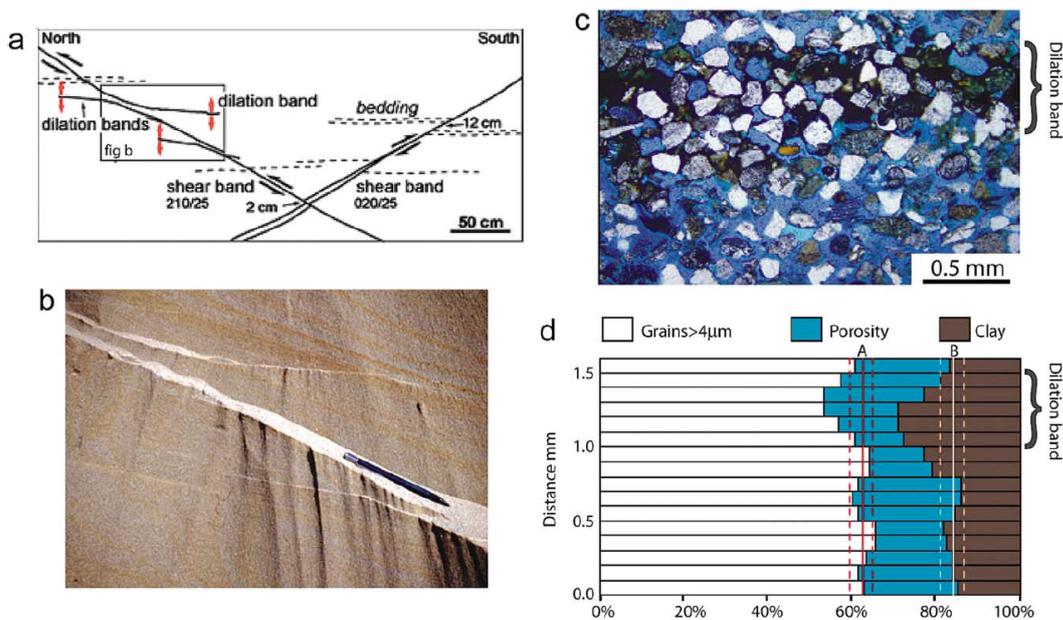


FIGURE 1.25 – Bandes de dilatance dans sable non-consolidé sur la terrasse marine de Savage Creek, McKinleyville, California. (a) Cartographie montrant des affleurements de bandes comprenant deux ensembles de bandes de cisaillement (incliné) et un ensemble de bandes de dilatance (presque horizontale). (b) Détail de (a) marquée par rectangle montrant un ensemble de bandes de cisaillement et un ensemble de bandes de dilatance connectés aux extrémités des segments de bandes de cisaillement. (c) Image de la section mince d'une partie de la bande de dilatance. Les pores dans la bande sont occupés par des minéraux argileux (sombres). (d) Distribution de porosité à travers la section mince déterminée par comptage de points. Le graphique montre une augmentation de 7% ($\pm 3\%$) en squelette ou moins-ciment porosité dans la bande ([49], cité par Aydin et al. (2006) ([7])).

La figure 1.26d présente la première micrographie d'une bande de dilatance naturelle à l'état montée par Chemenda et al. (2011) ([37]). Elle a été obtenue sur une fine discontinuité parallèle aux diaclases appartenant aux dolomicrites Jurassique (la roche carbonatée à grains fins) avec

des diaclases dense (cf. Figure 1.26b) où les diaclases ouverte présentent des traits plumeuses (cf. Figure 1.26a). La décohesion de matériau avec l'augmentation de la porosité dans la figure 1.26d suggère fortement une structure de bande de dilatance qui a aussi une certaine similarité avec la bande de dilatance (ou désagrégation) dans le grès de Nubian de Fossen et al. (2007) ([60]) et dans les sables mal consolidés de Californie de Du Bernard et al. (2002) ([49]).

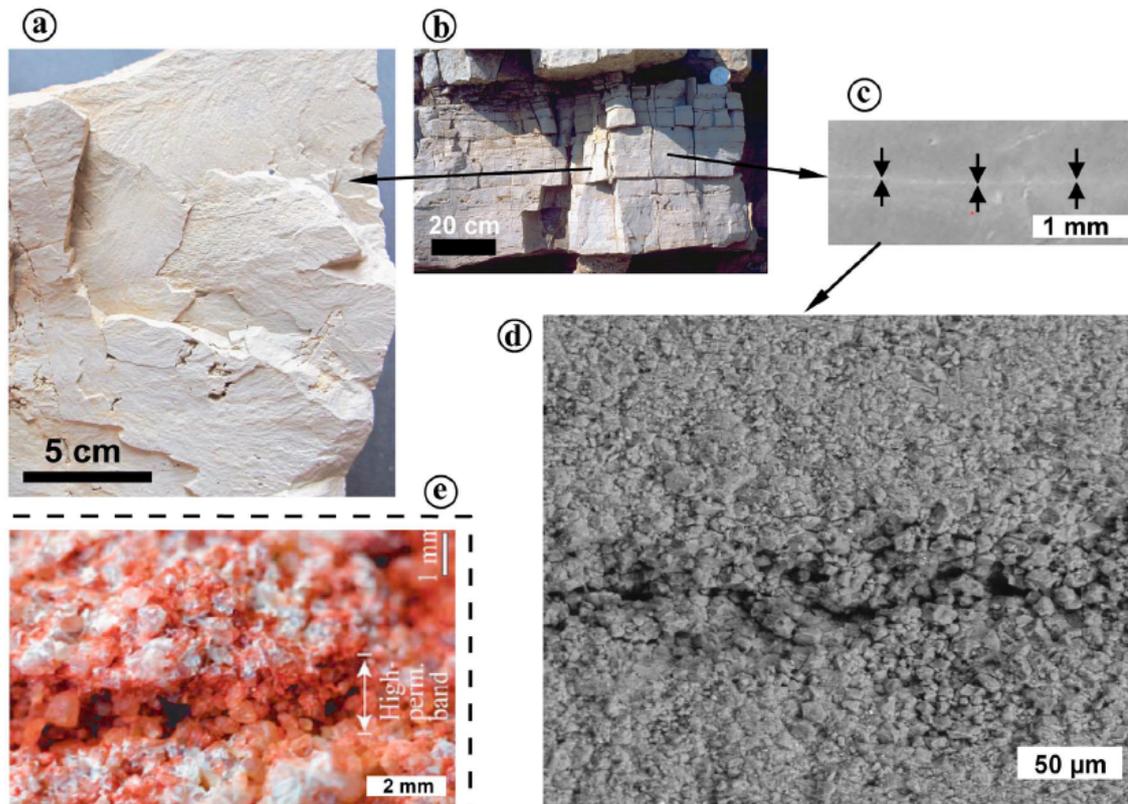


FIGURE 1.26 – Bandes de dilatance naturelles. (a) Aspect de la surface morphologique sur une diaclase ouverte. (b) Affleurement des diaclases denses dans les dolomicrites (dolomite cube) des couches tabulaires de la frontière du Plateau du Larzac (sud de la France). (c) Aspect de la trace (sur une surface sciée et polie) d'une discontinuité fine parallèle à la couche perpendiculaire aux diaclases avec des marques plumeuses. (d) Image MEB de la discontinuité montrant la bande avec des vides, des grains lâches et porosité augmentée (par rapport à la roche hôte) (Chemenda et al. (2011) ([34])). (e) Bande de dilatance (désagrégation) dans le grès de Nubian, Couches de Tayiba Red, Sinai (Fossen et al. (2007) ([60])). L'épaisseur de la bande est de plusieurs diamètres de grain.

Les bandes de dilatance sont découvertes expérimentalement plus récemment par Chemenda et al. (2011) ([34]). Les observations au microscopie électronique à balayage (MEB) sur les bandes de dilatance produites expérimentalement montrent que ces bandes sont aussi caractérisées par une dé-cohésion du matériau et une augmentation locale de la porosité. Lors de leur formation, les bandes ne sont pas ouvertes, elles deviennent fractures avec une fractographie plumeuse après séparation des deux épontes de la bande. La similarité entre les fractures de surface plumeuse générés expérimentalement et celles des cataclases naturelles est discutée, et ils argumentent que les diaclases sont peut-être initiés par des bandes de dilatance. Cependant, il n'y a pas beaucoup des études sur les bandes de dilatance et il reste encore un manque critique de données expérimentales suffisamment précises et détaillées nécessaires pour mieux comprendre les processus de rupture.

1.2 Approche expérimentale : Influence de la pression de confinement sur la localisation de déformation dans la roche

Nous adopterons les notations conventionnelles de mécanique de roches : les contraintes principales compressives seront notées σ_1 et σ_3 . σ_1 correspond à la contrainte la plus compressive et σ_3 à la contrainte la moins compressive. Dans l'essai classique de compression triaxiale, nous avons les trois contraintes telles que $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$, où P_c est la pression de confinement. Pour l'essai en extension le régime des contraintes sera tel que $\sigma_1 = \sigma_2 = P_c > \sigma_3$. La contrainte différentielle sera notée $q = \sigma_1 - \sigma_3$. Pour un échantillon saturé déformé sous condition saturée, la pression interstitielle sera notée p_p , et la différence entre la pression de confinement et la pression interstitielle sera appelée la “pression effective”. De même, la différence entre la contrainte moyenne et la pression interstitielle sera appelée la “contrainte moyenne effective”.

1.2.1 Les résultats des essais en compression

Dans le cas d'essai en compression triaxial, on observe que le comportement élasto-plastique des roches est en général fortement influencé par la pression de confinement P_c et la déformation appliquée. À faible P_c , le matériau se déforme de manière fragile, des bandes de cisaillement se forment à angle ψ faible par rapport à la direction de σ_1 . Cet angle augmente avec P_c , les bandes de cisaillement ont alors tendance à devenir plus compressive. À haute pression de confinement, le matériau se déforme dans le régime ductile, et présente une déformation quasi-homogène (cataclastique). À une pression transitoire, correspondante à la transition fragile-ductile, la localisation s'organise en bandes obliques conjuguées. Au cours des deux dernières décennies, les observations sur le terrain et en laboratoire en grès poreux ont démontré qu'il peut y avoir un régime intermédiaire avec une mode de rupture associée au développement de localisation des “bandes de compaction” (Baud et al. (2004) [13], (2012) [14]), Fortin et al. (2005) [57]). Ces bandes se localisent perpendiculairement à la contrainte principale maximale σ_1 avec un cisaillement négligeable (Wong et Baud (2012) [162]).

La figure 1.27 montre les données mécaniques représentatives de la transition fragile-ductile obtenues dans les essais en compression triaxiaux sur le calcaire Tavel réalisés par Vajdova et al. (2004) ([153]). Ses essais ont été effectués à différentes pressions de confinement variant de 10 MPa à 240 MPa. Aux pressions de confinement de 10, 20 et 30 MPa, la réponse mécanique et le mode de rupture sont typiques du régime de rupture fragile. Ces courbes $q(\varepsilon_{ax})$ montrent l'adoucissement après que la contrainte différentielle ait atteint le pic (1.27a). L'observation macroscopique sur les échantillons post-mortem révèle le développement de la rupture localisée subparallèle à l'axe de l'échantillon à la pression de confinement de 10 MPa alors que des bandes de cisaillement inclinés par rapport à l'axe se produisent aux pressions de confinement plus élevées. Au-delà la pression de confinement de 100 MPa, les réponses mécaniques sont typiques du régime de fluage cataclastique, et les pentes de la courbe $q(\varepsilon_{ax})$ sont positives. La localisation de déformation n'est pas observée sur les échantillons déformés. La figure 1.27b présente les courbes de déformation volumique en fonction de la contrainte moyenne⁴ $\sigma(\varepsilon_v)$ obtenues lors d'essais triaxiaux (courbes solides) et d'un essai hydrostatique (courbe en pointillé). Les deux courbes doivent coïncider tant que la déformation est poroélastique. Le point C' correspond sur la courbe $\sigma(\varepsilon_v)$ à $P_c = 30$ MPa au point où le volume de l'échantillon comprimé sous

4. $\sigma = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ - contrainte moyenne

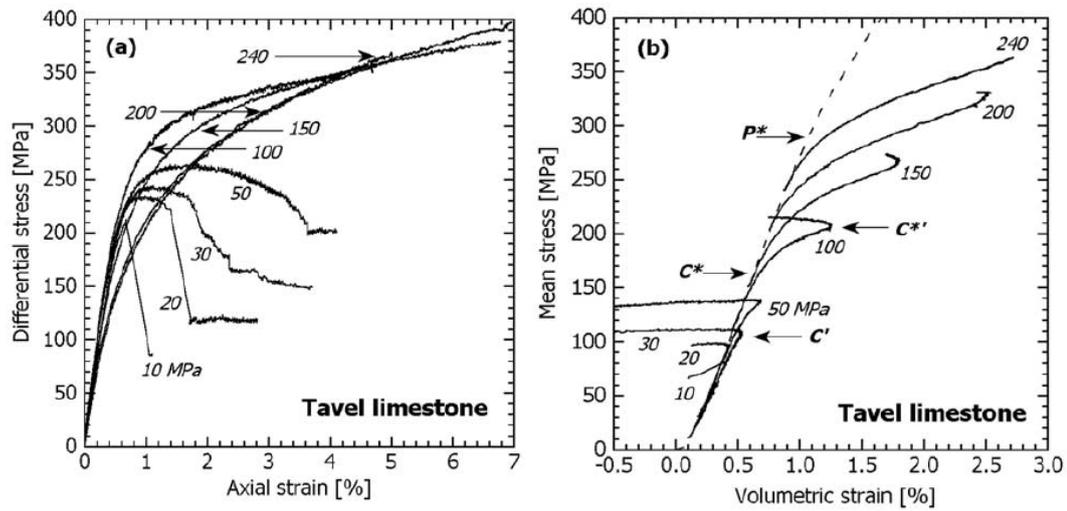


FIGURE 1.27 – Données mécaniques représentatives pour certains essais en compression triaxiaux sur calcaire de Tavel. (a) La contrainte différentielle est tracée en fonction de la déformation axiale. (b) La déformation volumique est tracée en fonction de la contrainte moyenne, et les données hydrostatiques se présentent par la ligne en pointillés. Le numéro à côté de chaque courbe indique la pression de confinement maintenue pendant l’essai. Les flèches dans la figure 1.27b marquent les contraintes critiques (initiation de la dilatance C' dans l’essai à la pression de confinement de 30 MPa, initiation de la compaction cisailante améliorée C^* et la transition de la compaction cisailante améliorée à la dilatance C^{*} dans l’essai à la pression de confinement de 100 MPa (Vajdova et al. (2004) ([153])).

régime triaxial devient supérieur à celui comprimé hydrostatiquement. Il correspond à l’initiation de la dilatance. Pour un niveau de contraintes au-delà de C^* , identifié sur la courbe $\sigma(\varepsilon_v)$ à $P_c = 100$ MPa, on observe une diminution du volume par rapport à l’hydrostat. Le champ de contrainte déviatorique a fourni une contribution inélastique significative à la déformation compressive, ce phénomène caractérise la “compaction cisaillement-amélioré” (*shear-enhanced compaction*) (Wong et al. (1997) ([164])). Dans le régime de fluage cataclastique (à $P_c = 100$ MPa et plus), après une certaine quantité d’écroûissage, les échantillons changent de compaction pour enregistrer une nouvelle phase de dilatance. Comme indiqué sur la figure 1.27b pour l’essai à $P_c = 100$ MPa, l’état de contrainte critique qui définit la transition entre compaction cataclastique et dilatance est désigné par C^{*} .

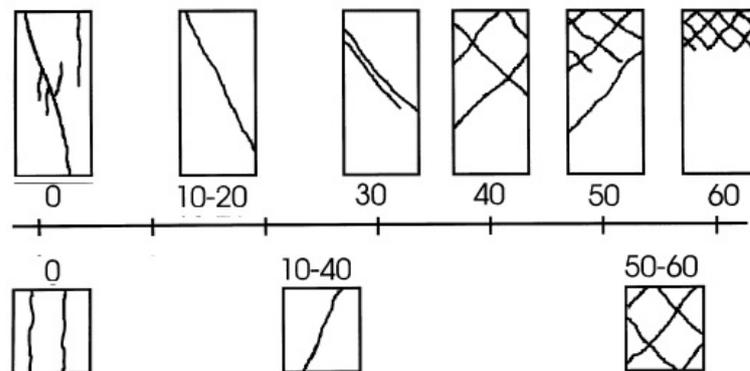


FIGURE 1.28 – Schéma récapitulatif des bandes observées sur l’échantillon de grès Vosges par rapport à la pression de confinement pour les essais de compression triaxiaux avec $H/D = 2$ et 1 , respectivement au-dessus et au-dessous de l’axe, où H - hauteur de l’échantillon, D - diamètre de l’échantillon (Bésuelle et al. (2000) [20]).

Bésuelle et al. (2000) ([20]) observent sur des grès de Vosges (figure 1.28) et pour une pres-

sion de confinement nulle, une combinaison des fractures *splitting*. Pour P_c jusqu'à 40 MPa, les bandes de cisaillement se caractérisent par une composante dilatante. Les bandes de cisaillement conjuguées sont observées aux pressions de confinement de 40 MPa à 60 MPa, l'espacement entre les bandes diminue avec la pression de confinement alors que le nombre de bandes de cisaillement augmente. L'angle des bandes de cisaillement par rapport à la direction de la contrainte principale majeure augmente avec la pression de confinement P_c . Les motifs observés sur les échantillons courts ($H/D = 1$) sont similaires par rapport aux modèles classiques ($H/D = 2$), cependant le nombre de bandes et l'angle des bandes sont plus faibles pour une même pression de confinement. Cette différence peut être expliquée par le frottement aux extrémités de l'échantillon, puisque la contrainte locale est perturbée à l'intérieur de cette zone et cet effet est plus important dans un échantillon court.

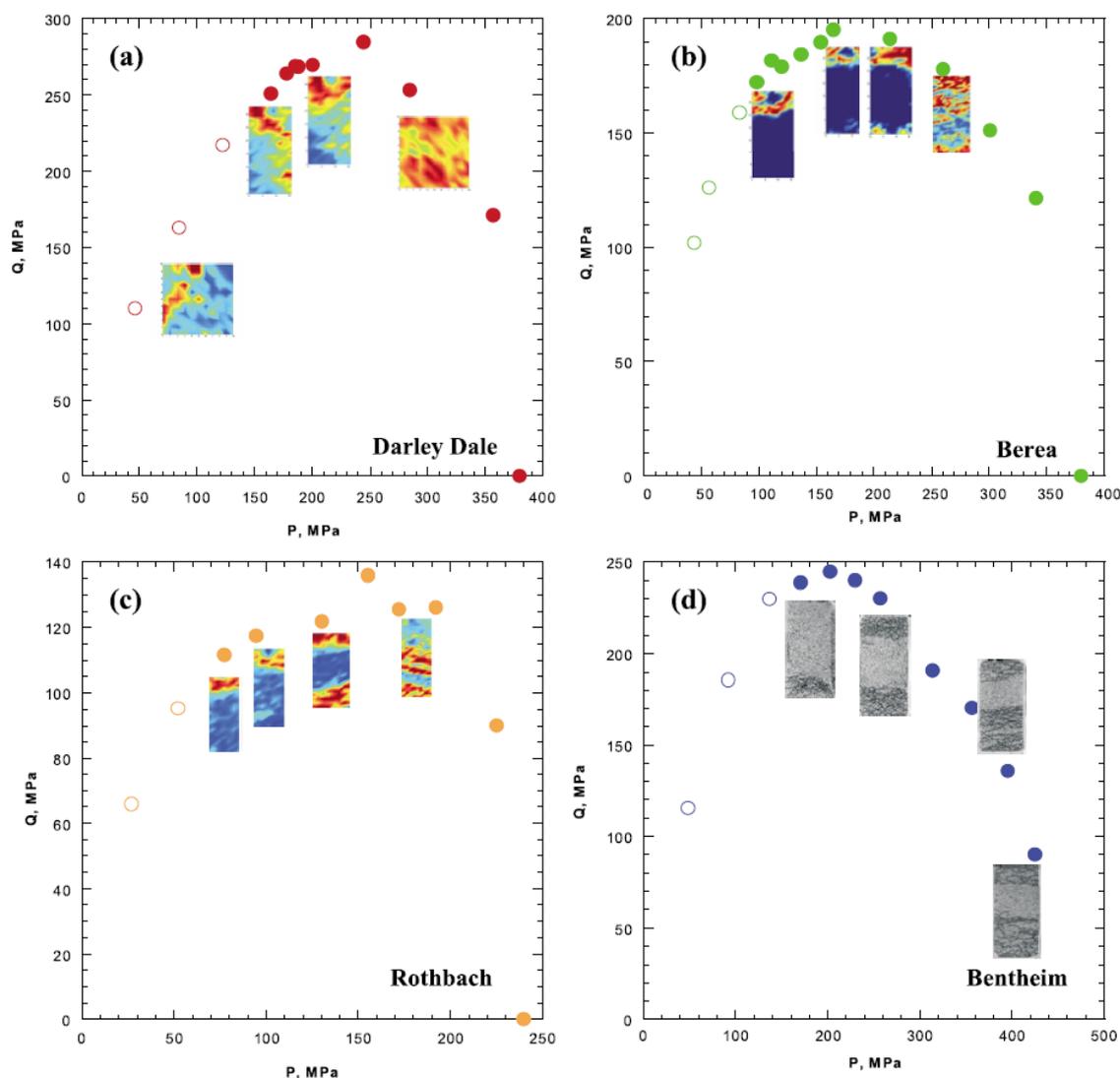


FIGURE 1.29 – Pics de contrainte et surfaces de charge au début de la compaction cisaillement-amélioré pour les grès de Darley Dale (a), Berea (b), Rothbach (c) et Bentheim (d) (Baud et al. (2004) ([13])).

Baud et al. (2004) ([13]) ont étudié en détail le comportement mécanique, le mode de rupture localisée ainsi que la microstructure de la déformation à la transition fragile - ductile pour cinq grès (Darley Dale, Rothbach, Berea, Bentheim et Diemelstadt) avec une porosité variant entre 13% et 24%. Les résultats ont démontré que les modes de rupture localisées impliquant des bandes de compaction et des bandes de cisaillement ayant l'angle élevé peuvent se développer

dans ces cinq grès alors qu'ils subissent une compaction cisaillement-améliorée (*shear-enhanced compaction*). Ils confirment également que de tels phénomènes de compaction sont souvent associées à des états de contrainte dans le régime de transition fragile-ductile, ce qui avait déjà été documenté par Wong et al. (2001) ([163]). La figure 1.29 présente l'évolution de la localisation de la déformation dans quatre grès en fonction de la pression de confinement à la transition fragile-ductile. Les symboles ouverts correspondent au pic de contrainte des échantillons qui se fracturent dans le régime fragile. Les symboles solides correspondent à la limite C^* pour le début de compaction cisaillement-améliorée. Les cas limites du modes de localisation sont identifiés : i) des bandes de cisaillement ayant des angles élevés (cf. Figure 1.29a) et une série de bandes de compaction discrètes sub-perpendiculaires à la direction de compression maximale (cf. Figure 1.29d), observés dans le grès très compact (Darley Dale) et les grès très poreux (Bentheim ou Diemelstadt) ; ii) un mode de localisation hybride impliquant des bandes de cisaillement ayant des angles élevés et des bandes de compaction diffuses (cf. Figures 1.29b et c) observé dans les grès avec une porosité intermédiaire (Rothbach ou Berea).

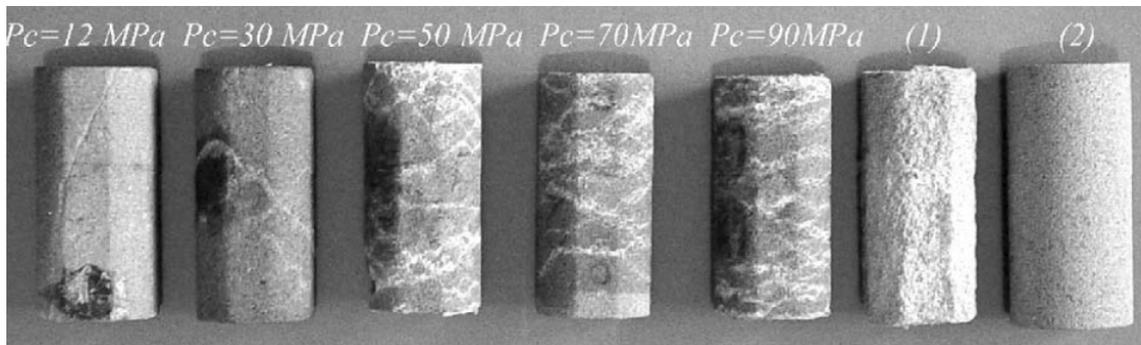


FIGURE 1.30 – Les photos de l'échantillons de grès Bleurswiller déformés à différentes pressions de confinement (P_c). Le diamètre d'un échantillon intact initial était 40 mm et l'hauteur était 80 mm. (1) est l'échantillon déformé sous les conditions hydrostatiques (Fortin et al. (2005) [57]).

Fortin et al (2005) ([57]) ont réalisé des expériences en compression triaxial aux différentes pressions de confinement P_c de 12, 30, 50, 70, 90, 110 MPa sur des grès Bleurswiller avec une porosité initiale de 25%. Les expériences ont été effectuées avec une pression interstitielle de 10 MPa. La figure 1.30 présente les photos de l'échantillons post-mortem pour les différentes pressions de confinement. À faible P_c ($P_c = 12$ et 30 MPa), la déformation est localisée dans un seul plan de rupture discret en tant que bande cisailante-dilatante. À pression de confinement de 50 et 70 MPa, les bandes de localisation se forment perpendiculairement à la contrainte principale maximale. Il s'agit des "bandes de compaction". À P_c plus élevée ($P_c = 90$ et 110 MPa), les bandes de compaction se localisent. La figure 1.31 correspond à une série de photographies et micrographies optiques de la microstructure à l'intérieur de l'échantillon déformé à la pression de confinement de 110 MPa. Les bandes de compaction discrètes, apparaissant comme des bandes localisées en couleur plus claire, sont réparties dans tout l'échantillon (cf. Figure 1.31a). À l'intérieur de la bande, l'analyse microstructurale indique que la réduction de porosité est inférieure à 4% due au broyage des grains et l'effondrement des pores (cf. Figures 1.31b et c). Ces caractéristiques sont similaires à celles observées sur les grès de Bentheim et Diemelstadt ([13]). Cependant, la microstructure du grès compacté de Bleurswiller est peu différente de celle observée précédemment dans les grès de Bentheim et Diemelstadt : le broyage des grains ne semble pas être aussi étendu que dans les deux grès précédemment mentionnés et ces bandes ne sont pas linéaires, mais assez tortueuses. Ceci est supposé dû à la composition minéralogique des grès.

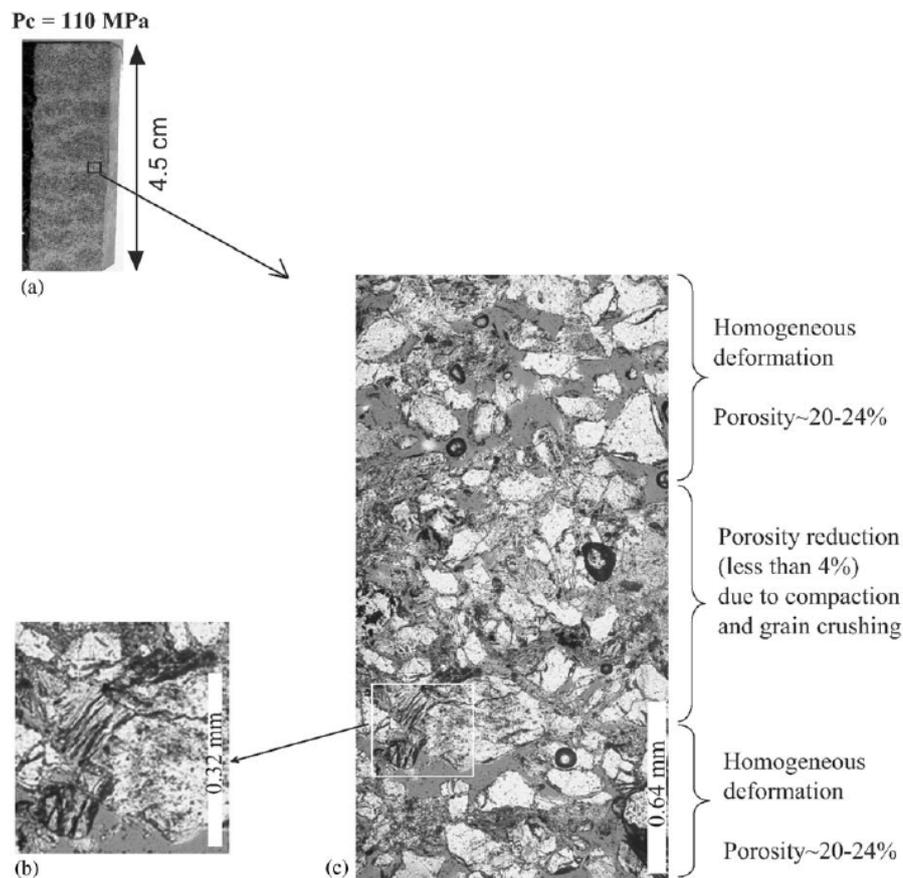


FIGURE 1.31 – Bandes de compaction dans l'échantillon testé à la pression de confinement de 110 MPa. (a) Photo entière d'une section dans la lumière naturelle. La contrainte principale était le long de la direction axiale. (b) Micrographies de la microstructure sous la lumière polarisée dans le microscope optique. Cette vue montre la largeur moyenne d'une bande discrète est de ~ 0.8 mm, ce qui est comparable à la taille des grains. La micrographie à gauche (c) montre en détail des grains écrasés à l'intérieur d'une bande (Fortin et al. (2005) [57]).

1.2.2 Les résultats des essais en extension

Bésuelle et al. (2000) ([20]) ont réalisé des essais en extension sur le grès de Vosges. Dans la gamme de pression de confinement étudiée, la rupture de grès des Vosges en extension triaxiale ne se produit pas avec une contrainte axiale positive (compressive). Afin d'obtenir une rupture en extension avec des contraintes positives, il faut des valeurs plus élevées de pression de confinement. La forme soi-disant "bobine", comme proposé par Brace (1964) ([28]) et Millar & Murray (1988) ([95]), a été utilisée. Cette forme d'échantillon permet d'avoir une contrainte axiale négative (extensive) dans la partie médiane de l'échantillon en ayant une contrainte positive à ses extrémités. Le comportement du grès dans les essais en extension est montré dans la figure 1.32. La contrainte axiale à la rupture pour les différentes pressions de confinement est la même. Elle est d'environ -10 MPa en traction. La dilatance volumétrique évolue de façon quasi-linéaire avec la contrainte axiale, et ne dépend que légèrement avec la pression de confinement. Les résultats obtenues montrent que le comportement du grès lors de tests d'extension est similaire avec essais en compression. Le pendage des bandes de cisaillement par rapport à la direction de la contrainte principale majeure (la direction horizontale) augmente en fonction de la pression de confinement (cf. Figure 1.33). À faible pression de confinement P_c , la bande est parallèle à la direction de la contrainte principale majeure comme dans le cas du "splitting" en compression. À grande P_c , la bande de cisaillement se produit à l'endroit du changement

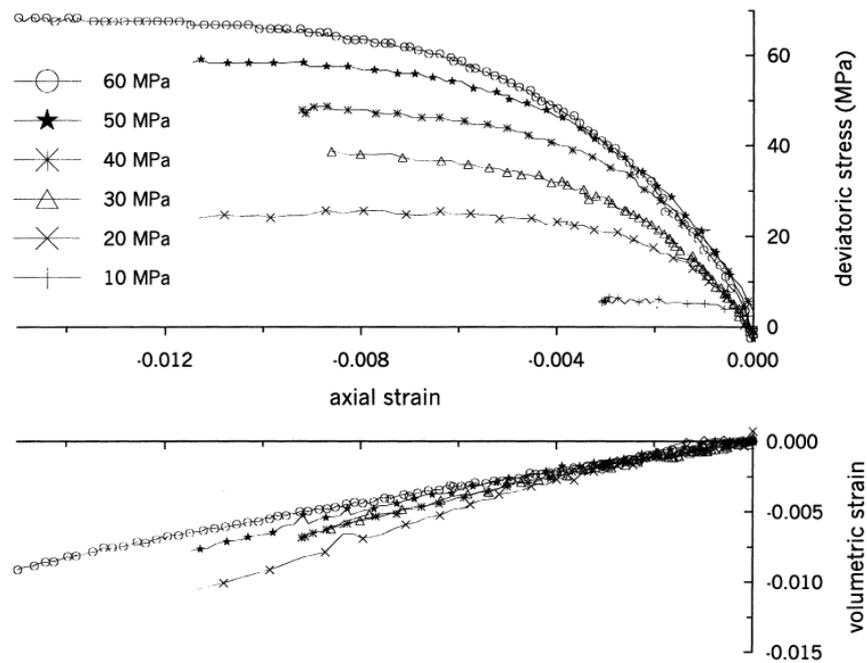


FIGURE 1.32 – Courbes de contrainte déviatorique et de déformation volumique par rapport à déformation axiale dans les essais d’extension triaxiaux sur le grès de Vosges réalisés par Bésuelle et al. (2000) ([20]).

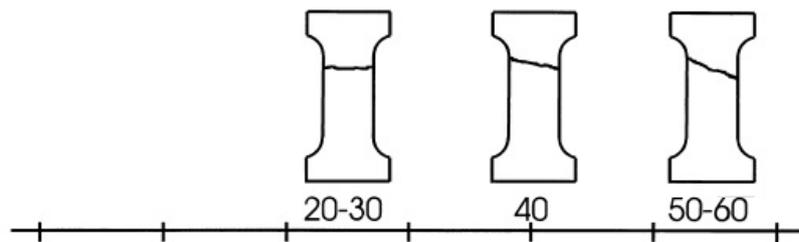


FIGURE 1.33 – Les motifs des bandes de cisaillement observées sur l’échantillon de grès de Vosges en fonction de la pression de confinement pour les essais d’extension triaxiaux (Bésuelle et al. (2000) [20]).

de diamètre de l’échantillon, ce qui est probablement due à des effets de concentration des contraintes.

Ramsey et Chester (2004) ([121]) ont réalisé des expériences en extension triaxiale sur des échantillon de forme "dog-bone" sur du marbre de Carrara (cf. Figure 1.34a). Ses résultats montrent une transition continue de la fracture d’extension vers la fracture de cisaillement avec une augmentation de la contrainte compressive. Ils ont également constaté une augmentation de l’angle de fracture en fonction de la pression de confinement (cf. Figure 1.34b).

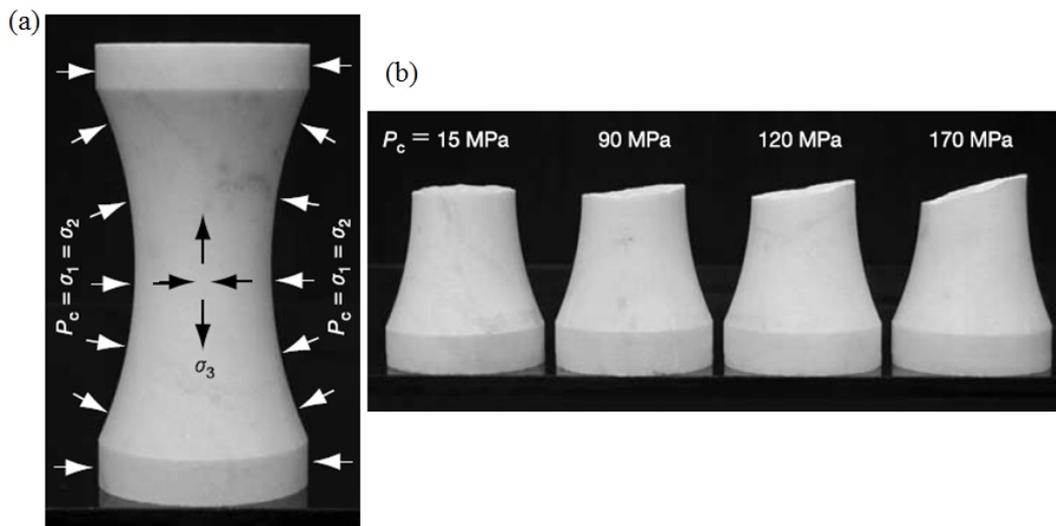


FIGURE 1.34 – Photos des échantillons "dog-bone" de marbre de Carrara non-formé et déformés. a) Échantillon "dog-bone" a 90 mm de hauteur, 43 mm de diamètre aux extrémités et 28 mm de diamètre au centre; (b) Échantillons représentatifs montrent le changement progressif de l'orientation de fracture avec l'augmentation de la pression de confinement ([121]).

Les fractures formées à faible pression de confinement (de 7.5 à 60 MPa) sont orientées quasi-perpendiculairement à la contrainte principale mineur σ_3 (parallèles à σ_1) (cf. Figure 1.35b). Elles affichent une morphologie de surface compatible avec un mode d'ouverture de déplacement et peuvent être classées comme les *fractures d'extension*. La morphologie présente des clivages discrets et intragranulaires hautement réfléchissant. L'angle de rupture (l'inclinaison par rapport à la direction de la contrainte principale majeure) est de $1^\circ - 2^\circ$. Les fractures formées à la pression de confinement élevée (de 130 à 170 MPa) sont inclinées de 13° à 22° (cf. Figure 1.35b). Elles se forment dans un état de contrainte compressive et présentent un déplacement en cisaillement (cf. Figure 1.35a). Ces fractures peuvent donc être classées comme les *fractures de cisaillement*. La surface de fracture est couverte d'une poudre de grains broyés et contiennent des rainures courtes qui sont parallèles à la direction de glissement. Les fractures, se formant dans un état de contrainte mixte de traction-compression sous pression de confinement de 70 à 120 MPa, affichent quant à elles une surface de transition appelée les *surfaces hybrides* (cf. Figure 1.35a). La morphologie de la surface de rupture montre des parcelles (*patches*) de cristaux discrets, réfléchissants, clivés entre des zones de matière broyée avec les linéations de glissement. L'angle de rupture par rapport à σ_1 est de 3° à 13° .

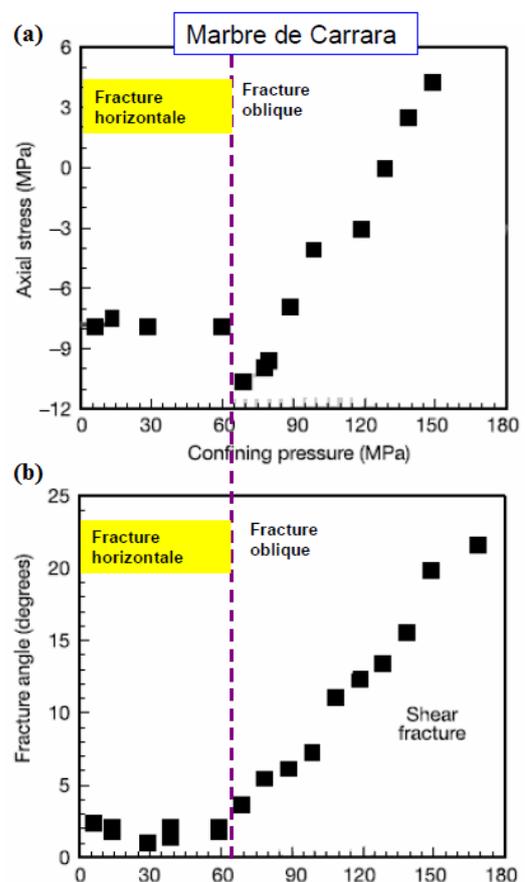


FIGURE 1.35 – La résistance à la rupture et l'angle de rupture en fonction de la pression de confinement pour le marbre de Carrara (Ramsey et al. (2004) [121]).

1.2.3 Utilisation d'un matériau synthétique analogue de roches

En plus des études expérimentales réalisées sur les roches naturelles, il y a également des études utilisant des matériaux synthétiques analogue de roche. Nous présenterons par la suite les résultats d'études expérimentales déjà obtenus avec le matériau GRAM1 (Granular Rock Analog Material) que nous avons utilisé pour ce travail de thèse.

Les propriétés de GRAM1 ont été étudiées par Jorand (2007) ([75]), puis par Nguyen (2009) ([98]). Jorand (2007) ([75]) a réalisé des essais en compression en déformation plane sur des modèles parallélépipédiques en utilisant un dispositif poly-axial spécialement développé pour ses expériences. Ses résultats montrent la relation entre le type de réseau de fractures/bandes et la contrainte moyenne σ . Pour σ faible, les réseaux de fractures obtenues sont orientés parallèlement à la direction de la contrainte majeure σ_1 ; pour σ plus grande, les réseaux de fractures cisailantes sont formés. Leur inclinaison par rapport à σ_1 augmente avec σ , de 0 (diaclyse) à 30° (fracture cisailante pur) (1.36). L'espace entre les fractures obliques ne dépend pas de l'épaisseur du modèle comme cela était souvent supposé. Ses fractures observées en laboratoire sont bien retrouvées dans la nature aux profondeurs équivalentes en fonction des lois d'échelles utilisées (figure 1.37).

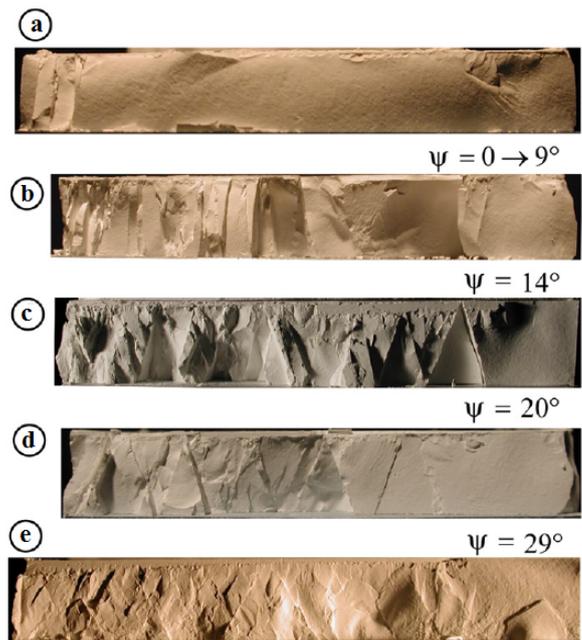


FIGURE 1.36 – Sections verticales (parallèle à la direction d'extension) au milieu des modèles fracturées. (a) Contrainte moyenne initiale $\sigma_{ini} = 0.4$ MPa. Les contraintes aux bordures du modèles à la fin de l'essai : $\sigma_1 = 0.4$ MPa, $\sigma_2 = 0.37$ MPa, $\sigma_3 = 0.016$ MPa; (b) $\sigma_{ini} = 0.5$ MPa, $\sigma_1 = 0.5$ MPa, $\sigma_2 = 0.31$ MPa, $\sigma_3 = 0.023$ MPa; (c) $\sigma_{ini} = 0.6$ MPa, $\sigma_1 = 0.6$ MPa, $\sigma_2 = 0.4$ MPa, $\sigma_3 = 0.08$ MPa; (d) $\sigma_{ini} = 1$ MPa, $\sigma_1 = 1$ MPa, $\sigma_2 = 0.48$ MPa, $\sigma_3 = 0.28$ MPa; (e) $\sigma_{ini} = 1.5$ MPa, $\sigma_1 = 1.5$ MPa, $\sigma_2 = 0.6$ MPa, $\sigma_3 = 0.43$ MPa. Ψ est l'angle entre les fractures (bandes de déformation) et la direction σ_1 (verticale) (Jorand et al. (2012) ([76])).

Les résultats des essais triaxiaux en compression de Nguyen (2011) ([99]) montrent que le matériau GRAM1 présente des courbes contrainte - déformation très similaires à celles obtenues sur des roches (figure 1.38, 1.27a). De même le comportement de localisation de la déformation en fonction de la pression de confinement est similaire à celui observé avec des grès. Nguyen (2011) ([99]) a déterminé que GRAM1 présente une transition du comportement fragile à un comportement ductile à une pression de confinement d'environ $P_c = 0.3$ MPa. Il a observé une seule bande de cisaillement à faible pression de confinement, puis plusieurs bandes obliques conjuguées sont observées à cette transition fragile-ductile. Les bandes de compaction s'observe pour une pression à partir de 0.3 à 0.4 MPa. Au-dessus de 0.4 MPa, le matériau se déforme ductilement et la déformation compressive est cataclastique ou homogène (figure 1.39).



FIGURE 1.37 – Réseaux de fractures/bandes générés dans les modèle de GRAM1 et dans la nature (Jorand (2007) ([75]) cité par Nguyen (2009) ([98])

Régime du comportement en fonction du P (MPa)	GRAM1	Calcaire de Solnhofen	Grès de Adamswiller
Fragile	$P_f \leq 0.15 \text{ MPa}$	$P_f \leq 50 \text{ MPa}$	$P_f \leq 20 \text{ MPa}$
Transition fragile - ductile	$0.2 \text{ MPa} \leq P_{fd} \leq 0.35 \text{ MPa}$	$P_{fd} = 100 \text{ MPa}$	$P_{fd} = 40 \text{ MPa}$
Ductile	$P_d \geq 0.4 \text{ MPa}$	$P_d \geq 200 \text{ MPa}$	$P_d \geq 60 \text{ MPa}$
P_d^{min} / P_f^{max}	2.7	4	3

TABLE 1.1 – Régimes de comportement pour GRAM1, le calcaire de Solnhofen et la grès d'Adamswiller ([98])

Le tableau 1.1 présente les différents régimes de comportement en fonction de la pression de confinement P_c pour GRAM1, le calcaire de Solnhofen (Baud et al. (2000) [15]) et le grès d'Adamswiller (Wong et al. (1997) [164]) en se basant sur les courbes $q(\varepsilon_{ax})$ et $\varepsilon(\varepsilon_{ax})$ (comme montré dans la figure 1.38) et les types des fractures correspondants à différentes P_c . On constate une similarité de l'évolution du comportement en fonction de P_c entre GRAM1 et les roches naturelles. Bien que les valeurs de P_c correspondant à chaque régime sont très différentes, le rapport P_d^{min} / P_f^{max} est très proche (P_f^{max} est la pression maximale correspondant au régime fragile, P_d^{min} est la pression minimale correspondant au régime ductile).

GRAM1 présente aussi une grande similitude de comportements avec des roches naturelles pour des essais d'extension. La courbe $q(\varepsilon_{zz})$ des essais d'extension réalisés à différentes P_c sur GRAM1 de la figure 1.40 et celle du grès des Vosges (Bésuelle (1999) [18]) (cf. Figure 1.32) montrent la similitude des comportements de GRAM1 et des roches naturelles en ce qui concerne l'influence de la pression de confinement P_c sur la contrainte différentielle q_{pic} , la déformation axiale au pic et l'évolution de la dilatance vers la compaction avec l'augmentation de P_c .

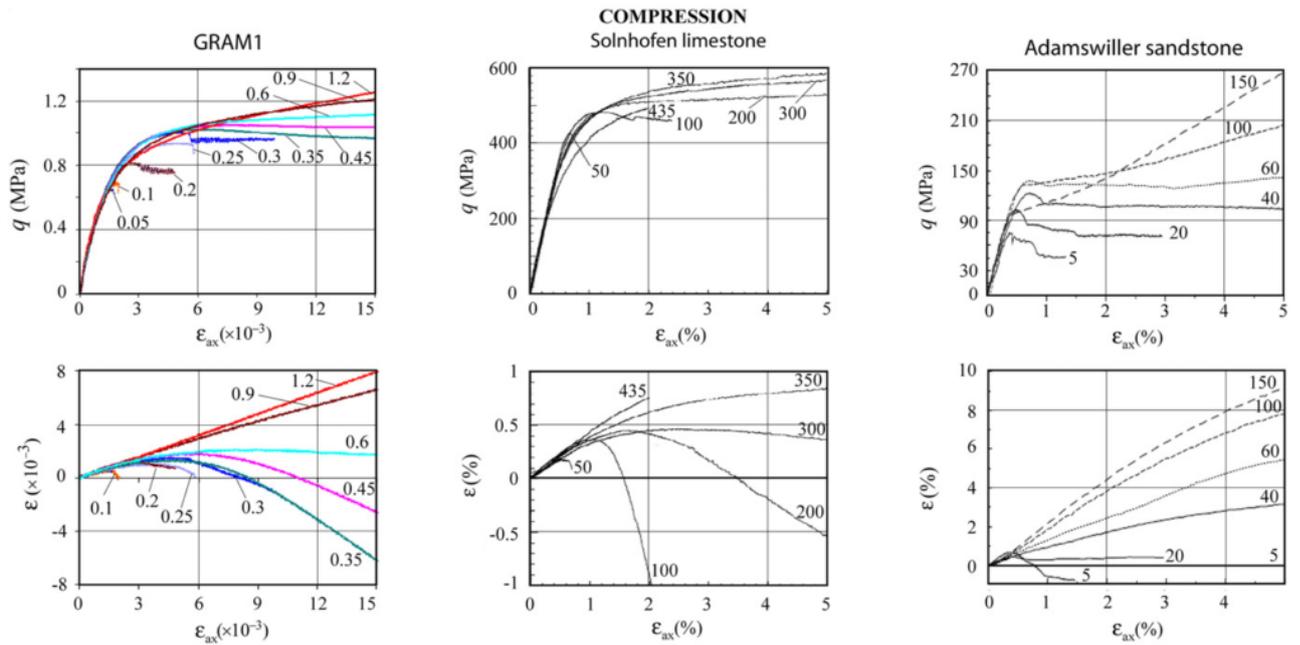


FIGURE 1.38 – Comparaison des courbes $q(\varepsilon_{ax})$ et $\varepsilon(\varepsilon_{ax})$ pour des essais en compression de GRAM1 et des roches : calcaire de Solnhofen et grès de Adamswiller (Nguyen et al. (2011) [99])

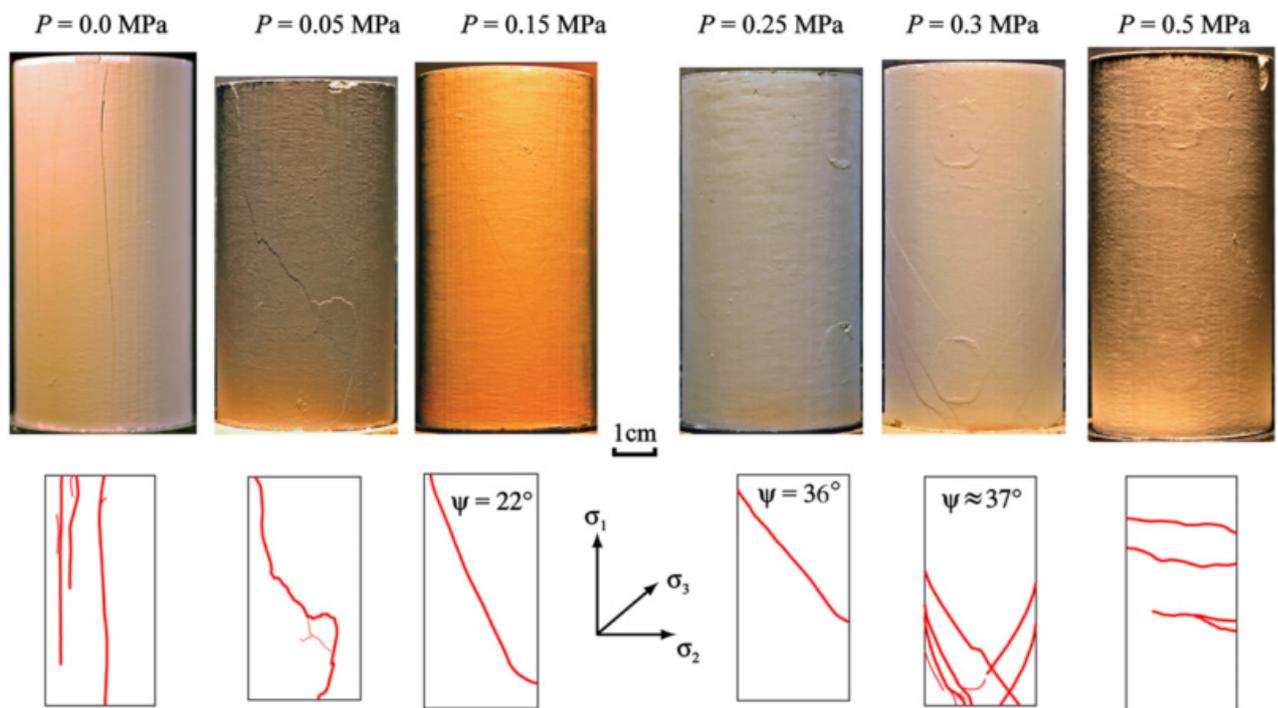


FIGURE 1.39 – Echantillons fracturés de GRAM1 dans les essais de compression à différents P_c (zoom sur les photos à haute résolution affiche clairement les fractures (localisation des bandes) représentés dans les dessins sous les photos correspondantes ([99])

La figure 1.41 montre l'évolution de la géométrie de fracturation en fonction de la pression de confinement dans les essais d'extension obtenue par Nguyen (2009) ([98]). Nous pouvons constater une augmentation de l'inclinaison de fracture en fonction de la pression de confinement. À faible pression de confinement ($P_c = 0.1 - 0.65$ MPa), la rupture se manifeste horizontalement dans la partie la plus amincie de l'échantillon dans l'état de contrainte de traction (cf. Figure 1.42). À $P_c = 0.7$ MPa, la fracture, créée dans l'état de contrainte mixte de traction et compression, est soit horizontale, soit oblique avec un faible angle par rapport à la direction de la contrainte principale majeure σ_1 ($\psi < 10^\circ$). À $P_c = 0.8$ à 1.3 MPa, la fracture est inclinée et se forme dans un état de contrainte en compression. L'inclinaison augmente avec P_c . La même tendance est trouvée pour différents grès (par exemple : le grès des Vosges (cf. Figure 1.32) (Bésuelle (1999) [18]), et le grès de Berea (Bobich (2005) [23])) ou dans le marbre de Carrara (Ramsey et Chester (2004) (cf. Figure 1.34, 1.35) ([121])).

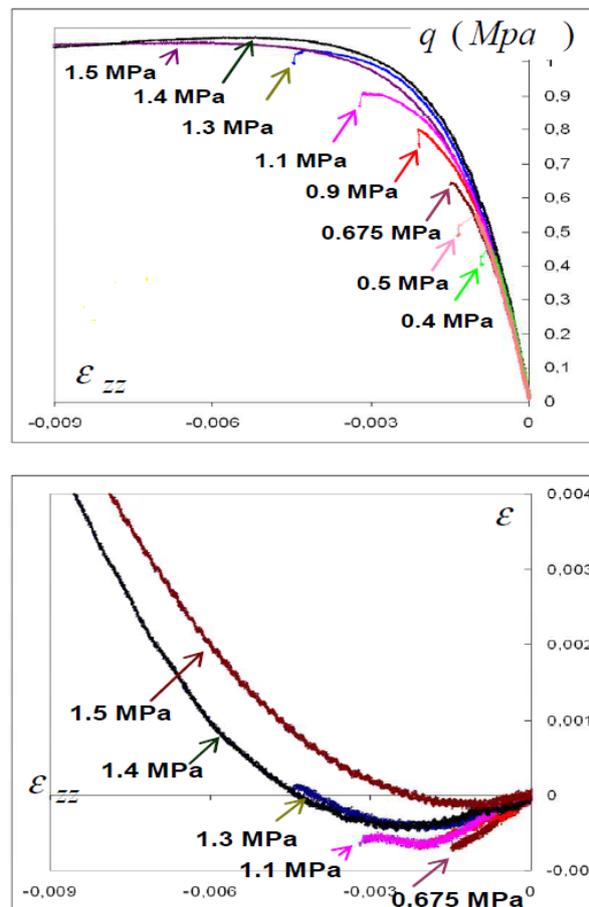


FIGURE 1.40 – Courbes $q(\varepsilon_{zz})$ dans les essais d'extension sur GRAM1 (Nguyen (2009) ([98])).

Les fractures, se produisant dans l'essai en extension, correspondent à de très minces discontinuités à la surface de l'échantillon (cf. Figure 1.43a). Les surfaces de rupture après ouverture de ces discontinuités présentent une topographie plumeuse caractérisée par des crêtes et des creux formant un motif divergent. À des pressions relativement élevées, la surface est compliquée et comporte des marches (cf. Figure 1.43d). Cette topographie à petite échelle devient moins exprimée quand la pression de confinement P_c diminue et disparaît complètement à $P < \sim 0.2$ MPa (cf. Figure 1.43b). Les discontinuités peuvent être formées à faible traction ou même en compression (cf. Figure 1.42). À $P \geq 0.6$ MPa, ces discontinuités ne sont pas ouvertes lors de leur formation, mais peuvent être facilement ouvertes si l'extension axiale continue après la fracturation. À fin d'analyser la structure de ces discontinuités avant l'ouverture, Chemenda et al. (2011) ([34]) ont effectué des essais où l'extension a été arrêtée juste après que la contrainte d'extremum σ_{ax}^{pic} (le minimum de σ_{ax}) soit atteinte. Les discontinuités obtenues ont ensuite été observées au microscope électronique à balayage (MEB). Ces surfaces représentent des caractéristiques de bandes de dilatance (cf. Figure 1.44). À partir des résultats obtenus, Chemenda et al. (2011) ([34]) supposent que l'origine des diaclases géologiques (et plus généralement, des fractures d'extension) peuvent être définies de leur fractographie. La présence de motifs plumeux pâles/déliés atteste la formation de diaclases à travers des bandes de dilatance.

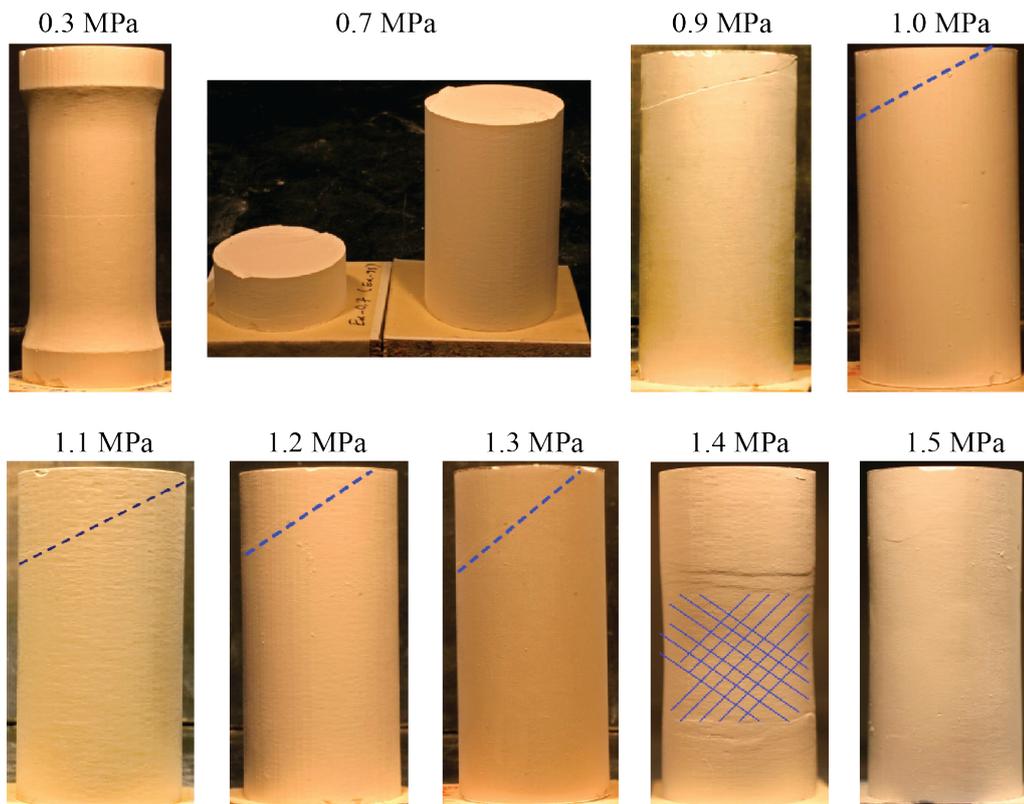


FIGURE 1.41 – Évolution de la géométrie de fracturation dans les essais d'extension sur GRAM1 ([98]).

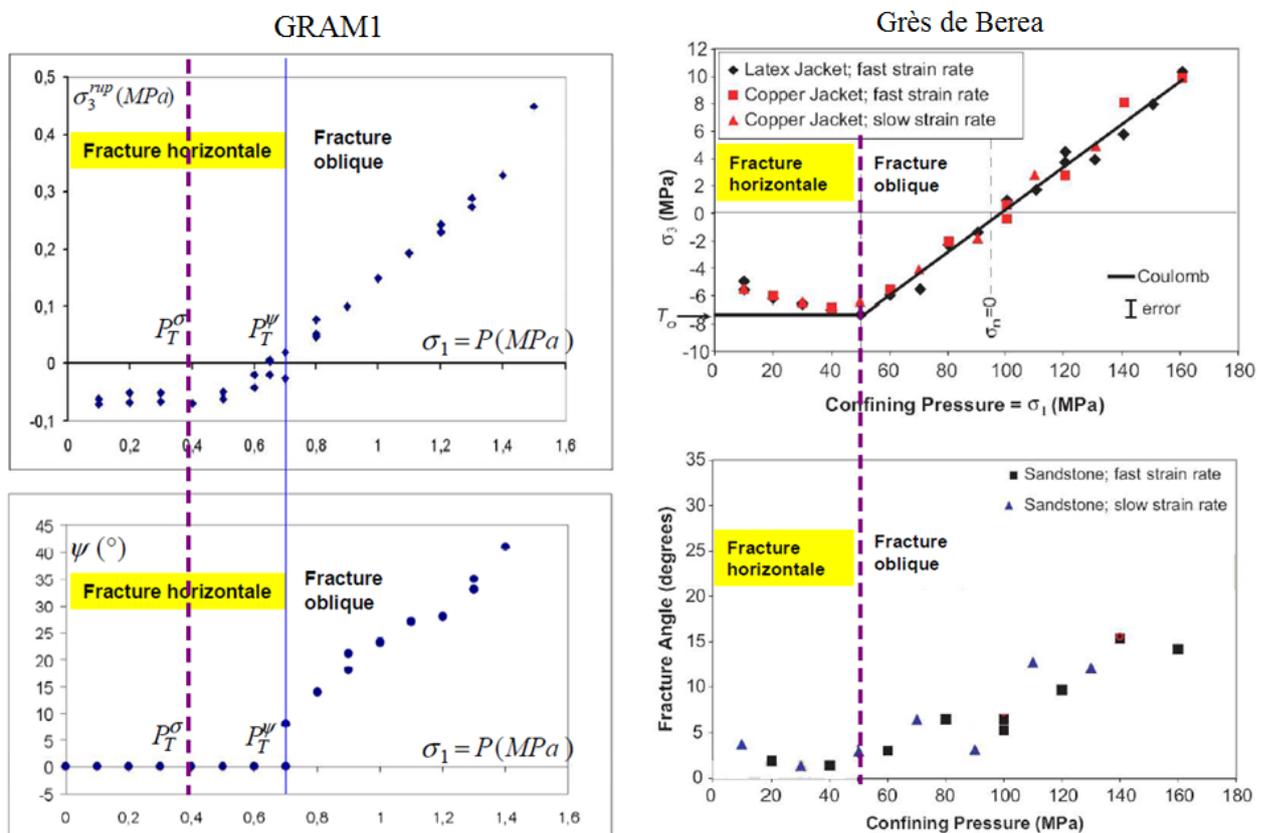


FIGURE 1.42 – Courbes $(\sigma_3^{rup}, \sigma_1 = P_c)$ et $(\psi, \sigma_1 = P_c)$ pour GRAM1 ([98]) et grès de Berea (Bobich (2005) ([23])).

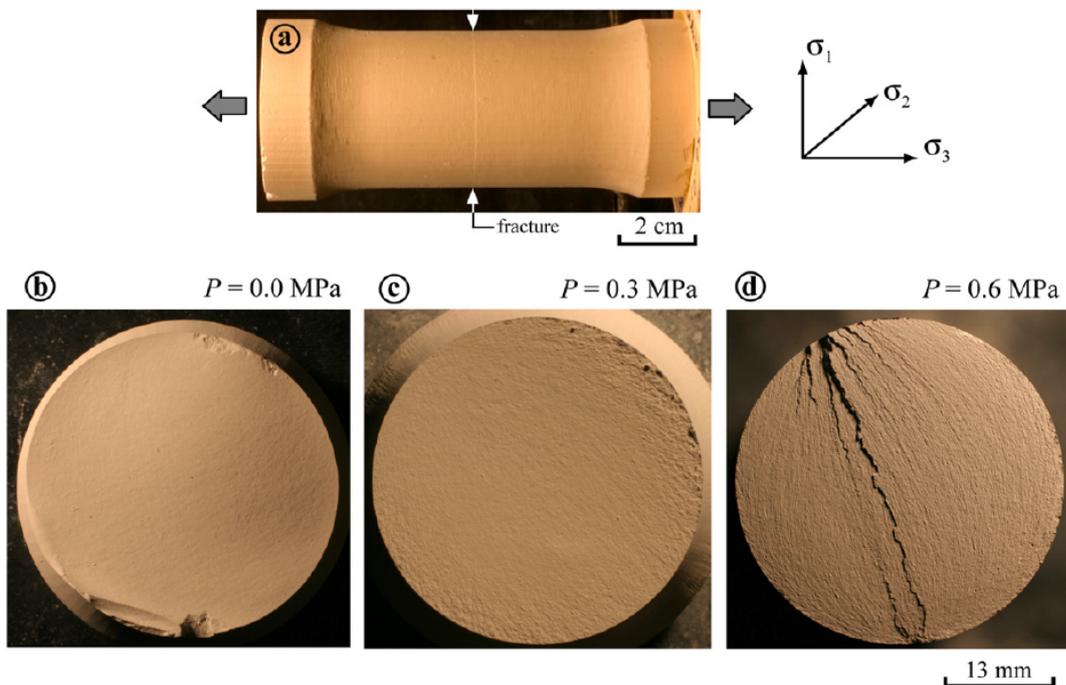


FIGURE 1.43 – Échantillons de GRAM1 fracturés lors d'essais en extension. (a) Vue générale d'un échantillon "dog-bone" fracturé au milieu. (b) à (d) Surfaces de fracture orthogonales à σ_3 générées à différentes pressions de confinement P (Chemenda et al. (2011) ([37]))

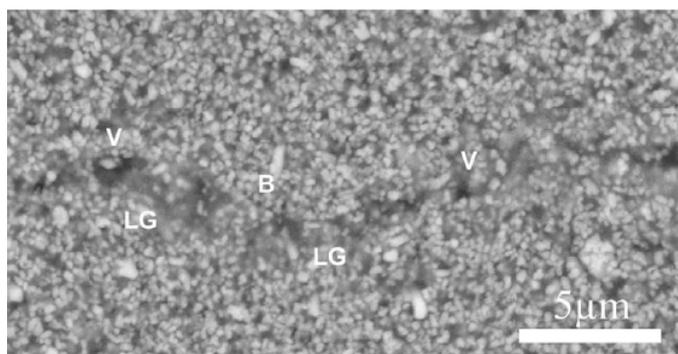


FIGURE 1.44 – Photomosaïque au microscope électronique à balayage (électrons rétrodiffusés) d'une bande de dilatance dans un échantillon de GRAM1 fracturé à $P = 0.6$ MPa. Le matériau a été imprégné avec une résine époxy de basse viscosité qui a pénétré dans et autour de la bande. Après polymérisation (solidification) de la résine, l'échantillon a été scié perpendiculairement à la bande, et la section polie avec soin avant l'observation. Les structures sont caractéristiques et ne peuvent être introduites par le sciage ou le polissage. À l'échelle présentée, la bande apparaît formée par un alignement de vides (V), de zones de grains lâches (LG) où les grains décompactés apparaissent inclus dans la résine grisâtre troubles autour des grains), et par des ponts (B) de matériel apparemment intact (Chemenda et al. (2011) ([34])).

1.3 Théorie de la bifurcation

Prédire les conditions d'initiation et de propagation de la localisation de la déformation est important en sciences de la Terre et plus largement dans les secteurs industriels.

Pour décrire le phénomène de localisation de déformation et de la rupture, il y a deux approches principales. La première approche est de décrire les phénomènes macroscopiques à partir de considérations micromécanismes : mécanique de la rupture. La deuxième approche est de type phénoménologique : théorie de Mohr-Coulomb et théorie de la bifurcation.

Pour la mécanique de la rupture, son objet est de déterminer l'évolution d'une fissure dans un milieu continu en fonction du chargement auquel un matériau fragile est soumis. Cette approche dérive de la « théorie de Griffith » (1920) qui est basée sur la définition des conditions de propagation d'une fissure pré-existante en se basant sur un bilan énergétique associé à la fissure. McClintock et Walsh (1962) ([93]) et Brace (1960) ([27]) ont étendu cette théorie en prenant en compte la fermeture des fissures sous contraintes compressives ainsi que le frottement entre les bords de la fissure. La théorie de Griffith prédit des conditions de propagation d'une fissure unique. Cependant, la rupture sous une pression suffisamment importante n'est pas causée par le développement d'une seule fissure majeure, mais par plusieurs fissures qui cohabitent pour former la rupture macroscopique. Le critère de Griffith initial et modifié ne peuvent pas rendre en compte de processus de rupture globale des géomatériaux.

La théorie la plus connue et la plus utilisée en géomécanique est la théorie de Mohr-Coulomb. L'avantage de cette théorie est sa simplicité. Cependant, cette approche n'explique le comportement des roches que de façon approximative. En effet, le critère de rupture de Coulomb et le cercle de Mohr sont utilisés pour déterminer la combinaison contrainte de cisaillement et contrainte normale qui aboutit à la rupture. L'orientation du plan de rupture est alors contrôlée par les directions des contraintes principales majeure et mineure et l'angle de la surface de rupture ne dépend que du coefficient de frottement interne du matériau. En réalité, les études expérimentales de Mogi (1967) ([96]), Chang et Haimson (2000) ([30]) ont montré que la contrainte intermédiaire σ_2 influence à la fois la contrainte à la rupture et l'orientation du plan de rupture. De plus, la théorie de Mohr-Coulomb ne tient pas en compte de l'influence de la réponse inélastique complète au début de la rupture (Sulem (2010) [138]).

Théorie de la bifurcation

Les observations du processus de rupture ont montré que ce qui apparaît comme un plan de rupture est en fait une zone de localisation de la déformation. Des dernières années, la théorie de la bifurcation (Rice (1973) [125], Rudnicki et Rice (1975) [127], Vardoulakis et Sulem (1995) [154], Chemenda (2007) [32], (2009) [33], [138]) a prouvé être utile et efficace pour rendre compte de la rupture des géomatériaux. En 1975, Rudnicki et Rice ([127]) ont adapté pour la première fois la théorie de la bifurcation au modèle de comportement réaliste pour géomatériaux. Ils ont montré que les caractères de géomatériaux comme le comportement plastique non associé et non coaxial ont des influences importantes sur le processus de localisation de la déformation. Plusieurs études expérimentales sur des sols et des roches ont été effectuées pour comprendre ces processus physiques qui contrôlent la localisation de la déformation ([140]).

Cette localisation est considérée comme une instabilité constitutive du matériau qui peut être prédite à partir des propriétés du matériau et des conditions de chargement. Les conditions pour le début de la localisation sont établies par trouver les conditions critiques possibles des

équations constitutives qui permettent l'existence d'un point de bifurcation, puis la formation d'une bande plane étroite de localisation. Ces conditions de bifurcation sont montrées dans Sulem (2010) (Sulem et al. (2010) [138]) :

1. Des relations constitutives du matériau ;
2. Des conditions d'équilibre mécanique au travers de la limite de la bande ;
3. Des conditions de compatibilité cinétique qui expriment le champ de vitesse est continu.

1.3.1 Théorie de bifurcation pour une mono-bande

Selon le concept général, la bifurcation d'un état de déformation homogène est considérée comme le résultat d'une instabilité dans la description constitutive. L'instabilité constitutive correspond à la formation d'une bande plane et étroite à l'intérieur d'un corps infini soumis à un chargement mécanique. À l'extérieur de la bande, le champ de vitesse est homogène et à l'intérieur il ne varie que dans la direction normale à la bande (cf. Figure 1.45).

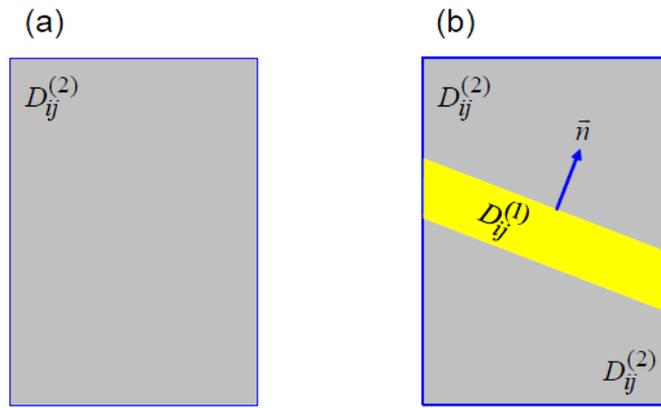


FIGURE 1.45 – (a) Déformation homogène; (b) Déformation localisée en bande de localisation [98]

La différence entre les taux de déformation extérieure $D_{ij}^{(2)}$ et intérieure $D_{ij}^{(1)}$ s'écrit :

$$D_{ij} = D_{ij}^{(1)} - D_{ij}^{(2)} = \frac{1}{2}[n_j g_i(n.x) + n_i g_j(n.x)] \quad (1.1)$$

Où g_i sont des fonctions non-nulles uniquement à l'intérieur de la bande ($g_2 = 0$, correspondant à une bande parallèle à σ_2), x_i sont les axes principaux du repères cartésien, et $n(n_i)$ est la normale à la bande ($i = 1, 2, 3$).

La condition d'équilibre implique la continuité du vecteur vitesse de contrainte à travers la bande :

$$n_i \dot{\sigma}_{ij} = n_i (\dot{\sigma}_{ij}^{(1)} - \dot{\sigma}_{ij}^{(2)}) = 0 \quad (1.2)$$

où $\dot{\sigma}_{ij}^{(r)}$ ($r = 1, 2$) sont les dérivées temporelles de la contrainte à l'intérieur ($r = 1$) et à l'extérieur ($r = 2$) de la bande. La relation constitutive entre la vitesse de contrainte et le taux de déformation est supposée linéaire, homogène :

$$\dot{\sigma}_{ij}^{(r)} = L_{ijkl}^{(r)} D_{kl}^{(r)} \quad (1.3)$$

Dans ce cas, le tenseur de raideur élasto-plastique du ordre 4 L_{ijkl} est identique à l'intérieur et à l'extérieur de la bande pendant la localisation de déformation $L_{ijkl}^{(1)} = L_{ijkl}^{(2)} = L_{ijkl}$, l'équation (1.3) devient :

$$\dot{\sigma}_{ij} = L_{ijkl} D_{kl} \quad (1.4)$$

En combinant les équations (1.1), (1.2), (1.4), on obtient un système d'équations linéaires, homogènes sur les fonctions g_i :

$$(n_i L_{ijkl} n_j) g_k = 0 \quad (1.5)$$

dont les solutions non-triviales existent quand :

$$\det |n_i L_{ijkl} n_j| = 0 \quad (1.6)$$

(1.6) est l'équation caractéristique représentant la condition de bifurcation de la déformation lors qu'une continuation non-uniforme de déformation ($g_i \neq 0$) est possible. Elle montre que la condition de bifurcation relie l'orientation n_i de la bande au module tenseur de raideur L_{ijkl} . Il faut donc bien définir ce tenseur L_{ijkl} qui dépend du choix du modèle constitutif pour analyser la bifurcation et trouver les relations critiques entre l'orientation n_i , les paramètres constitutifs et l'état de contrainte.

1.3.1.1 Les équations constitutives :

Rudnicki & Rice ont utilisé un modèle constitutif avec une surface de charge $f(\sigma_{ij})$ et un potentiel plastique $\Phi(\sigma_{ij})$ de Druker-Prager qui sont exprimés comme suit :

$$f = \bar{\tau} + \alpha\sigma - k \quad (1.7)$$

$$\Phi = \bar{\tau} + \beta\sigma \quad (1.8)$$

Où α est le coefficient de frottement interne; k est la cohésion interne; $\bar{\tau} = (\frac{1}{2}s_{ij}s_{ij})^{1/2}$ est la contrainte équivalente de Mises; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ est le déviateur de contrainte; δ_{ij} est l'indice de Kronecker; $\sigma = 1/3\sigma_{ij}$ est la contrainte moyenne; β est le coefficient de dilatance défini par le rapport entre la déformation volumique inélastique ε^p et la déformation inélastique cisailante effective $\bar{\gamma}^p$ (cité de Chemanda (2007) [32]) :

$$\beta = -\frac{d\varepsilon^p}{d\bar{\gamma}^p} \quad (1.9)$$

Où $d\bar{\gamma}^p = (2de_{ij}^p de_{ij}^p)^{1/2}$ et $de_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{3}\delta_{ij}d\varepsilon_{kk}^p$; avec en condition de dilatance $\beta > 0$, et en condition de compaction $\beta < 0$.

La déformation incrémentale totale est la somme des incréments de déformation élastique et de déformation inélastique :

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (1.10)$$

où les déformations élastiques sont reliées aux contraintes par la loi de Hooke; les incréments de déformation inélastiques sont déterminé à partir de la fonction du potentiel plastique :

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{d\sigma}{K}\delta_{ij} + \frac{ds_{ij}}{2G} \quad (1.11)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda \left[\frac{s_{ij}}{2\bar{\tau}} + \frac{1}{3}\beta\delta_{ij} \right] \quad (1.12)$$

K et G sont les modules de compressibilité et de cisaillement selon la relation suivante : $K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$; ν est le coefficient de Poisson. $d\lambda$ est la fonction scalaire non-négative à trouver. Pour la variation relative du volume inélastique incrémental, l'équation (1.12) donne :

$$d\varepsilon^p = d\varepsilon_{ii}^p = \beta d\lambda \quad (1.13)$$

Utilisant les équations (1.13) et (1.9) dans l'équation (1.12), on obtient :

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\bar{\gamma}^p \left[\frac{s_{ij}}{2\bar{\tau}} + \frac{1}{3}\beta\delta_{ij} \right] \quad (1.14)$$

La fonction seuil :

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \bar{\gamma}^p} d\bar{\gamma}^p = 0 \quad (1.15)$$

Les propriétés changent durant la déformation inélastique, le matériau est soit durci soit adouci. Considérant que α et k sont des fonctions de $\bar{\gamma}^p$; la condition de consistance assurant que l'état de contrainte reste sur la surface de charge dans le cas de déformation inélastique continue est alors écrite par :

$$d\bar{\tau} + \alpha d\sigma - H d\bar{\gamma}^p = 0 \quad (1.16)$$

Où $H = \frac{dk}{d\bar{\gamma}^p} - \sigma \frac{d\alpha}{d\bar{\gamma}^p}$ est le module d'érouissage plastique .

La combinaison des équations (1.10), (1.11), (1.14), (1.16) donne ([127]) :

$$L_{ijkl} = G \left\{ [(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj}) + \left(\frac{K}{G} - \frac{2}{3}\right)\delta_{kl}\delta_{ij}] - \frac{G}{(H+G) + \alpha\beta K} \left(N_{ij} + \frac{K}{G}\beta\delta_{ij} \right) \left(N_{kl} + \frac{K}{G}\alpha\delta_{kl} \right) \right\} \quad (1.17)$$

Où $N_{ij} = \frac{s_{ij}}{\bar{\tau}}$;

1.3.1.2 Le module d'érouissage critique et l'orientation de la bande de cisaillement :

La condition de bifurcation (éq 1.6) dépend du module d'érouissage H en fonction des paramètres constitutifs incrémentaux G, K, α , β et de l'état-contrainte N. En introduisant l'équation (1.17) dans l'équation (1.6), Rudnicki et Rice (1975) ([127]) ont trouvé :

$$H = 3 \frac{(Gn_i N_{ij} n_j + \beta K)(Gn_k N_{kl} n_l + \alpha K)}{4G + 3K} + G [(n_i N_{ij} n_k N_{kj}) - (n_i N_{ij} n_j)^2] - (G + \alpha\beta K) \quad (1.18)$$

H varie avec l'orientation de la bande de localisation et il décroît généralement quand la déformation plastique augmente. Par conséquent, Rudnicki et Rice (1975) ([127]) ont considéré que l'orientation pour laquelle le critère de la bifurcation est satisfait correspond à la valeur maximale de H . Si la normale de la bande est perpendiculaire à la direction de contrainte principale intermédiaire σ_2 , la valeur critique du module d'érouissage est alors :

$$h_{cr} = \frac{H_{cr}}{G} = \frac{1+\nu}{9(1-\nu)}(\beta - \alpha)^2 - \frac{1+\nu}{2} \left(N + \frac{\alpha + \beta}{3} \right)^2 \quad (1.19)$$

Où α , β , ν sont les paramètres du modèle déterminés lors des essais expérimentaux; $N = \frac{s_2}{\bar{\tau}}$ est le paramètre de l'état de contrainte déviatorique. Dans l'état de compression axisymétrique

$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, N est de $1/\sqrt{3}$; et dans l'état d'extension axisymétrique $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, N est de $-1/\sqrt{3}$. s_2 est la contrainte déviatorique principale intermédiaire.

Etant donné que h devrait être décroissant de façon monotone en fonction de la déformation inélastique, l'expression donne la valeur de h où la bande de cisaillement est possible si la condition suivante est satisfaite (Issen et Rudnicki (2001) [72], Perrin et Leblond (1993) [110]) :

$$N(1 - 2\nu) - \sqrt{4 - 3N^2} \leq \frac{2}{3}(\nu + 1)(\alpha + \beta) \leq N(1 - 2\nu) + \sqrt{4 - 3N^2} \quad (1.20)$$

Lorsque l'inégalité à gauche de 1.20 est violée, la bande de compaction est prédite dans la direction perpendiculaire à la contrainte principale la plus compressive. La valeur de h_{cr} est donc exprimée selon l'expression ([72], [33]) :

$$h_{cr}^c = \frac{H_{cr}^c}{G} = \frac{(1 + \nu)(\beta - \alpha)^2}{9(1 - \nu)} - \frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \left(\frac{1}{2}N_3 - \frac{\alpha + \beta}{3} \right)^2 - \left(1 - \frac{3}{4}N_3^2 \right) \quad (1.21)$$

Où $N_3 = (s_3/\bar{\tau}) = -(1/2)(N + (1/2)\sqrt{4 - 3N^2})$; s_3 est la contrainte déviatorique principale la plus compressive. « c » signifie compaction.

Quand l'inégalité de droite de 1.20 est violée, la bande de dilatance est prédite dans la direction perpendiculaire à la contrainte principale la moins compressive, et l'expression de h_{cr} est trouvée en remplaçant N_3 par $N_1 = s_1/\bar{\tau}$ dans l'équation 1.21.

Bésuelle (2001) ([19]) a également montré que le type de bande varie de façon continue des bandes de compaction aux bandes de dilatance à travers la gamme de 1.20. L'égalité 1.20 peut être re-exprimée à travers de la gamme de $\beta + \alpha$ comme une fonction de $\sqrt{3}N$. La figure 1.46, présentée par Issen et Rudnicki (2001) ([72]), montre l'évolution des domaines de bandes. Les bandes de cisaillement sont prédites dans la région centrale où l'équation 1.19 représente la valeur critique maximale du module d'écrouissage. Les bandes de compaction sont prédites pour les valeurs de $\beta + \alpha$ au-dessous de cette région et les bandes de dilatance sont prédites au-dessus cette région.

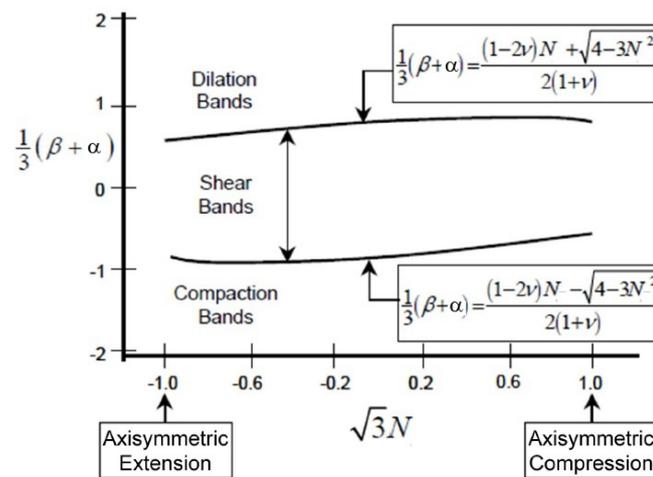


FIGURE 1.46 – Orientations de band prédites comme des fonctions de $\beta + \alpha$ et N ([72])

Cependant, les approches classiques ne mentionnent qu'une bande unique. En réalité, on observe des réseaux de bandes/fractures sur le terrain ou en laboratoire. Ces réseaux de

bandes/fractures sont caractérisés par un certain d'espacement dominant, l'épaisseur d'une bande. Ce paramètre d'espacement est décrit comme une fonction des paramètres constitutifs (α, β, ν, N) , y compris le module d'écrouissage h (Chemanda (2007) ([32], (2009) ([33])).

1.3.2 Formation de réseau de bandes/fracture

La condition de bifurcation pour un réseau de bandes/fractures est définie sur la figure 1.47.

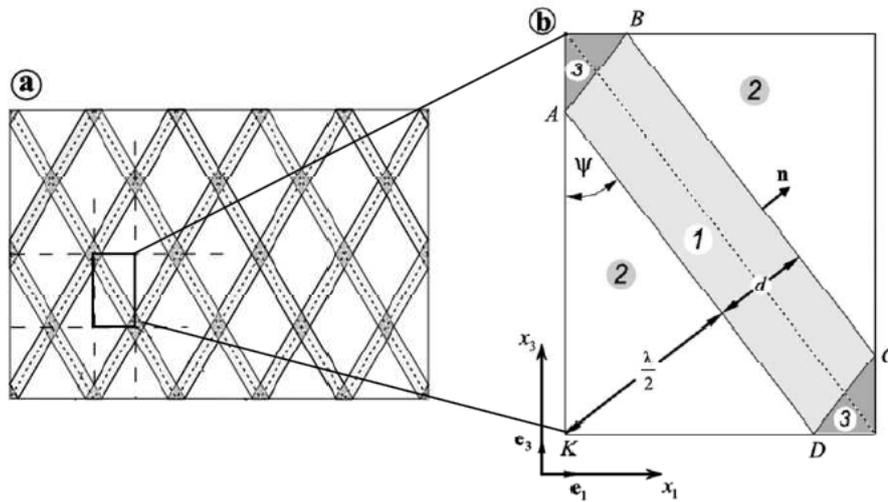


FIGURE 1.47 – Réseau régulier de bandes cisailantes. (a) configuration de localisation composée de deux familles de bandes parallèles conjuguées; (b) cellule élémentaire. d est l'épaisseur des bandes, λ est l'espacement entre les bandes. 1, 2, 3 sont des zones de champs de déformation différents. e_i sont les vecteurs unitaires (Chemenda (2007) ([32]))

Le réseau de bandes/fractures est représenté en deux familles de bandes parallèles conjuguées. Ces bandes sont symétriques par rapport à x_1 et x_3 , et parallèle à x_2 . L'épaisseur des bandes est d et l'espacement entre les bandes est λ . La configuration de déformation représente une structure répétée spatiale qui est composée d'une cellule élémentaire dont la taille définit l'espacement dominant d'une bande. L'analyse pour obtenir la condition de bifurcation dans cette cellule est basé sur l'hypothèse que l'apparition de la bifurcation se produit grâce à la redistribution de l'énergie sans apport d'énergie extérieure à la cellule. La cellule élémentaire est divisée en trois zones de champs de vitesse différents (cf. Figure 1.47). Chemenda (2007) ([32]) a analysé la bifurcation pour deux cas : la bifurcation continue et la bifurcation discontinue.

Pour la bifurcation continue, le paramètre d'espacement $(\chi = \frac{d}{\lambda})$ n'influence pas les conditions de bifurcation. Les équations de module d'écrouissage et de l'orientation de la bande sont le même que dans le cas d'une bande unique décrit précédemment.

Pour la bifurcation discontinue, il faut prendre en compte les caractères différents des déformations à l'intérieur et à l'extérieur de la bande. À la bifurcation discontinue on a :

$$L_{ijkl}^{(1)} = L_{ijkl} \text{ et } L_{ijkl}^{(2)} = G[(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj}) + (\frac{K}{G} - \frac{2}{3})\delta_{kl}\delta_{ij}] \quad (1.22)$$

La structure de la solution du module d'écrouissage est définie :

$$h = h_{cr} + \chi\wp(\chi, \alpha, \beta, \nu, N) \quad (1.23)$$

où $\wp(\chi, \alpha, \beta, \nu, N)$ est une fonction négative et très lourde (regarder (Chemenda (2007) [32]) pour plus de détail).

Dans le cas qu'une seule bande se formant dans le corps infini, la distance entre les bandes est infinie $\lambda = \infty$ ou $\chi = 0$, la condition de bifurcation est :

$$h_{\chi=0} = h_{cr} = \frac{1 + \nu}{9(1 - \nu)}(\beta - \alpha)^2 - \frac{1 + \nu}{2}\left(N + \frac{\alpha + \beta}{3}\right) \quad (1.24)$$

Quand il y a saturation des bandes, l'épaisseur de bande est égale à la distance d'inter-bande $\lambda = d$ ou $\chi = 1$, la valeur de h est donc :

$$h_{\chi=1} = h_{cr} + \frac{(\nu + 1)(\beta - \alpha)}{3(1 - \nu)}\left[\frac{N}{4} + \frac{\alpha(\nu + 1)}{3(2\nu - 1)}\right] + \frac{3}{4}N^2 - 1 \quad (1.25)$$

Chemenda (2007) ([32]) a montré la condition d'existence d'un réseau de bande/fracture selon la valeur de h satisfaisant $h_{min} = h_{\chi=1} \leq h \leq h_{max} = h_{\chi=0}$ ou $0 \leq \chi \leq 1$. Avec la diminution de h (les autres paramètres étant constants), la distance entre les bandes/fractures diminue (χ diminue, λ augmente).

L'orientation Ψ des bandes conjuguées par rapport à la direction compressive maximale (σ_1) est donnée ci-dessous ([32]) :

$$\cos(2\Psi) = \frac{2(1 + \nu)(\alpha + \beta + 3N) - 9N}{3\sqrt{4 - 3N^2}} \quad (1.26)$$

Si un réseau des bandes de compaction parallèles se forme, les valeurs de h et de χ sont exprimées selon les équations suivantes ([33]) :

$$h = \frac{H}{G} = h_{cr}^c + \chi \frac{C_{\alpha\beta}}{18(2\nu - 1)(1 - \nu)(\chi + 1)} \quad (1.27)$$

$$\chi = \frac{18(h - h_{cr}^c)(2\nu - 1)(1 - \nu)}{18(h - h_{cr}^c)(2\nu - 1)(\nu - 1) + C_{\alpha\beta}} \quad (1.28)$$

Où $C_{\alpha\beta} = [2\beta(1 + \nu) - 3N_3(2\nu - 1)][2\alpha(1 + \nu) - 3N_3(2\nu - 1)]$ et h_{cr}^c est déjà montré à l'équation 1.21.

1.4 Modèles numériques

Pour mieux comprendre le processus de formation des bandes de localisation de la déformation et de ruptures, les conditions de leur apparition en réseau et leur évolution, il y a beaucoup d'études de modélisation numérique. La modélisation numérique nécessite une description précise des propriétés mécaniques de roches (propriétés constitutives). Ceci est difficile du fait de la complexité de ces propriétés et ainsi que l'absence de données expérimentales appropriées. Cependant, les progrès récents dans la modélisation ainsi que la croissance des performances de calcul rendent la modélisation numérique un outil de plus en plus puissant. Nous présenterons à la suite quelques résultats de la modélisation numérique de Chemenda et ses collègues sur les conditions d'initiation et de propagation des bandes de localisation de la déformation.

Les modèles présentes intègrent l'évolution des paramètres constitutifs avec les contraintes et déformations et la relation dérivée expérimentalement entre les fonctions de la surface de charge et du potentiel plastique (Mas et Chemenda (2015) ([92])). Par conséquent, cet approche peut reproduire tous les types de bandes, voire des scénarios plus complexes tels que l'évolution des réseaux de bandes, leur épaissement et la propagation des bandes. Chemenda et al. (2012) ([38]) ont réussi à générer dans ces modèles⁵ les réseaux de bandes de cisaillement compactante similaire à la structure de bandes observée sur la terrain. La figure 1.48 présente l'évolution d'un réseau de bandes cisailante-compactantes montrée en termes de déformation inélastique accumulée $\bar{\gamma}_p$ et de l'état mécanique du matériau. Nous pouvons observer qu'aux premiers stades, la bande entière subit une déformation inélastique. À des stades ultérieurs, cette déformation se produit uniquement le long des flancs de la bande par l'incorporation de la roche hôte intacte, conduisant à l'épaississement de la bande. La partie centrale de la bande (déjà cisailée et compactée, donc durcie) subit principalement le déchargement élastique. La densité de la bande augmente avec la déformation due à la formation de nouvelles bandes et la propagation et la réflexion des bords du modèles des bandes existantes. Ces résultats des modèles numériques ont aussi mis en évidence que l'épaisseur total de la bande est clairement proportionnelle au déplacement cisailant total, ce qui est en accord avec les observations sur le terrain (Saillet et Wibberley (2010) ([128])).

L'impact d'une structure multicouche sur l'initiation et l'évolution de la localisation des déformations ainsi que le motif des bandes dans des roches poreuses a également été étudiée dans Chemenda et al. (2014) ([36]). L'organisation spatiale des réseaux de bandes dans la couche centrale, résultant de l'instabilité élastique-plastique du système à 3-couches, a montrée dépendre du contraste de rigidité élastique et du frottement entre les couches. Lorsque la rigidité élastique des couches E et/ou le frottement sont faibles, les réseaux sont assez *symétriques* (cf. Figure 1.49e). Une augmentation de E ou du frottement provoque le regroupement des bandes d'une orientation le long d'un segment de couche qui est suivi par un autre segment rempli avec les bandes de l'autre orientation (un réseau des bandes *asymétrique*) (cf. Figure 1.49a-c). Les résultats présentés semblent être en accord avec les données expérimentales. Dans des expériences de roche (les essais en compression de Bésuelle et al. (2000) ([20]) par exemple), les échantillons de roche sont en contact avec des embases plus rigides. Cependant, les réseaux de bandes de cisaillement se présentent symétriquement ($P_c = 40 \div 60$ MPa) (cf. Figure 1.28). La raison est que le frottement est très faible entre l'échantillon et les embases. Une observation similaire a été fait dans expériences des figures 1.36d et e de Jorand et al. (2012) ([76]). Les couches de GRAM2 sont prises en sandwich entre deux couches du caoutchouc. Caoutchouc et

5. Modèles numériques de 2-D 3-couches. La localisation de déformation peut se produire uniquement dans la couche 2 qui subit une déformation élastique-plastique. Les couches 1 et 3 sont élastiques et totalement couplées à la couche 2.

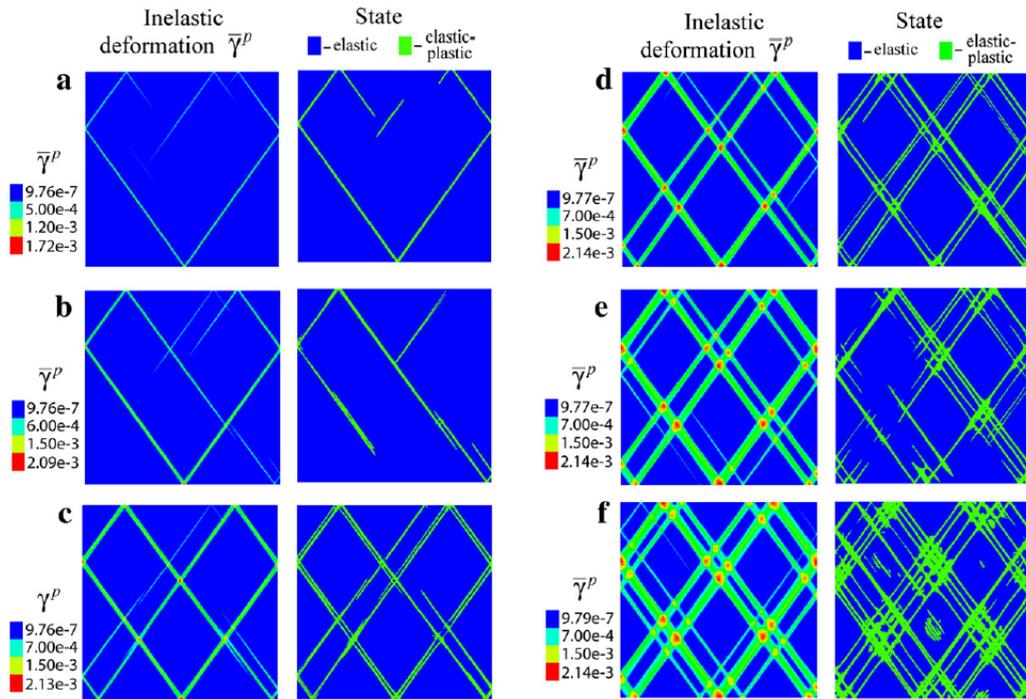


FIGURE 1.48 – Évolution du motif de $\bar{\gamma}_p$ et de l'état mécanique matériel dans le modèle d'une seule couche avec $h_{ini}^{sh} = -0.03$ et $h_{end}^{sh} = 0.3$. Les déformations nominales aux étapes indiquées de l'évolution du modèle sont : (a) $\varepsilon_1 = 10^{-5}$; (b) $\varepsilon_1 = 3.5 \times 10^{-5}$; (c) $\varepsilon_1 = 7.9 \times 10^{-5}$; (d) $\varepsilon_1 = 1.5 \times 10^{-4}$; (e) $\varepsilon_1 = 2.2 \times 10^{-4}$; (f) $\varepsilon_1 = 2.8 \times 10^{-4}$; (g) $\varepsilon_1 = 3.5 \times 10^{-4}$; (h) $\varepsilon_1 = 5.7 \times 10^{-4}$. La contrainte principale majeure σ_1 est horizontale. (Chemenda et al. (2012) ([38])).



FIGURE 1.49 – Les motifs de $\bar{\gamma}_p$ dans quatre modèles chargés au même raccourcissement horizontal total de 2.8×10^{-2} m. (a) $E = 5E_2$. (b) $E = E_2$. (c) $E = 0.5E_2$. (d) $E = 0.3E_2$. (e) $E = 0.05E_2$. La couche montrée est prise en sandwich entre deux autres couches non représentées (Chemenda et al. (2014) ([36])).

GRAM2 sont séparés par des feuilles de Téflon pour diminuer le frottement à l'interface. Le coefficient de frottement faible entre les couches et la rigidité élastique faible du caoutchouc (en comparaison avec la rigidité de GRAM2) peuvent donc être considérés les deux raisons pour lesquelles la formation des réseaux de bandes est symétriques.

Les différents types de bandes de compaction (droites et en chevrons/ou zigzag) sont également bien reproduits par les modèles numériques. Les bandes en zigzag reproduites par les simulations numériques de Chemenda (2009) ([33]) apparaissent progressivement à partir des extrémités de l'échantillon (le modèle numérique) vers le milieu (cf. Figure 1.50). Ces caractéristiques sont similaires à la formation des bandes de compaction discrètes observée en laboratoire (Baud et al. (2004) ([13]), Fortin et al. (2005) ([57])) (cf. Figure 1.29d). Une telle propagation de la déformation dans la direction perpendiculaire aux bandes est due aux l'effet de bords et est liée à l'évolution des propriétés constitutives de matériau avec la déformation.

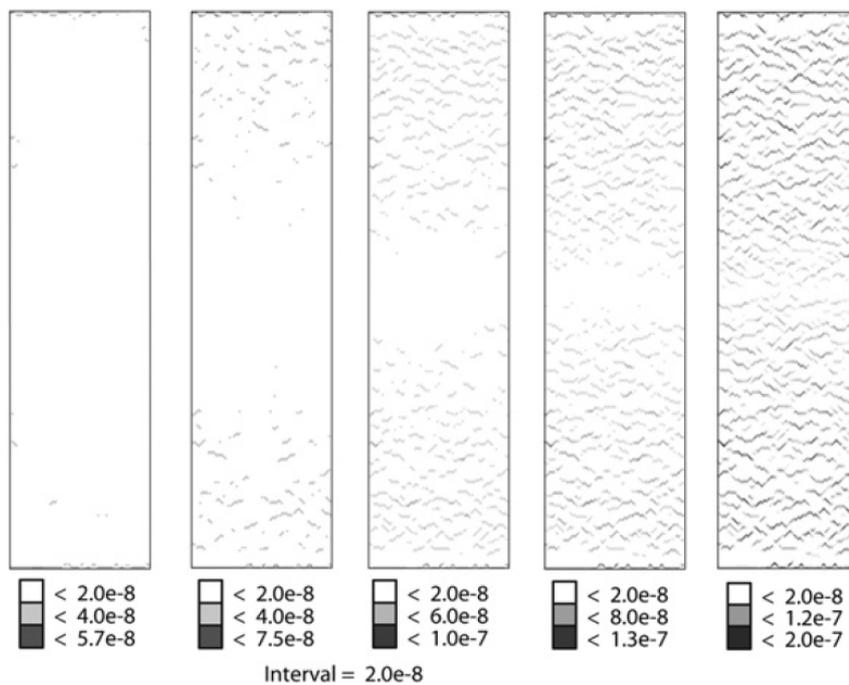


FIGURE 1.50 – Les motifs de déformation inélastique cisailante effective accumulée $\bar{\gamma}_p$ pour les étapes successives de l'évolution du modèle numérique sous contrainte compressive axisymétrique à $\alpha = 0.2$, $\nu = 0.3$, $h = -0.36$, $N = 1/\sqrt{3}$ et β croissant linéairement de -0.7 (à $\bar{\gamma}_p = 0$) à 0.18 (à $\bar{\gamma}_p = 2 \times 10^{-7}$) (Chemenda (2009) ([33])).

Chemenda (2011) ([35]) se concentre sur la formation et l'évolution des bandes de compaction longues, tabulaires. Ces bandes sont initiées comme des instabilités constitutives résultant de la bifurcation de la déformation (cf. Figure 1.51a). Ensuite certaines bandes meurent, tandis que d'autres continuent d'évoluer l'accumulation de la déformation inélastique (cf. Figure 1.51b-d) et des contraintes compressives au bout des bandes. Cependant, la concentration de contrainte ne dépasse pas 0.1% de la valeur moyenne (cf. Figure 1.51e). Dans le stade suivant, la concentration de contrainte est réduite, la propagation se ralentit et est accompagnée par l'épaississement des bandes dû à l'incorporation de matériau non compacté sur les flancs de bandes (cf. Figure 1.51f-g). La déformation inélastique est concentrée en périphérie de la bande (cf. Figure 1.51j), alors que la réponse de la partie déjà compactée de la bande (“noyau” de la bande) est quasiment élastique. L'épaisseur de cette partie augmente progressivement avec l'épaississement de la bande. La propagation de la bande est pratiquement arrêté au dernière

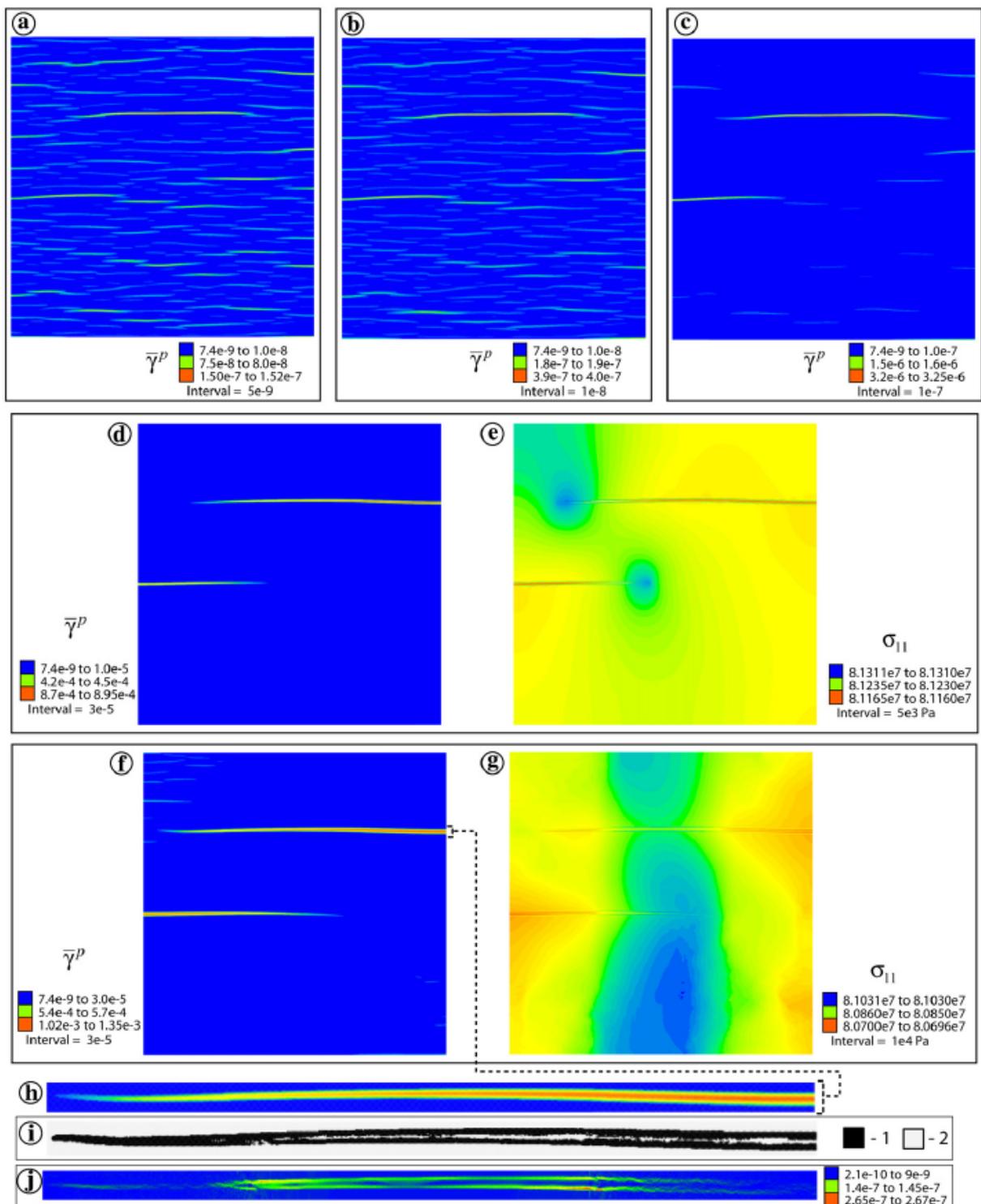


FIGURE 1.51 – Évolution de bandes de compaction en terme de $\bar{\gamma}_p$ et de la contrainte majeure σ_{11} qui est verticale. (d)-(e), (f)-(g) correspondent respectivement aux mêmes stades de déformation. (h) Zoom de la bande supérieure dans (f); (i) La même bande présentée en terme de la réponse mécanique du matériau : 1. réponse élastique-plastique; 2. réponse élastique. (j) Distribution du taux de déformation de cisaillement à l'intérieur et autour de la même bande que dans (h) et (i) (Chemenda (2011) ([35])).

stade et seulement l'épaississement de la bande, qui est maximale dans le segment central de la bande et réduit vers le bout de la bande, est observé.

Chapitre 2

Technique de corrélation d'images (DIC Digital Image Correlation)

Contents

2.1	Caractérisation des mécanismes de déformation : les techniques expérimentales	52
2.1.1	Détection par mesure de déformations	53
2.1.1.1	Capteurs axiaux et radiaux	53
2.1.1.2	Mesures du champ de déformation	53
2.1.1.3	Mesures par tomographie rayons X	54
2.1.2	Détection par émissions acoustiques	54
2.1.3	Détection par observations microscopiques	55
2.2	Méthodes de mesures du champ de déformation complet	57
2.2.1	Méthodes interférométriques	57
2.2.1.1	Interférométrie holographique	57
2.2.1.2	Moiré interférométrique	58
2.2.2	Méthodes non-interférométriques	59
2.2.2.1	Méthodes de grilles	59
2.2.2.2	Méthodes de corrélation d'images numériques bidimensionnelle (DIC-2D)	60
2.2.2.3	Méthodes de flux optique	62
2.3	Corrélation d'images numériques 2D (DIC-2D)	63
2.3.1	Principe de la technique de corrélation d'images	63
2.3.2	Le logiciel de corrélation Sept-D (7D)	64
2.3.2.1	Définitions générales	65
2.3.2.2	Méthode d'auto-adaptation du motif à corrélérer pour déterminer des champs de déplacements	69
2.3.2.3	Paramètres utilisés	70
2.4	Incertitude de mesure par la technique DIC-2D	71
2.5	Quelques exemples d'application de la technique DIC en géomatériaux	72

2.1 Caractérisation des mécanismes de déformation : les techniques expérimentales

Dans le domaine de la mécanique des géomatériaux, l'observation de l'apparition de la localisation de bande et du mode de rupture se réalise par de nombreuses techniques. Ces techniques se concentrent sur le but des études et aussi sur les modes de déformation, soit l'observation à l'échelle macroscopique soit la concentration de microfissures à l'échelle du grain.

Les différentes techniques expérimentales peuvent être classées en trois groupes principaux (cité par Bésuelle (1999) ([18])) :

1. Les mesures de déformation

Ces techniques comparent les déformations dans plusieurs directions ou mesurent directement le champ de déformation afin de détecter la perte d'homogénéité et d'observer l'évolution de la déformation. On trouve alors :

- La technique de mesure de déformation dans plusieurs directions par des capteurs axiaux et radiaux ;
- La mesure du champ de déformation en surface d'échantillon, par des techniques optiques ou par interférométrie laser ;
- La mesure du champ de densité interne par tomographie rayons X.

2. Les mesures soniques

La détection de l'initiation et de l'évolution de la localisation de déformation se fait par la technique d'émissions acoustiques ou par la technique de vitesse d'ondes.

- On considère que l'initiation et la propagation des microfissures libèrent de l'énergie sous forme acoustique. La mesure des émissions grâce à des capteurs posés à différents endroits sur la surface de l'échantillon permettent en plus de localiser les événements acoustiques par une technique de tomographie.
- Pour la technique de vitesse d'ondes, on mesure la vitesse de propagation d'onde à travers l'échantillon. L'apparition d'une zone localisée induit une chute des vitesses, suivant leur orientation.

3. Les observations microscopiques

Des observations microscopiques peuvent se faire en utilisant des coupes minces de l'échantillon post-mortem. Cette technique est destructive, il est donc nécessaire d'interrompre les essais à différents stades de chargement.

Selon la synthèse sur les études de la localisation effectuée dans Scholz (1968) [129] complétée par les études plus récentes (Bésuelle, (1999) [18]), la localisation de déformation apparaît avant le pic de contrainte mais à différentes valeurs en pourcent par rapport à la contrainte au pic, même pour une seule roche. Cela tient à la technique de détection, mais aussi à la qualité de l'essai et surtout aux conditions de frottement aux extrémités.

2.1.1 Détection par mesure de déformations

2.1.1.1 Capteurs axiaux et radiaux

C'est la méthode la plus simple pour mesurer des déplacements axiaux et radiaux dans des directions différentes. Dans l'étude plus récente, Bésuelle (1999) ([18]) a réalisé son étude sur le comportement du grès des Vosges sous chargement triaxial en utilisant des mesures de déplacements axiaux et radiaux. Trois capteurs de déplacement axial sont posés directement sur la surface de l'échantillon et les mesures des trois capteurs sont comparées ensemble pour observer l'homogénéité du champ de déformation axiale. Quatre capteurs radiaux à mi-hauteur de l'échantillon cylindrique dans deux directions orthogonales mesurent la déformation radiale. Les capteurs axiaux et radiaux fournissent une mesure de déformation la plus réaliste et nous permettent de détecter la perte d'homogénéité de déformation. Au moment de cette perte d'homogénéité, il considère qu'il y a localisation de la déformation. En analysant les mesures obtenues, le comportement axial de l'échantillon se compose de trois phases :

- Une première phase non homogène correspondant à la phase de mise en place de l'échantillon dans la cellule due en particulier à l'influence des défauts de parallélisme induites aux deux extrémités de l'échantillon.
- Une deuxième phase homogène dans laquelle les vitesses de trois déformations axiales sont très proches.
- Une troisième phase, non homogène, où certaines mesures axiales deviennent divergentes. Le début de cette phase est interprété comme l'initiation de la localisation de la déformation.

Au début de l'essai, les déplacements sont petits, et augmentent en fonction de la contrainte appliquée. En règle générale, les événements mesurés par les capteurs axiaux sont de bons indicateurs de la localisation. Et ses analyses sont souvent accompagnées par des mesures dans la direction latérale du centre de l'échantillon.

2.1.1.2 Mesures du champ de déformation

Ces méthodes se basent sur le principe de mesure sans contact avec l'échantillon observé. Cela permet d'éviter les interactions mécaniques de l'appareil de mesure sur la surface de l'échantillon. Il est nécessaire de créer un réseau de franges d'interférence sur la surface de l'échantillon par une source lumineuse (par exemple : méthodes interférométriques). L'analyse des franges entre le stade initial et le stade déformé donne des mesures de déplacement des points sur la surface observée. Dans la méthode de corrélation d'image digitale (DIC), les images digitales sont acquises suivant la surface de l'échantillon au cours de chargement. Les déplacements sont évalués en comparant l'image au stade déformé avec l'image de référence (généralement l'échantillon au stade non-déformé). L'interprétation des champs de déplacement fournit les

champs de déformation. La connaissance du champ de déformation en fonction de chargement permet d'acquérir une meilleure compréhension de la réponse du matériau sous chargement et de l'étude de mécanisme microscopique. Une description détaillée de ces méthodes est donnée dans la partie suivante.

2.1.1.3 Mesures par tomographie rayons X

X-ray CT (CT - Computed Tomography), connue pour son application dans l'imagerie médicale, est une technique qui permet l'imagerie non destructive et la quantification des caractéristiques internes d'un objet en 3D. Ces mesures sont liées directement à la variation de la densité du matériau dans le cas d'un matériau quasi homogène et sans fluide interstitiel. Le principe de la mesure consiste à enregistrer des images radiographiques d'un échantillon à plusieurs positions angulaires différentes. A partir de ces différentes projections, des tranches virtuelles peuvent être reconstruites avec des algorithmes appropriés. L'empilage des tranches successives permet ensuite de reconstruire une image en 3D de l'objet. Du développement initial pour l'imagerie médicale, X-ray CT est maintenant largement utilisée en sciences de matériaux, et permet des progrès importants dans la compréhension des bandes de cisaillement dans les géomatériaux. Desrues et al. (1996) ([47]) ont utilisé la tomographie numérisée comme un outil qualitatif et quantitatif pour une étude consacrée à la localisation de déformation dans l'essai triaxial sur du sable. X-ray CT est aussi utilisé pour analyser la localisation de déformation à l'état post-mortem d'une roche granulaire (Bésuelle et al. (2000) ([20])). Ses analyses sur des échantillons de grès des Vosges dans l'essai triaxial en compression sous la pression de confinement de 30 MPa et 50 MPa, respectivement, ont montré que la bande de cisaillement détectée dans l'échantillon testé à 30 MPa a apparu comme une zone noire correspondant à la porosité inférieure à la porosité moyenne de l'échantillon et son centre a présenté une déformation cataclastique dilatant, tandis que le bande détectée a montré un comportement de compaction dans le cas à 50 MPa. Cependant, cette méthode exige une puissante source de rayons X afin de permettre une haute résolution, un dispositif de chargement construit spécialement, une cellule de confinement qui est aussi transparent que possible aux rayons X. . . En outre, X-ray CT est basé sur la mesure de transmission, il est donc sensible qu'à variations de densité. Par conséquence, en l'absence de déformation volumétrique mesurable dans la zone de déformation localisée, des rayons X ne peuvent pas détecter le phénomène de localisation. Pour surmonter une telle limitation, certains auteurs ont couplé X-ray CT avec la technique de corrélation d'image numérique (DIC). La comparaison des couples d'images reconstruits en 3D à deux étapes de chargement successives permet de mesurer un champ de déplacement incrémental, au lequel peut être obtenu les tenseurs de déformation (Lenoir et al. (2007) [85], Bornert et al. (2010) [25], Ji et al. (2015) [73]).

2.1.2 Détection par émissions acoustiques

Les émissions acoustiques (EA) sont considérées comme un indicateur efficace de l'évolution de la microstructure, y compris des microfissures dans des échantillons de roche. Dans un échantillon, des déformations locales libèrent une quantité d'énergie suffisante pour générer des impulsions acoustiques. Ces événements acoustiques sont ensuite comptés et enregistrés. Les événements acoustiques au cours de la phase de chargement de l'essai sont censés résulter de la création et la propagation des microfissures. Lorsqu'il y a la densification de microfissuration, il résulte un changement de l'activité acoustique. L'activité acoustique peut être enregistrée en utilisant un capteur piézo-électrique (Scholz (1968) [130]) et le nombre d'EA peut être lié à la déformation inélastique, ou en utilisant un réseau de capteurs attaché sur la surface d'un

échantillon sous chargement, la localisation spatiale peut être affichée. Différents auteurs ont utilisé cette technique dans des essais axisymétriques en compression pour étudier la nucléation de cisaillement-fracture (Lockner 1993), et récemment pour analyser le développement des bandes de compaction discrètes (Fortin et al. (2006) [58], (2009) [59]). De plus, des formes d'onde EA fournissent des informations sur la source des mécanismes qui arrivent au cours de la déformation de la roche, ce qui permet une meilleure compréhension des micromécanismes.

La Figure 2.2 présente la distribution d'hypocentre EA aux projections parallèles aux axes de x, y et z pour un échantillon de grès Bleurswiller dans l'essai triaxial en compression de Fortin et al. (2006) ([58]) à la pression de confinement de 80 MPa correspondant aux différents stades de déformation (Figure 2.1). Des grappes EA premièrement forment à la fois dans l'intérieur de l'échantillon et aux extrémités. Ceci peut être lié à des contraintes hétérogènes en raison de la friction aux bords. La localisation prononcée dans hypocentres EA se produisant dans l'étape b de la figure 2.2 indique que la déformation de l'échantillon est caractérisée par la compaction de cisaillement améliorée (*shear-enhanced compaction*). Événements d'émissions acoustiques forment des grappes qui sont allongées perpendiculairement à la direction de compression. Les bandes de compaction ne sont pas parfaitement planes et développent latéralement par coalescence des grappes d'effondrement de pores. Des d'une bande de compaction traverse l'échantillon, le processus se répète et les nouvelles bandes forment au-dessus et au-dessous des anciennes.

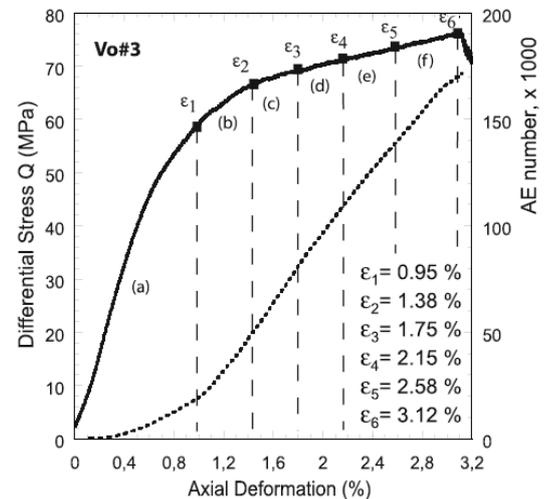


FIGURE 2.1 – Contrainte différentielle (courbe solide) et émissions acoustiques cumulées (courbe en pointillés) en fonction de déformation axiale dans grès Bleurswiller à $P_c = 80 MPa$ (Fortin et al. (2006) [58])

2.1.3 Détection par observations microscopiques

La méthode des lames minces a été utilisé depuis les années 1970. L'étude microscopique est réalisée sur un échantillon chargé jusqu'à un niveau voulu de contrainte puis déchargé. Les étapes expérimentales sont les suivantes (Bied (2000) [52]) :

- Mise en place de l'échantillon sec dans une enceinte dans laquelle on fait le vide.
- Imprégnation et saturation totale de l'échantillon avec le liquide coloré de résine époxy pour améliorer la visibilité des fissures.
- Polymérisation de la résine sous l'effet de la chaleur.
- Découpe de bandes très fines et confection de sections minces avec faces polies et d'une série de lames minces.
- Observation des lames minces au microscopie électronique à balayage (MEB) ou microscope optique.

Les observations micro-structurales permettent d'analyser l'évolution du nombre des fissures, l'étude statistique de leur orientation et de leur longueur, de détecter la répartition spatiale des fissures à l'intérieur d'un échantillon et de caractériser leur forme. Ord et al. (1999) ([106]) ont réalisé les essais de compression en condition biaxiale sur le grès de Gosford et ont observé la formation d'une bande/fracture de cisaillement après les essais. Ils ont souligné qu'à

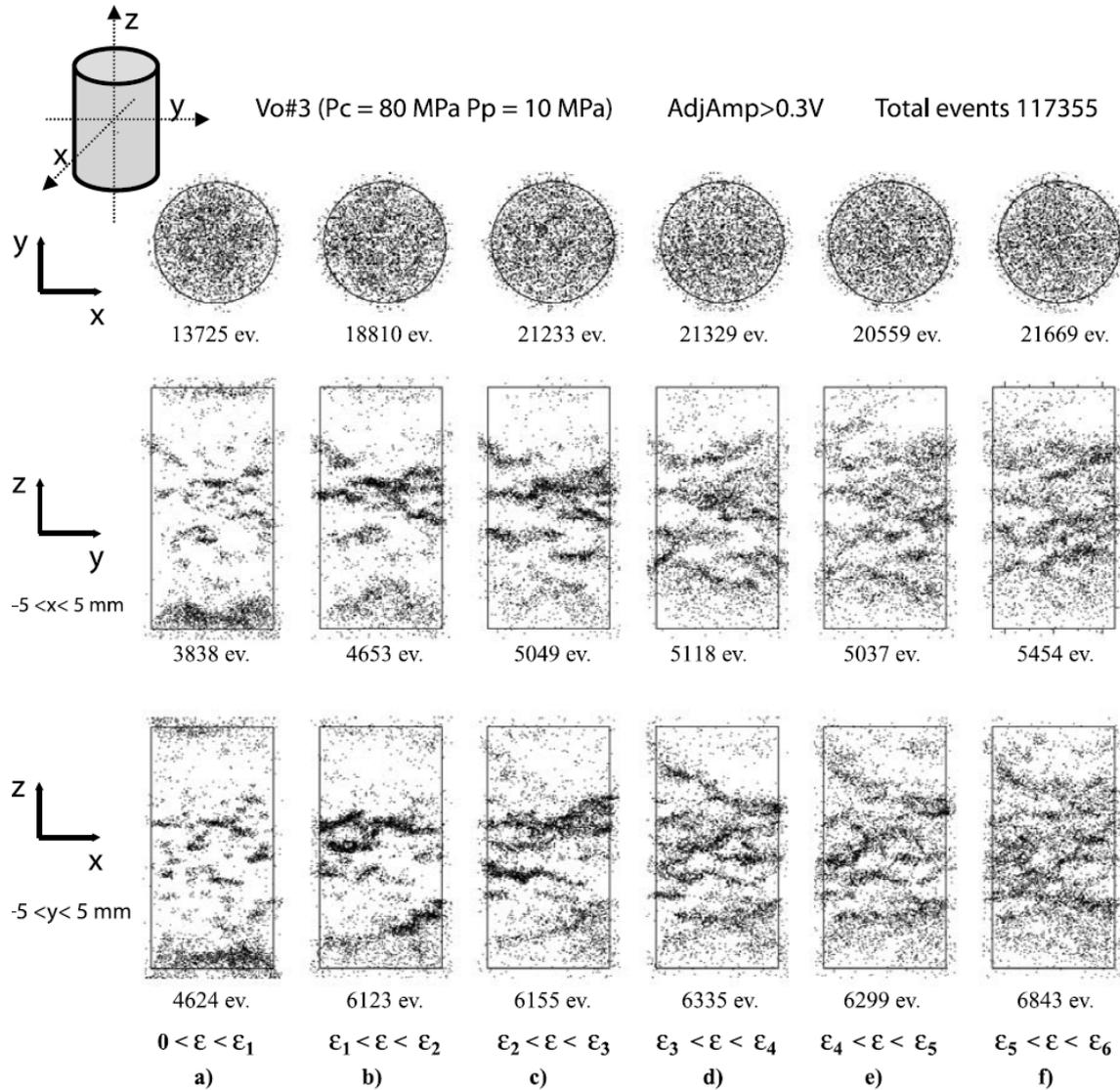


FIGURE 2.2 – Distribution d’hypocentre EA pour l’échantillon à $P_c = 80 \text{ MPa}$. (En haut) Une vue regardant vers le bas sur l’échantillon (projection de tous les événements sur le plan (x, y)). (Au centre) Une projection de tous les événements situés entre $-5\text{mm} < x < +5\text{mm}$ sur le plan (z, y). (En bas) Une projection de tous les événements situés entre $-5\text{mm} < x < +5\text{mm}$ sur le plan (z, x). Chaque point représente un événement EA (Fortin et al. (2006) [58]).

la pression de confinement élevée, une zone de dilatance se trouve parallèle à la surface de rupture et l’entoure. Avant le pic, le comportement du matériau commence par des mouvements rigides des grains, ensuite un processus de microfissuration, avec des fractures intragranulaires et intergranulaires, se localise à l’intérieur de la zone de cisaillement. Des fissures intergranulaires continuent au voisinage proche de la bande. La bande localisée a une épaisseur de un à deux grains. Après la rupture, l’épaisseur de la bande de cisaillement est de 1 à 2 mm, comprennent des grains très fissurés ou même une brèche de fragments cassés.

2.2 Méthodes de mesures du champ de déformation complet

Pour caractériser expérimentalement la localisation de la déformation, des fractures et leur propagations, déterminer l'initiation de bifurcation, il est nécessaire de mesurer le champ de déplacement local sur l'échantillon. Les méthodes de calcul de champs locaux sont très variées et ont été développées pour s'appliquer à différentes échelles, ainsi que différents types de matériaux. Ces techniques se basent sur le principe de mesure sans contact avec l'échantillon observé et fournissent la répartition des déplacements de l'échantillon. L'avantage de la mesure sans contact est d'éviter les interactions mécaniques de l'appareil de mesure sur l'échantillon, en particulier pour les matériaux souples ; en outre, la mesure de déplacement n'est pas perturbée tandis que la rupture progresse.

Dans la littérature, les méthodes de mesure de champ de déplacement de surface utilisent des moyens d'investigation différents (laser, lumière blanche, caméra, microscope optique, microscope électronique à balayage...) et leur mesure repose sur des principes physiques variés (interférométrie, imagerie optique...). On peut séparer l'ensemble de ces techniques en deux grandes classes (Doumalin (2000) [48], Tran (2011) [147]) :

- Méthodes interférométriques
 - Interférométrie holographique
 - Moiré interférométrique
- Méthodes non-interférométriques
 - Méthodes de grilles
 - Méthodes de corrélation d'images
 - Méthodes de flux optique

2.2.1 Méthodes interférométriques

Les méthodes interférométriques, en général, mesurent le déplacement en enregistrant la différence de phase de l'onde lumineuse diffusée à partir de la surface de l'échantillon avant et après déformation. Les résultats de la mesure se présentent sous la forme des franges d'interférence.

Les méthodes d'interférométrie holographique et les méthodes de moiré interférométrique sont des techniques voisines. Elles se basent sur la formation de franges d'interférence, mais la manière de création de ces franges est différente.

2.2.1.1 Interférométrie holographique

Pour les méthodes d'interférométrie holographique, le réseau de franges d'interférence est créé à la surface de l'échantillon par deux faisceaux de lumière cohérente d'orientation différentes par rapport à la normale de la surface. Ces deux faisceaux sont séparés à partir d'une même lumière cohérente (généralement un laser hélium-néon ($\lambda = 633$ nm) ou néodyme-YAG ($\lambda = 532$ nm)) par une lentille semi-réfléchissante, et ses angles d'incidence sont opposés. Ces méthodes peuvent aussi détecter des déplacements hors plan en ajoutant un troisième faisceau. Les franges d'interférométrie sont visualisées sur une plaque holographique et sont acquises par

une caméra CCD comme illustré dans la figure 2.3.

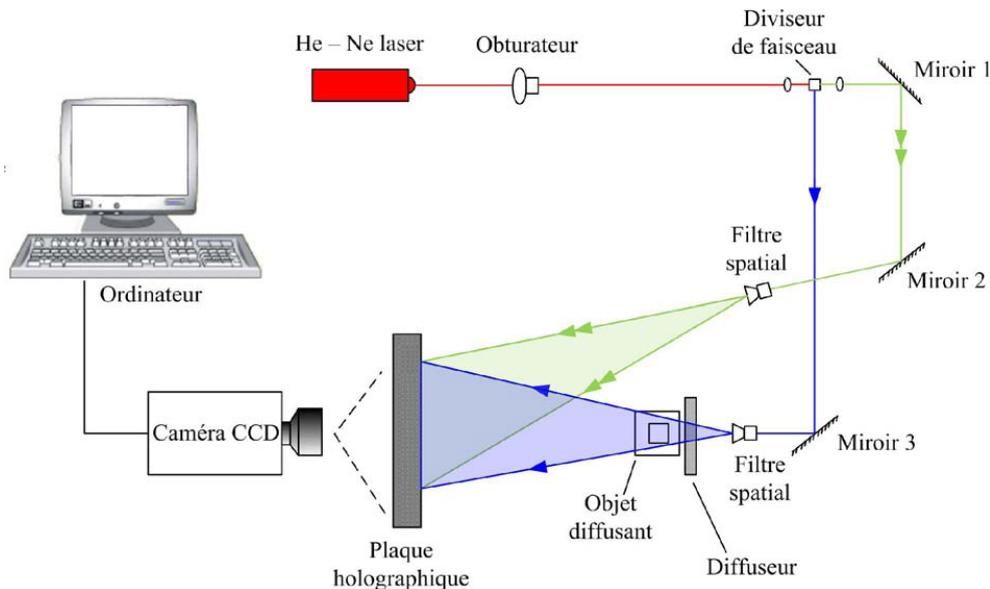


FIGURE 2.3 – Schéma expérimental de l'interférométrie holographique ([147])

Les franges observées sont caractéristique des déplacements micrométriques subis par l'objet et sont analysées en traitant la phase ou en utilisant les transformées de Fourier rapides. La mesure des franges permet de déterminer quantitativement les déplacements. Les méthodes d'interférométrie holographique peuvent atteindre une précision de mesure de $0,25 \mu\text{m}$ dans une zone observée de 1 à 2 m^2 . Les méthodes d'interférométrie holographique ont des applications très variées allant du contrôle non destructifs (par exemple : pour la détection de défaut de collage, détection de fissures...) à la mesure vibratoire dans des divers secteurs industriels.

2.2.1.2 Moiré interférométrique

La méthode de moiré interférométrique repose sur le phénomène de diffraction d'une onde lumineuse monochromatique par un réseau de pas régulier p_0 (cf. Figure 2.4). Ce réseau, déposé sur la surface de l'objet d'étude, intercepte deux faisceaux de lumière cohérente qui ont les angles symétriques $\pm\theta$. À l'état initial non déformé, l'ordre de diffraction +1 du premier faisceau est confondu avec l'ordre de diffraction -1 du deuxième faisceau. Lorsque l'objet se déforme, les faisceaux diffractés ne se superposent plus parfaitement mais forment un angle γ entre eux. Cela produit des franges d'interférence qui peuvent être visualisés sur un écran parallèle à la surface de l'objet étudié. La mesure de déplacement ou de déformation se fera en utilisant des algorithmes de démodulation de phase ou par analyse manuelle.

La performance de cette technique est étroitement liée au pas du réseau déposé sur l'échantillon et à l'algorithme de démodulation de phase. Avec les moyens classiques de lithographie, on obtient 1000 à 1200 lignes par millimètre, la précision de mesure de déplacement est donc limitée à $1\mu\text{m}$. Des études récentes ont montré une mesure de déplacement avec une précision pouvant attendre de 200 nm (Kishimoto et al. (2000) [78]). Comme les échelles d'investigation sont fines, le moiré interférométrique a été utilisé dans les applications micrométriques pour détecter des hétérogénéités de déformation de polycristaux dans le domaine plastique (Nicoletto (2002) [101], Labbe et Cordero (2005) [82]) ou pour étudier la propagation d'une fissure dans

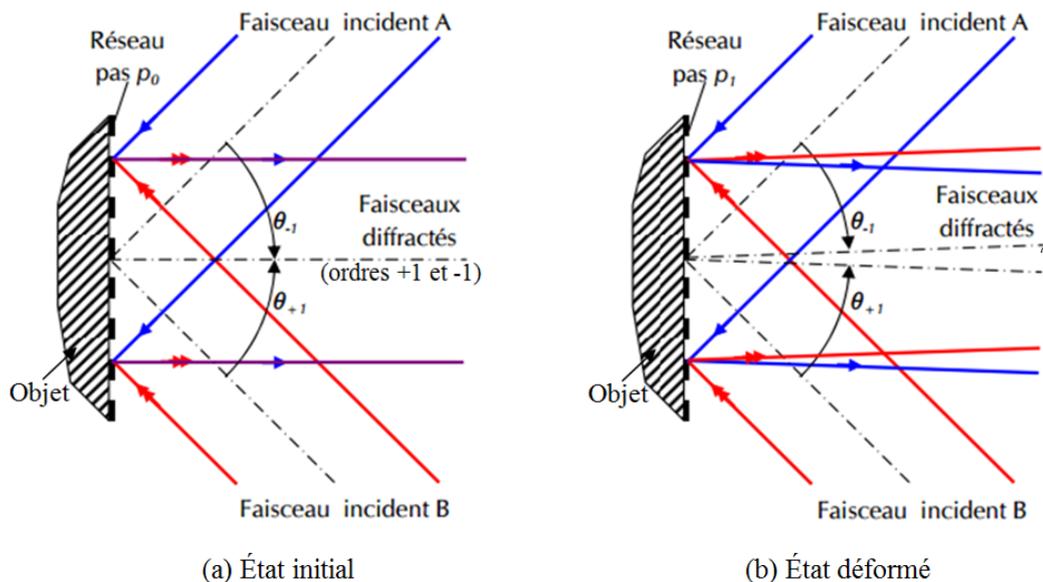


FIGURE 2.4 – Schéma de principe du moiré interférométrique

un bimatériau aluminium/époxy (Nishika et al. (2000) [103]).

2.2.2 Méthodes non-interférométriques

Les méthodes non-interférométriques, également connu sous le nom de méthodes d'analyse d'image, sont basées sur l'analyse d'une paire d'images représentant les états initial et déformé. Le champ de déplacement entre ces deux états est déterminé grâce à un certain nombre de repères répartis sur la surface observée. Ils sont représentés par un contraste important dans chaque image. Différentes géométries de repères sont utilisées : des motifs de grille, ou des motifs aléatoires. L'observation des repères s'effectue avec divers moyens, dépendant la taille de l'échelle locale observée, de la caméra CCD jusqu'au microscope électronique à balayage, voire rayons X pour la mesure en 3D.

2.2.2.1 Méthodes de grilles

La méthode de grille est une des plus anciennes méthodes d'analyse de déformation. Cette méthode utilise un certain nombre de repère disposés régulièrement sur la surface de l'échantillon que l'on appelle grille. Le principe est de suivre des repères entre les configurations avant et après déformation et de mesurer leurs positions dans ces deux positions. En réalisant cette mesure, elle permet d'identifier le champ de déplacement. Les déformations locales peuvent être ensuite calculées par une dérivation discrète. Les repères sont constituées de motifs identiques répartis régulièrement sur toute la surface à analyser. Ils forment une grille régulière. On rencontre des motifs simples comme des grilles de lignes, de points ou de lignes cerclées (figure 2.5). Ces différents motifs de grilles sont créés par différentes techniques de marquages : peinture, dépôts métalliques, gravage mécanique, gravage chimique ... (Obata et al. (1983) [104], Hatanaka (1992) [69], Allais et al. (1994) [2], Berka et al. (1998) [17]). Dans tous les cas, le choix du moyen de marquage doit être compatible avec le système d'observation utilisé et fournir un contraste suffisant détectable par le système d'observation. En particulier, pour des essais thermomécaniques, il faut choisir un marquage qui ne disparaît pas sous l'action de la chaleur. Pour les application micrométrique, les techniques de microélectrolithographie s'utilisent de plus en

plus (Berka et al. (1998) [17], Badulescu (2010) [9]) et sont mieux adaptées pour une observation au microscope électronique à balayage (MEB).

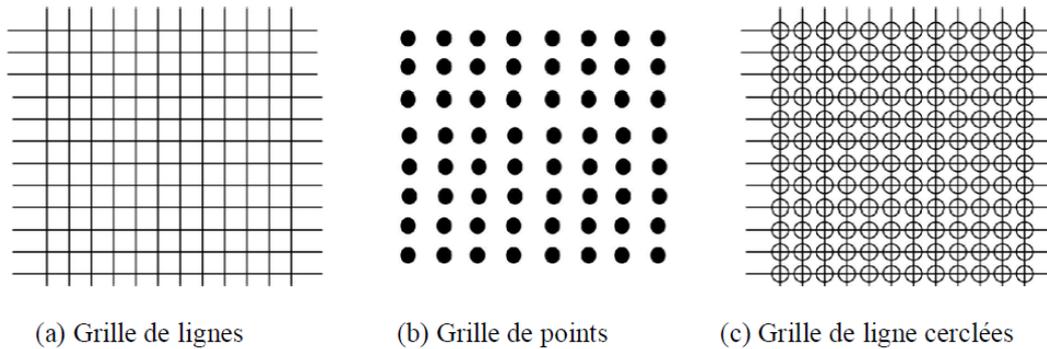


FIGURE 2.5 – Différents motifs de grilles (Doumalin (2000) [48])

2.2.2.2 Méthodes de corrélation d'images numériques bidimensionnelle (DIC-2D)

Le concept de l'utilisation de la corrélation d'images pour mesurer le changement d'un ensemble de données est connu depuis longtemps, il est appliqué à des images numériques depuis les années 1970 (Pohl et al. (1975) [113], Keating et al. (1975) [77]). La corrélation d'images numériques se classe dans les méthodes "sans-contact" et exige des images d'un objet sous format numérique. Une analyse des images est effectuée pour extraire le champ de déformation complet et/ou déplacement. La méthode de corrélation d'images ou Digital Image Correlation (DIC) a été développée initialement par un groupe de chercheurs de l'Université de South Carolina dans les années 1980 (Peters et Ranson (1982) [111], Sutton et al. (1983) [145], (1986) [144], (2009) [146], Chu et al. (1985) [40]). Au cours de ces dernières années, cette méthode a été largement étudiée et améliorée. Ses applications à la mécanique des matériaux sont nombreuses et s'étendent à divers matériaux. On peut noter en particulier les études de fracture, de caractérisation des matériaux composites (Umezaki et Ichikawa (2003) [150], Ambu et al. (2005) [3], Fouinneteau et Pickett (2006) [62], Nicollto et al. (2009) [102]), les bétons (Choi et Shah (1997) [39], Ple et al. (2002) [1]), les métaux (Panin et al. (2008) [109]), les polymères (Jiménez-Piqué et al. (2003) [74], Knauss et Zhu (2002) [79]), des composants et des joints électroniques (Shi et al. (2007) [132], Cugnoni et al. (2007) [42], [141]), les matériaux hétérogènes (Sierra et al. (2008) [133]), les bois (Ukyo et Masuda (2004) [149]), les sols (Finno et Rechenmacher (2003) [55], [123]), la roche (Bhandari et Indue (2005) [21], Ma et al. (2006) [89], Dautriat et al. (2011) [43], Nguyen (2011) [100]), etc . . .

Le principe de cette technique consiste à comparer deux images enregistrées correspondant à l'état initial et à l'état déformé. Cette comparaison nécessite l'existence d'un grand nombre de détails locaux à la surface de l'échantillon étudié. La texture de surface idéale devrait être isotrope, il ne devrait pas y avoir une orientation préférée et devrait être non périodique. Pour cela, on utilise des motifs aléatoires appelés mouchetis ou "speckle". Ces mouchetis doivent fournir un contraste qui est utilisé ensuite pour la corrélation. La surface naturelle de l'échantillon elle-même peut offrir ce type de repères, cependant pour les applications très locales la majorité des matériaux ne présentent pas de contraste suffisant. On utilise alors un moyen artificiel pour créer ce contraste tel qu'un speckle de granularité laser par l'éclairage de la surface de l'échantillon par une source de lumière cohérente (rayon laser) ou un dépôt de peinture noire ou blanche par vaporisation. Toutefois, un effet de décorrélation sérieuse peut se produire avec

des motifs de speckle laser lorsque l'objet étudié est soumis à un mouvement de corps rigide. En revanche, des motifs de speckle noire-blanc constitués de petites taches disposées aléatoirement (figure 2.6) sont plus robustes et utilisés dans plupart des recherches actuelles en matière de DIC.

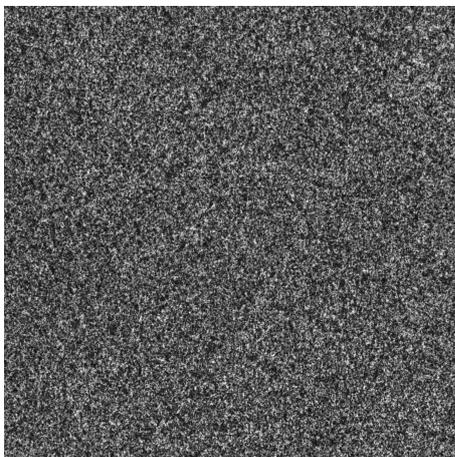


FIGURE 2.6 – Mouchetis par dépôt de peinture

Par rapport aux méthodes interférométriques et la méthode de grille, la méthode DIC-2D montre les avantages suivants :

1. *Une préparation de l'échantillon rapide et une installation expérimentale simple* : il suffit que la caméra soit fixée pour enregistrer des images digitales de la surface de l'échantillon avant et après déformation. La préparation du mouchetis sur la surface de l'échantillon peut se réaliser simplement par vaporisation de peinture sur la surface de l'échantillon.
2. *Peu d'exigence dans l'environnement de mesure* : Contrairement à la méthode interférométrique, DIC-2D ne nécessite pas une source laser. Une source de lumière blanche ou une lumière naturelle peut être utilisé pour l'éclairage au cours du chargement.
3. *Large gamme de résolution de mesure* : DIC-2D peut être appliquée à diverses échelles correspondant aux dispositifs d'acquisition d'image numérique. Elle peut être couplée à la microscopie optique (Sun et al. (1997) [142], Zhang et al. (2006) [166]), la microscopie électronique à balayage (Wang et al. (2006) [160], Lagattu et al. (2006) [83]), la microscope confocal à balayage laser (Franck et al. (2007) [63]), la microscope à force atomique (Chasiotis et Knauss (2002) [31], Li et al. (2007) [86]) et la microscope à effet tunnel (Vendroux et Knauss (1998) [156], [157], [155]) pour réaliser des mesures de déformation de l'échelle micrométrique à nanométrique. Elle peut également être adaptée pour une mesure tridimensionnelle (mesure du déplacement dans la direction perpendiculaire à la surface).

Ainsi, on peut dire que la méthode DIC est une des technologies de mesure optiques actuelles les plus robustes et avec une large gamme de domaine d'application.

2.2.2.3 Méthodes de flux optique

Le concept de flux optique a été étudié dans les années 1940 et des travaux ont été publiés par Gibson (1950) ([65]). Les méthodes de flux optique se focalise sur les problèmes de détection de mouvements dans des séquences d'images. Cette méthode est principalement appliquée pour les études météorologiques sur l'imagerie satellite (mouvement des nuages, des océans . . .) et les applications pour les études en mécanique des matériaux, des géomatériaux en particulier, sont rares. Le principe est d'estimer le champ de déplacement à partir du champ de vitesse produit par le mouvement des objets présentant un contraste. La détection du mouvement s'appuie sur deux hypothèses de base : l'hypothèse de conservation de l'intensité lumineuse des objets observés au cours du mouvement et l'hypothèse de continuité spatiale, temporelle ou spatio-temporelle, du champ de vitesses apparentes (Orkisz et Clarysse (1996) [107]). L'estimation du mouvement apparent dans une séquence d'images se base nécessairement sur une hypothèse de conservation de certaines propriétés photométriques des objets observés. Cependant, cette conservation n'est pas suffisante pour déterminer les composantes de la vitesse. Des équations supplémentaires sont nécessaires et on impose par exemple les hypothèses de "petits déplacements" et de différentiabilité spatio-temporelle de l'intensité lumineuse pour trouver la "composante normale" du vecteur vitesse. Pour trouver la deuxième composante, tangentielle, il est nécessaire de régulariser l'estimation, c'est-à-dire réduire l'espace des solutions par l'introduction d'une contrainte supplémentaire. Différentes variantes existent et permettent d'améliorer les performances ou d'amoinrir les défauts pour des répartitions de niveaux de gris. Avec les technique de corrélation, on obtient plus rapidement une évaluation du déplacement en chaque pixel de l'image. Cependant, celles-là sont uniquement valides pour des faibles déplacements.

2.3 Corrélation d'images numériques 2D (DIC-2D)

2.3.1 Principe de la technique de corrélation d'images

La technique de corrélation est basée sur la comparaison de deux images numériques de la surface observée, une image “de référence” correspond à l'état initial et une image à l'état “déformé”. Dans la technique DIC-2D, un domaine de mesure est tout d'abord défini sur l'image de référence, il est ensuite divisée régulièrement en une grille artificielle (2.7a), généralement une grille carrée. Les déplacements sont calculés pour chaque point (ou nœud) de cette grille (2.7b).

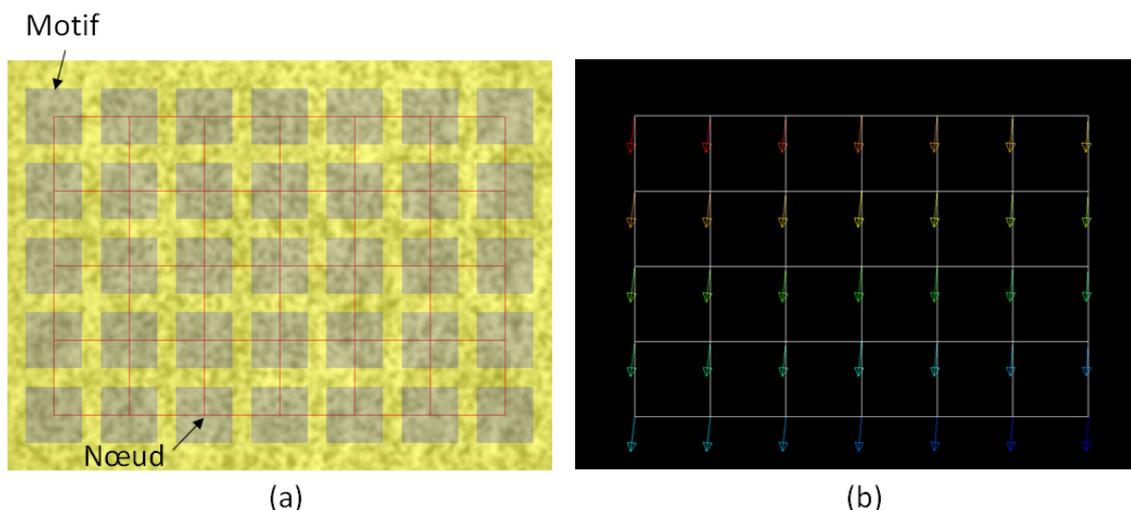


FIGURE 2.7 – (a) Image de référence, le carré gris est le motif servant pour suivre des déplacements de son point central, les points l'intersection fr la grille rouge déterminent les centres des motifs ou nœuds ; (b) Vecteurs de déplacement des nœuds calculés par corrélation d'images.

Le principe de la méthode DIC-2D est de suivre le même point (ou pixels) entre deux images prises avant et après déformation. Afin de calculer les déplacements du point P, un domaine carré de pixels, appelé aussi “motif” ou “subset” ou “ZOI, Zone Of Interest”, identifié par les valeurs de niveaux de gris de chaque pixel, est sélectionné dans l'image de référence comme illustré sur la Figure 2.8. La méthode recherchera dans l'image à corrélérer le motif le plus semblable au précédent en termes de niveaux de gris en appliquant une transformation décrivant le déplacement du matériau dans une zone de recherche prédéfinie. La raison du choix d'un motif plutôt qu'un pixel individuel pour le processus de corrélation est que le motif comprenant une grande variation de niveaux gris se distinguera des autres motifs, et peut donc être identifié plus uniquement dans l'image à corrélérer.

Afin de quantifier la similarité de la distribution de niveaux gris dans le motif des les deux configurations, un coefficient appelé “coefficient de corrélation” doit être prédéfini. Il existe dans la littérature différentes définitions des critères pour calculer les coefficients de corrélation, ces critères peuvent être classés en deux catégories : les critères Cross-Correlation (CC) et les critères Sum-Squared Difference (SSD) (Pan et al. (2009) [108]). La procédure d'identification de motifs homologues est completé au travers la recherche de la position du pic dans la distribution du coefficient de corrélation correspondant à la fenêtre de recherche. La position du motif déformé est déterminée lorsque le coefficient de corrélation extremum est détecté.

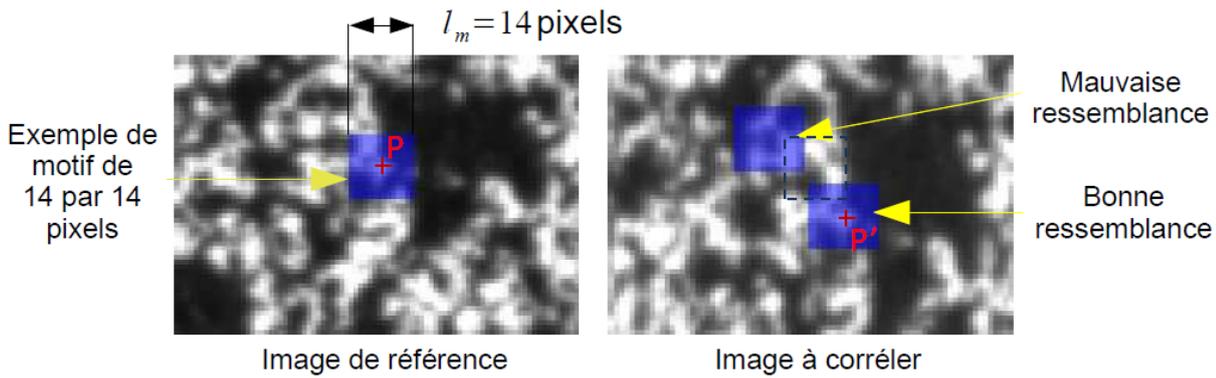


FIGURE 2.8 – Illustration de ressemblance entre deux motifs (Coudert (2005) [41])

Les critères de corrélation mentionnés ci-dessus ne fournissent que des déplacements avec une précision au niveau du pixel entier. Afin d'améliorer la précision de DIC, plusieurs algorithmes d'enregistrement de sous-pixel ont été utilisés ainsi que des interpolations des niveaux de gris pour accéder à l'information sous-pixel ([108]).

2.3.2 Le logiciel de corrélation Sept-D (7D)

De nombreux logiciels ont été développés, soit académiquement (7D¹, Correla, CorrelManuV², KelKins, COSI-Corr,...), soit commercialement (Aramis 2D, VIC-2D...). Certains de ces logiciels ont fait l'objet d'études comparatives par Bornert et al. (2009) ([26]). La performance de chaque logiciel dépend de diverses sources telles que la qualité d'acquisition d'image, les paramètres de corrélation comme la taille du moucheti, la taille de la fenêtre de corrélation, l'interpolation de niveau de gris, les critères de corrélation et de l'algorithme d'optimisation, etc. Il est généralement pas clair pour l'utilisateur de définir ces paramètres pour obtenir des résultats les plus précis possible.

Dans le cadre de ma thèse, le logiciel Sept-D (7D) est utilisé pour corrélérer les images. Ce logiciel a été développé au laboratoire de Mécanique Appliquée d'Annecy par Pierre Vacher et il supporte la plupart des formats de photos (ex : .tif, .bmp, .jpeg, ...), images codées sur 8 bits ou 12 bits, noir et blanc ou couleur. 7D a été appliqué dans plusieurs domaines tels que le médical, la géologie (Poupinet et al. (2003) [116]), l'archéologie, la mécanique des matériaux ... et en particulier pour les études du champ de déplacement pour divers matériaux comme les matériaux métalliques (Boissière (2008) [24], Pottier et al. (2008) [115]), les polymères (Vacher (2002) [151], [41]), les fluides, les roches (Nguyen (2011) [100]) ou les biomatériaux. Dans cette section, nous présentons d'abord brièvement quelques définitions requis et ensuite la méthode d'analyse dans le logiciel 7D et enfin les paramètres de corrélation d'images utilisés pour nos images expérimentales.

1. Développé par Pierre Vacher, à l'Université de Savoie
 2. Développé par Michel Bornert, à l'École Polytechnique

2.3.2.1 Définitions générales

Niveaux de gris

Après avoir défini l'image de référence et une ou plusieurs images à corrélérer, l'utilisateur choisit une zone d'analyse sur l'image de référence, la taille de motif et le pas de la grille. La recherche des points communs entre deux images se base sur la distribution des niveaux de gris d'un motif centré autour du point dont on cherche à identifier le déplacement.

Dans l'image de référence, le niveau de gris est représenté par la fonction discrète $f(x, y)$ et dans l'image déformée $f^*(x^*, y^*)$, il devient :

$$f^*(x^*, y^*) = f^*[x + u(x, y), y + v(x, y)] \quad (2.1)$$

où $u(x, y)$ et $v(x, y)$ sont des champs de déplacements pour un point donné de grille.

Les niveaux de gris dans l'image déformée seraient obtenus en utilisant deux types d'interpolation : interpolation bi-cubique et interpolation bilinéaire. Pour l'interpolation bilinéaire, le niveau de gris d'un point est calculé à partir de 4 points autour de lui, comme la fonction suivante (Figure 2.9a) (Vacher et al. (1999) [152]) :

$$f^*(x^*, y^*) = \lambda x^* + \beta y^* + \gamma x^* y^* + \alpha \quad (2.2)$$

où $\alpha = f^*(1, 0) - f^*(0, 0)$; $\beta = f^*(0, 1) - f^*(0, 0)$; $\gamma = f^*(1, 1) + f^*(0, 0) - f^*(0, 1) - f^*(1, 0)$; $\lambda = f^*(0, 0)$

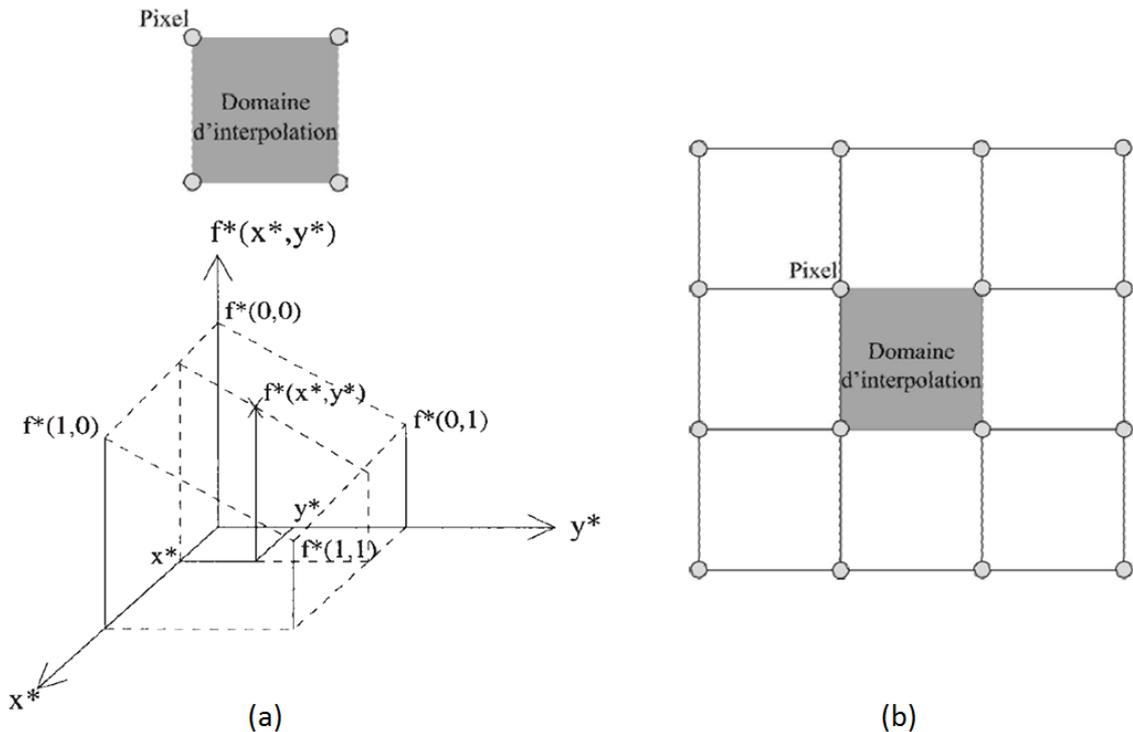


FIGURE 2.9 – Schémas d'interpolation des niveaux de gris : (a) Interpolation bilinéaire, (b) Interpolation bi-cubique ([152]).

Pour l'interpolation bi-cubique, ce niveau de gris est obtenu à partir de 16 pixels voisins (Figure 2.9b).

Coefficient de corrélation

Il existe dans la littérature différentes définitions du coefficient de corrélation (Doumalin (2000) [48]). Deux coefficients de corrélation ont été implémentés dans le logiciel 7D :

- Normalized cross-correlation (NCC) : Il cherche à normaliser la contribution de différentes valeurs d'intensité et à comparer la variété de niveau de gris dans chaque domaine de corrélation.

$$C_{NCC} = 1 - \frac{\sum_{i \in D} f(X_i) \times g(x_i)}{\sqrt{\sum_{i \in D} (f(X_i))^2 \times \sum_{i \in D} (g(x_i))^2}} \quad (2.3)$$

où D est le domaine de corrélation (ou *subset*) sur lequel le coefficient de corrélation est calculé. $f(X_i)$ et $g(x_i)$ sont respectivement le niveau de gris du point i de coordonnées X_i et x_i dans l'image de référence et déformée.

- Zero mean normalized cross-correlation :

$$C_{ZNCC} = 1 - \frac{\sum_{i \in D} (f(X_i) - \bar{f}) \times (g(x_i) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i \in D} (f(X_i) - \bar{f})^2 \times \sum_{i \in D} (g(x_i) - \bar{g})^2}} \quad (2.4)$$

où \bar{f} et \bar{g} sont respectivement les niveaux de gris moyens dans le domaine D de l'image de référence et déformée.

La valeur de coefficient de corrélation varie entre 0 et 1 ($0 < C < 1$). Elle tend vers zéro lorsque les images présentent une similitude parfaite.

La corrélation d'images est influencée fortement par le changement de luminosité au cours de la mesure. Ceci entraîne une mauvaise estimation du déplacement. Il est donc important de choisir le coefficient de corrélation de haute performance pour limiter cet influence. Parmi les deux coefficients de corrélation, la valeur de corrélation calculée par le deuxième type ZNCC ne change pas avec le changement de luminosité. Ce critère fournit une performance robuste contre le bruit et est insensible au décalage de l'éclairage et au changement de contraste. Par contre, le premier type NCC est insensible au changement de contraste mais sensible au décalage de l'éclairage.

Le domaine dans l'image de référence (ou l'image initiale) est déplacé sur la zone de recherche dans l'image déformée (ou l'image à corrélérer) et un coefficient de corrélation sera calculé. Ce motif carré sur l'image de référence est au début considéré conserver sa forme dans l'image déformée et ensuite sera auto-adaptatif. La position optimale du domaine dans l'image à corrélérer est celle qui minimise le coefficient de corrélation.

La figure 2.10 présent un exemple de calcul de paramètre de corrélation lors du déplacement du motif initial de ± 10 pixels sur l'image à corrélérer. La position d'un minimum global sera utilisée pour définir la position optimale du motif initial sur l'image à corrélérer. Nous observons lors que l'utilisation d'une interpolation bilinéaire fait apparaître des vaguelettes de période d'un pixel (cf. figure 2.10a). Ce phénomène sera estompée en utilisant une interpolation bicubique des niveaux de gris (cf. figure 2.10b).

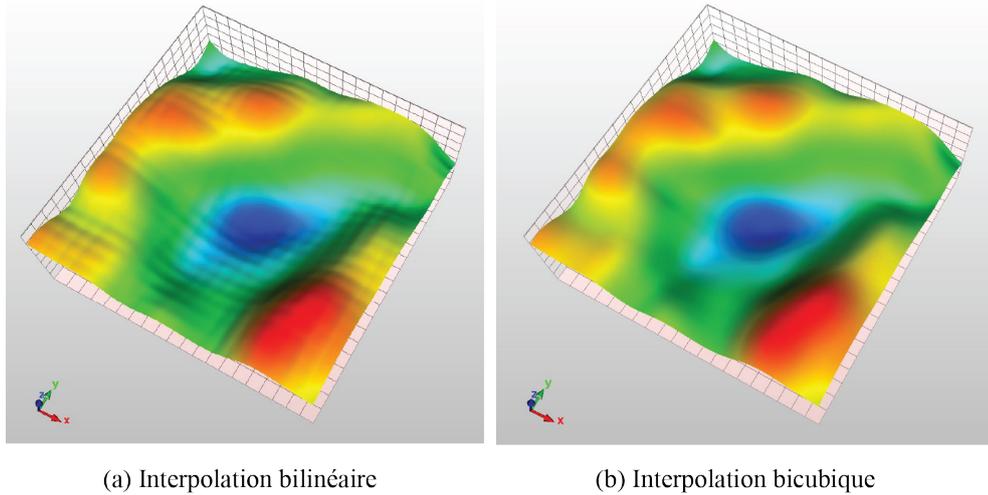


FIGURE 2.10 – Exemple d'une surface indiquant l'évolution de la valeur du paramètre de corrélation C_{ZNCC} selon les deux types d'interpolation des niveaux de gris.

Champ de déplacements

La méthode est basée sur la recherche d'un champ de déplacements sur chacun des éléments carrés de la grille. Nous considérons un point P dans l'image de référence se déplaçant au point P^* dans l'image à corrélérer (Figure 2.11). L'expression bilinéaire du déplacement du point P suivant la direction \vec{x} et \vec{y} est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{d}_P = \begin{pmatrix} U(x, y) \\ V(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a.x + b.y + c.x.y + d \\ e.x + f.y + g.x.y + h \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

a, b, c, d, e, f, g, h sont les coefficients du vecteur de déplacement. Ces coefficients seront déterminés si nous connaissons les déplacements des 4 nœuds d'un élément carré. Ceci sera réalisé par un processus itératif dans lequel la forme du motif est adaptée dynamiquement aux informations présentes dans les images.

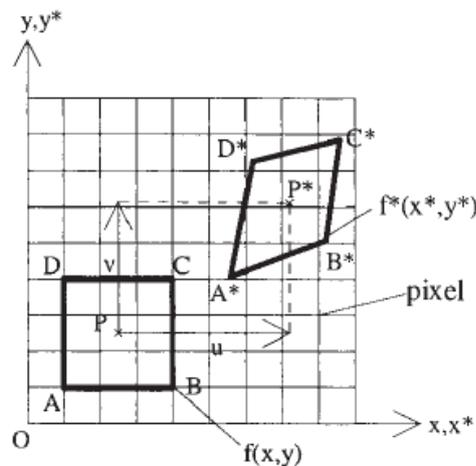


FIGURE 2.11 – Champ de déplacements $U(x, y)$ et $V(x, y)$ entre l'image de référence et l'image déformée ([152]).

Champ de déformation

Considérons un point P de coordonnées (x, y) dans l'image de référence, ses coordonnées dans l'image à corrélérer sont données par :

$$\begin{cases} x^* &= x + U(x, y) \\ y^* &= y + V(x, y) \end{cases} \quad (2.6)$$

Le tenseur gradient de la transformation F est :

$$F = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\partial U}{\partial x} & \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial x} & 1 + \frac{\partial V}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + a + c.y & b + c.x \\ e + g.y & 1 + f + g.x \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Le tenseur de déformation Green-Lagrange E est calculé par :

$$E = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (F^T \otimes F - I) \quad (2.8)$$

où I est la matrice unité et F^T est la transposée de F .

Les déformations principales du tenseur de déformation de Green-Lagrange sont exprimées par :

$$\begin{cases} E_I &= \frac{E_{11}+E_{22}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(E_{11} - E_{22})^2 + 4E_{12}^2} \\ E_{II} &= \frac{E_{11}+E_{22}}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(E_{11} - E_{22})^2 + 4E_{12}^2} \end{cases} \quad (2.9)$$

Supposant OX et OY comme étant les axes principaux de déformations. L'angle entre x et X est défini par :

$$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{2E_{12}}{E_{11} - E_{22}} \right) \quad (2.10)$$

Notant que le champ de déformation d'un carré ici est représenté par la déformation calculée au centre de carré.

Les déformations principales minimales (ε_{min}), maximales (ε_{max}) et cisailante maximale γ_m est ainsi définie :

$$\varepsilon_{min} = \min(E_I, E_{II}) \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_{max} = \max(E_I, E_{II}) \quad (2.12)$$

$$\gamma_m = \frac{1}{2}(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \quad (2.13)$$

En supposant $\varepsilon_{ax} = E_I$, $\varepsilon_{ra} = E_{II}$, la déformation volumique est calculée comme :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{ax} + 2 \times \varepsilon_{ra} \quad (2.14)$$

En outre, le logiciel 7D fournit aussi les déformations logarithmiques calculées au sens de Hencky (voir [152] et [100] pour plus de détails).

2.3.2.2 Méthode d'auto-adaptation du motif à corrélérer pour déterminer des champs de déplacements

Pour localiser un point dans l'image initiale sur l'image déformée, l'algorithme de corrélation dans une première phase calcule d'abord simplement une première approximation du champ de déplacements pour les quatre nœuds d'un carré de la grille initiale. À la première itération, le champ de déplacement obtenu dans la première phase est appliqué sur le motif autour de chaque nœud de la grille. Le motif choisi autour du point A, B, C, D (non déformé) est localisé respectivement au A_1, B_1, C_1, D_1 en appliquant ce champ de déplacement. La procédure de calcul de coefficient de corrélation pour rechercher le pic sur la surface d'évolution du paramètre de corrélation est réalisé et un champ de déplacement correspondant est obtenu. Dans l'itération suivante, les quatre motifs de l'images de référence sont déformés en appliquant le champ de déplacement trouvé dans la première itération. Une nouvelle corrélation est effectuée pour les quatre même points et un nouveau champ de déplacements est obtenu. Cette méthode est mise en œuvre jusqu'à ce qu'un champ de déplacement stable soit obtenu, c'est-à-dire que la position de quatre nœuds n'évolue quasiment plus (Figure 2.12).

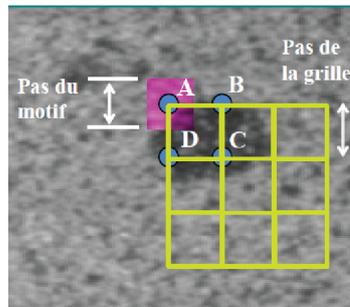
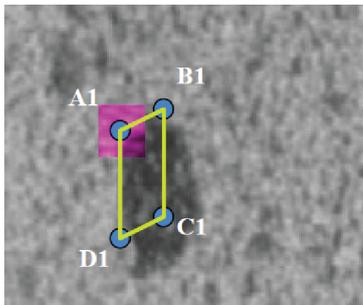
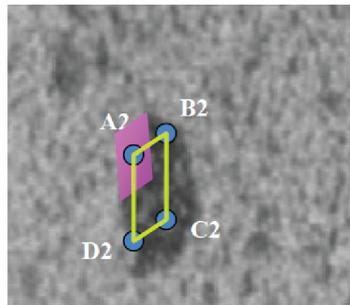


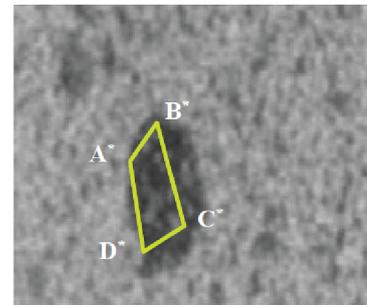
Image de référence: motif en forme de carré



1^{re} itération



2^{ème} itération



n^{ème} itération

Image à corrélérer: motif en forme de quadrilatère

FIGURE 2.12 – Processus itératif pour calculer un champ de déplacements d'un carré de la grille ([41]).

Le principe présenté ci-dessus est appliqué pour un élément carré. Pour les voisinages, ce processus se réalise d'une manière similaire pour calculer les quadrilatères voisins un utilisant les solutions obtenues à l'étape précédente.

2.3.2.3 Paramètres utilisés

Les principaux paramètres que l'utilisateur peut définir pour effectuer une corrélation sont : la taille du motif, la taille du pas de la grille, le choix du coefficient de corrélation et le type d'interpolation des niveaux de gris.

Dans le logiciel 7D, la taille du motif habituellement utilisée est comprise entre 8 et 40 pixels. Si la taille de motif est trop petite, l'information disponible devient faible pour calculer un critère de corrélation fiable et ceci est susceptible de donner de fausses corrélations en raison d'une augmentation du nombre de minimum locaux sur la surface de coefficient de corrélation ([100]). Si la taille du motif est plus grande, la carte de déformation obtenue devient plus douce. Elle peut s'adapter pour la recherche dans le cas de déformation homogène, mais le temps de calcul augmente. Pour la taille de grille, le plus grande fournira moins de détail dans le cas de déformation fortement hétérogène.

Dans nos expériences, l'échantillon est mis dans une cellule rempli d'eau, les sources de lumière sont en dehors de la cellule. Le changement de luminosité ne peut donc pas être évité. Afin d'assurer une bonne qualité de mesure, nous utilisons la critère de coefficient de corrélation du type "zero mean normalized cross-correlation" et une interpolation bicubique aux niveaux de gris. Les tailles de motif et de pas de la grille sont respectivement $10 \times 10 \text{ pixels}^2$ ($\approx 0.31 \times 0.31 \text{ mm}^2$) et 10 pixels ($\approx 0.31 \text{ mm}$) (Figure 2.13).

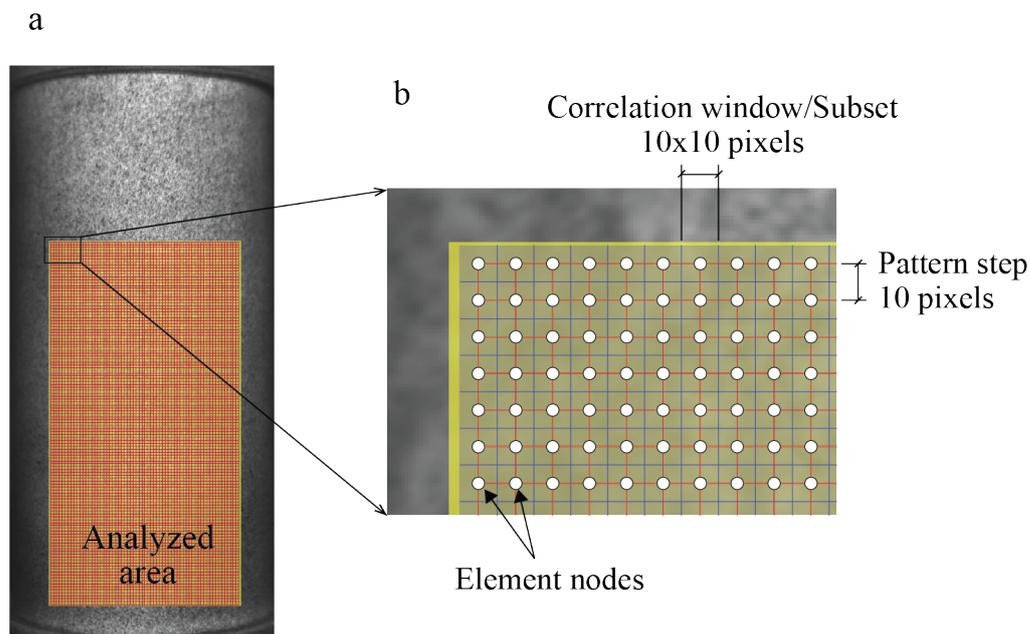


FIGURE 2.13 – (a) Échantillon avec une zone d'analyse choisie (en jaune) et la grille (en rouge); (b) Les paramètres de corrélation utilisés : taille de motif de $10 \times 10 \text{ pixels}^2$, pas de la grille de 10 pixels.

2.4 Incertitude de mesure par la technique DIC-2D

La précision de mesure du déplacement et de déformation fortement dépend de la qualité du système de chargement, du système d'acquisition de l'image et de l'algorithme de corrélation utilisé. Les principales sources d'erreurs sont données dans le tableau 2.1 et aussi résumées et analysées par de nombreux auteurs (Bornert et al. (2009) [26], Pan et al. (2009) [108]).

Erreurs liées à échantillon, système de chargement et d'acquisition de l'image	Mouchetis ou speckle Positionnement non perpendiculairement de la caméra à la surface de l'échantillon Déplacement hors plan de l'échantillon Distorsion d'imagerie Réglage de netteté Luminosité Bruits pendant l'acquisition et la numérisation d'image
Erreurs liées à l'algorithme de la corrélation	Taille de motif, taille de pas de la grille Choix du coefficient de corrélation Algorithme de recherche sub-pixel Type d'interpolatin des niveaux de gris

TABLE 2.1 – Sources d'erreur de DIC-2D ([108])

Les résultats de Coudert [2005] ([41]) ont montré que le logiciel 7D dans un cas de petite déformation ($< 5\%$) et associé à l'utilisation d'un système d'acquisition de qualité (caméra numérique Hamamatsu, éclairage stable) permettait d'obtenir une incertitude de mesure de déplacement de l'ordre de 0.01 pixels et de déformation est de 2.10^{-3} pour une taille du motif de corrélation de 10×10 pixels. Cependant, ces valeurs indiquées ne sont qu'approximative car l'incertitude de mesure dépend des conditions expérimentales. Pour améliorer la précision de mesure dans nos études expérimentales, outre les choisis liés à l'algorithme de la corrélation mentionnés dans la partie précédente, la qualité du système d'acquisition et des niveaux de gris aléatoire, nous avons aussi considérée les points suivants :

- Utilisation d'un éclairage diffuse et couvrant suffisant la zone d'intérêt de la surface de l'échantillon pour éviter les effets spéculaires ;
- Choix d'un format d'enregistrement sans compression. Nous utilisons les images en format *.tiff ;
- Marquage aléatoire qui n'est que très peu contrastée. Les dimensions moyennes des taches sont entre 3 et 10 pixels et ne doivent pas excéder la dimension du motif de corrélation.

2.5 Quelques exemples d'application de la technique DIC en géomatériaux

Au cours des trois dernières décades, la technique DIC est largement utilisée pour les études en géomécanique (des sols, des roches) et s'est présentée très efficace. **Guler et al. (1999)** ([66]) ont analysé des images pour déterminer des déplacements de particules de sables Ottawa pendant un essai de cisaillement direct. **Liu et Iskander (2004)** ([88]) ont utilisé la technique DIC pour étudier la déformation en deux dimensions spatiales du sol.

Dans l'étude de la localisation des déformations, la technique DIC permet de bien caractériser l'hétérogénéité des champs de déformation. **Viggiani et Desrues (2004)** ([158]) ont fait des études d'évolution des bandes de cisaillement sur la marne de Beaucaire lors d'un essai de compression en déformation plane en utilisant deux techniques de mesure de déformation : la méthode de stéréophotogrammétrie de faux relief (False Relief Stereophotogrammetry - FRS) et la technique DIC (logiciel **7D**). Ses résultats obtenus montrent que l'approche par DIC fournit plus d'informations et plus détaillé de la localisation des déformations que la méthode FRS.

Nguyen (2011) ([100]) a utilisé la méthode DIC (logiciel **7D**) et développé la nouvelle technique DIC-F (*Digital Image Correlation for Fracture*) pour étudier la localisation de la déformation et la fissuration dans les roches tendres : une roche volcanique de Naples (Tuf à grains fins) et un matériau artificiel à base d'argile (CPIR09). Technique DIC-F est un post-traitement des champs de déplacement, qui permet d'automatiser l'identification des lignes de discontinuité de déplacement et puis quantifier les sauts de déplacement le long de ces discontinuités. La figure 2.14 présente les résultats issus d'un essai de compression uniaxiale sur le matériau CPIR09. Deux types de fracture sont observés : les fissures dites wing cracks (W) et les bandes de compaction (C). Les wing cracks s'initient aux pointes des entailles puis se propagent suivant la direction de charge (l'orientation verticale). Les bandes de compaction sont toujours perpendiculaires à direction de charge (l'orientation horizontale). Elles se situent aux pointes des entailles aussi bien qu'entre les wing cracks et les bords des échantillons.

Lanata (2015) ([84]) a également employé la méthode DIC (logiciel *PhotoWarp*) pour suivre l'évolution de la localisation des bandes de cisaillement dans un grès de Vosges dans les essais de compression en déformation plane en utilisant une nouvelle cellule triaxiale vraie développée au Laboratoire 3SR (Grenoble) (e.g Figure 2.15). À partir de l'analyse des champs de déformation incrémentale, la première bande de cisaillement est bien détectée avant le pic de contrainte, généralement à 60 – 70% de la contrainte différentielle maximale. Ce phénomène a été identifié par la perte d'homogénéité du champ de déformation. Un motif diffuse de bandes de cisaillement, apparaît juste après que la courbe contrainte-déformation perd sa tendance linéaire, est encore détectée à la fin de l'essai. Ceci conduit à l'hypothèse que la propagation de la bande de cisaillement principale à travers de la surface de l'échantillon provoque l'inhibition de leur développement pendant l'essai.

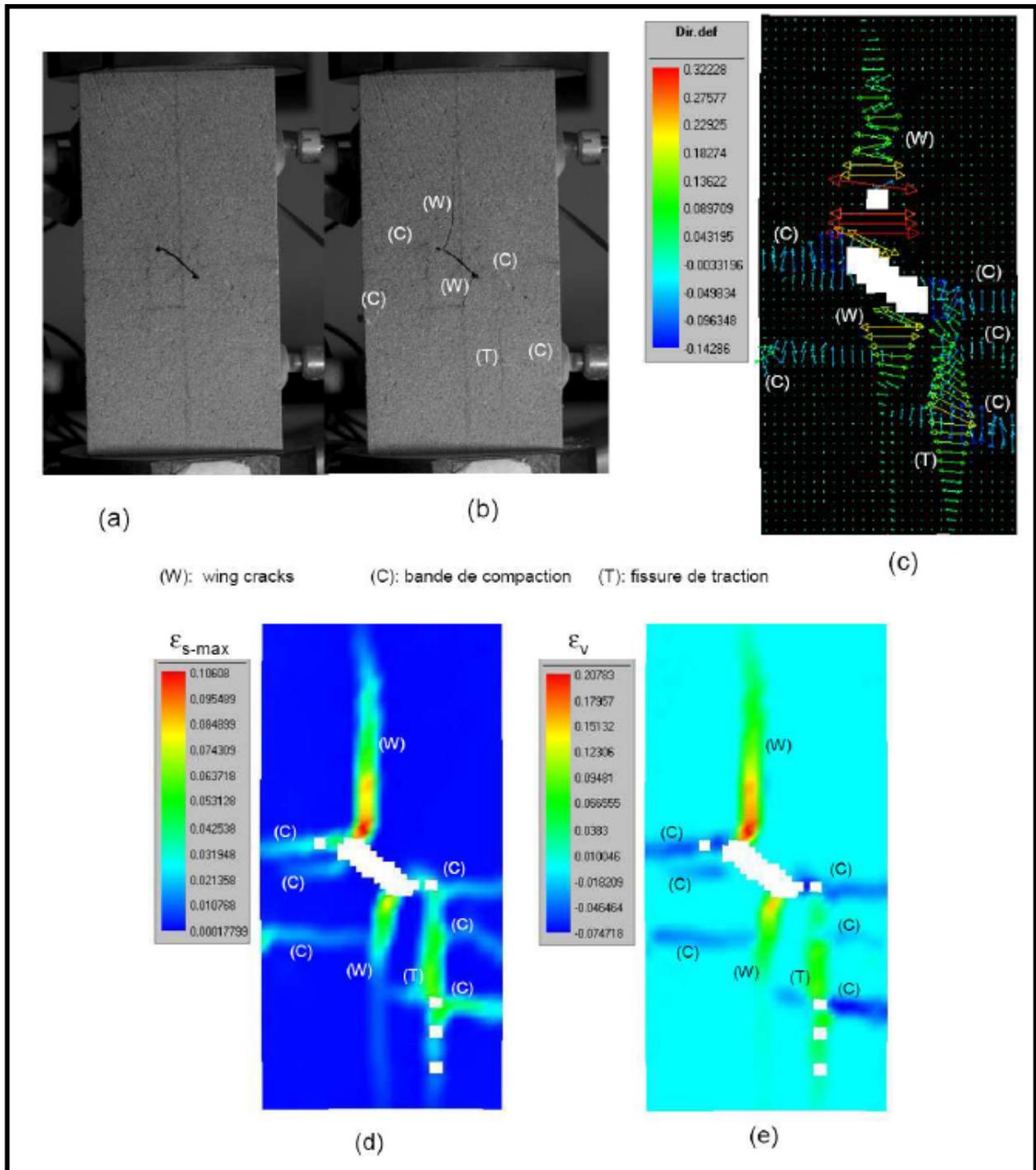


FIGURE 2.14 – Essai Cpir1-E-45-02. (a) et (b) Photos acquises respectivement au début d'essai et à la rupture; (c) Direction et intensité de déformation principale, pas de la grille de 60 pixels; (d) et (e) cartes de déformations cisailantes maximales (ε_{s-max}) et volumiques (ε_v), pas de la grille de 40 pixels (Nguyen (2011) [100]).

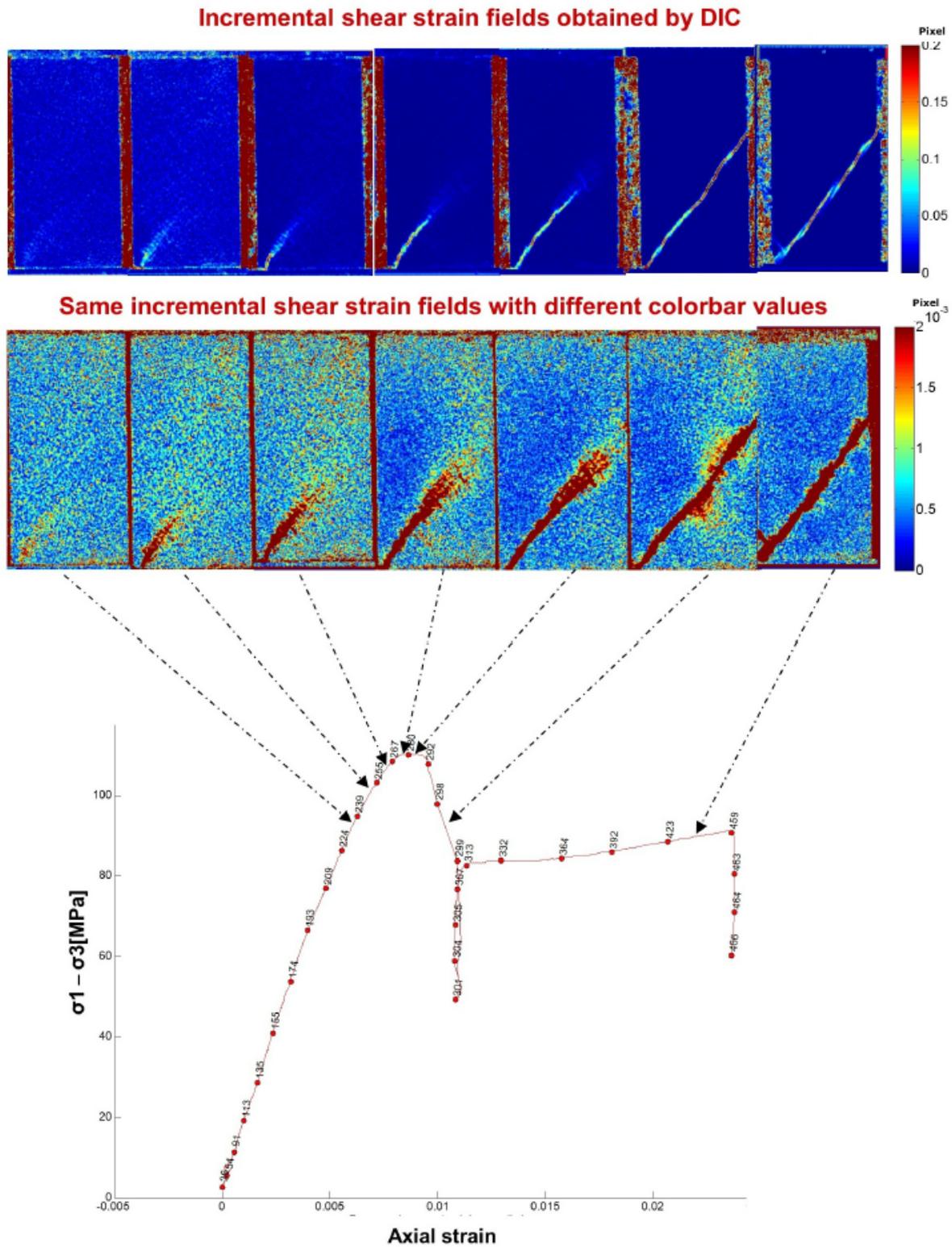


FIGURE 2.15 – Courbe contrainte-déformation et cartes des déformations incrémentales pour un essai de compression à la pression de confinement 30 MPa ([84]).

Chapitre 3

Développements expérimentaux

Contents

3.1	Matériau synthétique analogue de roches GRAM1	75
3.2	Fabrication des échantillons de GRAM1	76
3.3	Dispositifs et techniques expérimentaux	79
3.3.1	Description du dispositif triaxial	79
3.3.2	Embases de chargement	80
3.3.3	Technique de diminution du frottement entre l'échantillon et l'embase	82
3.3.4	Système de montage de caméra	83
3.3.5	Logiciel de pilotage et d'acquisition des données	83
3.3.6	Nouvelle cellule de pression	83

3.1 Matériau synthétique analogue de roches GRAM1

Le matériau étudié est le matériau granulaire analogue à la roche 1 (GRAM1). Il est un nouveau matériau créé dans le laboratoire Géoscience Azur dans la cadre du consortium Geo-FracNet et considéré comme un analogue des roches telles que les grès et les calcaires mais faible résistant. Il a été utilisé dans les thèses précédentes (Jorand (2007) [75], Nguyen (2009) [98]).

Ce matériau est fabriqué de poudre de dioxyde de titane (TiO_2) dont le diamètre des grains est environ de $0.25 \pm 0.1 \mu m$. La forme des grains varie très peu, sphérique à ovoïde (figure 3.1). L'énergie de surface est réduite avec de l'acide polyacrylique. Le poudre est chargé sous la pression hydrostatique de $P_{fabr} = 2$ MPa pour que les grains sont liés l'un à l'autre. Le module d'Young de GRAM1 est $E = 6.5 \times 10^8$ Pa, le coefficient de Poisson est $\nu = 0.25$, le coefficient de la friction interne est $\alpha \approx 0.6$. Le coefficient de dilatance β pour les conditions d'extension varie de 0.4 (à $P_c = 0.4$ MPa) à -0.2 (à $P_c = 1.3$ MPa), et la densité est $\rho = 1723$ kg/m³ (Chemenda et al. (2011) [34]).

GRAM1 se présente des avantages importants par rapport aux roches naturelles :

- GRAM1 présente un comportement très similaire à la plupart des roches, mais sa rigidité est de deux ordres de grandeur plus petite que celle des roches réelles. Ainsi, il est possible de réduire l'encombrement du matériel d'expérience en taille et en volume. En plus, elle est plus petite par rapport à la rigidité du dispositif expérimental. Nous donc pouvons éviter le problème au moment à la rupture, où l'énergie élastique est libérée

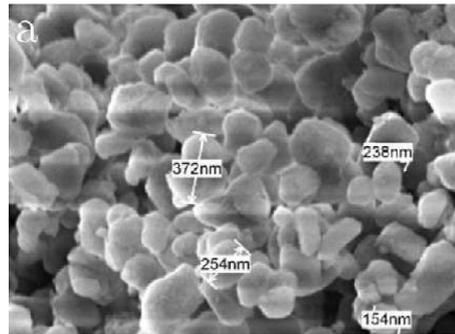


FIGURE 3.1 – Image SEM de la poudre constituant le matériau GRAM1 (Jorand (2007) [75])

brutalement. La simplification des dispositifs et de la procédure expérimentale permet d'augmenter la précision et la fiabilité des mesures, et également d'effectuer des essais de manière plus répétitives et rapides.

- La procédure de fabrication de GRAM1 suivant un protocole très strict, ce qui assure l'homogénéité des échantillons. Les résultats sont donc plus reproductibles qu'avec des échantillons de roches naturelles.

3.2 Fabrication des échantillons de GRAM1

Nous avons effectué deux types d'essai axisymétrique en compression et en extension. Nous avons donc utilisé deux formes d'échantillon : la forme cylindrique pour l'essai en compression et la forme bobine pour l'essai en extension (Figure 3.2).

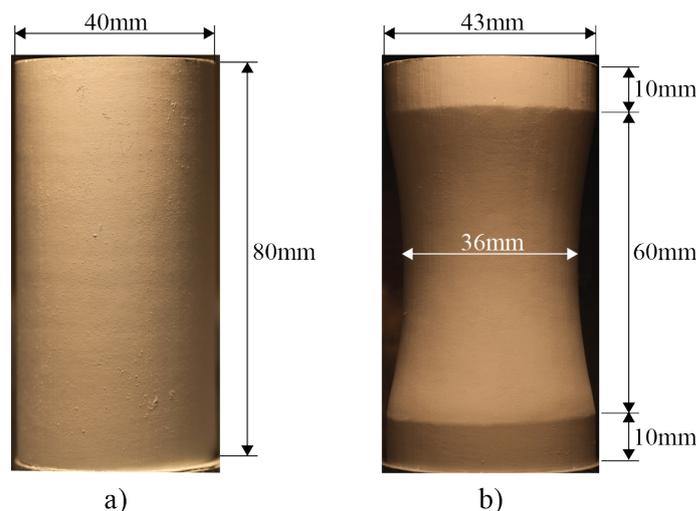


FIGURE 3.2 – Échantillons de GRAM1 en forme (a) cylindrique pour des essais en compression ; (b) bobine pour des essais en extension.

Nous avons suivi la procédure de fabrication des échantillons décrite dans la thèse de Nguyen, (2009) [98]. La poudre de départ est composée de grains d'oxyde de titane (TiO_2) de diamètre $0.25 \pm 0.1 \mu m$, traitée avec de l'acide polyacrylique pour réduire l'énergie de surface des grains. Pour éviter les agglomérats, la poudre est tout d'abord passée à travers un tamis. Elle est

ensuite versée dans un moule cylindrique de diamètre 55 mm par couches et vibrée à chaque couche afin de précompacter légèrement les grains (cf. Figure 3.3a). Après démoulage, la poudre protégée par une membrane en latex est couverte par une autre membrane en néoprène (cf. Figure 3.3b). L'ensemble est ensuite placé dans une cellule de pression triaxiale. Cette poudre est compactée avec une pression hydrostatique de 2 MPa et maintenue à cette pression pendant 10 heures. L'échantillon obtenu après compactage hydrostatique n'a pas une forme cylindrique parfaite (cf. Figure 3.3c). La poudre est moins compactée aux extrémités de l'échantillon à cause du frottement au contact entre les extrémités de l'échantillon et les embases. Les extrémités de l'échantillon sont donc tout d'abord coupées. L'échantillon est ensuite taillé la surface verticale au moyen d'une scie à fil diamanté (cf. Figure 3.3d). Pour avoir une forme cylindrique ou bobine, nous utilisons des cales variées et bien réglées sur un portique afin d'obtenir le rayon de l'échantillon voulu. Au cours du taillage, il faut tourner le support de l'échantillon le plus lentement possible pour obtenir une surface très lisse. Après taillage de la surface verticale, l'échantillon est posé sur un berceau en V pour tailler les deux extrémités parfaitement planes et perpendiculaires à la surface verticale.

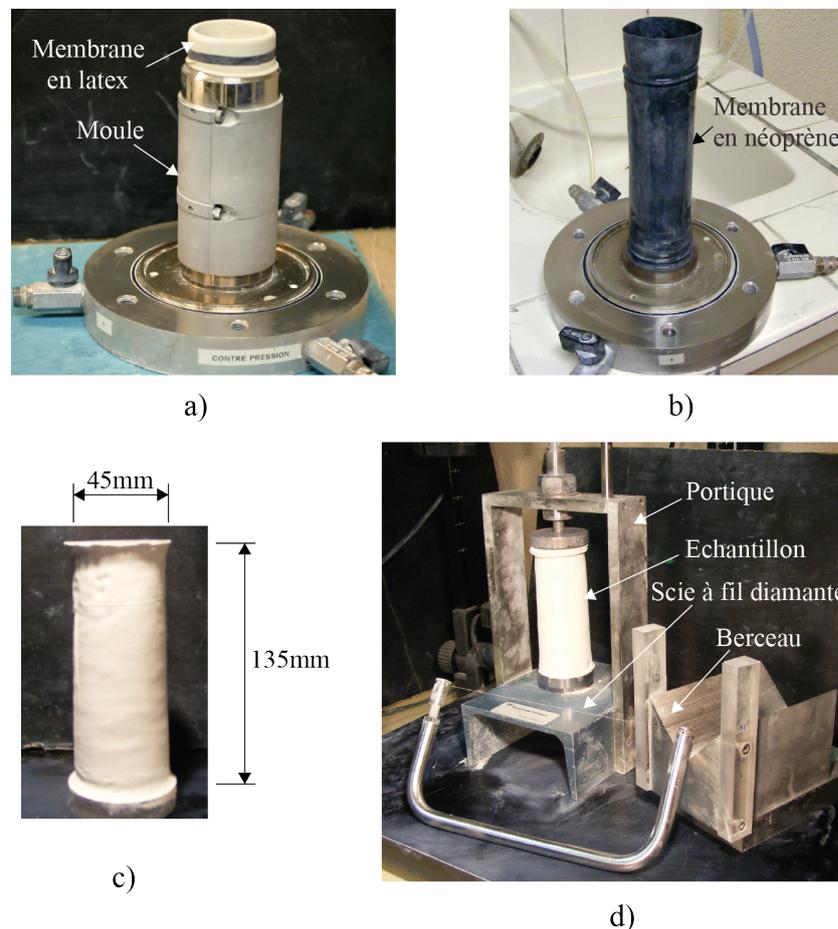


FIGURE 3.3 – Différentes étapes de la fabrication des échantillons de GRAM1 : (a) Première étape de remplissage de la poudre dans un moule cylindrique; (b) Deuxième étape de précompactage de la poudre par pression hydrostatique dans la cellule triaxiale; (c) Échantillon brut après la compaction; (d) Troisième étape de taillage pour obtenir des échantillon voulus (Nguyen, (2009) [98]).

À fin d'améliorer la qualité de l'échantillon préparé et réduire la durée de taillage, un nouveau dispositif de taillage a été développé. Le processus de taillage est maintenant réalisé automatiquement (Figure 3.4). Le fil diamanté est attaché sur un bras qui se déplace du haut

au bas pendant que l'échantillon tourne autour de son axe à l'aide d'un moteur.

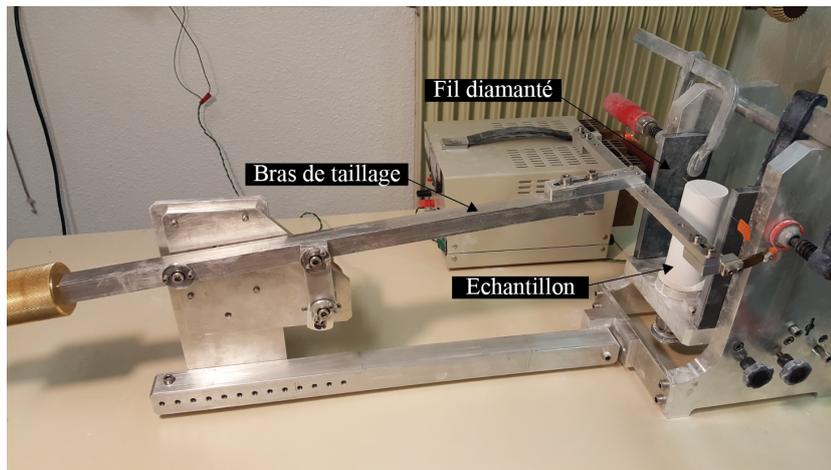


FIGURE 3.4 – Nouveau dispositif de taillage.

Un échantillon, soit cylindrique de hauteur 80 mm et diamètre 40 mm pour des essais de compression, soit bobine de diamètre maximal 43 mm et diamètre minimal 36 mm pour des essais d'extension, est couvert par une membrane imperméable en latex d'épaisseur 0.3 mm. Un motif de gouttes noires aléatoirement dispersées (mouchetis) est effectué sur cette membrane au moyen d'une bombe aérosol (Figure 3.5). Nous utilisons une peinture noire à pulvérisation JeTt Noir Mat 700°C. Différents types de mouchetis sont testés en combinaison avec l'amélioration de la technique de spray (distance de la bombe à l'échantillon, pression de sortie...) pour améliorer la qualité du mouchetis et ainsi les résultats de corrélation.

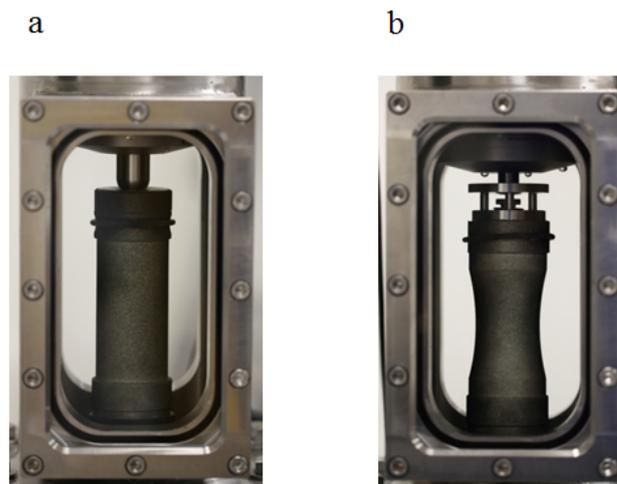


FIGURE 3.5 – Échantillons de GRAM1 couverts par la membrane imperméable en latex sur laquelle un motif des gouttes noires est effectué : (a) mise en place de l'échantillon pour des essais en compression ; (b) pour des essais en extension.

3.3 Dispositifs et techniques expérimentaux

Le dispositif de chargement pour effectuer des essais axisymétriques de compression et d'extension est composée d'une cellule de confinement, d'un système de chargement uniaxial et d'un générateur de pression. Le système optique est composé de 2 caméras ayant une résolution de 6 Mpixels et d'un système d'éclairage LED.

3.3.1 Description du dispositif triaxial

L'ensemble du dispositif expérimental est présenté dans la figure 3.6. Ce dispositif se compose :

- d'une cellule de confinement adapté à la technique de corrélation d'image. Cette cellule a une capacité de 2 MPa et deux fenêtres planes transparentes en PMMA qui permettent d'observer et de filmer l'échantillon au cours du chargement. Cette cellule a été conçue et mise au point dans le cadre de ce travail de thèse.
- d'un générateur de pression permettant l'application d'une pression de confinement P_c jusqu'à 3 MPa avec une précision de 0.1 %.
- d'une presse uniaxiale verticale permettant d'imposer une vitesse de chargement constante avec un asservissement en position. Cette presse applique une force axiale sur l'échantillon à travers d'un piston de chargement. La capacité de la presse est de 50 kN, correspond à une contrainte axiale de 40 MPa pour un échantillon de 40 mm de diamètre. La contrainte axiale est mesurée avec un capteur de force immergeable d'une capacité de 8 kN, avec une précision de 0.1%.
- d'un capteur LVDT externe mesurant le déplacement du piston au cours de l'essai.
- de deux caméras CCD monochrome de haute résolution de 6 Mpixels : ayant d'une fréquence d'acquisition de 10Hz fixées perpendiculaire aux fenêtres, permettant une acquisition de 10 images/seconde. Le système d'éclairage se compose de quatre spots LED ; deux spots de chaque côté de la cellule sont posées en haut et en bas de la fenêtre avec une inclinaison de 45°.
- de deux ordinateurs : l'un permet de contrôler le déplacement de la presse, de programmer les chemins de chargement et de récupérer des données mesurées par le capteur de force et de déplacement, d'afficher les courbes au cours de chargement. Le deuxième ordinateur permet d'afficher et d'enregistrer des images observées par les deux caméras. L'acquisition des données et des images sont synchronisées.

L'objectif des tests est de comprendre les mécanismes de localisation de la déformation et de rupture du matériau d'étude à partir des mesures des champs de déplacement fournis par la technique de corrélation d'images digitales (DIC). L'analyse des champs de déplacement et de déformation nous permet d'identifier l'initiation et l'évolution de la localisation de déformation, et de prévoir le mode de rupture (bande de cisaillement, bande de compaction, et bande de dilatance) (Dautriat et al. (2011), [43]).

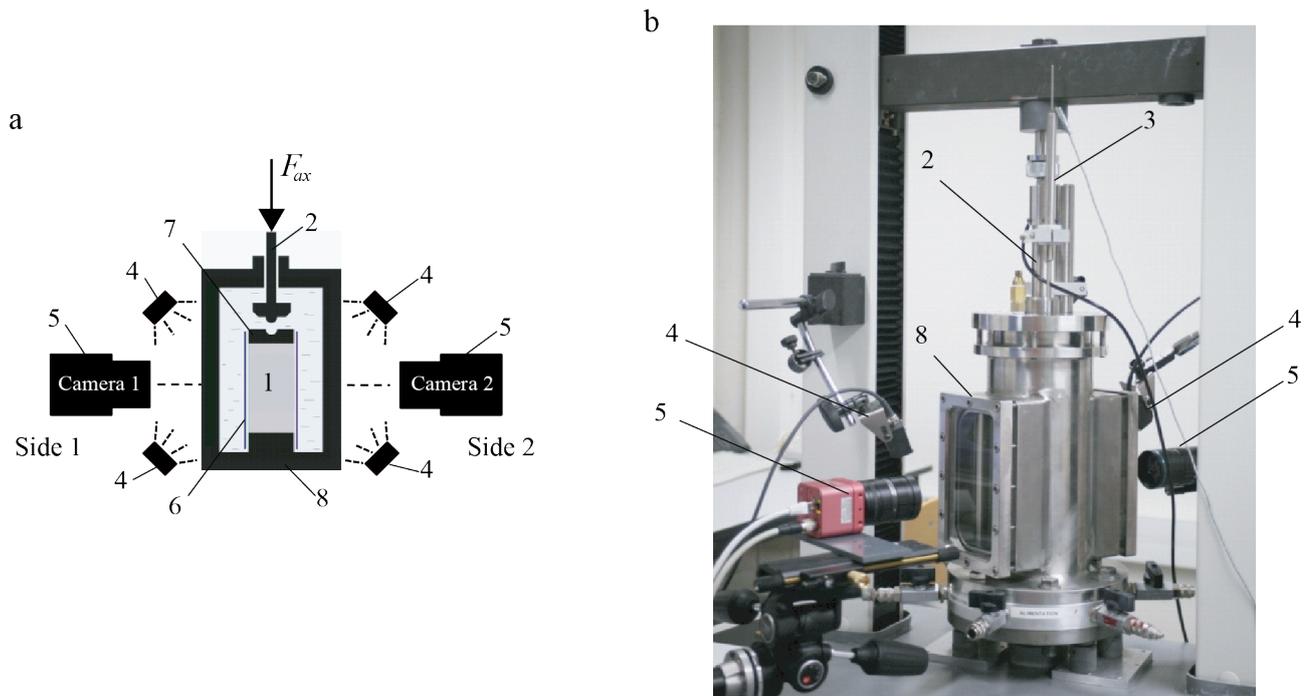


FIGURE 3.6 – Schéma (a) et photo du montage expérimental. (1) Échantillon de GRAM1 ; (2) Piston vertical transmettant la force verticale ; (3) Capteur externe LVDT ; (4) LEDs ; (5) Caméras ; (6) Membrane en latex ; (7) Embase rigide ; (8) Cellule de confinement.

3.3.2 Embases de chargement

L'échantillon est mis entre deux embases, inférieure et supérieure. La force axiale est imposée sur l'échantillon à travers l'embase supérieure. Les embases choisies sont de type mobile qui assurent le meilleur contact avec l'échantillon dès le début du test. Par ailleurs, elles permettent à la fois la rotation et la translation latérale par rapport au piston de chargement. L'embase inférieure a une forme cylindrique en inox de 43 mm de diamètre et repose sur le support de la cellule. Des embases supérieures sont différentes correspondent à deux types d'essai.

a) Embase supérieure pour l'essai en compression

L'embase supérieure comprend deux pièces en inox d'une forme cylindrique ayant un diamètre de 43 mm (figure 3.7). La pièce 1 a une empreinte hémisphérique sur la surface supérieure. Le piston ayant une tête de forme hémisphérique appuie sur la pièce supérieure dans l'empreinte hémisphérique pour exercer la force axiale sur l'échantillon. Cette forme permet à la pièce 1 de tourner autour du piston. En plus, entre les deux pièces 1 et 2 et entre la pièce 2 et l'échantillon, nous mettons du lubrifiant pour minimiser le frottement entre eux et permettre une translation latérale de la pièce 2 par rapport à la pièce 1.

b) Embase supérieure pour l'essai en extension

Pour l'essai en extension, le piston de chargement va monter et tirer l'embase supérieure pour diminuer la contrainte axiale. L'embase supérieure se compose de quatre pièces comme dans la figure 3.8.

La tige avec deux rotules connecte une coque cylindrique de 43 mm de diamètre au connecteur et permet la rotation relative entre eux. La pièce coulissante est placée entre la rotule

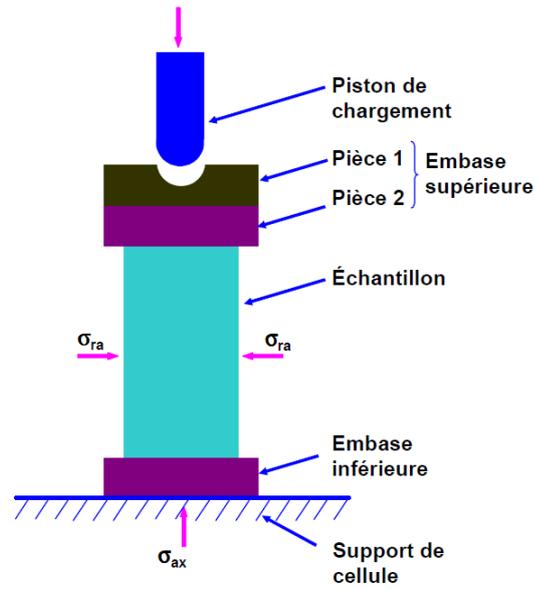


FIGURE 3.7 – Schéma de l'échantillon et des embases pour l'essai en compression (selon Nguyen (2009), [98])

inférieure et la surface à l'intérieur de la coque pour une translation de la tige par rapport au connecteur. Tout l'ensemble est accroché au piston de chargement à l'aide d'un crochet .

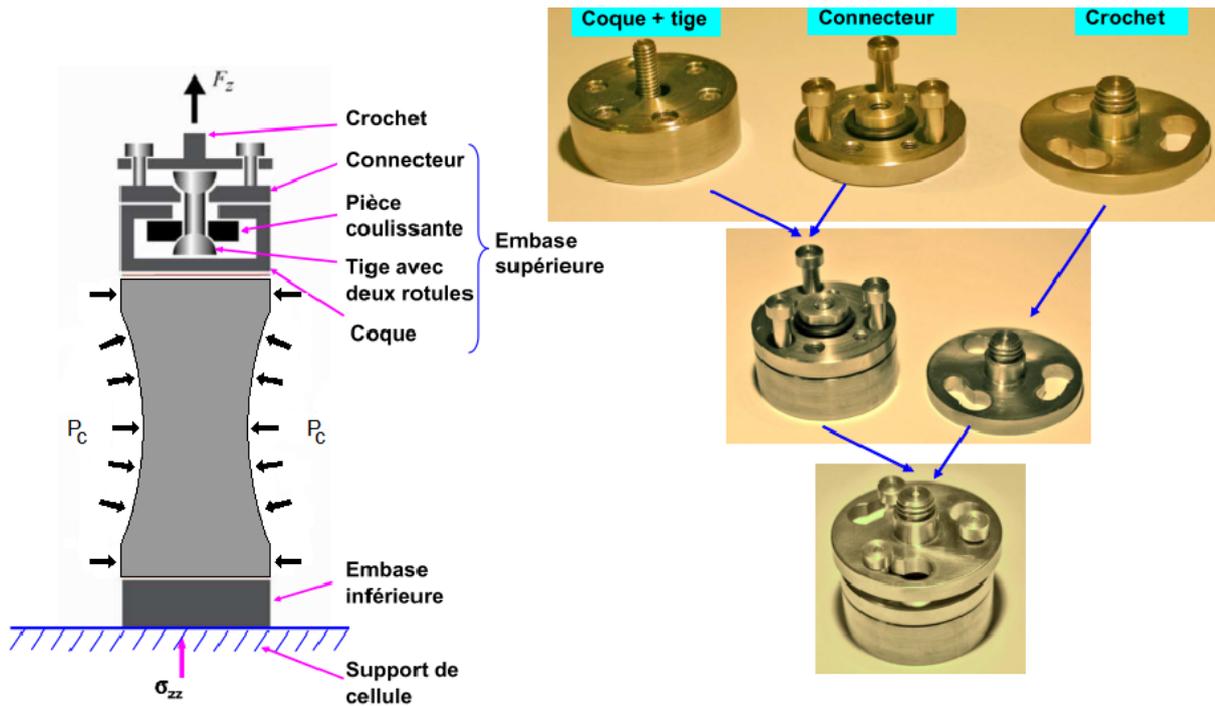


FIGURE 3.8 – Schéma de l'échantillon et des embases pour l'essai en extension ([98])

3.3.3 Technique de diminution du frottement entre l'échantillon et l'embase

En mécanique des roches, on utilise souvent le lubrifiant du mélange vaseline-acide stérique pour réduire le frottement de contact entre l'embase et l'échantillon [18]. Cependant, avec notre matériau synthétique de très faible résistance, nous avons besoin d'un lubrifiant ayant le coefficient de frottement encore plus faible. Pour notre étude, nous utilisons un lubrifiant "TCX1" fabriqué spécialement à base d'hydrocarbures solides et liquides. Ce lubrifiant qui a été utilisé dans les essais de Jorand (2007) ([75]), et de Nguyen (2009) ([98]), peut réduire le frottement entre deux pièces en aluminium à $\mu = 0.016$ (cf. Tableau 3.1).

Le lubrifiant TCX1 n'est pas mis en contact direct avec GRAM1 pour ne pas provoquer de réaction chimique. Nous utilisons donc deux couches de téflon d'épaisseur 0.1 mm afin d'isoler la surface de l'échantillon du lubrifiant. Le téflon se déforme pendant le chargement et s'adapte à la forme de l'échantillon, ceci réduit les effets de bords. L'efficacité de cette technique a déjà montré dans le travail de Nguyen (2009) ([98]).

Lubrifiant	Coefficient de frottement
TCX1	0.016
Acide stérique	0.022
Tungstendisulfie (WS2)	0.032
Molybdenum disulfide (MoS2)	0.032
Graphite	0.036

TABLE 3.1 – Coefficient de frottement des lubrifiants (Nguyen (2009), [98])

3.3.4 Système de montage de caméra

Deux caméras svx ECO694 sont montées sur des platines de déplacement micrométrique avec une course de $\pm 15\text{mm}$ (cf. Figure 3.6). Chaque platine coulisse sur une colonne en profilé aluminium qui va du bas de la cellule jusqu'au haut. Ce système permet de bien centrer et régler les caméras perpendiculairement à la fenêtre de la cellule, et également de garder les caméras stables pendant l'essai. Les objectifs utilisés sont de marque Muytron 1 :1.8/16 mm et Fujinon 1 :1.4/16 mm. Les images sont prises en format tiff, la résolution est de 2752×2204 pixels.

3.3.5 Logiciel de pilotage et d'acquisition des données

Deux programmes de contrôle et d'acquisition de données adaptés à la spécificité de notre expérience ont été développés en utilisant le logiciel LabVIEW :

- Un programme qui permet de piloter la presse en imposant une vitesse de déplacement constante et aussi le générateur de pression par port RS232 en paramétrant la rampe de pression à appliquer dans la cellule. Les données mesurées pendant l'essai tel que la force mesurée par capteur de force, le déplacement mesuré par capteur LVDT, la pression et variation du volume dans la cellule de pression, sont enregistrées et affichées sur l'écran de l'ordinateur. Ce même programme permet la synchronisation de l'acquisition des images avec les autres données.
- Le deuxième programme permet d'enregistrer les images dans un fichier *.avi qui seront ensuite découpés en images au format *.tiff.

3.3.6 Nouvelle cellule de pression

Dans l'essai triaxial conventionnel, l'échantillon est soumis à l'intérieur d'une cellule de pression cylindrique (Fig.3.9a). La forme cylindrique de la cellule rend l'image de l'échantillon prise par la caméra déformée même sans chargement, entraînant ainsi l'imprécision dans le calcul des champs de déplacement et de déformation en utilisant la méthode de DIC. La figure 3.9 présente la carte de déformation de composant axial obtenue en utilisant la cellule de pression cylindrique classique. Un système de lignes d'artefact conjuguées (Fig.3.10a) apparaît de façon permanente sur les cartes de déformation et influence les valeurs de déformation locale et de déformation globale, en particulier dans le cas où l'échantillon est déformé dans le domaine élastique. Afin de surmonter cette difficulté, une nouvelle cellule de pression avec deux fenêtres rectangulaires planes transparentes a été développée pendant la thèse. Ceci permet d'éliminer le type d'artefact comme mentionné ci-dessus (Fig.3.9b et Fig.3.10b).

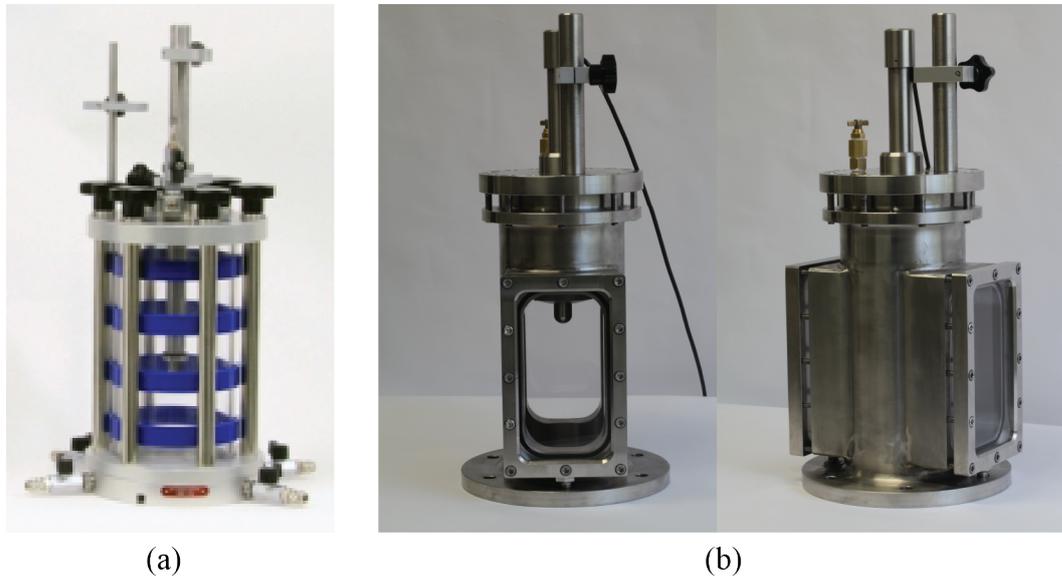


FIGURE 3.9 – (a) Cellule de pression cylindrique classique ; (b) Nouvelle cellule de pression.

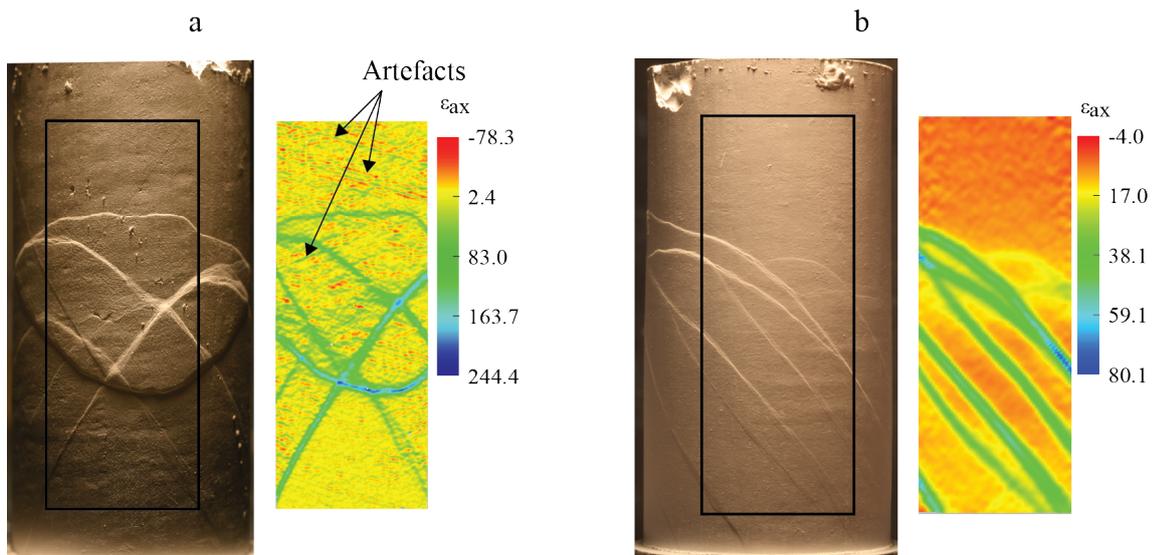


FIGURE 3.10 – Cartes de déformation du composant axial obtenues en utilisant (a) Cellule de pression cylindrique classique ; (b) Nouvelle cellule de pression.

Chapitre 4

Traitement et analyse des résultats expérimentaux des essais en compression

Contents

4.1 Synthèse des essais triaxiaux utilisant le matériau GRAM1	86
4.1.1 Détection du point de bifurcation	86
4.1.2 Technique de mesure de l'orientation de bande de déformation pour des essais triaxiaux	87
4.2 Essais de compression axisymétrique	90
4.2.1 Procédure de l'essai	90
4.2.2 Analyses générales	90
4.2.3 Essai C0.2-01T	92
4.2.3.1 Évolution des bandes de déformation	94
4.2.3.2 Vitesse de propagation de bande de déformation	94
4.2.3.3 Evolution de l'épaississement des bandes de déformation	98
4.2.4 Essai C0.3-12T	101
4.2.4.1 Initiation de la localisation de bande de déformation et évolution du réseau de bande de déformation	103
4.2.4.2 Vitesse de propagation des bandes de déformation	109
4.2.4.3 Evolution de l'épaississement de bande de déformation	109
4.2.5 Essai C0.3-08T	111
4.2.5.1 Évolution de bande de déformation	113
4.2.5.2 Épaississement des bandes de déformation et fracturation de l'échantillon	117
4.2.6 Calcul de la déformation volumique inélastique ε^p et de la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$	118
4.3 Discussion	120
4.3.1 Réseau de bandes de déformation à la transition fragile-ductile	120
4.3.2 Initiation et évolution de localisation de déformation à la transition fragile-ductile	120

Ce chapitre a pour le but de présenter les résultats de l'étude expérimentale visant à caractériser l'initiation, la propagation et le développement de bandes de localisation de la déformation dans des échantillons de GRAM1 en utilisant la technique de corrélation d'images 2D pour mesurer des champs de déplacement en surface des échantillons.

La campagne d'essais réalisés dans ce travail de thèse vise à étudier le comportement mécanique du matériau GRAM1 dans la régime de transition fragile-ductile. Selon l'étude de Nguyen (2009) ([98]), la pression de confinement à la transition fragile-ductile $P_c = P_{bdt}$ varie entre 0.2 et 0.35 MPa pour des essais en compression. Nous présentons d'abord un aperçu général des essais effectués à différentes pressions de confinement ainsi que la courbe contrainte-déformation $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ associée. Sur ces courbes, les positions d'images utilisées pour l'analyse DIC (Corrélation d'Images Digitales) sont indiquées. Les résultats de corrélation d'images seront présentés et discutés avec les courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$.

Les résultats des analyses de corrélation d'images numériques présentés dans ce chapitre utilisent la convention de signe de mécanique des roches : une déformation positive présente une compression ; une déformation négative correspond à une extension. Les valeurs de déformation affichées sur l'échelle de couleur sont multipliées par 10^{-3} .

Ce chapitre se compose de trois sections : La première section donnera un résumé des essais triaxiaux réalisés par Nguyen (2009) ([98]) ; la deuxième section présentera les résultats d'essais en compression. On présentera en particulier l'initiation et l'évolution des bandes de déformation, leur vitesses de propagation ainsi que l'évolution de l'épaississement des bandes de déformation. Enfin la troisième section sera dédiée à la discussion.

4.1 Synthèse des essais triaxiaux utilisant le matériau GRAM1

Nguyen (2009) ([98]) a réalisé des essais triaxiaux en compression et en extension, couvrant l'ensemble du comportement fragile et ductile sur des échantillons de GRAM1. Son étude expérimentale sur la localisation de la déformation se base sur des mesures de déplacement en utilisant les capteurs de déplacement LVDTs. Le système de mesure se compose de deux LVDTs axiaux et quatre LVDTs radiaux. La figure 4.1 présente les deux configurations expérimentales adaptées aux deux formes d'échantillon testées. Dans la configuration 1 (Fig. 4.1a), les capteurs LVDTs axiaux sont collés sur la membrane de l'échantillon et cette configuration est utilisée pour les essais en compression ainsi que des essais en extension sur échantillons cylindriques. Dans la configuration 2 (Fig. 4.1b), les LVDTs axiaux sont fixés sur un anneau circulaire monté sur l'échantillon. Cette configuration est utilisée pour les essais en extension réalisés sur des échantillons de forme bobine.

4.1.1 Détection du point de bifurcation

À partir des données de force et de déplacements enregistrées, Nguyen (2009) peut établir les courbes contrainte-déformation. Il a utilisé une technique de détection de la localisation de déformation basée sur le principe de mesure multiple des déformations. Cette technique a été utilisée par plusieurs auteurs (Santarelli (1990)[129], Bésuelle (1999) [18], Sulem et Ouffroukh (2006) [139]). Si l'échantillon se déforme de manière homogène, les déformations mesurées à différents points de l'échantillon sont égales. Quand la déformation se localise, les valeurs de mesures de déplacement aux différents points sont différents. Cette différence permet d'identifier le point de bifurcation. L'identification du point de bifurcation est réalisée en utilisant les courbes telles que (q, ε_{zz}) , $(\Delta\varepsilon_{zz,ra}, \varepsilon_{zz})$ comme présentées dans les figures 4.2, 4.3, 4.4.

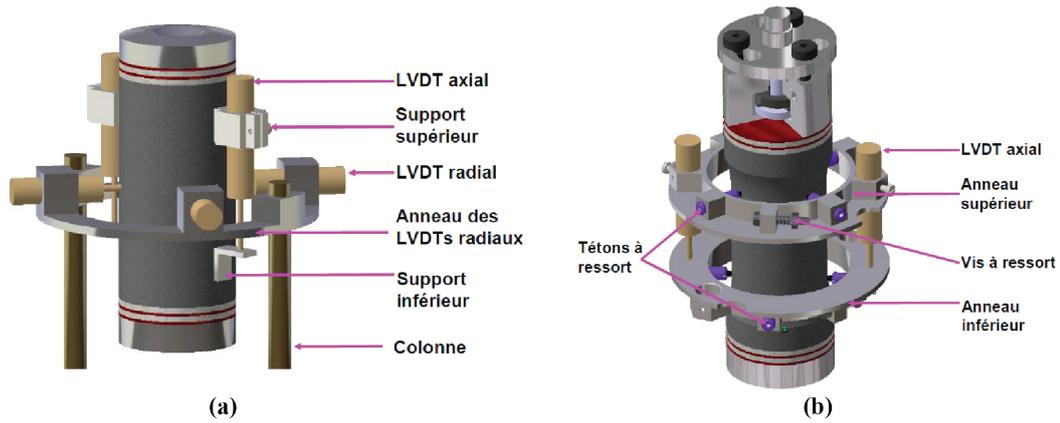


FIGURE 4.1 – Schéma présentant la fixation des LVDTs sur l'échantillon (a) dans la configuration 1, (b) dans la configuration 2 utilisés dans l'étude de Nguyen (2009) [98].

Dans l'essai à $P_c = 0.2$ MPa présenté sur la figure 4.2, les courbes ($\Delta\varepsilon_{zz,ra}, \varepsilon_{zz}$) se composent de trois phases. Une première phase de déformation non homogène correspond à la mise en contact de l'échantillon avec le système de chargement. Ensuite, les courbes sont linéaires signifiant la déformation homogène. À partir du point de bifurcation, ces courbes divergent, la déformation devient hétérogène. Pour $P_c < 0.4$ MPa, le point de bifurcation est facile à mettre en évidence car les trois phases de déformation sont bien identifiées (cf. Figs. 4.2 et 4.3); à partir de $P_c = 0.4$ MPa (cf. Fig. 4.4), le point de bifurcation est moins évident car la partie linéaire des courbes ($\Delta\varepsilon_{zz,ra}, \varepsilon_{zz}$) après la phase de mise en place n'est pas bien identifiée et l'écart des mesures varie progressivement et reste faible jusqu'à la fin de l'essai.

Par ailleurs, cette technique de mesure permet d'identifier le point de bifurcation mais ne permet pas de suivre l'évolution de la localisation des bandes de déformation. Ceci est toutefois très important pour étudier le comportement du matériau au cours du chargement ainsi que pour évaluer l'influence d'un réseau des bandes sur le développement d'une nouvelle bande de déformation. L'analyse des bandes de déformation se fait donc généralement sur la surface post-mortem des échantillons.

4.1.2 Technique de mesure de l'orientation de bande de déformation pour des essais triaxiaux

Dans notre travail, la détection de l'initiation de la localisation des bandes de déformation et son évolution sont effectués par l'analyse DIC. L'orientation des fractures/bandes de déformation peut également être mesurée grâce aux traces qu'elles laissent sur la membrane. Ces traces correspondent à de la poussière produite par l'endommagement du matériau à l'intérieur d'une fracture ou bande. L'angle formé par la direction de la contrainte principale majeure et la tangente à la trace donne l'inclinaison Ψ de la fracture ou bande par rapport à la contrainte principale majeure (cf. Figure 4.5).

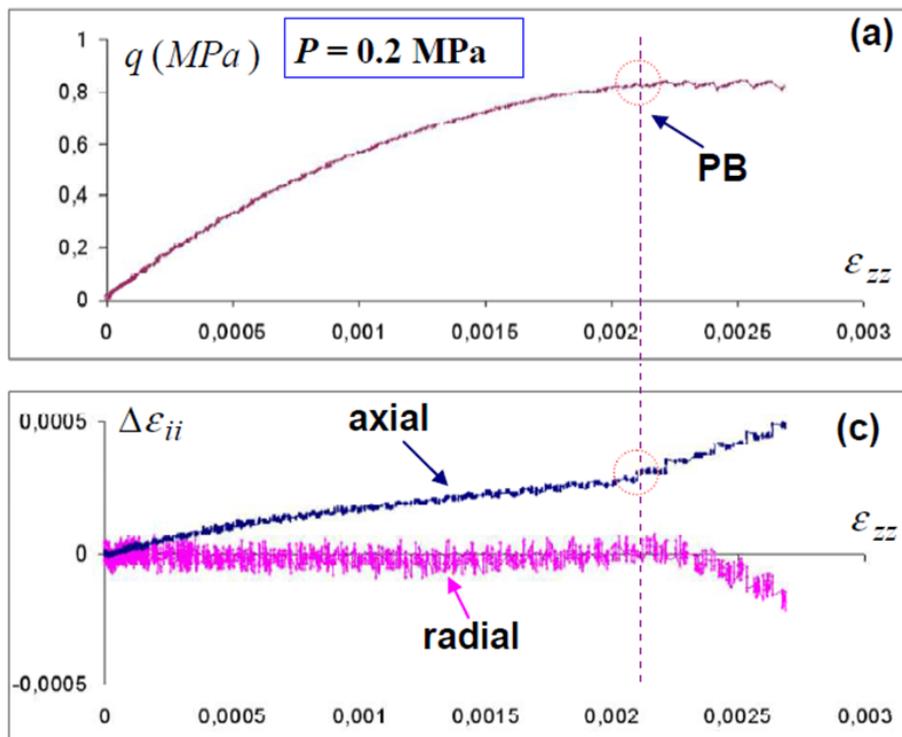


FIGURE 4.2 – Essai triaxial en compression à la pression de confinement $P_c = 0.2 \text{ MPa}$ (Nguyen (2009) [98]).

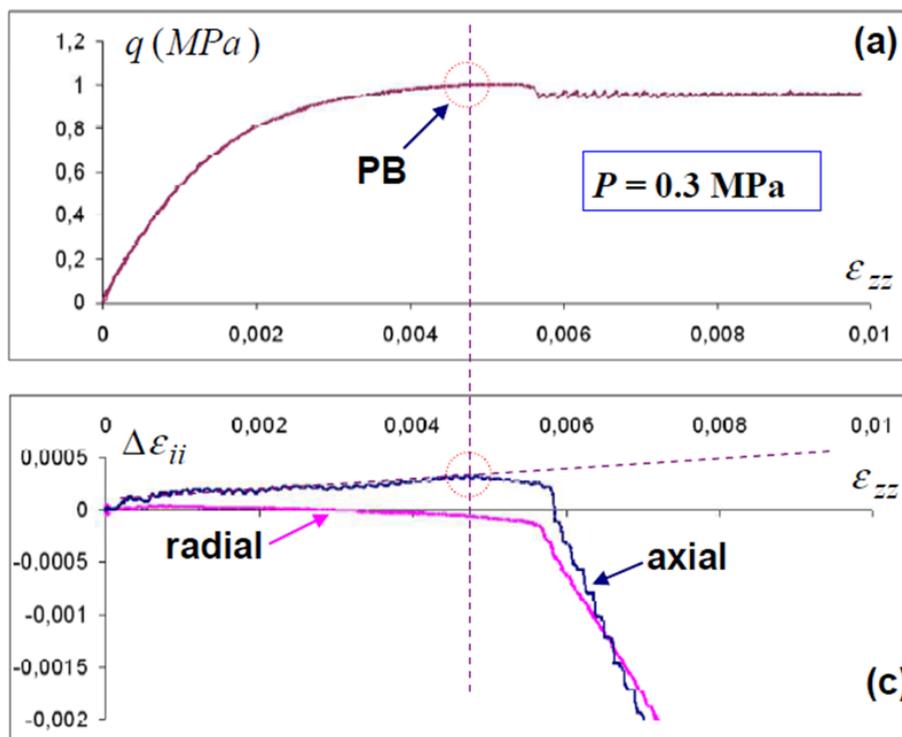


FIGURE 4.3 – Essai triaxial en compression à la pression de confinement $P_c = 0.3 \text{ MPa}$ (Nguyen (2009) [98]).

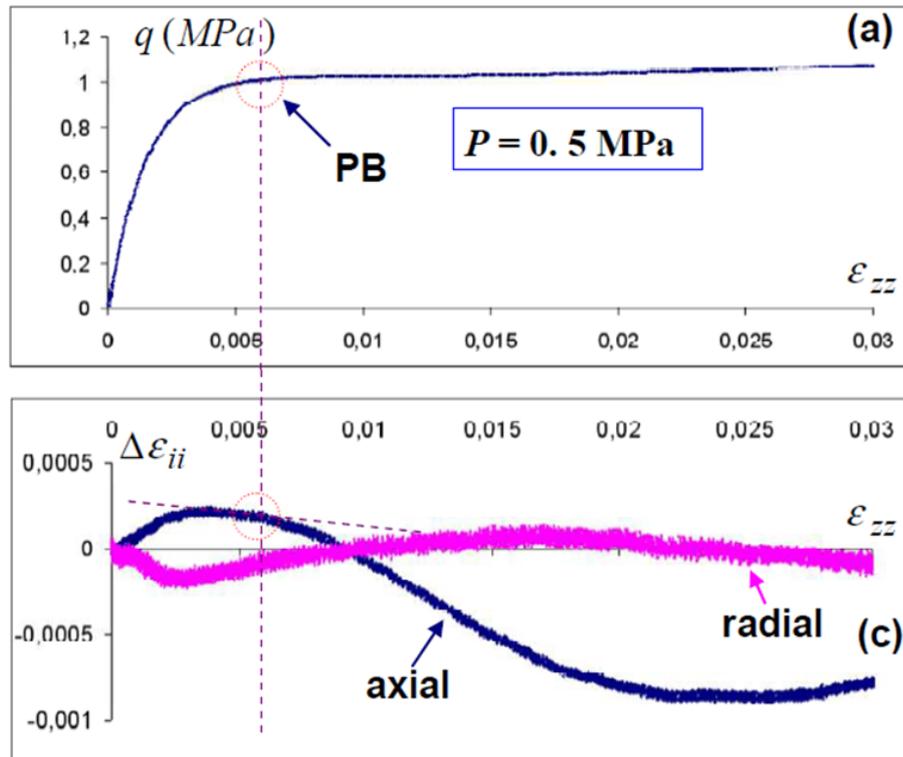


FIGURE 4.4 – Essai triaxial en compression à la pression de confinement $P_c = 0.5$ MPa (Nguyen (2009) [98]).

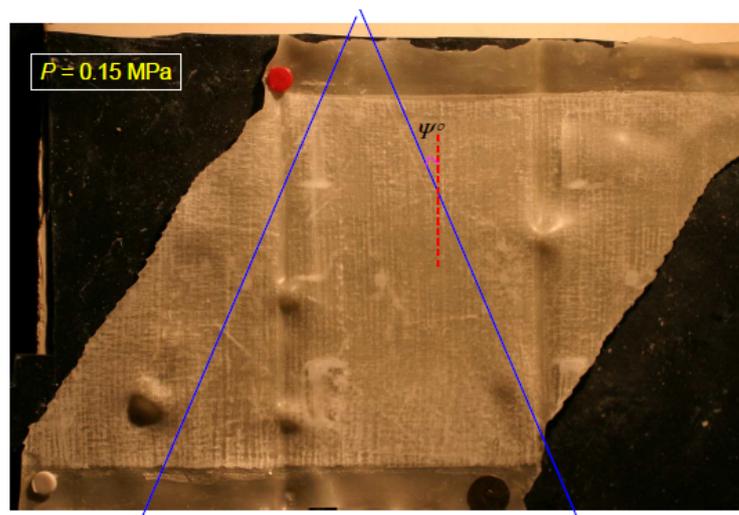


FIGURE 4.5 – Technique de mesure de l'orientation d'une bande de déformation utilisée par Nguyen (2009) ([98]).

4.2 Essais de compression axisymétrique

4.2.1 Procédure de l'essai

L'échantillon est d'abord soumis à une pression de confinement étudiée P_c . La vitesse de chargement hydrostatique est de 25 kPa/min. Ensuite, P_c est maintenue constante et un piston vertical se déplace suivant la direction axiale à une vitesse constante de 0.06 mm/min = 10^{-3} mm/s (correspondant à une vitesse de déformation de $1.25 \times 10^{-2} s^{-1}$) pour exercer une contrainte axiale sur l'échantillon.

Au cours de l'essai, l'échantillon est filmé par deux caméras de haute résolution de 6 Mpixels avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz suivant deux côtés diamétralement opposés. Les mesures de déformations axiales sont effectuées en appliquant la méthode de corrélation d'images (DIC) sur les images acquises. Par ailleurs, différentes cartes de déformations axiales ou/et de cisaillement maximal, seront calculées de façon incrémentale ou cumulée.

À la fin des essais, le déchargement de la contrainte déviatorique est exécuté jusqu'à l'état hydrostatique. Ensuite la pression isotrope est baissée progressivement à zéro. L'échantillon est alors démonté de la cellule minutieusement pour éviter tout endommagement.

4.2.2 Analyses générales

Nom d'essai	Dimensions de l'échantillon H & D(mm)	Pression de confinement P_c (MPa)	Contrainte axiale au pic (MPa)	ε_{ax}^{max} par LVDT	Conditions aux extrémités
C0.2-01T	78.8; 40.5	0.2	0.9	0.02	téflon + lubrifiant
C0.3-12T	79.1; 40.3	0.3	1.05	0.02	téflon + lubrifiant
C0.3-08T	78.2; 40.5	0.3	1.04	0.09	téflon + lubrifiant
C0.3-10T	78.9; 40.5	0.3	1.06	0.02	téflon + lubrifiant

TABLE 4.1 – Référence des essais en compression

Le Tableau 4.1 présente le référencement des essais en compression. La contrainte axiale est calculée en divisant la force appliquée par la surface d'appui de l'échantillon. La déformation axiale présentée dans le tableau est calculée en divisant le raccourcissement axial (mesuré par le capteur LVDT externe) par la hauteur initiale de l'échantillon.

La courbe typique de contrainte différentielle $q = \sigma_1 - \sigma_3$ en fonction de la déformation axiale $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ ($\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est la moyenne de déformations axiales sur toute la hauteur de l'échantillon calculée par corrélation d'images) pour les essais en compression triaxiaux à pression de confinement $P_c = P_{bdt} \approx 0.3$ MPa est présentée sur la figure 4.6. On peut voir la différence non négligeable entre les courbes où la déformation axiale nominale $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est calculée à partir des mesures par capteur externe LVDT (courbe 1, Fig. 4.6) et par la technique DIC (courbe 2, Fig. 4.6). La dernière courbe correspond très bien aux mesures LVDT internes (où les capteurs LVDT ont été collés à la surface/membrane de l'échantillon) par Nguyen et al. (2011) ([99]) dans les mêmes conditions. La mesure par DIC donne un module d'Young $E \approx 6.5 \times 10^5$ MPa, alors que la mesure de capteur externe fournit une valeur beaucoup plus faible $E \approx 3.8 \times 10^5$

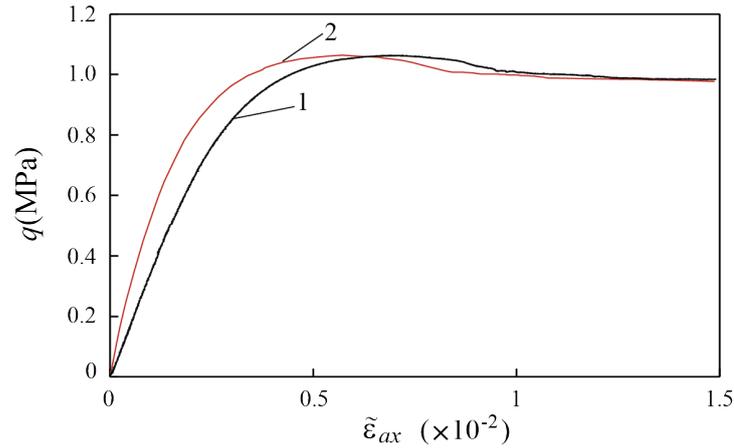


FIGURE 4.6 – Courbes de contrainte-déformation représentatives $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$. 1, $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est calculée à partir des mesures de déplacement par le capteur externe LVDT ; 2, $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est obtenue en intégrant le champ de déformation axiale à partir de DIC sur toute la hauteur de l'échantillon.

MPa.

Parmi les dix-huit essais de compression menés sur les échantillons de GRAM1, nous ne montrons sur la figure 4.7 que les courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ de trois essais à $P_c = 0.3$ MPa et d'un essai à $P_c = 0.2$ MPa pour lesquelles deux essais à $P_c = 0.3$ MPa (C0.3-12T et C0.3-08T) et un essai à $P_c = 0.2$ MPa (C0.2-01T) seront analysés en détail par la suite. Les déformations axiales présentées sur ces courbes sont calculées par DIC. Nous pouvons constater que la réponse élastique de tous ces essais est très similaire, les courbes coïncident dans la première partie quasi-linéaire. Ensuite, pour la gamme de $P_c = 0.3$ MPa, ces courbes évoluent sur une portion non linéaire et atteignent le pic de contrainte. Après le pic de contrainte, l'adoucissement graduel est observé. À grande déformation, un plateau comme dans l'essai C0.3-08T est également atteint. Au contraire, pour l'essai à $P_c = 0.2$ MPa, le pic est suivi d'une chute brutale de contrainte puis de plusieurs petites chutes de contrainte.

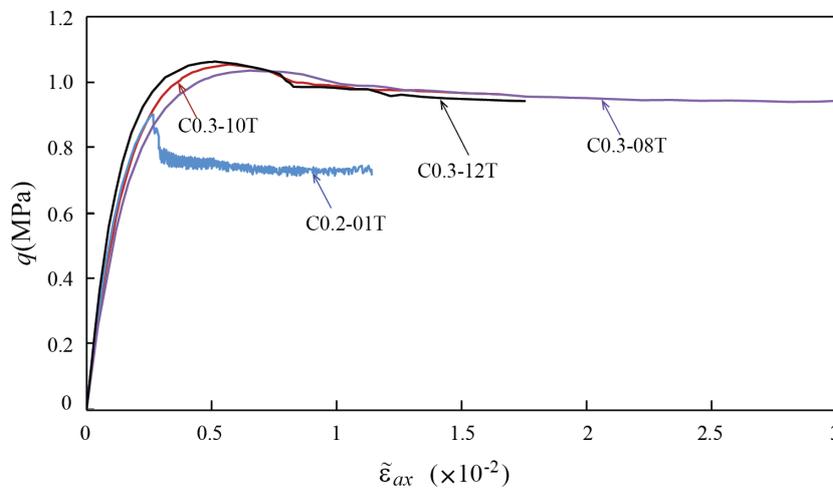


FIGURE 4.7 – Courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ des essais en compression, $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est donnée par DIC.

4.2.3 Essai C0.2-01T

L'essai C0.2-01T a été réalisé à la pression de confinement $P_c = 0.2$ MPa. La courbe de la contrainte différentielle ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation axiale ($\tilde{\varepsilon}_{ax}$ - calculée par DIC) est présentée sur la Figure 4.8. La courbe est composée d'une partie linéaire, une partie non-linéaire avec trois chutes de contrainte intermédiaires après le pic et ensuite plusieurs petites chutes successives. Pour l'analyse DIC, 13 parmi les 17000 images enregistrées au cours du chargement ont été choisies. Elles sont indiquées sur la courbe contrainte-déformation. L'image 0 correspond au début de l'essai, et l'image 1 correspond au moment où la courbe contrainte-déformation vient à s'écarter de la partie linéaire. Les images 2 et 3 sont les images consécutives avant et après l'initiation de la première bande de localisation juste avant le pic de contrainte. Les images 3 et 4 sont les deux images qui encadrent la première chute de contrainte. Les images 4 et 5 correspondent à la deuxième chute de contrainte. De même, les images 5 et 6 correspondent à la troisième chute de contrainte.

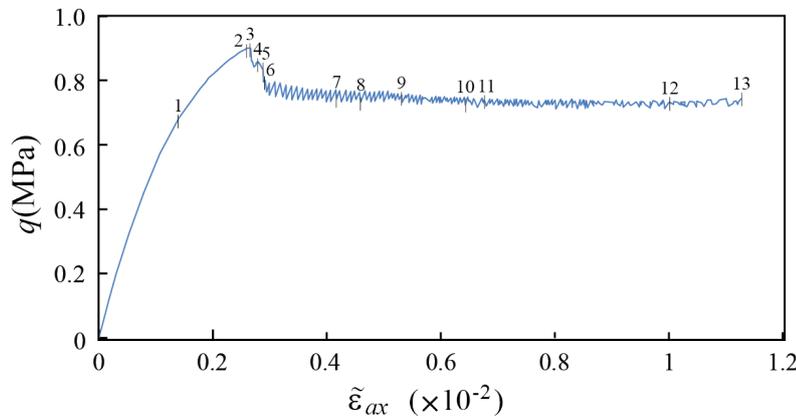


FIGURE 4.8 – Essai C0.2-01T. Courbe contrainte-déformation axiale avec indication des numéros des images utilisées pour l'analyse DIC.

La figure 4.9 présente les photos prises de la surface de l'échantillon post-mortem suivant les quatre côtés parmi lesquelles deux correspondent aux faces côtés filmés par les caméras au cours de l'essai, deux cartes de déformations axiales accumulées obtenues par l'analyse DIC et la membrane recouvrant l'échantillon. Les cartes de déformation axiale accumulée à l'état final du chargement montrent les fractures/bandes de déformation correspondantes aux zones marquées par les deux rectangles noirs sur les photos notées 1 et 2 (cf. Fig. 4.9a) de l'échantillon post-mortem. En regardant la surface de l'échantillon post-mortem et les traces sur la membrane, nous constatons deux types de bandes de déformation : une bande de déformation majeure nommée I qui traverse toute la hauteur de l'échantillon et des bandes de déformation secondaires nommées respectivement a, b, c, d, e, f, g, h . Ces bandes secondaires ne traversent pas tout l'échantillon et se connectent à la bande de déformation majeure. L'inclinaison Ψ de la fracture/bande majeure et des bandes secondaires (a, b, c) mesurée à partir des traces sur la membrane est d'environ $23 \pm 1^\circ$, tandis que celles de bandes e, f, g, h sont plus importants. Les inclinaisons de bandes e, g et bandes f, h sont respectivement de 37° et 27° .

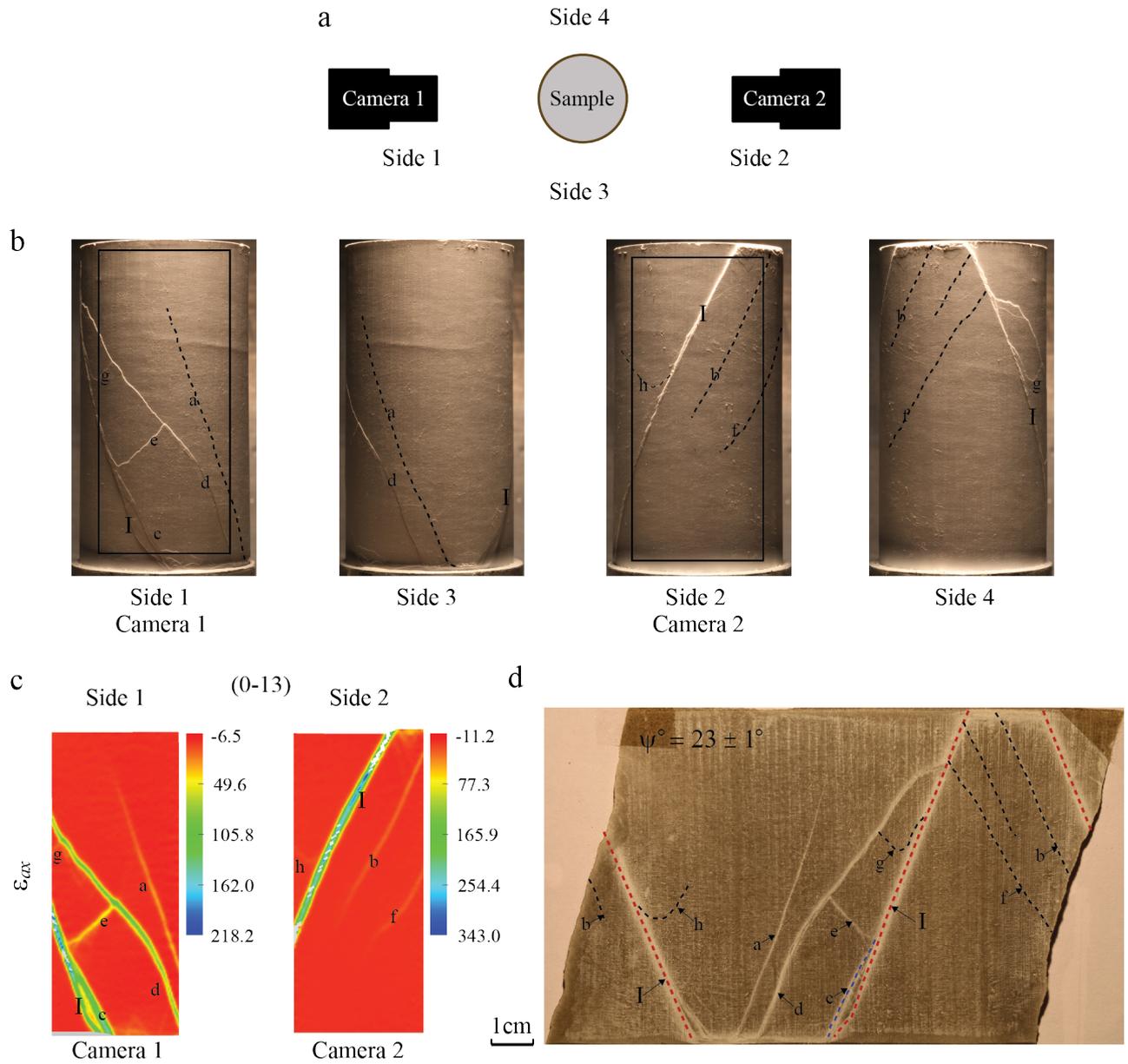


FIGURE 4.9 – Essai C0.2-01T. (b) Photos de l'échantillon post-mortem observées suivant 4 côtés (montrés à (a)) (c) Cartes de déformations axiales (ε_{ax}) (d) Mesure de l'angle de la fracture/bande de déformation avec des traces sur la membrane.

4.2.3.1 Évolution des bandes de déformation

L'évolution des bandes de déformation dans l'essai C0.2-01T est présentée sur les figures 4.10, 4.11 et 4.12. La figure 4.10 montre les cartes de déformations axiales accumulées (ε_{ax}) à différents stades correspondant aux points indiqués sur la courbe contrainte-déformation ($q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$) (cf. Fig. 4.8), tandis que les déformations incrémentales axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$), cisailantes maximales ($\Delta\gamma_m$) et volumiques ($\Delta\varepsilon$) sont présentées sur les figures 4.11 et 4.12. À chaque point, les deux cartes de déformation obtenues par deux caméras placées suivant deux côtés opposés (cf. Fig. 4.9a) sont montrées. La carte de gauche est donnée par la caméra 1 et celle de droite par la caméra 2.

La bande de déformation majeure I apparait tout d'abord à l'extrémité supérieure sur l'image de droite entre les stades 2 et 3 et se propage ensuite vers l'autre côté de l'échantillon entre les stades 4 et 5. Cette bande se développe de façon continue tout au long de l'essai. Cette bande est la plus développée et reste toujours active durant toute la phase de déformation. Au fur et à mesure de l'évolution de bande majeure I, les autres bandes de déformation secondaires se forment. Sur la carte de déformations incrémentales (2-3), nous voyons aussi l'apparition de la bande de déformation secondaire *a* s'initiant à l'extrémité inférieure puis se propageant vers le haut. Cette bande est parallèle à la bande majeure I. Ensuite, c'est l'apparition des bandes *b*, *c* au stade 6 ; *d* au stade 7 ; *e* au stade 8 et *g* au stade 12. D'autres bandes peuvent être identifiées. Le plus grand nombre de bandes de déformation s'observe en termes de la déformation volumique incrémentale $\Delta\varepsilon$ au stade 12-13. On peut constater également l'apparition d'une bande de déformation *i* et des fissures/bandes autour la bande *e*, par exemple, qui ne peuvent être détectées directement sur les photos, prises à la surface de l'échantillon post-mortem, mais qui sont bien visibles en appliquant la technique DIC.

4.2.3.2 Vitesse de propagation de bande de déformation

Comme indiqué ci-dessus, la bande de déformation majeure I apparait très rapidement entre les images consécutives 2 et 3 (l'intervalle de 0.1s). Cette bande se forme quasi-complètement sur la carte de déformations de droite à la phase (2-3). Ceci signifie que cette bande propage très rapidement de ce côté. En mesurant la longueur de cette bande en fonction du temps, nous pouvons calculer/estimer sa vitesse de propagation à environ $V_b = 853.5$ mm/s (la vitesse de chargement $V_c = 10^{-3}$ mm/s). Cependant, cette bande n'arrive qu'à propager à l'autre côté au stade 5 et est bien formée au stade 7 (cf Figure 4.10). La vitesse de propagation est donc plutôt de $V_b = 5.16 \times 10^{-1}$ mm/s. L'évolution de bandes *a*, *b*, *c*, *d* peuvent peut-être empêcher le développement de la bande majeure I conduisant à cette diminution de la vitesse de propagation.

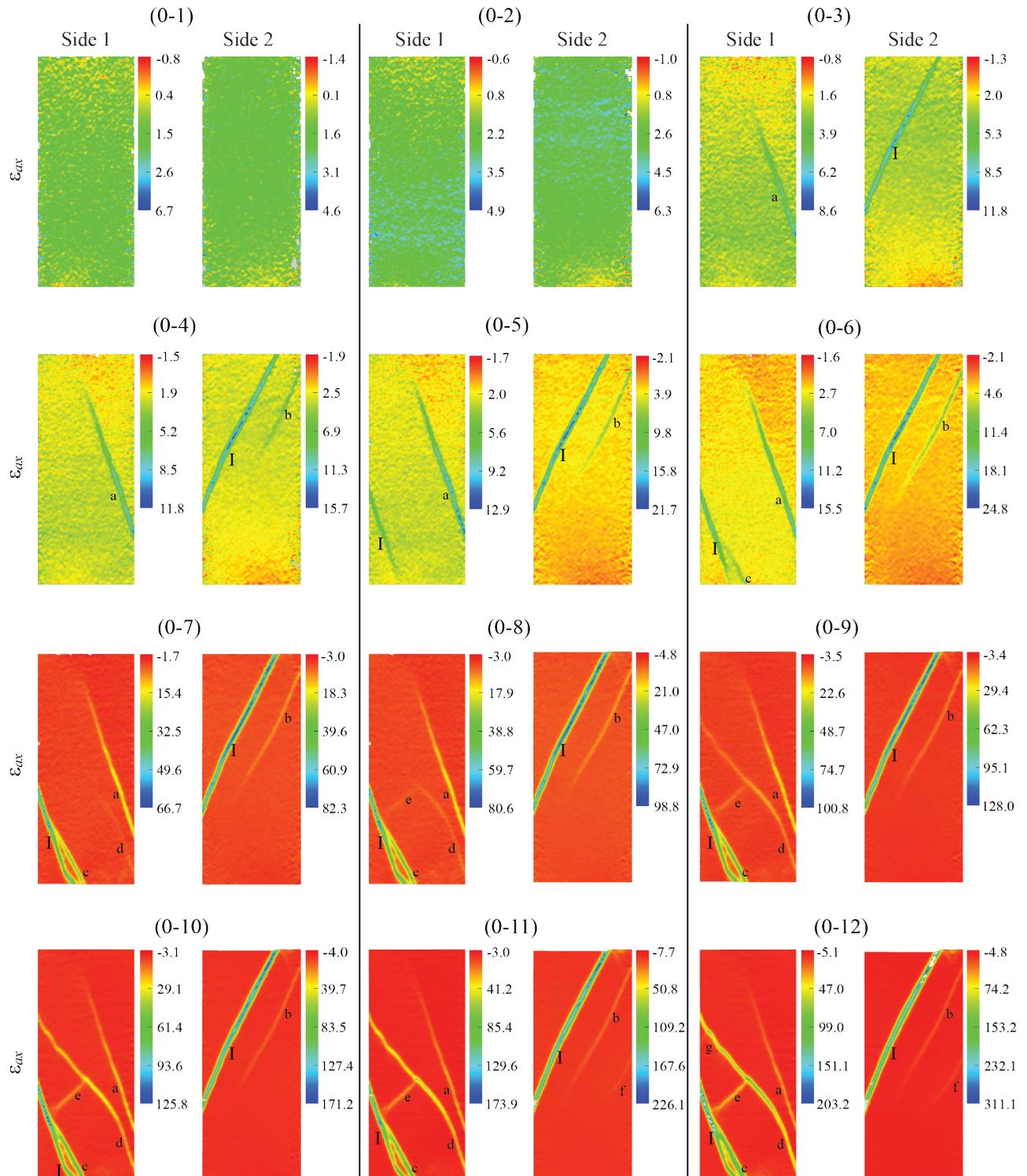


FIGURE 4.10 – Essai C0.2-01T. Évolution des déformations axiales cumulées (ε_{ax}) obtenues à partir de DIC entre les stades correspondant au point (0) et les points (n), où $n = 1, 2 \dots 12$ indiqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (Fig. 4.8). Pour chaque point, les paires de cartes de déformations obtenues par deux caméras suivant deux côtés opposés sont présentées. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

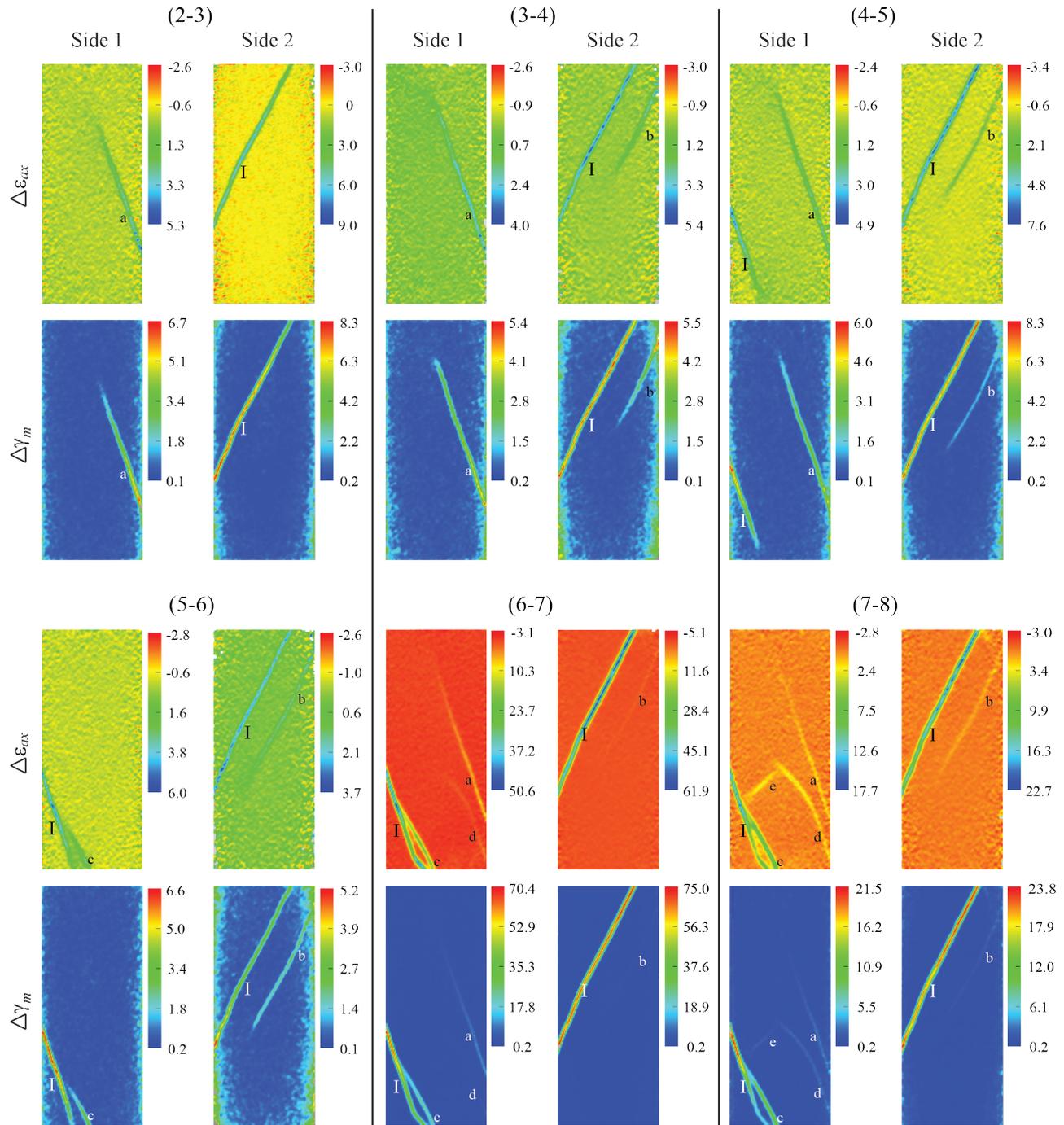


FIGURE 4.11 – Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$) et cisailantes maximales incrémentales ($\Delta\gamma_m$) entre les points successifs (n et $n + 1$), où $n = 1, 2 \dots 8$, indiqués sur la courbe $q(\bar{\varepsilon}_{ax})$ (Fig. 4.8). Les valeurs de déformation affichées à l'échelle de couleur sont multipliées par 10^{-3} .

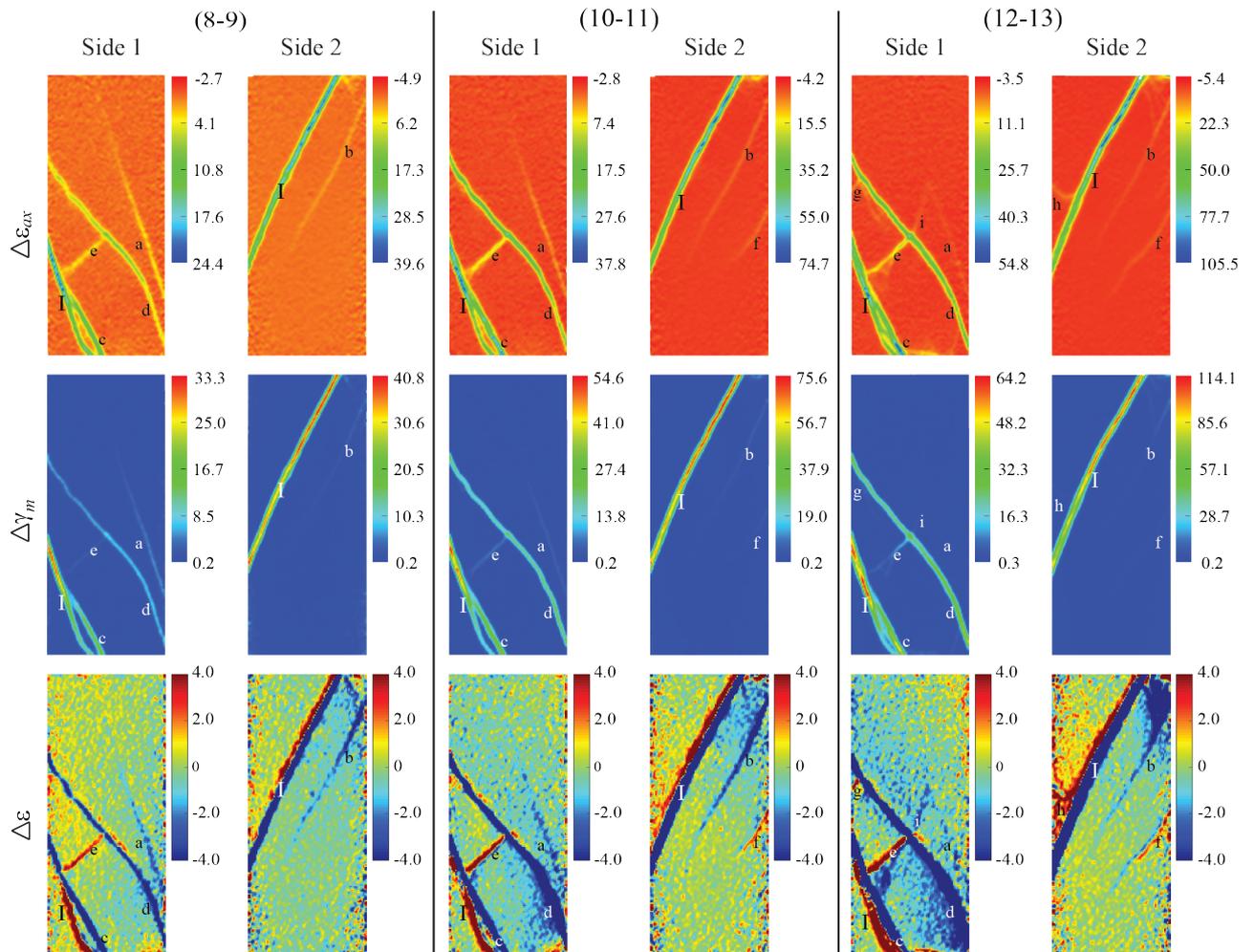


FIGURE 4.12 – Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$), cisailantes maximales ($\Delta\gamma_m$) et volumiques incrémentales ($\Delta\varepsilon$) entre les points successifs (n et $n + 1$), où $n = 8, 9 \dots 13$, indiqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (Fig. 4.8). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

4.2.3.3 Evolution de l'épaississement des bandes de déformation

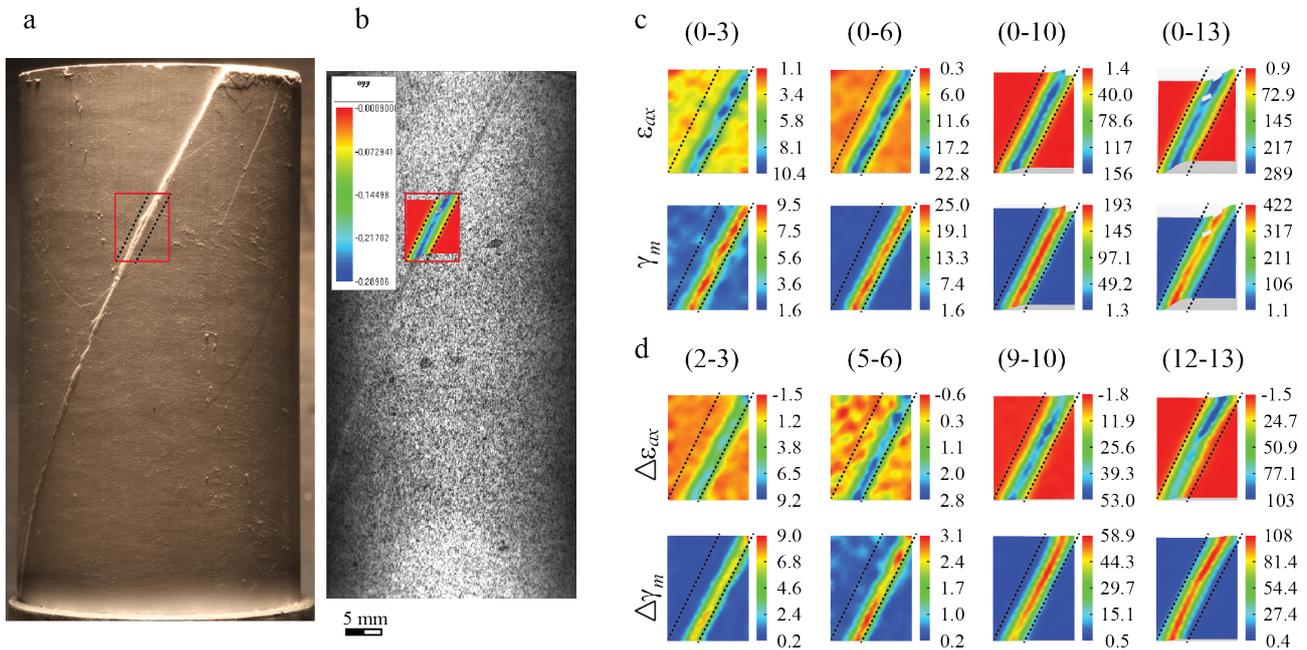


FIGURE 4.13 – Essai C0.2-01T. (a) Photos de l'échantillon post-mortem et (b) de l'échantillon couvert par la membrane au stade final de chargement. Le rectangle rouge indique la zone analysée par DIC. Deux lignes pointillées représentent l'épaisseur finale de la bande de déformation ; (c) Cartes de déformations axiales (ε_{ax}) et cisailantes maximales accumulées (γ_m) entre l'état initial au début de l'essai et différents stades de chargement correspondant aux images (3), (6), (10), (13) observées dans la zone rectangle rouge ; (d) Cartes de déformations axiales ($\Delta\varepsilon_{ax}$) et cisailantes maximales incrémentales ($\Delta\gamma_m$). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

En observant les traces laissées par les bandes sur la membrane, nous pouvons constater que l'épaisseur de bandes n'est pas identique pour chacune d'entre-elles. La bande de déformation majeure I est beaucoup plus épaisse que les autres. Les cartes de déformations sur les figures 4.10, 4.11 et 4.12 montrent l'évolution de l'épaississement des bandes au cours du chargement. Cet épaississement est bien mis en évidence lorsqu'on analyse la déformation par DIC sur une petite zone marquée par un rectangle rouge (Figure 4.13). Cette zone comprend une part de la bande majeure I (Figure 4.13a, b). L'évolution des déformations axiales et cisailantes maximales accumulées (ε_{ax} , γ_m) et incrémentales ($\Delta\varepsilon_{ax}$, $\Delta\gamma_m$) à différents stades dans la zone rectangle est présentée dans la figure 4.13c et d. L'épaisseur de la bande I augmente de manière progressive pendant l'essai. Cette épaisseur finale est représentée par deux lignes pointillées. Par ailleurs, nous pouvons constater que l'épaisseur finale de la bande se contribue par plusieurs petites et courtes bandes, appelées "brins", comme illustré sur la figure 4.14. On observe sur les cartes de déformation incrémentale un déplacement de la bande de la droite vers la gauche (cf. Fig. 4.13d). Cependant, l'épaisseur illustré par DIC est plus important que celle observée à la surface de l'échantillon post-mortem (cf. Fig. 4.13a et b). Un tel écart peut être expliqué par l'influence de la membrane recouvrant l'échantillon.

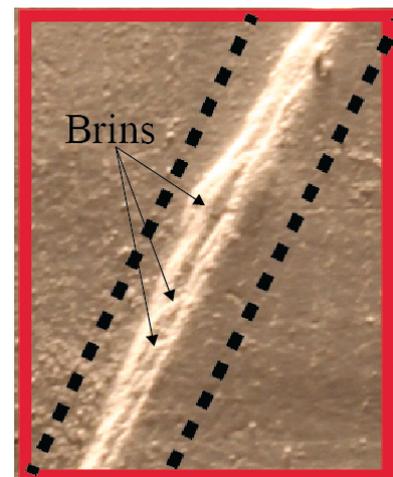


FIGURE 4.14 – Essai C0.2-01T. Zoomant la zone rectangle indiquée dans la figure 4.13a.

Nous choisissons aussi d'analyser la zone où se trouvent l'intersection entre les bandes de déformation I et c (Fig. 4.15). Cette zone est celle limitée par un rectangle rouge dans la figure 4.15a. L'épaisseur des bandes I et c est également constitué par des brins. Les bandes I et b se connectent par des bandes de connexion (cB) (cf. Fig. 4.15b). L'évolution de l'épaississement des bandes I et c au cours du chargement est présentée sur les figures 4.16 et 4.17. Comme précédemment les lignes pointillées représentent l'épaisseurs finales de ces bandes de déformations. (6-7) On observe que la bande c se forme d'abord sur le côté droit près de la ligne pointillée. Cette bande ensuite se déplace vers la limite gauche (cf Figure 4.17). L'épaisseur de la bande I évolue de façon similaire. Les cBs se forment entre la bande I et bande c peuvent être détectées sur les cartes de déformations incrémentales (7-8), (9-10), (11-12), (12-13) sur la figure 4.17.

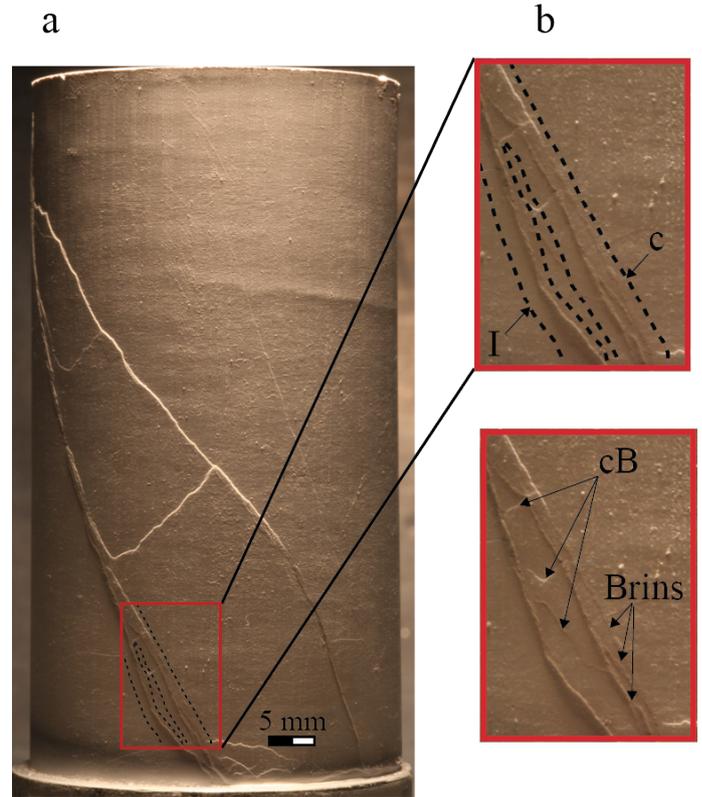


FIGURE 4.15 – Essai C0.2-01T. (a) Photo prise à la surface de l'échantillon au côté 2 (cf. Fig. 4.9a); le rectangle rouge indique la zone analysée par DIC; lignes pointillées représentent l'épaisseur final des bandes de déformation obtenu par DIC. (b) Zoomant la zone rectangle; cB - bande de connexion de deux bandes I et c.

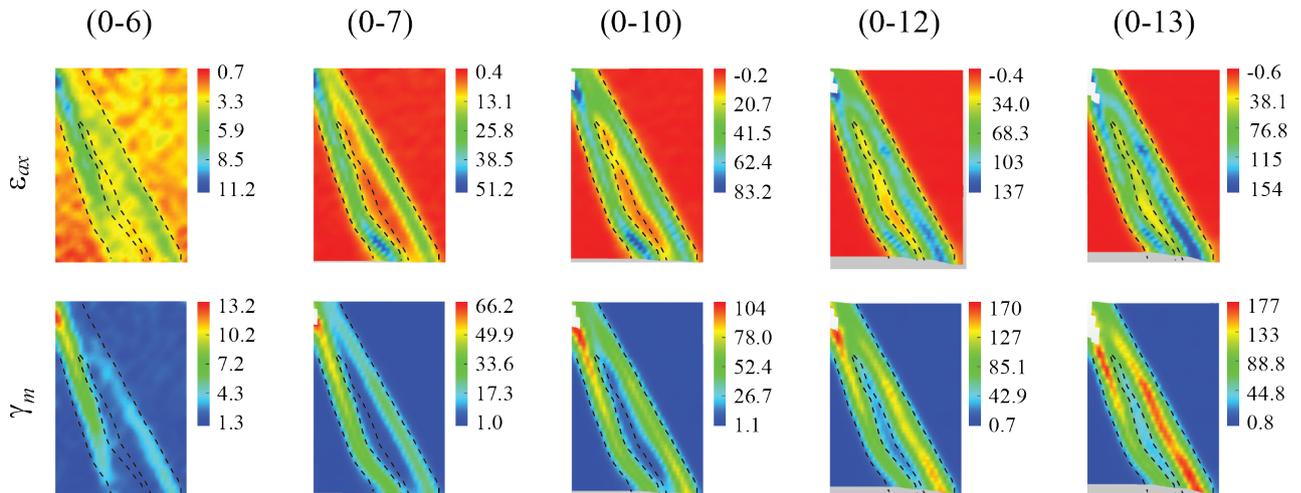


FIGURE 4.16 – Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales et cisailantes maximales accumulées entre l'état initial correspondant au début de l'essai et différents stades de chargement correspondant aux images (4), (5), (8), (12), (13) observées dans la zone en rectangle rouge. Lignes pointillées représentent l'épaisseur final des bandes à la fin d'essai. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

En appliquant la technique de superposition des cartes de déformations analysées par DIC sur la surface de l'échantillon post-mortem, nous pouvons remarquer que la position de la bande c aux différents incréments coïncide avec les brins autour de la bande principale qui contribuent à l'épaisseur finale de cette dernière (cf Figure 4.18).

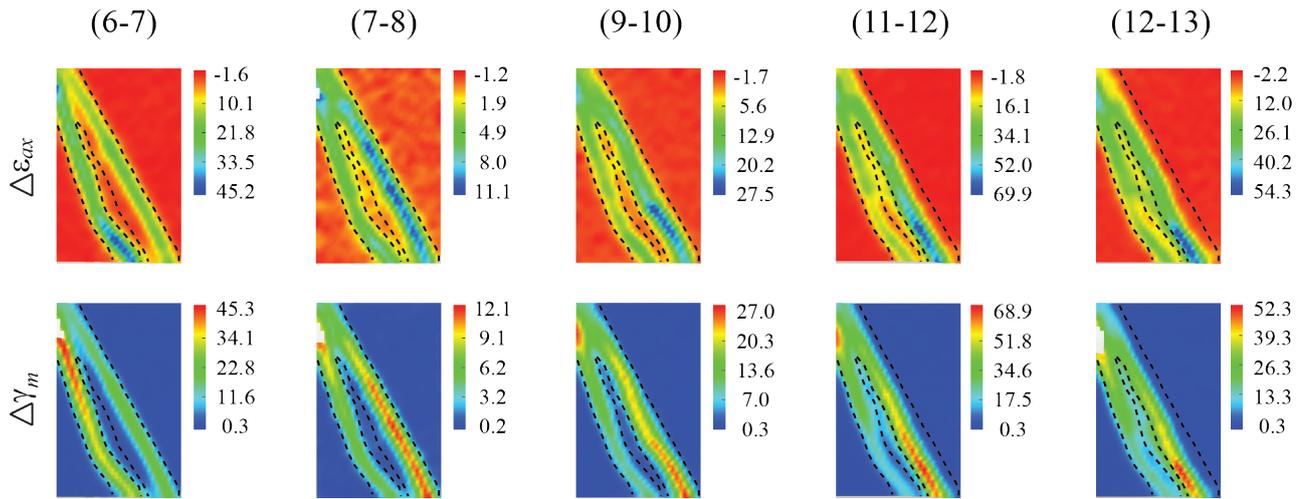


FIGURE 4.17 – Essai C0.2-01T. Cartes de déformations axiales et cisailantes maximales incrémentales à (6-7), (7-8), (9-10), (11-12), (12-13) observées dans la zone en rectangle rouge. Lignes pointillées représentent l'épaisseur final de la bande à la fin d'essai. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

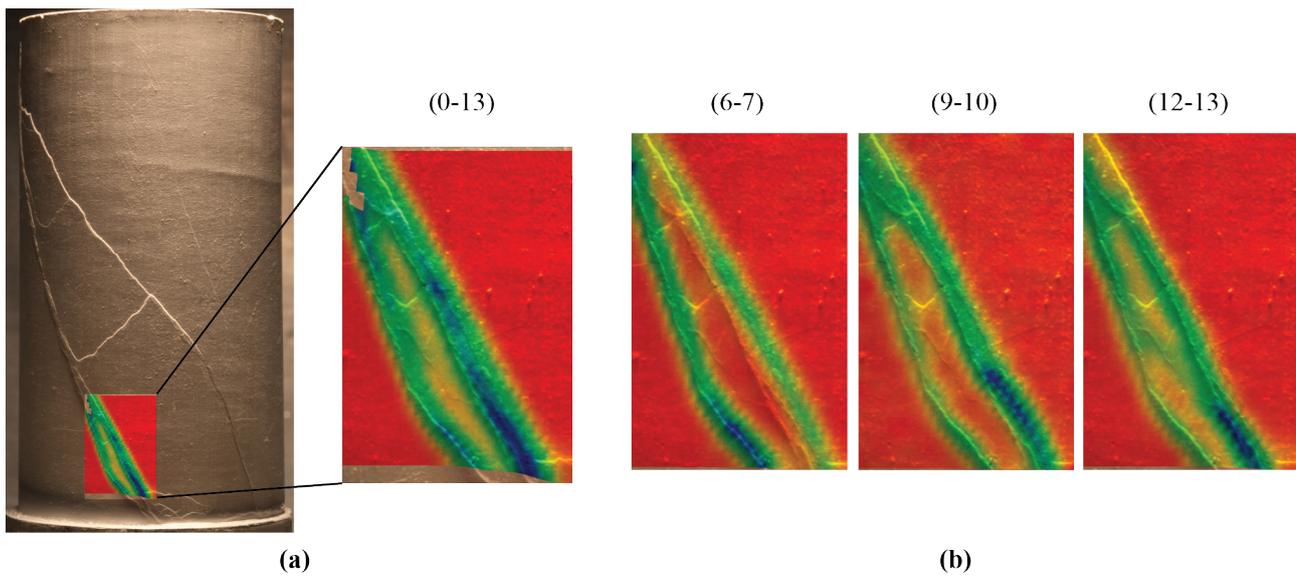


FIGURE 4.18 – Essai C0.2-01T. (a) Superposer la carte de déformations accumulées à la fin d'essai corrélée dans la zone en rectangle rouge ; (b) Superposer les cartes de déformations incrémentales à (6-7), (9-10), (12-13) corrélées dans la zone en rectangle rouge sur l'échantillon post-mortem.

4.2.4 Essai C0.3-12T

L'essai C0.3-12T est l'un des essais de compression axisymétrique réalisé à la pression de confinement de transition fragile-ductile $P_c = 0.3\text{MPa}$. La Figure 4.19 présente la courbe de la contrainte différentielle ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation axiale ($\tilde{\varepsilon}_{ax}$). La courbe est composée d'une partie linéaire, une partie non-linéaire avec adoucissement graduel après le pic de contrainte correspondant à la valeur de déformation axiale de 0.006. Parmi les images utilisées pour l'analyse DIC, nous ne choisissons que 13 images. L'image 0 est enregistrée en début du chargement, l'image 1 est choisie quand la courbe n'est plus linéaire. Les images 3, 4, 5 sont les trois images qui correspondent à l'initiation des bandes de déformation majeures que nous allons voir par la suite. Les images de 6 à 13 permettent de suivre l'évolution de ces bandes de déformation majeures ainsi que l'apparition des nouvelles bandes de déformation.

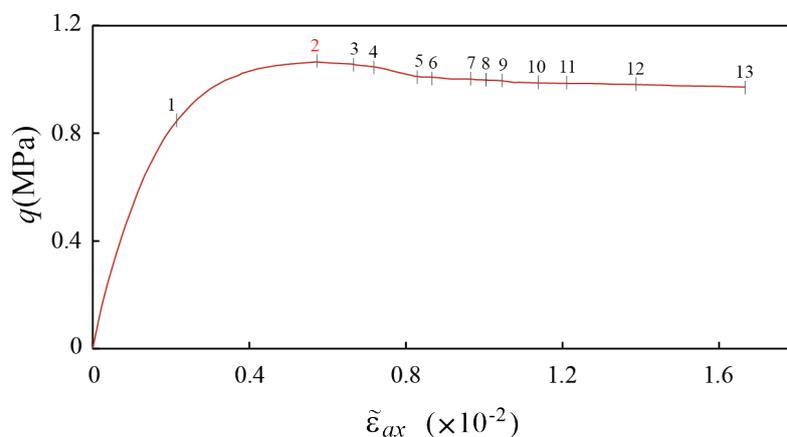


FIGURE 4.19 – Essai C0.3-12T. Courbe contrainte-déformation axiale avec indication des numéros d'images utilisées pour l'analyse DIC.

La figure 4.20 présente les photos prises à la surface de l'échantillon post-mortem suivant les quatre côtés dont les côtés 1 et 2 sont filmés pendant l'essai. Les deux cartes de déformations cisillantes maximales analysées par DIC présentent la structure des bandes de déformations qui coïncident avec celle observées à la surface de l'échantillon post-mortem. Nous constatons la formation d'un réseau de bandes conjuguées après l'essai qui se compose de trois bandes de déformation majeures nommées I, II, III et des bandes de déformation secondaires nommées $a, b, c, d, e, f, g, h, i$. Notons que nous ne référençons que les bandes qui peuvent être observées par les deux caméras. L'orientation des diverses bandes reste constante et est d'environ $34 \pm 1^\circ$ par rapport à la direction de la contrainte principale axiale.

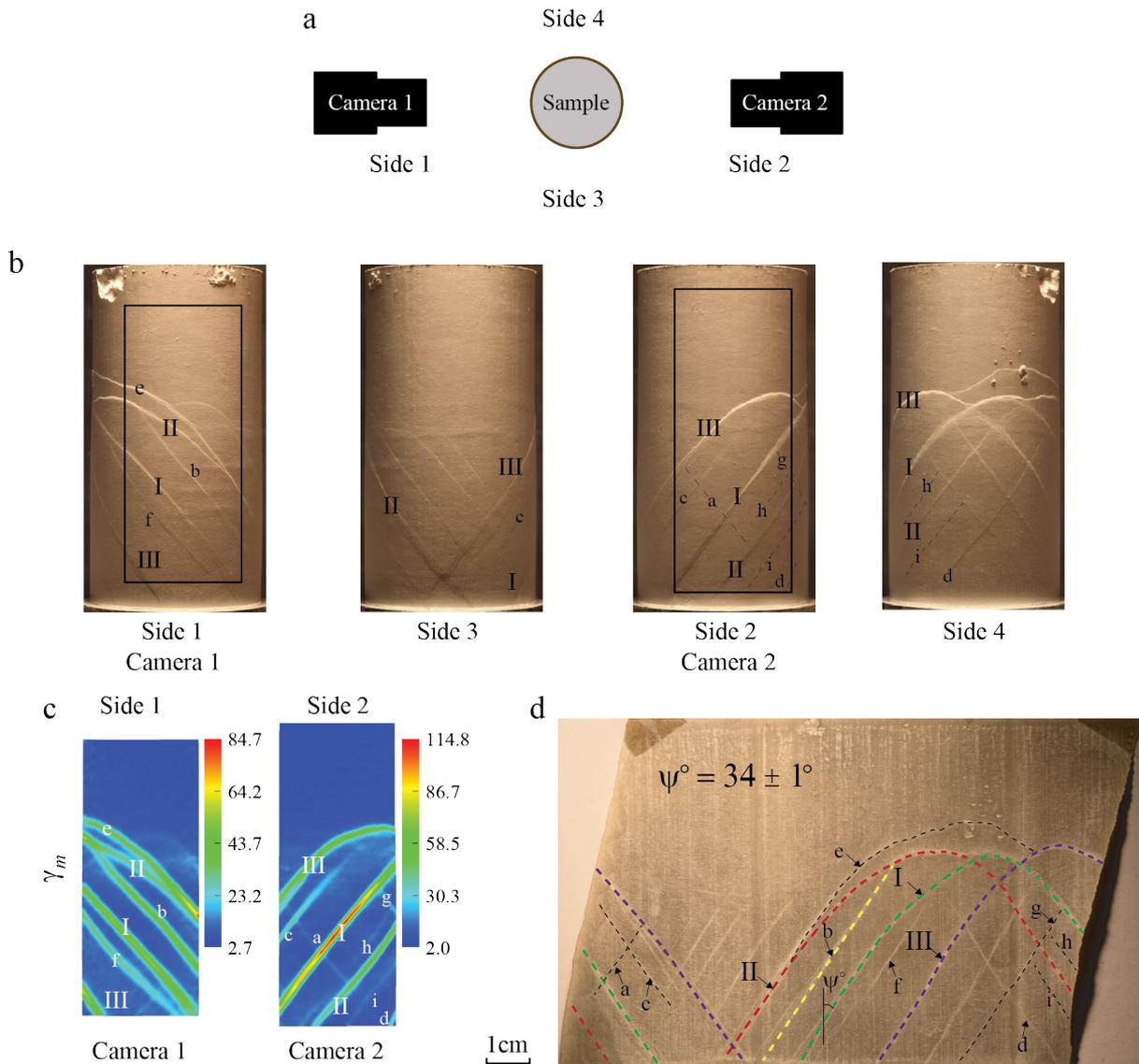


FIGURE 4.20 – Essai C0.3-12T. (b) Photos de l'échantillon post-mortem observées suivant 4 côtés (montrés à a); (c) Cartes de déformations cisillantes maximales (γ_m) accumulées entre les stades correspondant à 0 et 13; (d) La surface interne de la membrane montrant des traces des fractures/bandes de déformation.

4.2.4.1 Initiation de la localisation de bande de déformation et évolution du réseau de bande de déformation

Afin d'étudier l'évolution de la localisation de la déformation, nous choisissons la partie inférieure des photos, où le réseau des bandes se concentre (cf. Figure 4.21). La figure 4.22 montre les cartes de déformations axiales (ε_{ax}) au stade de chargement correspondant à l'image 1 par rapport à l'état initial 0. L'échantillon se déforme de manière homogène à ce stade. Les cartes de déformations axiales et cisailantes maximales accumulées (ε_{ax} et γ_m) et incrémentales ($\Delta\varepsilon_{ax}$ et $\Delta\gamma_m$) sont présentées dans les figures 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 respectivement.

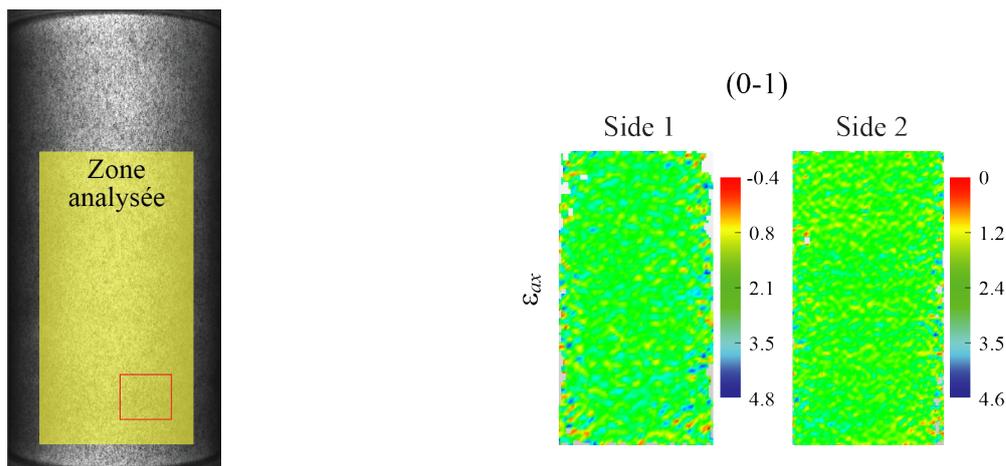


FIGURE 4.21 – Essai C0.3-12T. Zone analysée pour étudier l'évolution de bande de déformation. Zone marquée par rectangle rouge pour suivre l'évolution d'épaississement de bande de déformation majeure I.

FIGURE 4.22 – Essai C0.3-12T. Cartes de déformations axiales au stade de chargement correspondant à l'image (1) par rapport à l'état initial 0.

L'analyse des déformations accumulées est faite avec comme image de référence au stade 1. Nous pouvons voir que l'échantillon devient hétérogène à partir du stade 2. L'incrément (1-2), dans lequel l'image 2 est au pic de contrainte, montre que la déformation hétérogène se concentre au coin droit de la carte de gauche et dans la partie supérieure de la carte de droite. Ensuite, la première bande I apparaît au coin droit de la carte de gauche au stade correspondant à l'image 3. L'incrément suivant (3-4) présente la propagation de cette bande qui traverse de l'autre côté de l'échantillon et ainsi que l'initiation de nouvelle bande de déformation II dans la partie centrale de la carte de déformations de droite. La bande de déformation I est complètement formée au stade 5. À ce stade nous observons l'apparition de la troisième bande de déformation majeure III au coin gauche de la carte de déformations de gauche. Les bandes de déformation II et III terminent leur formation respectivement au stade 8 et 10. Les trois bandes (dites les bandes de déformation majeures) sont le plus développées et restent actives tout au long de l'histoire de la déformation (Figures 4.23, 4.24, 4.25, 4.26). Cependant, le taux de déformation le long de ces bandes n'est pas constant, comme cela peut être vu à partir des cartes de déformations incrémentales (Figs. 4.25, 4.26).

En cours de la formation des trois bandes, nous pouvons constater la formation et le développement des bandes de déformation secondaires, tel que la formation de la bande *a* au stade 4, la bande *b* au stade 7, la bande *c* au stade 8, et les bandes *g*, *e*, *d* au stade 9. En regardant les cartes de déformations incrémentales, nous voyons que la bande secondaire *a* n'apparaît que dans l'incrément 3-4 puis disparaît et reprend dans l'incrément 11-12. En revanche, la bande secondaire *g* est visible dans la carte de déformations accumulées à partir du stade 9 mais

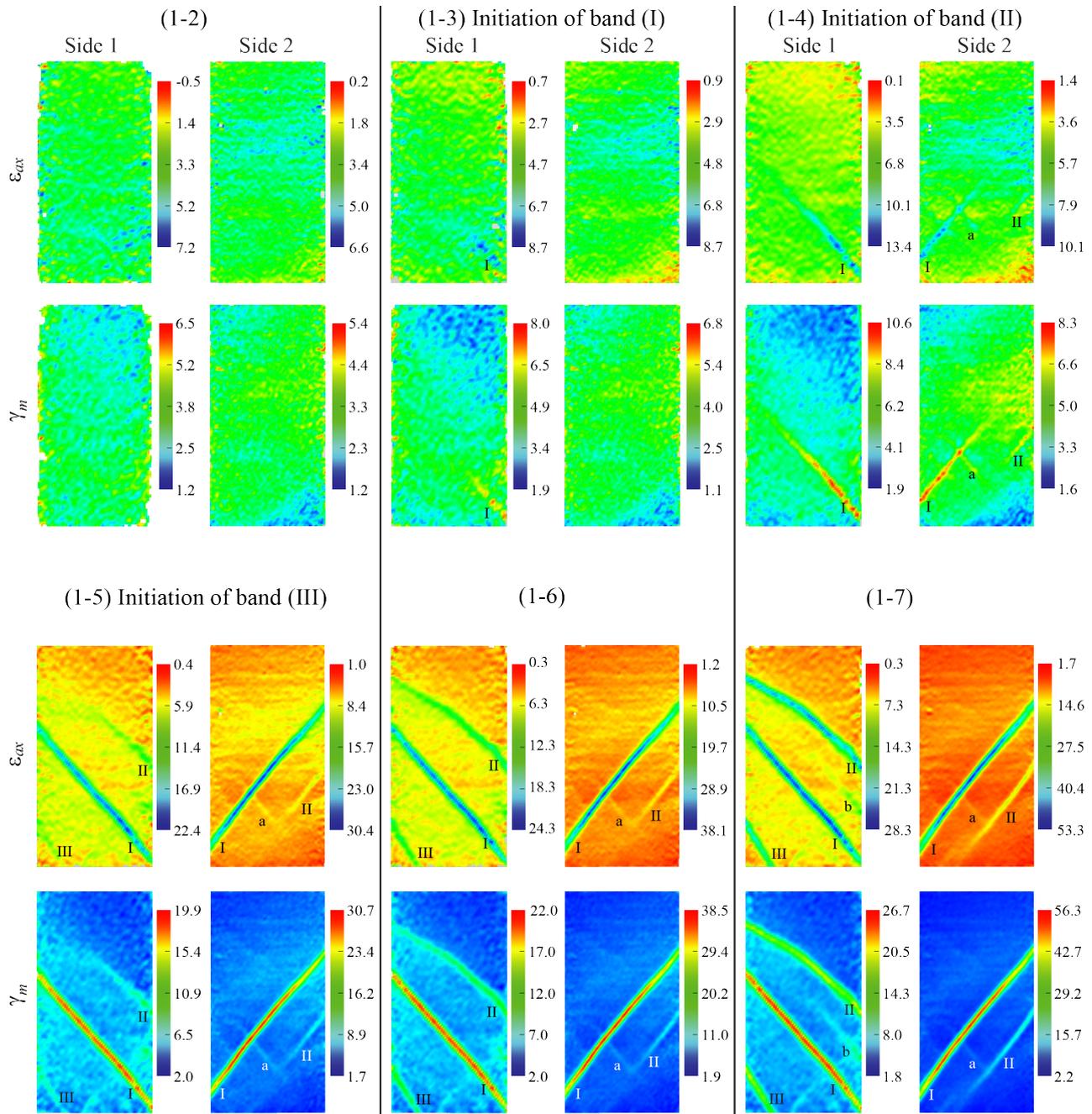


FIGURE 4.23 – Essai C0.3-12T. Cartes de déformations accumulées du composant axial (ε_{ax}) et de déformations de cisaillement maximum (γ_m). Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. L'image de référence est au stade (1). Les numéros au-dessus de chaque paire de cartes de déformations indique le stade pour lequel ε_{ax} est présentée. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

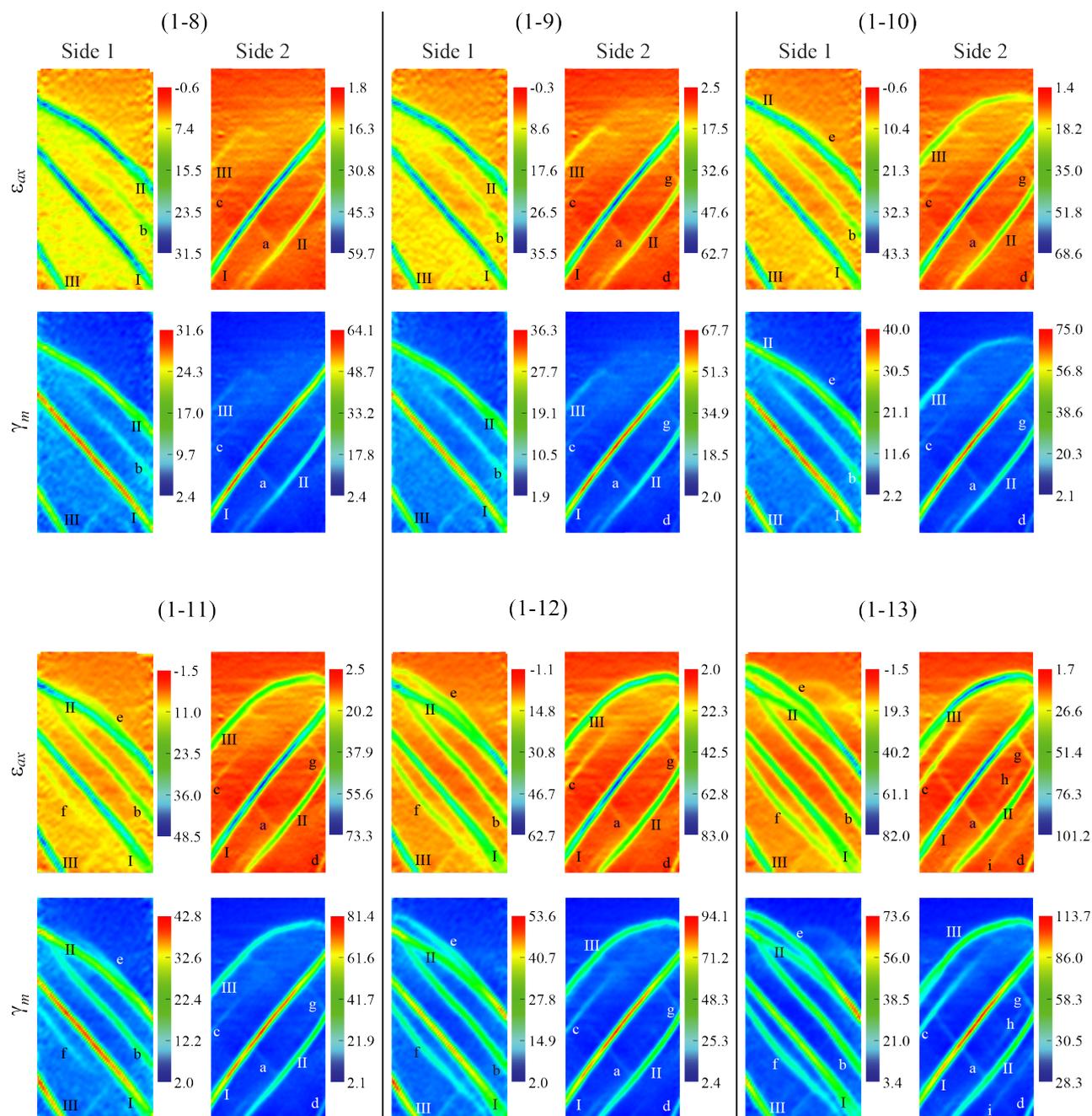


FIGURE 4.24 – Essai C0.3-12T. Cartes de déformations accumulées du composant axial (ε_{ax}) et de déformations de cisaillement maximum (γ_m). Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. L'image de référence est au stade (1). Les numéros au-dessus de chaque paire de cartes de déformations indique le stade pour lequel ε_{ax} est présentée. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (Suite).

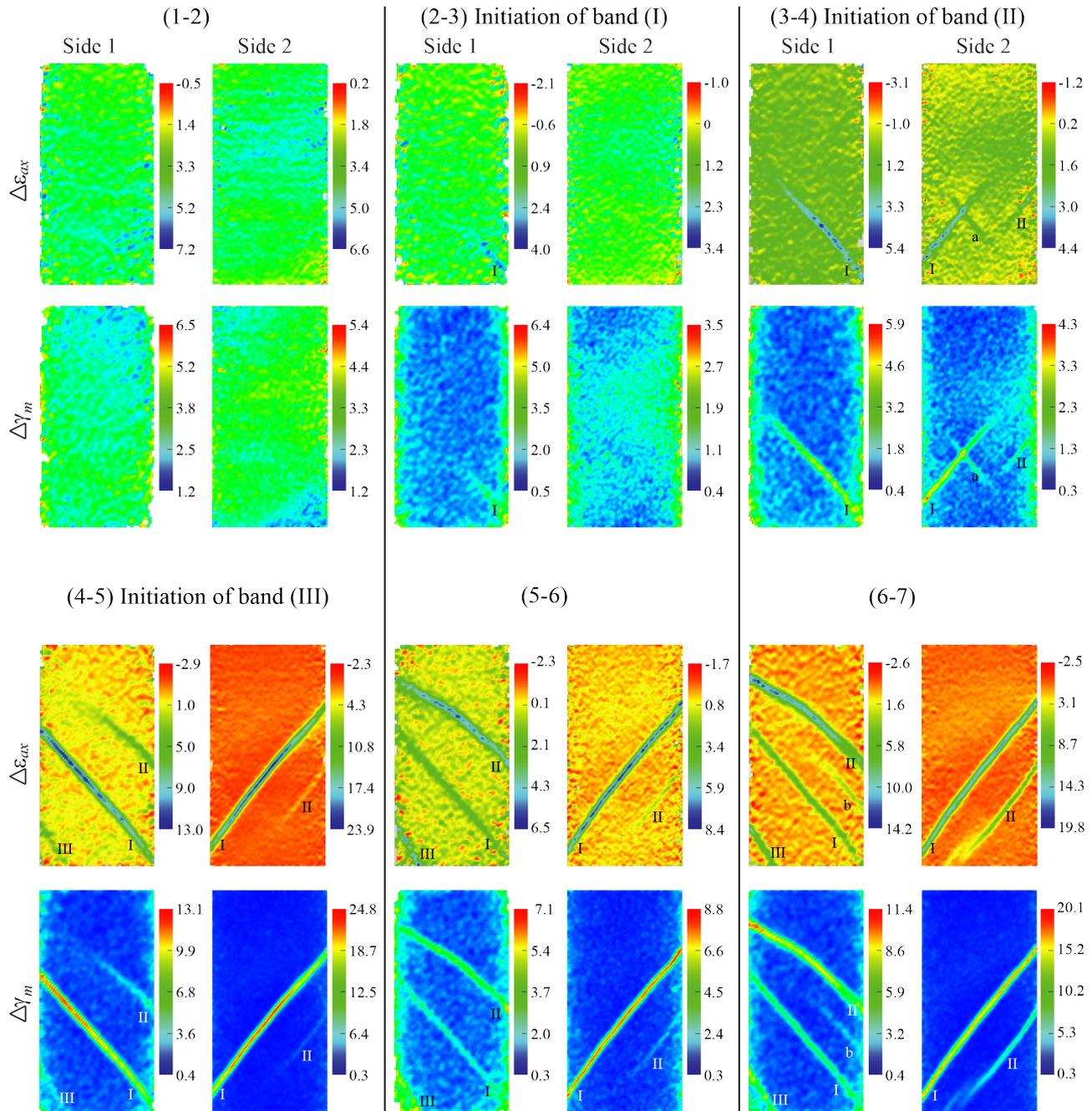


FIGURE 4.25 – Essai C0.3-12T. Cartes de déformations incrémentales du composant axial et de déformations de cisaillement maximum entre les points successifs ($n - 1$ et n) où $n = 1, 2 \dots 13$ présentés sur la courbe contrainte-déformation dans la figure 4.19. Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

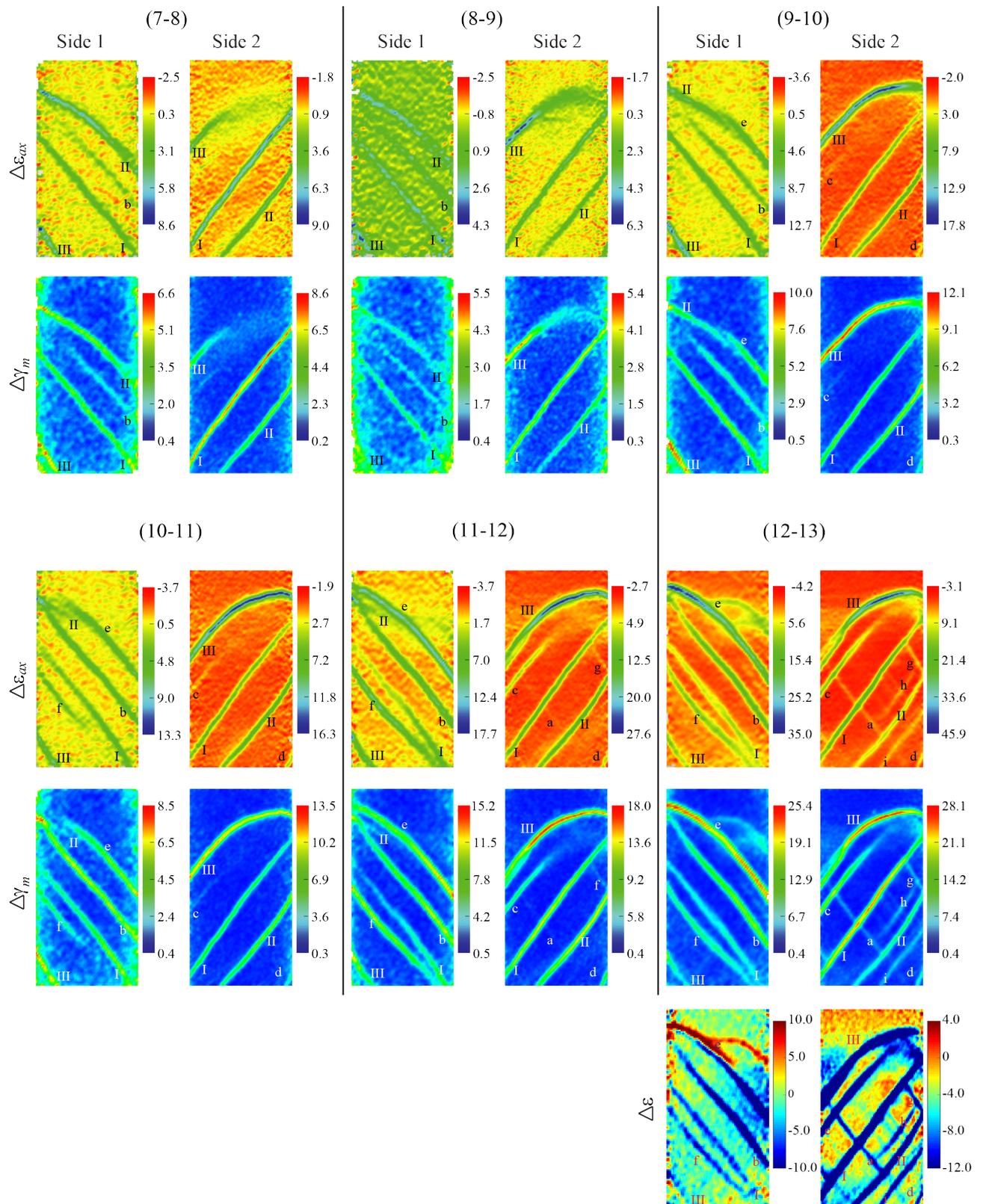


FIGURE 4.26 – Essai C0.3-12T. Cartes de déformations incrémentales du composant axial et de déformations de cisaillement maximum entre les points successifs ($n - 1$ et n) où $n = 1, 2 \dots 13$ présentés sur la courbe contrainte-déformation dans la figure 4.19. Les paires de cartes obtenues par deux caméras à deux côtés opposés. La paire finale de cartes montre les déformations volumiques incrémentales $\Delta\varepsilon$. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (Suite).

n'est pas visible dans les cartes de déformations incrémentales correspondantes. Ceci peut être expliqué par le fait que la quantité de déformation de cette bande est très faible dans chaque incrément, par conséquent elle n'apparaît pas dans la carte de déformations incrémentales.

L'incrément 9-10, qui est situé au début du plateau de la courbe contrainte-déformation $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (cf. Fig. 4.19) où une légère diminution de la contrainte est encore observée, montre une variation du motif de localisation de la bande de déformation majeure II. Une nouvelle partie de la bande apparaît (bande e) : cette partie se connecte avec la partie inférieure et remplace la partie supérieure initiale de la bande II.

Dans les incréments 11-12 et 12-13, qui sont situés sur le plateau, nous observons l'apparition séquentielle de nouvelles bandes de déformation, telles que les bandes f , h , i synchrones du développement des bandes déjà existantes. Le nombre maximum de bandes de déformation peut être observé sur les cartes de déformations volumiques incrémentales $\Delta\varepsilon$ au stade 12-13.

Les bandes majeures et secondaires sont aussi observées sur la surface interne de la membrane (cf. Fig. 4.20d). La figure 4.27 représente les bandes de déformation majeures I, II, III et une bande de déformation secondaire b en 3D. Bien que toutes ces bandes ont une orientation différente, elles font pratiquement le même angle Ψ d'environ 34° par rapport à la direction de compression maximum.

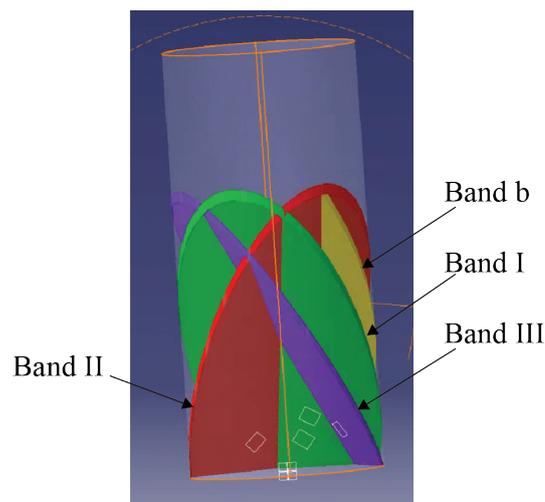


FIGURE 4.27 – Essai C0.3-12T. Présentation 3D des bandes de déformation majeures et une bande secondaire b .

4.2.4.2 Vitesse de propagation des bandes de déformation

En se basant sur la détermination de moment d’initiation et de fin de formation des bandes de déformation, nous pouvons estimer la vitesse de propagation des bandes de déformation majeures (tableau 4.2) :

Bande de déformation	$V_b \times 10^{-1}$ (mm/s)
Bande I	5.5
Bande II	2.9
Bande III	2.6

TABLE 4.2 – Essai C0.3-12T. Vitesse de propagation des bandes de déformation majeures

Ces valeurs sont cent fois plus rapide que la vitesse de chargement (vitesse de chargement V_c dans nos essais est 10^{-3} mm/s, donc le taux V_b/V_c est d’environ 550). Cependant, ce processus est quasi-statique car cette vitesse est très inférieure à la vitesse de propagation des ondes élastiques. Les vitesses de propagation de bande II et III sont beaucoup plus faibles que celle de la première bande.

4.2.4.3 Evolution de l’épaississement de bande de déformation

Les traces laissées par les bandes de déformation sur la surface interne de la membrane montrent que les bandes de déformation majeures sont plus épaisses que les bandes secondaires (cf. Fig. 4.20d). Les bandes majeures sont toujours actives pendant toute la durée de l’essai (cf. Figures 4.25 et 4.26). La figure 4.28 présente la surface de l’échantillon post-mortem à différentes échelles. Nous pouvons constater que non seulement les bandes de déformation majeures (bandes I, II, III) se composent de petites bandes ou “*brins*”, mais aussi que les bandes secondaires (bandes *b*, *d*, etc.) (cf. Fig. 4.28b). Ces brins sont longs et quasi-sub-parallèles. Nous avons choisi la zone marquée par un rectangle rouge (figure 4.28) pour suivre l’évolution de l’épaississement d’une bande majeure représentative, la bande majeure I, au cours du chargement. Les brins constitutifs de la bande majeure I apparaissent séquentiellement et contribuent à l’épaisseur finale de la bande (figure 4.29). Cette épaisseur est indiquée par deux lignes pointillées (cf. Figure 4.29a). Les incréments (2-3), (3-4), (6-7), (9-10) et (12-13) montrent que les brins se forment sur la droite puis se déplacent vers la gauche dans la zone limitée entre les deux lignes pointillées (cf. Figure 4.29b).

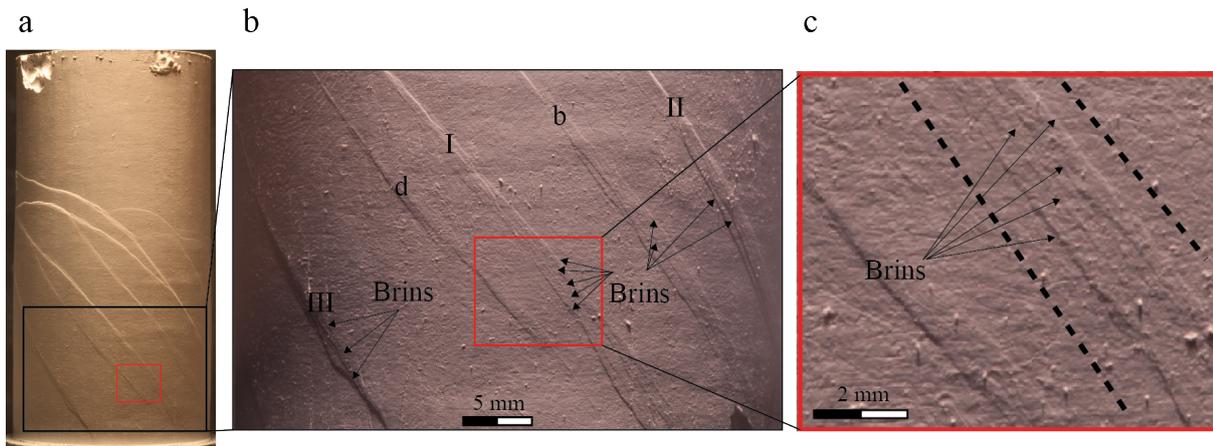


FIGURE 4.28 – Essai C0.3-12T. Surface de l'échantillon post-mortem zoomant à différentes échelles : (a) L'échantillon complète vu au côté 1 (cf. Fig. 4.20a); (b) dans le rectangle noire; (c) dans le rectangle rouge où la technique DIC sera appliquée pour suivre l'évolution d'épaississement de la bande de déformation I.

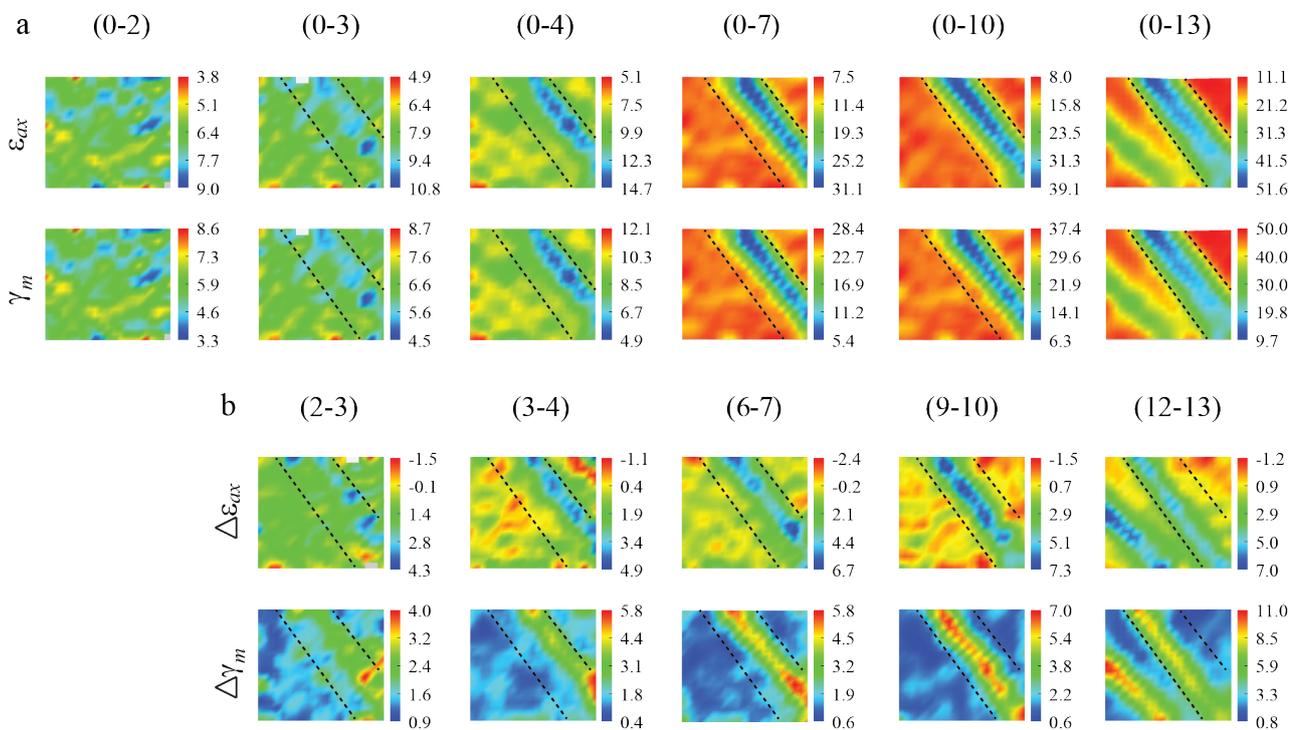


FIGURE 4.29 – Essai C0.3-12T. Comparaison entre les cartes de déformation de la zone en rectangle rouge pour suivre l'évolution de la bande (I) et montre l'augmentation de l'épaississement de la bande. (a) Cartes de déformations accumulées (ε_{ax} et γ_m) aux différents stades de chargement fait référence aux images (2), (3), (4), (7), (10), (13). L'image de référence est à l'état initial 0; (b) Cartes de déformations incrémentales ($\Delta\varepsilon_{ax}$ et $\Delta\gamma_m$) à (2-3), (3-4), (6-7), (9-10), (12-13). Deux lignes pointillées représentent l'épaisseur finale à la fin d'essai.

4.2.5 Essai C0.3-08T

L'essai C0.3-08T est chargé jusqu'à grande déformation axiale de 9% à la pression de confinement $P_c = 0.3$ MPa. La figure 4.30 présente la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ de cet essai sur laquelle nous marquons 10 points (de l'image 1 à 10) correspondant aux stades pour lesquels nous présenterons les résultats obtenus à partir de DIC. L'image 0 est à l'état initial. L'image 1 correspond au stade où la courbe n'est plus linéaire. L'image 2 est au pic de contrainte correspondant à la déformation axiale de 0.0065. L'image 3 montre l'apparition d'une bande de déformation se propageant de l'autre côté. Les images de 4 à 10 présentent l'évolution de la formation de réseau de bandes de déformation. Nous pouvons constater que la forme de la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ de cet essai est similaire à celle de l'essai C0.3-12T. La courbe adoucit graduellement après le pic de contrainte puis devient un plateau à grande déformation. Il y a de très faibles chutes de contrainte sur la courbe.

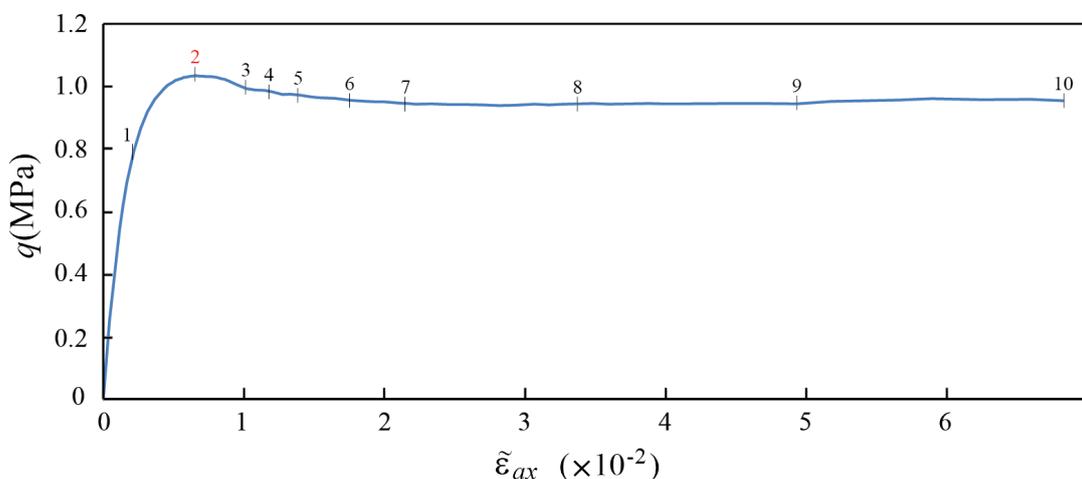


FIGURE 4.30 – Essai C0.3-08T. Courbe contrainte-déformation axiale $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ avec indication des numéros d'images utilisées pour l'analyse DIC.

Les photos de la surface de l'échantillon post-mortem observées suivant différentes directions (illustrées dans la figure 4.31a) sont montrée sur la figure 4.31b. La bordure noire limite la zone sur laquelle est appliquée la technique DIC. Les cartes de déformations axiales (ε_{ax}) et cisailantes maximales (γ_m) cumulées entre le point 0 et 10, marqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (cf. Fig. 4.30), sont présentées sur la figure 4.31b. Le réseau de bandes de déformation apparaît clairement dans les deux types de carte de déformations et coïncide bien avec le réseau de bandes observé sur la surface de l'échantillon post-mortem. On peut remarquer que l'échantillon est très déformé avec un réseau dense de bandes. Ce réseau de bandes de déformation se compose de deux familles, nommées respectivement *famille I* et *famille II*. Les deux familles sont conjuguées. Les traces sur la membrane (cf. Figure 4.31d) montre qu'une famille de bande se forme le long d'une segment qui est ensuite suivi par la deuxième famille de bande. Il y a donc une sorte de groupement quasi-périodique des bandes de différentes familles d'orientation produisant des réseaux de bandes asymétriques. La longueur des segments de groupe des bandes est presque égale. Les bandes se forment de manière très dense. L'espacement entre les bandes λ est petit et les bandes sont épaisses. L'épaississement des bandes est dû à l'incorporation des brins sur les flancs de bande au cours de la déformation. L'orientation des bandes est d'environ $32 \pm 2^\circ$ par rapport à la direction de la contrainte principale axiale. Notons que l'orientation de bandes montrée sur la photo de la membrane inversée par rapport à laquelle identifiée sur la photo prise à la surface de l'échantillon post-mortem (side 1 - cf. Figure 4.31b).

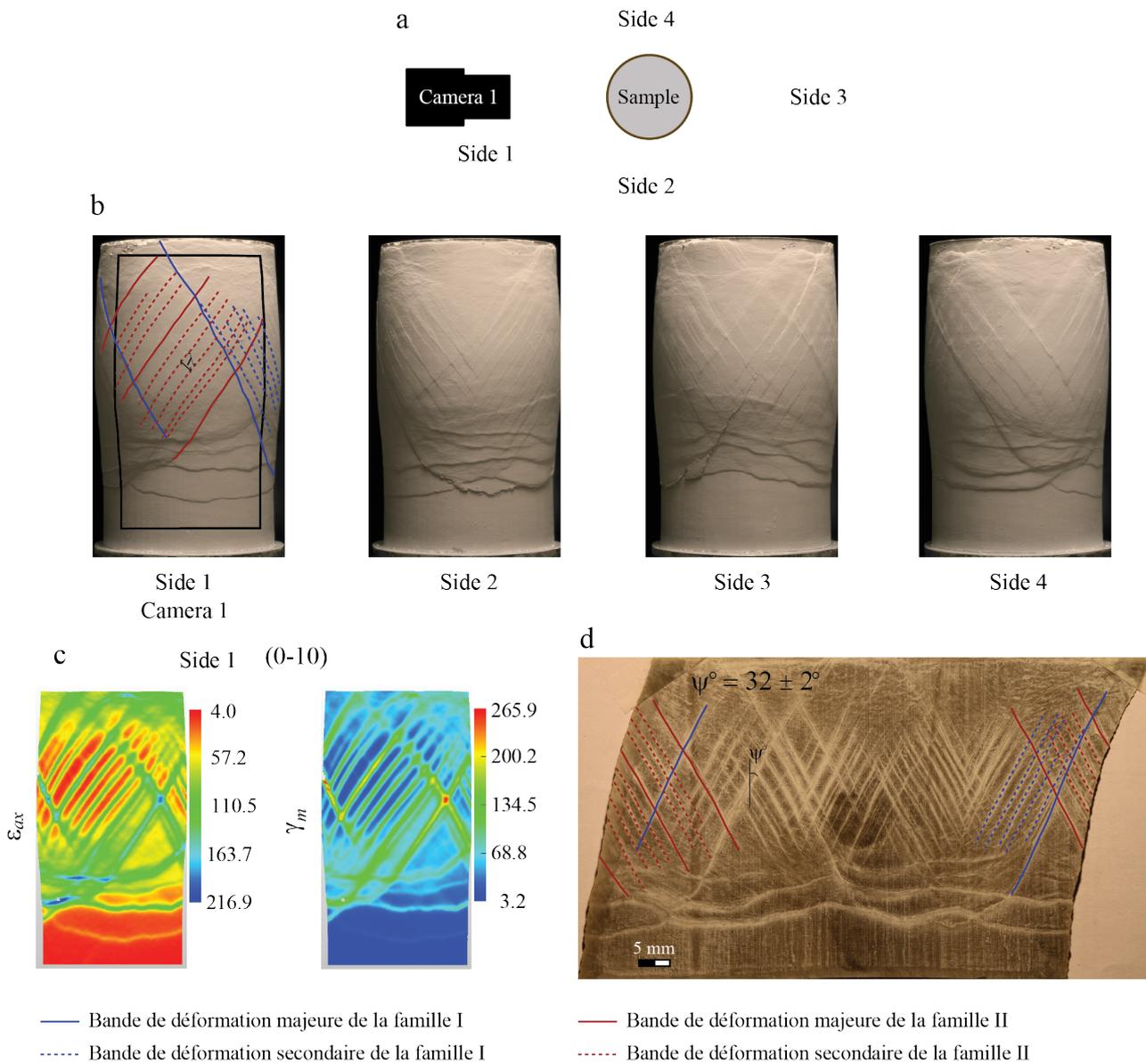


FIGURE 4.31 – Essai C0.3-08T. (b) Photos de l'échantillon post-mortem observées suivant 4 côtés (montrés à (a)); (c) Carte de déformations axiales (ϵ_{ax}) et cisailantes maximales (γ_m) cumulées entre le stade 0 et stade 10. Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} ; (d) Surface interne de la membrane montre le réseau de bandes de déformation. λ est l'espacement de bande.

4.2.5.1 Évolution de bande de déformation

L'évolution de bandes de déformation est montrée à travers l'analyse des résultats de DIC à dix stades différents comme indiqués sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (cf. Figure 4.30) pour lesquels les cartes de déformations axiales et de cisaillement maximum cumulées et incrémentales sont présentées dans les figures 4.33 et 4.34. L'analyse de déformation accumulé se fait avec l'image de référence à l'état initial. La déformation de l'échantillon est homogène dans le premier stade à l'image 1 ou la courbe est linéaire (Figure 4.32). Elle devient hétérogène lorsque la courbe s'écarte de la partie linéaire (cf. carte de déformations cumulées (0-2) ou l'incrément (1-2) dans la figure 4.32). La carte de déformations cumulées au stade 3 (0-3) montre l'apparition d'une bande de localisation de déformation dans la partie centrale à gauche. Cet apparition peut être considérée comme la propagation d'une bande initiée de l'autre côté entre les stades 2 et 3. Des bandes de déformation fines commencent également à apparaître mais ne sont pas vraiment nettement (cf. l'incrément (2-3) Figure 4.32).

D'après les cartes de déformations cumulées et incrémentales présentées dans les figures 4.33 et 4.34, nous pouvons constater que l'évolution du réseau de bandes de déformation passe par plusieurs étapes. Dans un premier temps, les bandes des deux familles se forment (dans l'incrément (3-4)), mais ensuite les bandes majeures de la famille I se développent plus davantage que la famille II (l'incrément (4-5)).

Dans l'incrément (5-6), les bandes majeures de la famille II se développent simultanément avec les bandes majeures de la famille I. Un réseau de bandes conjuguées quasi-symétriques est alors formé. Dans la zone en losange délimitée par les bandes majeures, nous voyons la formation des bandes secondaires de la famille II. À partir du stade 6, ce type de bandes prospère et empêche le développement des bandes de déformation de la famille I. Cependant, les bandes majeures de la famille I sont toujours actives (cf. les incréments (6-7)-(9-10) sur les figures 4.33 et 4.34). Le motif de réseau de bandes au stade 10 est complètement asymétrique.

L'espacement des bande λ évolue avec la déformation. À l'incrément (5-6), λ est petit. Puis certaines bandes meurent et par conséquent, λ augmente (cf. l'incrément (6-7)). À grande déformation, λ se réduit de nouveau jusqu'à sa valeur ultime due à la réactivation de certains bandes.

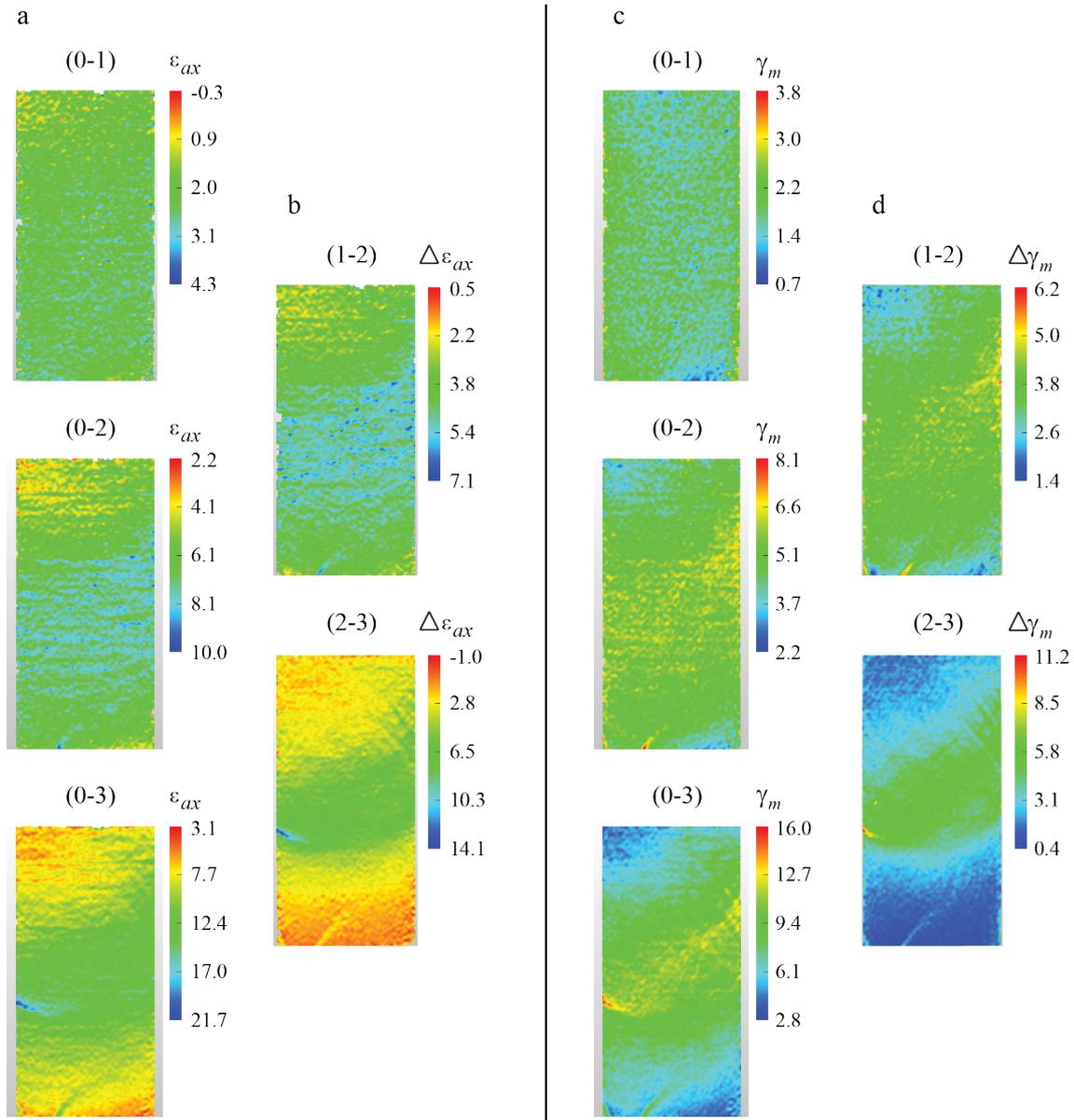


FIGURE 4.32 – Essai C0.3-08T. (a) et (c) Cartes de déformations axiales (ε_{ax}) et cisailantes maximales (γ_m) cumulées entre le stade au début de chargement et les stades (1)-(3); (b) et (d) Cartes de déformations axiales et de cisaillement maximum incrémentales entre les stades (1-2) et (2-3). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} .

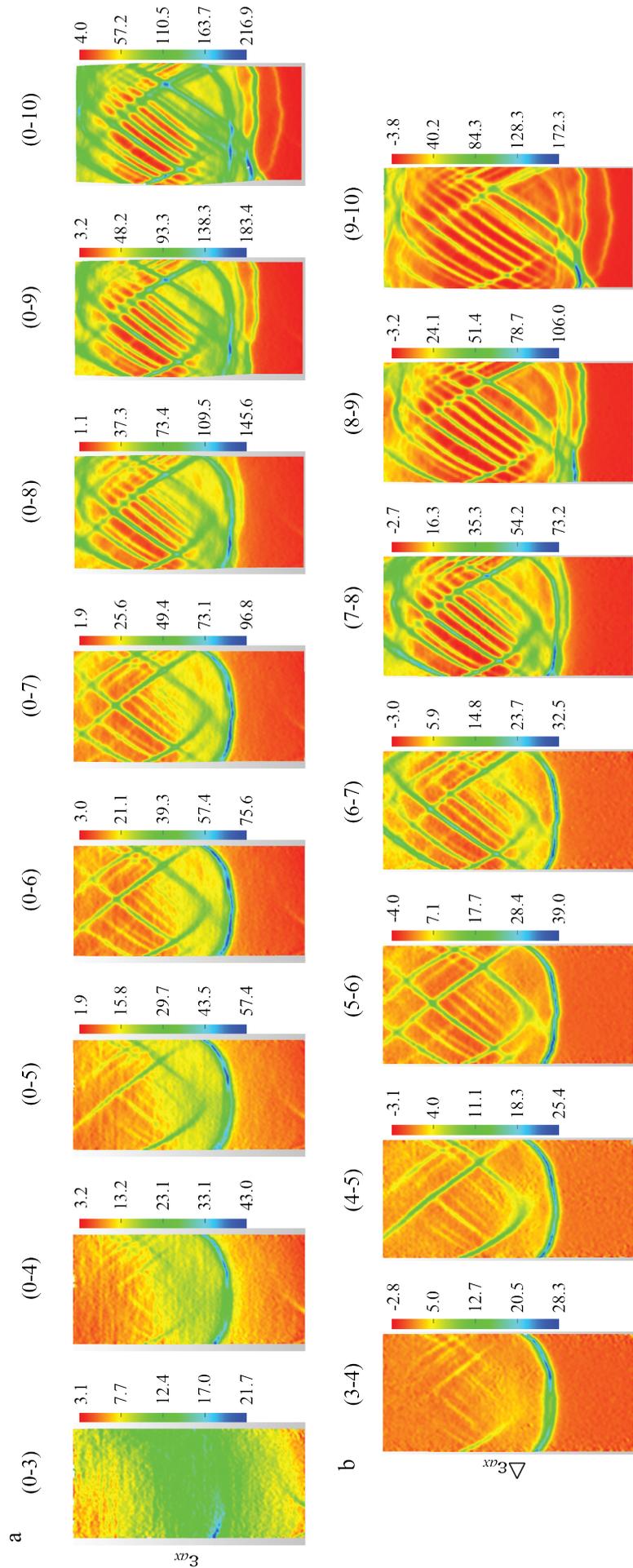


FIGURE 4.33 – Essai C0.3-08T. (a) Cartes de déformations axiales cumulées (ε_{ax}) et (b) incrémentales ($\Delta\varepsilon_{ax}$). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (*La suite*)

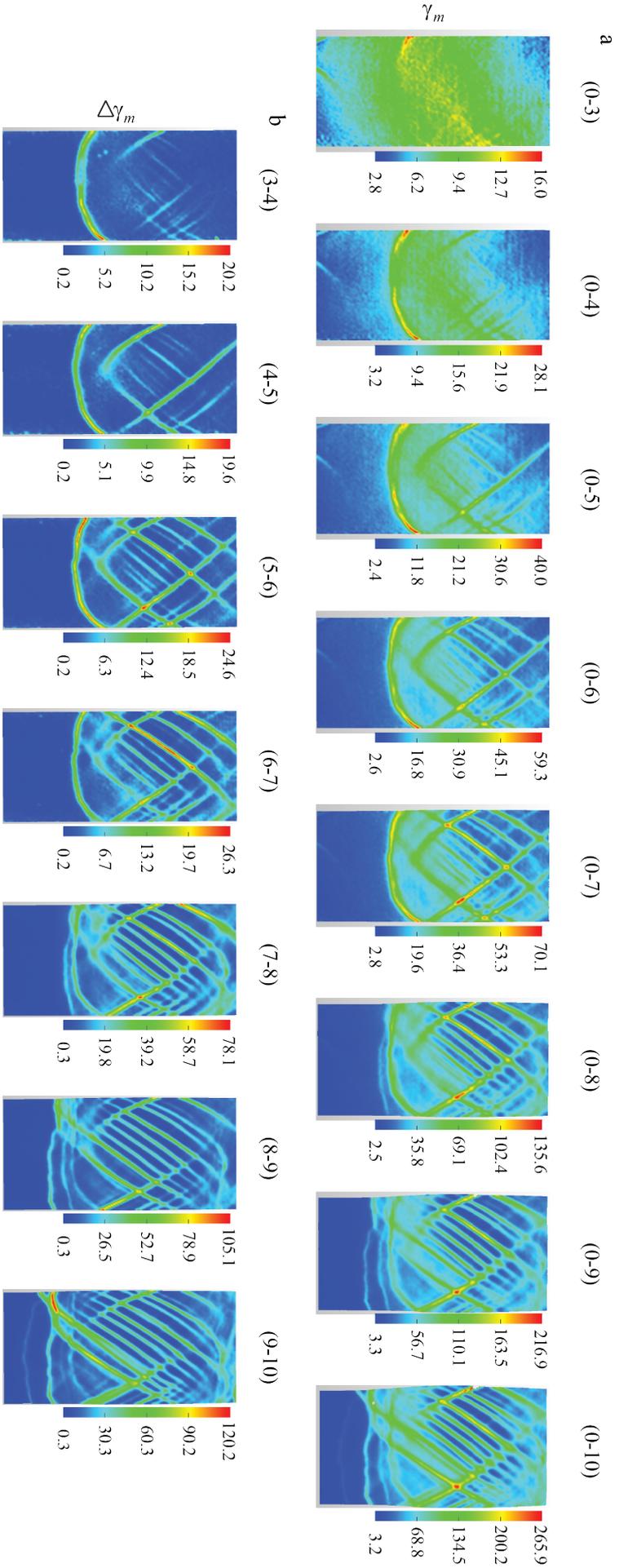


FIGURE 4.34 – Essai C0.3-08T. (a) Cartes de déformations cisailantes maximales cumulées ($\Delta\varepsilon_{ax}$) et (b) incrémentales ($\Delta\gamma_m$). Les valeurs de déformation sont multipliées par 10^{-3} (*La suite*).

4.2.5.2 Épaississement des bandes de déformation et fracturation de l'échantillon

Les cartes de déformations cumulées indiquent l'épaississement des bandes de déformation pendant le chargement. Les traces laissées par des bandes sur la membrane montrent que les deux types de bandes (majeures et secondaires) sont très épais (cf. Figure 4.31c). En agrandissant la photo de la surface de l'échantillon post-mortem, nous pouvons constater des séries de brins sub-parallèles très denses qui contribuent à l'épaisseur final des bandes. L'épaississement de bandes conduit à la réduction de l'espacement entre les bandes. La figure 4.35, montre aussi l'apparition de fissures ouvertes (FO) et le décalage (D) sur la bande de déformation majeure (BM). Ceux-ci sont des marqueurs du grande déplacement sur cette bande de cisaillement qui conduit le glissement relatif des deux compartiments A et B (cf. Figure 4.36a). Par ailleurs, on observe l'existence des bandes de déformation ondulées (ou en forme de chevron) perpendiculaire par rapport à la direction de contrainte compressive σ_1 sur la surface de l'échantillon à l'extrémité supérieure. Les bandes cisailantes deviennent saturées et semblent disparaître (S). Les cartes de déformations incrémentales (cf. Figures 4.33 et 4.34) ne permettent de mettre en évidence que des bandes cisailantes qui propagent jusqu'à l'extrémité supérieure et se connectent pour créer des bandes ondulées susmentionnées. La dernière se produit lorsque la courbe de contrainte-déformation $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ atteint le plateau (à partir le stade 7) (cf. Figure 4.30).

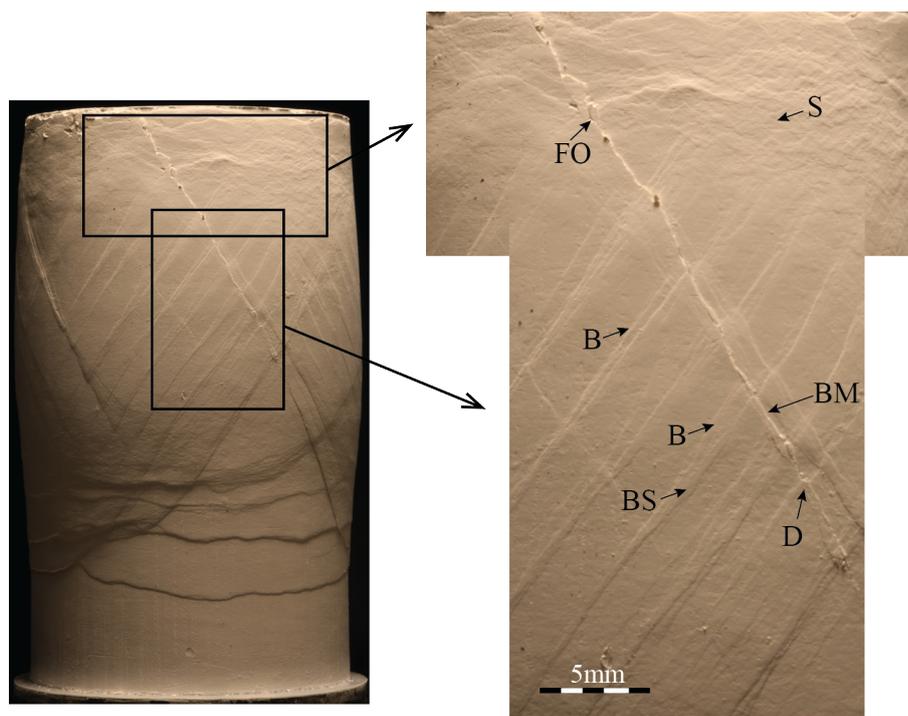


FIGURE 4.35 – Essai C0.3-08T. Le zoom sur le réseau de bandes de déformation. La photo zoomée montre différents types de bandes : bande de déformation majeure (BM), bande de déformation secondaire (BS), brins contribuent à la bande principale (B), zone de saturation de bandes (S), fissure ouverte (FO), décalage de bande (D).

La figure 4.36b montre que la surface de rupture n'est pas plane mais est créée par l'interaction des intenses plans de cisaillement élémentaires des bandes conjuguées. Le matériau est désagrégé facilement selon ces plans élémentaires. Cependant, il semble plus dur au contact avec l'embase supérieure et forme un cône. L'angle moyen de ce cône par rapport à la direction de la contrainte principale axiale σ_1 est d'environ 30.6° ce qui est presque égal à l'angle de frottement interne du matériau GRAM1.

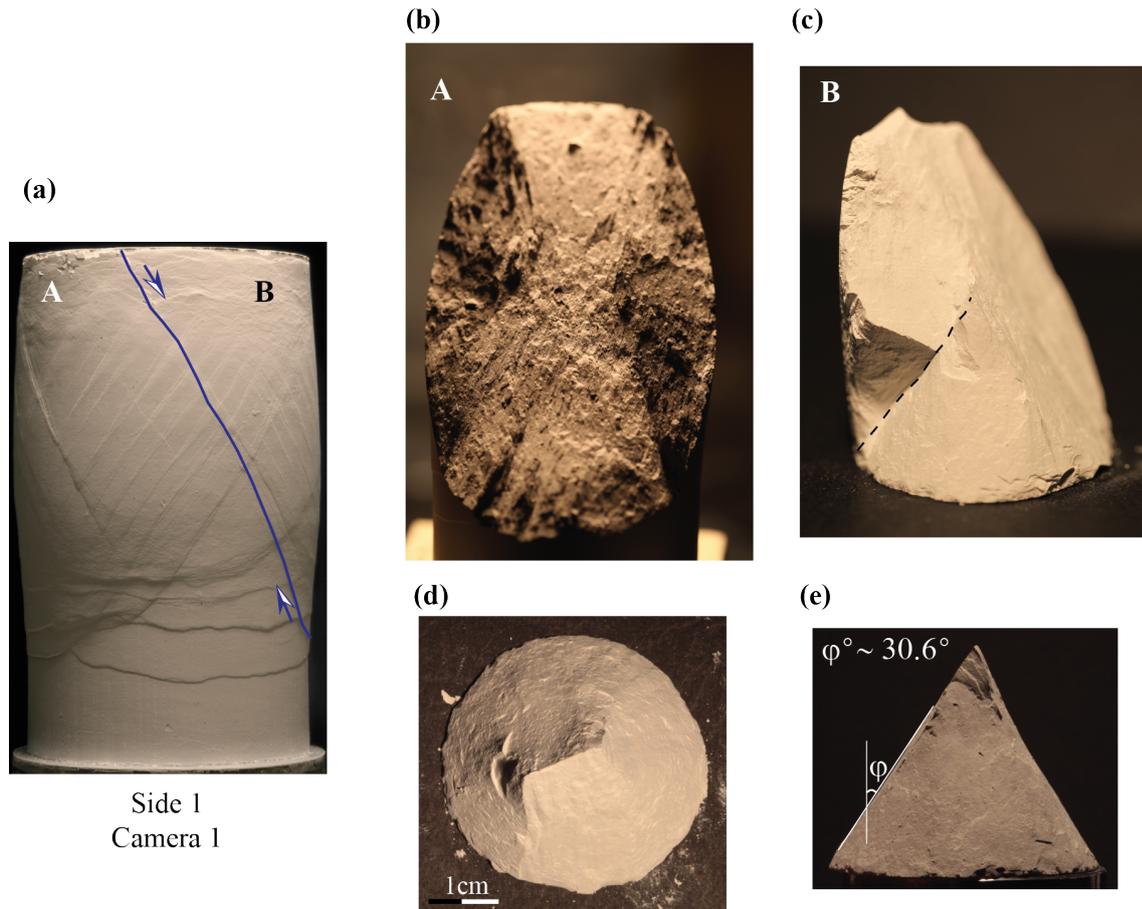


FIGURE 4.36 – Essai C0.3-08T. (a) Photo de l'échantillon post-mortem, la ligne solide bleu représente une faille/fracture séparant deux compartiments A et B; (b) La surface de rupture de la partie A; (c) La partie B où se trouve le cône; (d) Le matériau en forme de cône vu de haut et (e) horizontalement.

4.2.6 Calcul de la déformation volumique inélastique ε^p et de la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$

Les analyses théoriques (Rudnicki et Rice (1975) [127], Chemenda (2007) [32]) et les modèles numériques (Chemenda (2009) [33], (2011) [35]) montrent que la dilatance (β) affecte fortement sur la formation de différents types de bandes de la localisation de déformation qui sont les précurseurs de la défaillance du matériau. Le facteur de dilatance β est défini par le rapport entre la déformation volumique inélastique ε^p et la déformation inélastique cisailante équivalente cumulée $\bar{\gamma}^p$ le long d'un trajet de chargement correspondant à une contrainte moyenne σ_m (Mas et Chemenda (2015) [92]) :

$$\beta = \left(\frac{\partial \varepsilon^p}{\partial \bar{\gamma}^p} \right)_{\sigma_m} \quad (4.1)$$

β est dépendant de $\bar{\gamma}^p$ et de σ_m , ce qui résulte du fait que ε^p dépend de ces paramètres. L'évolution de β avec $\bar{\gamma}^p$ peut être donc défini par l'évolution de ε^p avec $\bar{\gamma}^p$.

Afin de déterminer l'évolution de la déformation volumique inélastique ε^p en fonction de la déformation inélastique cisailante équivalente cumulée $\bar{\gamma}^p$, on choisit une zone de 3×3 points/nœud (Figure 4.37, ex.) (nœuds de la grille définie dans la zone d'analyse de l'image de référence pour le processus de corrélation d'images DIC) au sens d'une bande de déformation majeure. Puis, les déformations moyennes totales dans cette zone ε_{ax} et ε_t sont calculées à partir de DIC à différents stades de déformation. Les déformations ε^p et $\bar{\gamma}^p$ sont ensuite calculées

selon les équations suivantes (e.g., Nguyen et al. (2011) [99]) :

$$\varepsilon^p = \varepsilon - q(1 - 2\nu)/E \quad (4.2)$$

$$\bar{\gamma}^p = \frac{2}{\sqrt{3}} |(\varepsilon_{ax} - \varepsilon_r) + \frac{q}{E}(1 + \nu)| \quad (4.3)$$

où $\varepsilon = \varepsilon_{ax} + \varepsilon_t + \varepsilon_r$ est la déformation volumique totale ; ε_r est la déformation radiale. On ne peut pas mesurer ε_r , on suppose donc que $\varepsilon_r = \varepsilon_t$ et $\varepsilon = \varepsilon_{ax} + 2\varepsilon_t$. Cette hypothèse est fréquente en mécanique des roches.

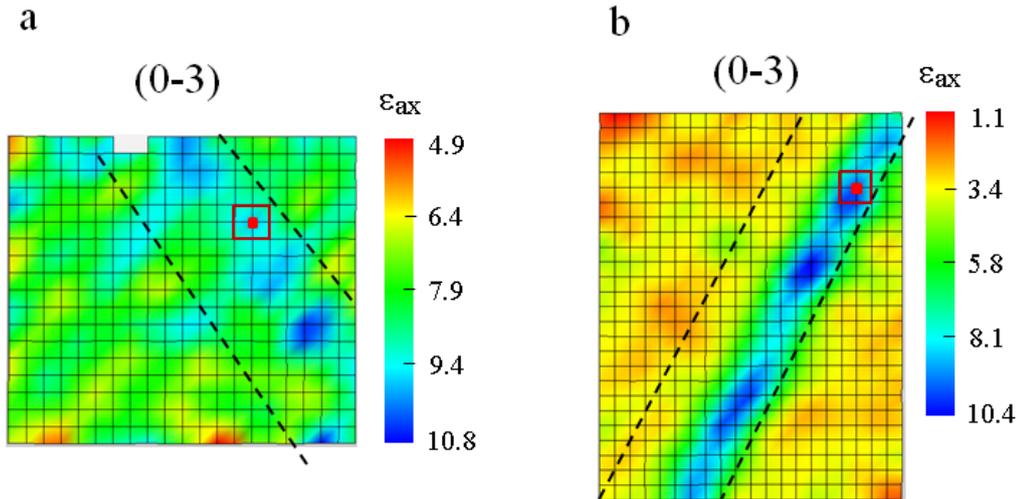


FIGURE 4.37 – Cartes de déformations axiales accumulées entre les stades correspondant aux points 0 et 3 (a) de l'essai C0.3-12T (comme montrée dans la figure 4.29) et (b) de l'essai C0.2-01T (Fig. 4.13). Le carré bleu (de 3×3 nœuds) présente la zone utilisée pour calculer l'évolution de ε^p et $\bar{\gamma}^p$ à l'intérieur de la bande de déformation I au cours du chargement. Le point rouge est le point central de cette zone.

Les déformations ε^p et $\bar{\gamma}^p$ sont calculées pour un point représentatif à l'intérieur de la première bande de déformation majeure (nommée bande I pour tous les essais). La figure 4.37 présente la position dans la bande I que l'on choisit pour ces calculs des essais C0.3-12T et C0.2-01T. Les résultats seront montrés dans la discussion ci-dessous.

4.3 Discussion

4.3.1 Réseau de bandes de déformation à la transition fragile-ductile

Lors d'un essai de compression triaxial, l'évolution du comportement de GRAM1 est généralement fortement influencé par la pression de confinement P_c ou la contrainte moyenne σ_m . Dans tous les essais, les échantillons sont déformés avec l'apparition de motifs typiques de bandes cisailantes. À la transition fragile-ductile ($P_c = P_{bdt}$) ou ($\sigma_m = \sigma_{bdt}$), la localisation s'organise en bandes obliques conjuguées qui se composent de bandes majeures et bandes de déformation secondaires. À faible pression de confinement ($P_c < P_{bdt}$ ou $\sigma_m < \sigma_{bdt}$), le comportement du matériau se caractérise par un régime plutôt fragile, une seule ou quelques bandes de déformation sont typiquement formés qui deviennent rapidement des fractures/failles. Les courbes contrainte-déformation au régime de déformation fragile se caractérisent par une chute soudaine de contrainte dès le pic de contrainte (e.g. Fig. 4.8), alors qu'à la transition fragile-ductile, elles s'adoucissent graduellement après le pic de contrainte jusqu'à atteindre un plateau à une déformation assez grande (e.g. Figs. 4.19 et 4.30).

Les motifs typiques des réseaux de bandes conjuguées obtenus peuvent se localiser dans les parts inférieure (Fig. 4.38a), supérieure (Fig. 4.38b) ou dans les deux (Fig. 4.38c). Le dernier cas, plutôt symétrique, affectant le motif entier de bandes, est très rare. Le cas asymétrique (Figs. 4.38a, b et d) est beaucoup plus typique. La densité des bandes augmente nettement avec le raccourcissement de l'échantillon, mais l'orientation de bandes reste stable : l'angle Ψ entre les bandes et la direction de contrainte principale majeure σ_1 est de $\pm(34 \pm 1^\circ)$.

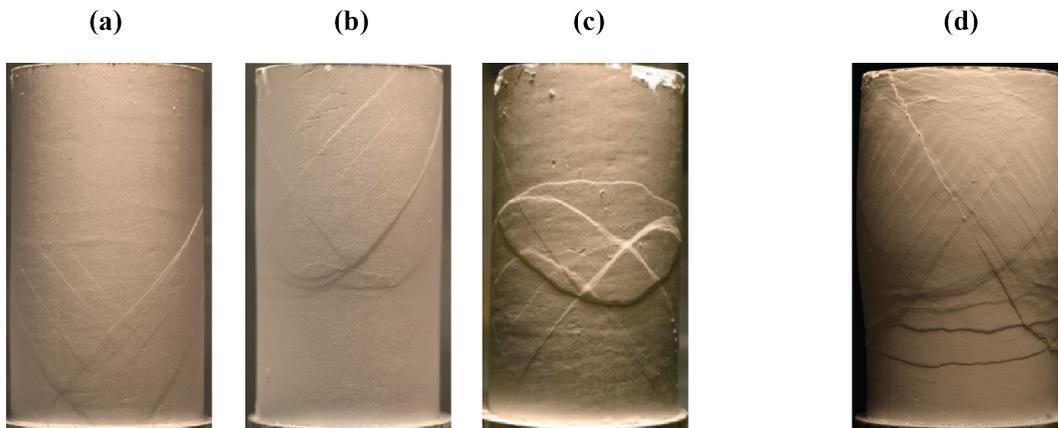


FIGURE 4.38 – Échantillons post-mortem déformés à la pression de confinement de transition fragile-ductile $P_c = 0.3$ MPa sous les mêmes conditions, mais avec différents accourcissements totaux (a) C0.3-12T, 2%; (b) C0.3-10T, 2%; (c) C0.3-04G, 2.2% (l'essai de Mugny); (d) C0.3-08T, 9%.

4.3.2 Initiation et évolution de localisation de déformation à la transition fragile-ductile

Les résultats présentés par la technique DIC montrent clairement que les bandes observées sur la surface de l'échantillon post-mortem ne sont pas formées simultanément mais séquentiellement. Cependant, la résolution de déformation de la méthode DIC utilisée n'approche que 10^{-4} (Vacher et al., (1999) [152]), les bandes de déformations initiées à plus faible déformation ne peuvent donc pas être révélées par cette méthode. Les modèles numériques (Chemenda et al., (2012) [38]), cependant, suggèrent l'initiation précoce du réseau de bandes de déformation

dès que la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$ est très faible (Figure 4.39). Initialement, c’est un réseau dense de bandes “embryonnaire” (Fig. 4.39a). Ensuite, la plupart d’entre eux deviennent inactifs, et seules quelques bandes de déformation majeures continuent à se développer et de s’épaissir (Figs. 4.39b à e). Aux stades ultérieurs, les autres bandes peuvent être réactivées (Fig. 4.39f). Dans la figure 4.39f, on peut voir que le motif des bandes se compose de bandes majeures conjuguées. Elles sont limitées par des bandes de déformation secondaires (généralement d’une famille de direction). Ce motif de bande est très similaire au motif expérimental de l’essai C0.3-08T (cf. Fig 4.31d). Il y a, cependant, une grande différence entre les expériences réelle et numérique. Dans le dernier cas, le modèle est parfaitement homogène et le chargement est uniforme. Ceci n’est pas possible dans le cas des expériences réelles. Le frottement et l’adaptation élastique entre l’échantillon et les embases rigides conduisent la localisation de déformation à s’initier près des extrémités de l’échantillon.

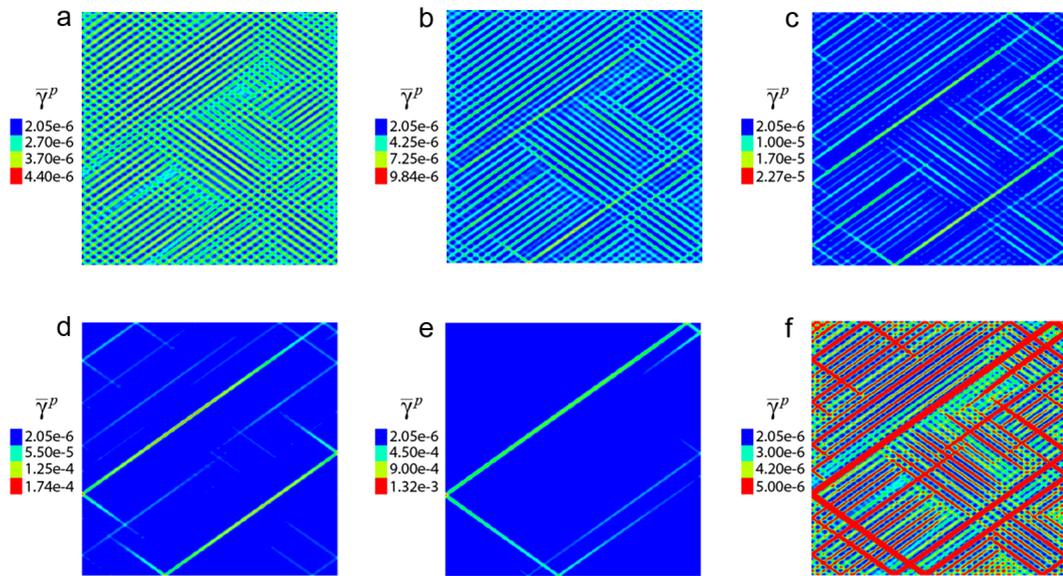


FIGURE 4.39 – Évolution du réseau de bande de déformation dans le modèle numérique de Chemenda et al. (2012) [38] montre les stades de déformation précoce (la résolution de modèle est 500×500) : (a à e) évolution du motif de $\bar{\gamma}^p$; (f) la même que dans (e), mais à différente échelle de $\bar{\gamma}^p$ (la limite supérieure de $\bar{\gamma}^p$ est réduite de 1.32×10^{-3} à 5×10^{-6}).

Les cartes de déformations obtenues par la technique DIC (cf. Figs. 4.23, 4.24, 4.33) montrent que l’évolution d’une bande individuelle comprend la propagation et l’épaississement de cette dernière et ce processus est accompagné par la formation (ou réactivation) de nouvelles bandes. *Pourquoi la déformation de l’échantillon ne peut pas être réalisées par la formation d’une ou quelques bandes qui tient compte du raccourcissement axial de l’échantillon entier comme dans le régime fragile ?* Afin de répondre cette à question, nous considérons l’évolution du module d’écrouissage h et du coefficient de dilatance β en fonction de la contrainte moyenne σ_m et de la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$. Nous profitons également de l’information détaillée disponible sur les propriétés constitutives de GRAM1 (Mas et Chemenda, (2014) [91], (2015) [92]).

La figure 4.40 présente les surfaces $h(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)$ et $\beta(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)$ obtenues à partir d’un grand nombre de tests expérimentaux réalisés avec GRAM1 (Mas et Chemenda, 2015 [92]). On peut constater qu’à contrainte moyenne (σ_m) élevée, h est toujours très positif à faible $\bar{\gamma}^p$ et diminue aux valeurs faibles positives quand $\bar{\gamma}^p$ augmente. Alors qu’il est négatif à faible σ_m (Fig. 4.40a). Cela signifie qu’à σ_m important, le matériau est durcissant (h est toujours positif), tandis qu’il

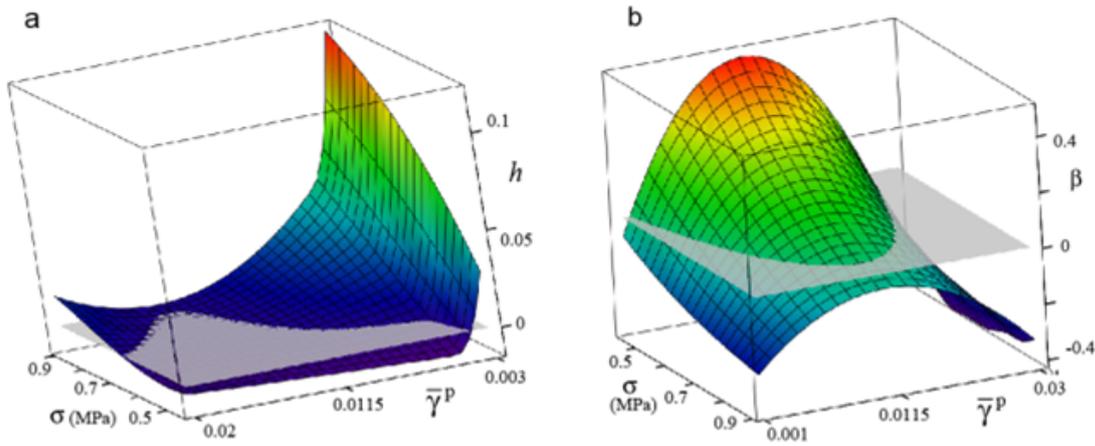


FIGURE 4.40 – Fragments des surfaces (a) $h(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)$ et (b) $\beta(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)$, dérivées d'un grand nombre de tests expérimentaux à différentes P_c par Mas et Chemenda, (2015) [92]. Les plans semi-transparents gris montrent un niveau zéro de h et β . Le couleur rouge des palettes de couleur correspond aux valeurs hautes positives de h et β , et le bleu correspond aux h et β petites/négatives.

est adoucissant à σ_m faible (h est toujours négatif).

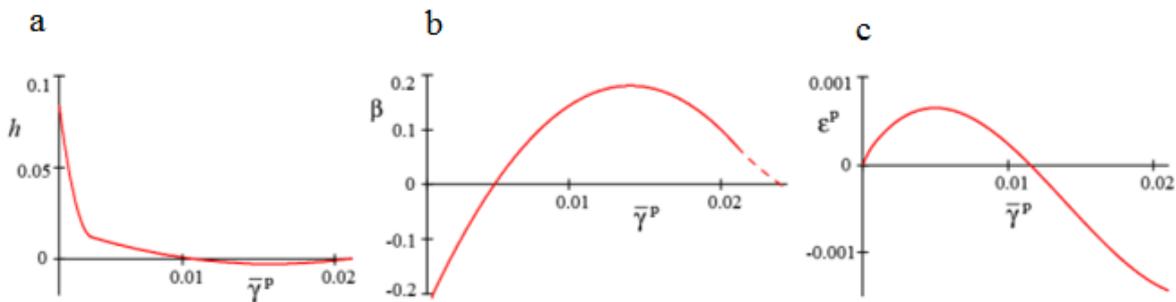


FIGURE 4.41 – Graphiques $h(\bar{\gamma}^p)$, $\beta(\bar{\gamma}^p)$, et $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$, respectivement pour $\sigma_m = \sigma_{bdt} = 0.65$ MPa. $h = [\partial\bar{\tau}(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)/\partial\bar{\gamma}^p]G^{-1}$ est le module d'écrouissage normalisé par le module de cisaillement G ; $\beta = \partial\varepsilon^p(\sigma_m, \bar{\gamma}^p)/\partial\bar{\gamma}^p$ est le facteur de dilatance; $\bar{\tau}$ est la contrainte von Mises (Mas et Chemenda, (2015) [92]).

La contrainte moyenne σ_m correspondant au pic de contrainte dans les essais réalisés à $P_c = 0.3$ MPa est d'environ 0.65 MPa¹. Elle se situe entre les régimes de déformation en durcissement et d'adoucissement (cf. Fig. 4.40a). À cette contrainte moyenne, h change de positif à négatif puis à nouveau positif avec l'augmentation de $\bar{\gamma}^p$ (Figure 4.41a). Par conséquent, on peut supposer que la localisation de la déformation dans ces tests a été initiée à $h < 0$ et évolué le long de la même bande jusqu'à ce que h devienne positif. *Comment ceci est lié au facteur de dilatance β et à son évolution en fonction de σ_m et $\bar{\gamma}^p$?* On peut voir sur la figure 4.40b, β est positif (dilatance) à σ_m faible et négatif (compactance) à σ_m élevée. La transition fragile-ductile se produit à la valeur intermédiaire de σ_m de 0.65 MPa, où β augmente d'abord pour passer de négatif à positif, puis réduit pour repasser négatif (Figure 4.41b). On peut remarquer une forte corrélation entre l'évolution de h et β avec σ_m et $\bar{\gamma}^p$. L'augmentation de β est associée à la réduction de h . De plus, la compaction est associée au durcissement, alors que la dilatance, à l'adoucissement. La transition fragile-ductile et la formation du réseau de bande associée se produisent ainsi à la transition β de positif à négatif avec la croissance de $\bar{\gamma}^p$. Ceci provoque

1. $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (\sigma_1 + 2P_c)/3 = 0.65$ MPa pour C0.3-12T; 0.647 MPa pour C0.3-08T; 0.653 MPa pour C0.3-10T.

aussi une transition du durcissement à l'adoucissement. L'évolution de β avec $\bar{\gamma}^p$ est définie par l'évolution de la déformation volumique inélastique ε^p avec $\bar{\gamma}^p$ qui est présentée sur la figure 4.41c. Nous allons relier ces résultats aux nos résultats obtenus par DIC en contraignant à $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ pour l'essai de référence C0.3-12T.

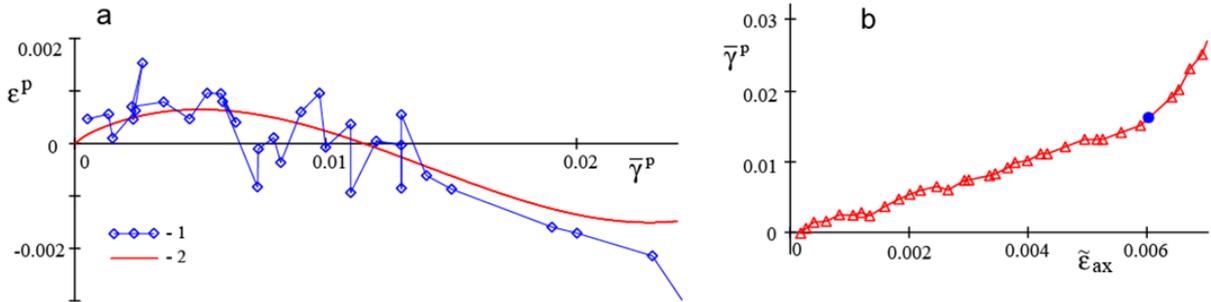


FIGURE 4.42 – (a) Graphique $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ au sein de la première bande de déformation (bande I, Fig. 4.23) pour l'essai C0.3-12T : 1, points calculés à partir de DIC ; 2, la même courbe que sur la figure 4.41c ; (b) Évolution de $\bar{\gamma}^p$ dans la première bande en fonction de $\bar{\varepsilon}_{ax}$ (points calculés à partir DIC). Le cercle bleu sur le graphique indique l'initiation de la localisation de déformation.

La figure 4.42 présente les graphiques $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ et $\bar{\gamma}^p(\bar{\varepsilon}_{ax})$ de l'essai C0.3-12T. La méthode de calcul de ces points est présenté dans la partie 1.2.6. Malgré la précision limitée des valeurs de déformation obtenues à partir de DIC (la dispersion des données résultantes vue sur la figure 4.42a), ainsi que l'hypothèse selon laquelle $\varepsilon_r = \varepsilon_t$, les points $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ reflètent de façon assez satisfaisante la tendance de la courbe $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ de la figure 4.41c. Le moment de la formation de la bande I (de son arrivée au point de mesure de déformation) est clairement visible sur la courbe $\bar{\gamma}^p(\bar{\varepsilon}_{ax})$ sur la figure 4.42b. Il se situe entre les points 2 et 3 (sur la courbe contrainte-déformation $q(\bar{\varepsilon}_{ax})$ dans la figure 4.19 quand $\bar{\gamma}^p \approx 0.014$ où h est négatif (cf. Fig. 4.41a) et β a la valeur presque maximale (cf. Fig. 4.41b). Après ce point, la croissance de $\bar{\gamma}^p$ accélère (cf. Fig. 4.41b), puis ralentit de nouveau quand β devient suffisamment négatif et h , suffisamment positif. Celui-ci explique pourquoi à la transition fragile-ductile l'évolution d'une bande dans l'essai expérimental provoque son épaississement et l'initiation d'une nouvelle bande : la déformation à l'intérieur de la bande devient compactive au-delà d'un certain point et cause le durcissement du matériau, ce qui empêche une déformation supplémentaire au même endroit et aboutit au développement d'un réseau de bandes.

Pourquoi un tel réseau ne se forme pas en dessous de la transition fragile-ductile, à la pression de confinement P_c , par exemple, de 0.2 MPa ?

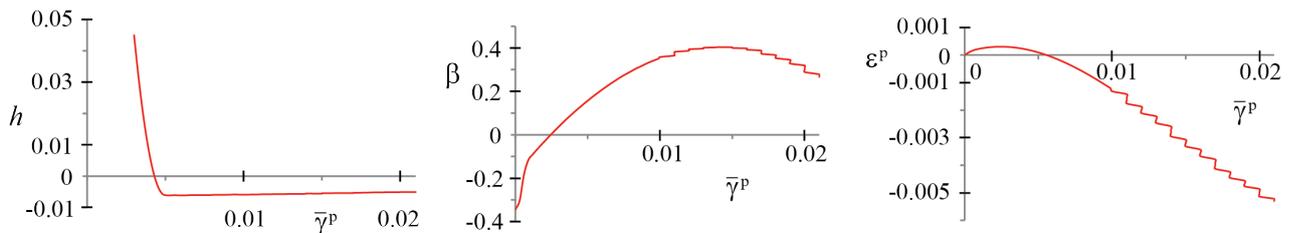


FIGURE 4.43 – Graphiques $h(\bar{\gamma})^p$, $\beta(\bar{\gamma}^p)$, et $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$, respectivement pour $\sigma_m = \sigma_{bdt} = 0.5$ MPa (Mas et Chemenda, (2015) [92]).

La contrainte moyenne au pic de contrainte est de 0.5 MPa à cette P_c (essai C0.2-01T, tableau 4.1). À cette valeur de σ_m , h change de positif à négatif avec l'augmentation de $\bar{\gamma}^p$.

Les deux paramètres h et β sont plus importants qu'à $P_c = 0.3$ MPa (Figures 4.43a, b) (Mas et Chemenda, (2015) [92]). Ils peuvent approcher au niveau zéro à la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$ beaucoup plus grande. On peut également observer une décroissance accélérée de la déformation volumique inélastique ε^p avec $\bar{\gamma}^p$ (Figure 4.43c). Les points $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ obtenus des calculs de déformation dedans la bande de déformation I de l'essai C0.2-01T (Figure 4.44a) reflètent bien la tendance de la courbe $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ de la figure 4.44c. La bande de déformation I se forme très rapidement et le moment de cette formation se situe entre les points 2 et 3 sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (cf. Fig. 4.8) quand $\bar{\gamma}^p \approx 0.01$ (Figure 4.44b). Après ce point la déformation inélastique cisailante équivalente $\bar{\gamma}^p$ augmente de façon très accélérée (β reste à la valeur très positive, et h , positive). Par conséquent, la formation de la bande peut s'adapter au raccourcissement de l'échantillon entier et cette bande devient une fracture/faille représentant une discontinuité de déplacement.

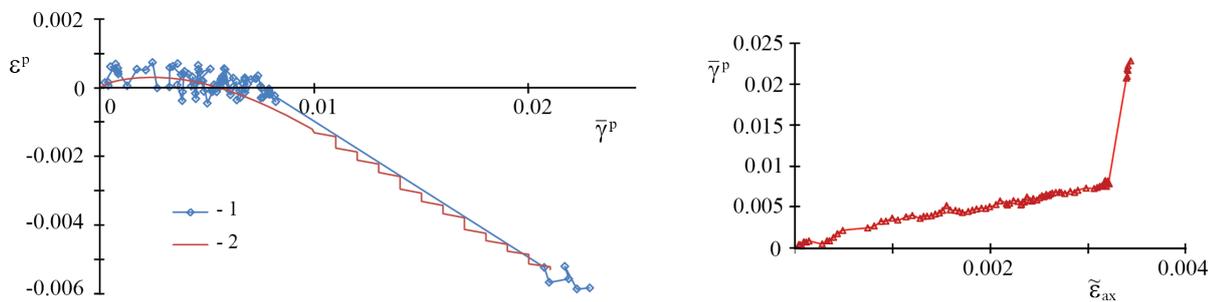


FIGURE 4.44 – (a) Graphique $\varepsilon^p(\bar{\gamma}^p)$ au sein de la première bande de déformation (bande I, Fig. 4.10) pour l'essai C0.2-01T : 1, points calculés à partir de DIC ; 2, la même courbe que sur la figure 4.43c ; (b) Évolution de $\bar{\gamma}^p$ dans la première bande en fonction de $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ (points calculés à partir DIC).

Chapitre 5

Traitement et analyse des résultats expérimentaux des essais en extension

Contents

5.1	Forme en bobine des échantillons pour les essais en extension	126
5.2	Procédure de l'essai	127
5.3	Analyses générales	128
5.3.1	Données mécaniques	129
5.3.2	Caractéristiques de la fracture	130
5.4	Mesure de la déformation axiale	134
5.5	Évolution de la déformation au cours du chargement	137
5.6	Discussion	140

Dans le cadre de ce travail de thèse, une série d'essais en extension triaxiaux à différentes pressions de confinement allant de 0.25 à 0.9 MPa ont été réalisés. L'objectif de ce travail est de décrire les modalités de localisation de la déformation (fracture extensive ou cisailante) en fonction de la pression de confinement. Les surfaces de rupture seront décrites par leur orientation macroscopique et leur morphologie. La technique de corrélation d'images sera utilisée pour suivre l'évolution de la déformation à la surface de l'échantillon et construire la courbe contrainte-déformation $q(\varepsilon_{ax})$.

5.1 Forme en bobine des échantillons pour les essais en extension

Dans un essai en extension axisymétrique, il est nécessaire d'exercer une contrainte axiale σ_{ax} en tension pour atteindre la rupture de l'échantillon. Il y a deux méthodes pour cela : soit l'échantillon est fixé aux embases par serrage (Liao et al. (1997) [87]) ou par collage (Okubo et Fukui (1996) [105]; Cattaneo et Rosati (1999) [29]) et une force de tension est exercée aux extrémités ; soit d'utiliser un échantillon en forme de bobine (Figure 5.1c).

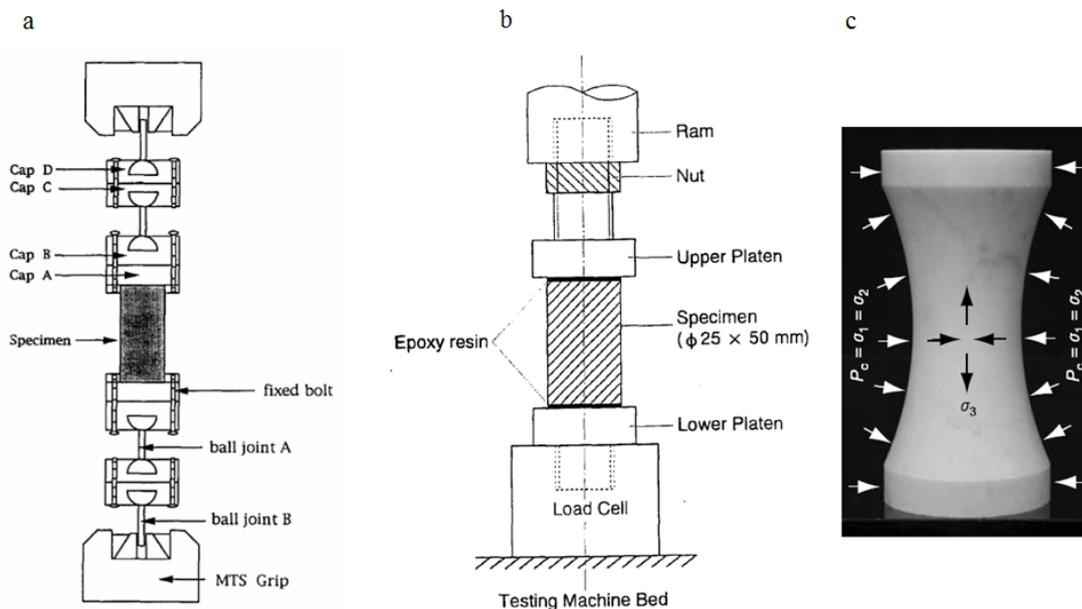


FIGURE 5.1 – Différentes techniques pour engendrer la contrainte axiale σ_{ax} en tension : (a) Serrage. Les embases serrent les extrémités de l'échantillon (Liao et al (1997) [87]); (b) Collage. L'échantillon est collé aux embases aux extrémités (Okubo et Fukui (1996) [105]); (c) Échantillon en forme de bobine (Ramsey et Chester (2005) [121]).

Cependant, la première méthode présente plusieurs inconvénients. Dans le cas de serrage, les embases en métal couvrent et serrent l'échantillon aux extrémités (Okubo et Fukui, (1996) [105], par exemple) (Figure 5.1a). Dans le cas de collage les extrémités de l'échantillon sont collés à la surface des embases par une résin époxy (Liao et al., (1997) [87]) (Figure 5.1b). Le serrage ou le collage, par conséquent, peut empêcher une déformation radiale libre et causer la non-homogénéité du champ de contrainte. Cela peut entraîner une rupture précoce de l'échantillon. De plus, la colle peut pénétrer à l'intérieur de l'échantillon et changer ses propriétés.

Pour la deuxième méthode, deux formes d'échantillon ont été utilisés pour les essais en extension : (a) forme en bobine I (Figure 5.2a) (Millar & Murray (1988) ([95]), Bésuelle et al. (2000) ([20]), Nguyen (1999) ([98])); (b) forme en bobine II (Figure 5.2b) utilisée par Ramsey et Chester (2004) ([121]), Bobich (2005) ([23])), par exemple. L'embase est simplement posée aux deux extrémités de l'échantillon. Grâce à cette forme il est possible d'avoir une contrainte axiale négative dans la partie médiane de l'échantillon alors que la contrainte axiale aux extrémités ne peut diminuer en dessous de 0 MPa. La contrainte axiale générée dans la partie amincie au centre de l'échantillon peut être estimée selon l'équation (Nguyen (2009) [98]) : $\sigma_{ax}^c = \sigma_{ax}^{ex} S_{ex} - P_c (S_{ex} - S_c) / S_c$, où σ_{ax}^c et σ_{ax}^{ex} sont respectivement les contraintes axiales au centre et aux extrémités ; S_c et S_{ex} sont respectivement les aires des sections au centre et aux extrémités.

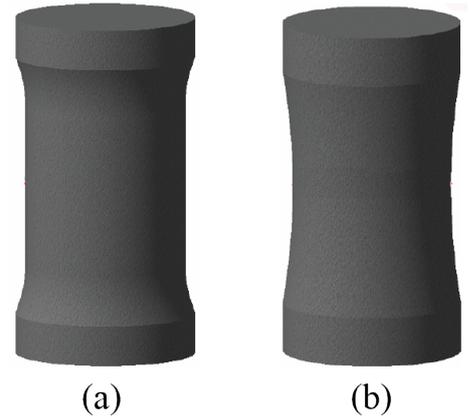


FIGURE 5.2 – Différentes formes de bobine d'échantillon utilisé pour un essai en extension : (a) forme I; (b) forme II.

5.2 Procédure de l'essai

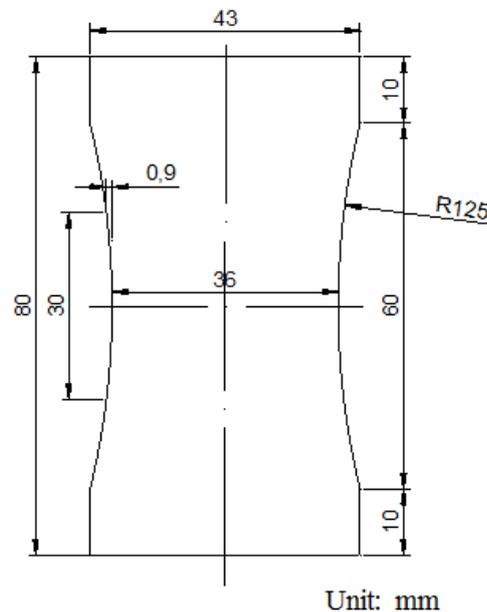


FIGURE 5.3 – Plan des dimensions d'un échantillon de forme en bobine.

Comme dans les essais en compression, l'échantillon est d'abord chargé jusqu'à la pression hydrostatique désirée P_c . Ensuite, la contrainte axiale σ_{ax} est diminuée en montant le piston verticalement à une vitesse constante de 0.06 mm/min. Nous avons utilisé des échantillons de forme bobine dont les dimensions sont indiquées sur la figure 5.3. Cette forme permet la formation de fracture/bande de déformation uniquement dans la partie centrale de l'échantillon où la contrainte est la plus extensive ou la moins compressive.

5.3 Analyses générales

Nom d'essai	Pression de confinement $P_c = \sigma_1$ (MPa)	Contrainte axiale au pic σ_{ax}^{pic} (MPa)	Angle de fracture Ψ (°)	Remarque
E0.25-01T	0.25	-0.071	0	
E0.25-02T	0.25	-0.106	0	
E0.3-04T	0.3	-0.101	0	
E0.3-06T	0.3	-0.120	0	
E0.35-04T	0.35	-0.130	0	
E0.4-01T	0.4	-0.099	0	
E0.4-02T	0.4	-0.129	0	
E0.5-01T	0.5	-0.130	0	
E0.5-02T	0.5	-0.112	0	
E0.5-05T	0.5	-0.096	0	
E0.6-02T	0.6	-0.114	0	
E0.6-03T	0.6	-0.087	0	
E0.7-03T	0.7	-0.047	0	
E0.7-01T	0.7	-0.030	1	
E0.7-02T	0.7	-0.020	3.8	
E0.7-04T	0.7	-0.059	1	
E0.7-05T	0.7	-0.019	1	cale
E0.7-06T	0.7	-0.020	1	cale
E0.8-09T	0.8	-0.0076	13	
E0.8-08T	0.8	-0.0059	13	
E0.8-06T	0.8	-0.0064	12	
E0.8-10T	0.8	-0.0066	1	cale
E0.8-11T	0.8	-0.0097	1	cale
E0.9-02T	0.9	0.024	17	

TABLE 5.1 – Référence des essais en extension

Le tableau 5.1 montre la référence des essais en extension réalisés. La contrainte axiale à la rupture est calculée en divisant la force appliquée par la surface de rupture :

$$\sigma_{ax}^{rup} = \sigma_3^{rup} = P_c - \frac{F_{ax}}{S^{rup}} \quad (5.1)$$

où P_c est la pression de confinement ; F_{ax} est la force appliquée sur l'échantillon ; S^{rup} est la surface de la section horizontale de l'échantillon à la rupture.

5.3.1 Données mécaniques

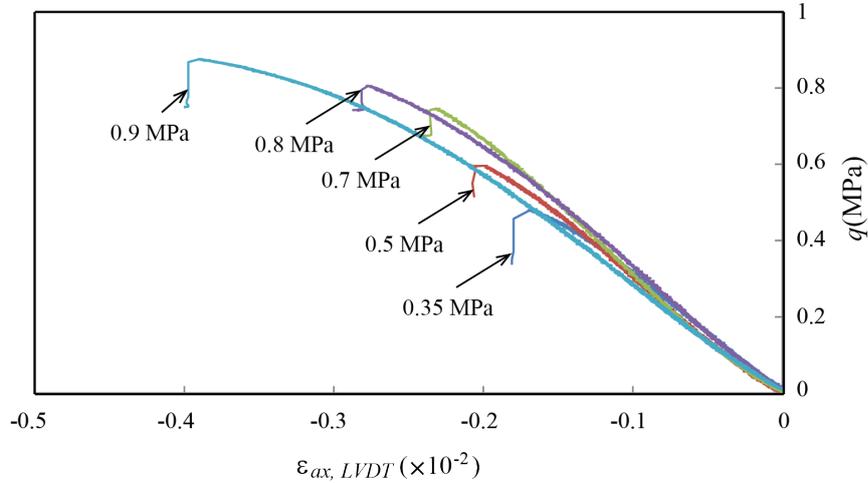


FIGURE 5.4 – Courbes de contrainte différentielle par rapport le raccourcissement axial mesuré par le capteur LVDT externe $q(\varepsilon_{ax,LVDT})$ pour différentes P_c , indiquées sur les courbes; $P_c = 0.35$ MPa (E0.35-04T); $P_c = 0.5$ MPa (E0.5-05T); $P_c = 0.7$ MPa (E0.7-03T); $P_c = 0.8$ MPa (E0.8-10T); $P_c = 0.9$ MPa (E0.9-0.2T).

Les courbes contrainte différentielle-déformation axiale $q(\varepsilon_{ax,LVDT})$ pour différentes pressions de confinement P_c sont présentées sur la figure 5.4, où la déformation axiale est mesurée par le capteur LVDT externe. Les essais en extension à la pression de confinement P_c de 0.25 à 0.9 MPa manifestent une chute de contrainte après le pic. La résistance à la rupture est considérée comme la plus grande contrainte différentielle obtenue sur les courbes contrainte-déformation (cf. Fig. 5.4) et est caractérisée sur le graphique contrainte axiale à la rupture $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ par rapport à la contrainte principale majeure $\sigma_1 = P_c$ (Figure 5.5). Une contrainte axiale de traction a été obtenue à la rupture dans tous les essais effectués à des pressions de confinement inférieures à 0.8 MPa. À P_c inférieure à 0.5 MPa, $\sigma_{ax} = \sigma_3$ diminue (devient plus extensive) de -0.071 (cf. Fig. 5.5, proche de la résistance à la traction uniaxiale de GRAM1 $\sigma_t = -0.07$ MPa (Nguyen et al. (2011), [99])) à -0.013 MPa avec l'augmentation de P_c . σ_3 augmente (devient plus compressive) en fonction de P_c lors que $P_c \geq 0.5$ MPa. À $P_c = 0.8$ MPa, la contrainte axiale à rupture $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ est très proche de 0.

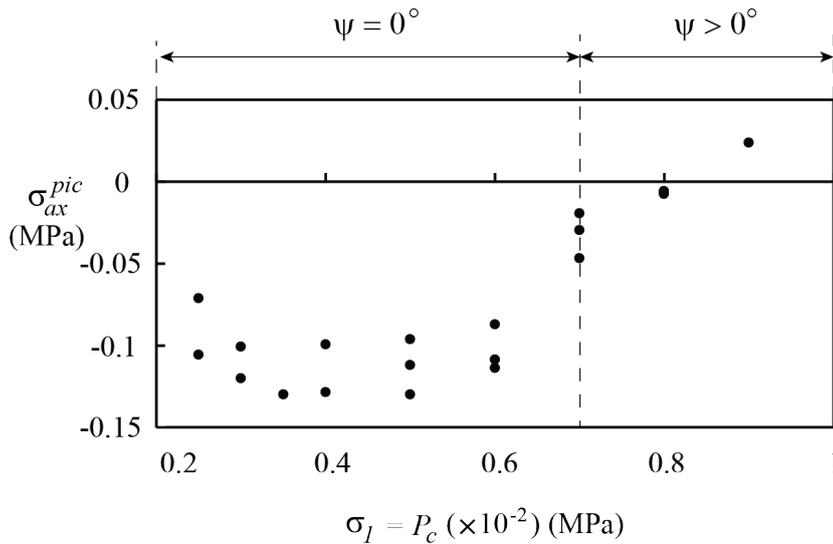


FIGURE 5.5 – Contraintes axiales au pic $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ versus la pression de confinement P_c .

5.3.2 Caractéristiques de la fracture

La figure 5.6 présente les photos des demis échantillons post-mortems dans les essais en extension à différentes P_c . L'angle Ψ entre les fractures et la direction de la contrainte principale σ_1 dépend fortement de P_c ou de la contrainte moyenne σ_m ¹. À $P_c < 0.7$ MPa ($\sigma_m < 0.47$ MPa), les fractures sont perpendiculaires à la direction de la contrainte axiale. Leur formation est accompagnée par une émission acoustique (bruit audible) qui prouve la rupture fragile dynamique du matériau. À $P_c = 0.7$ MPa, la fracture est soit horizontale, soit inclinée avec une faible $\Psi < 4^\circ$ (cf. Fig. 5.6). Pour $P_c > 0.8$ MPa, plusieurs bandes obliques sont formées dans la zone centrale de l'échantillon (Figure 5.8b).

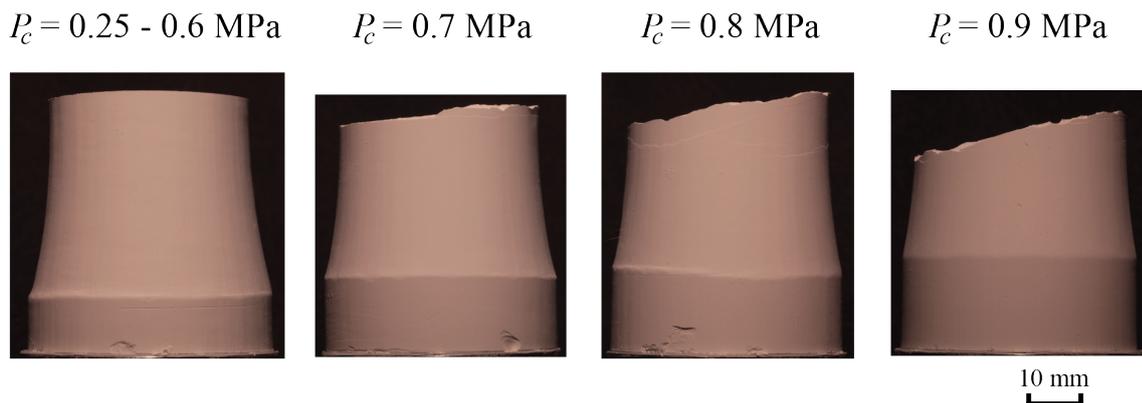


FIGURE 5.6 – Photographie montrant l'angle de la fracture avec l'augmentation de la pression de confinement P_c ; $P_c = 0.25 - 0.6$ MPa (E0.25-02T); $P_c = 0.7$ MPa (E0.7-03T); $P_c = 0.8$ MPa (E0.8-08T); $P_c = 0.9$ MPa (E0.9-02T).

L'évolution de l'angle de la fracture en fonction de P_c est montrée sur le graphique (Ψ, P_c) dans la figure 5.7. Les angles de la fracture Ψ formés à $P_c < 0.7$ MPa sont égaux à 0° et sont donc indépendants de la pression de confinement P_c . À partir de $P_c \geq 0.7$ MPa, Ψ augmente

1. Pour les essais en extension : $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (2 \times P_c + \sigma_{ax})/3$; où $\sigma_1 = \sigma_2 = P_c, \sigma_3 = \sigma_{ax}$

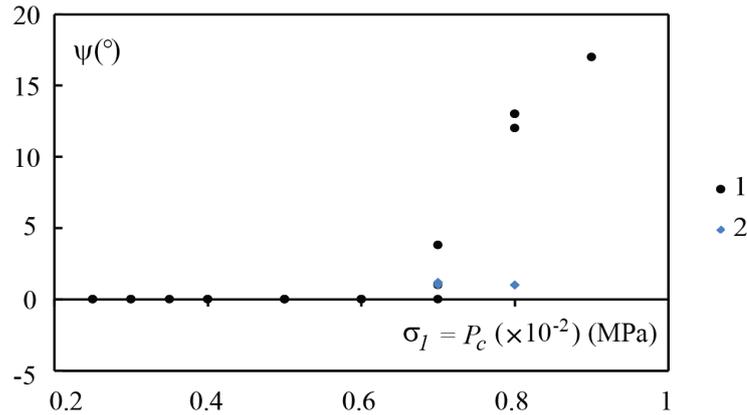


FIGURE 5.7 – Évolution de l'angle de la fracture Ψ avec la pression de confinement P_c dans les essais en extension : (1) les essais normaux (sans cale) ; (2) les essais avec une ou des cales collées au centre de l'échantillon.

de façon quasi-linéaire avec P_c (cf. Tableau 5.1).

La contrainte normale σ_n sur le plan de rupture peut être déterminée à partir des contraintes principales (σ_1, σ_3) et de l'angle (Ψ) à partir de l'équation suivante (Bobich (2005) [23]) :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \cos(2\Psi) \quad (5.2)$$

À la pression de confinement $P_c = 0.7$ MPa, la contrainte normale (σ_n) sur la surface de rupture change de la traction à la compression.

Cependant, nous pouvons constater que les essais avec une cale collés au centre de l'échantillon à $P_c = 0.8$ MPa, présentent une fracture quasi-horizontale ($\Psi < 1^\circ$) (les essais E0.8-10T, E0.8-11T) alors que pour les essais sans cale les fractures ont un angle $\Psi \approx 13^\circ$ (Figure 5.8). Pour le cas de $P_c = 0.7$ MPa, la cale présente également une influence similaire sur l'angle de la rupture (cf. Tableau 5.1).

Après démontage de l'échantillon, la fracture apparaît à la surface de l'échantillon comme une discontinuité visible et mince. La séparation manuelle des parties de l'échantillon le long de la discontinuité révèle cette dernière. Les surfaces des fractures générées à différentes P_c sont montrées sur la figure 5.9. À $P_c = 0.7$ MPa, la tomographie plumeuse est accompagnée par des marches (cf. Fig. 5.9c). Pour $P_c \geq 0.8$ MPa, la surface de fracture se caractérise par les plaques ou zones pulvérisées (cf. Fig. 5.9e et f). L'emplacement des plaques peuvent se relier sur les deux faces de la fracture. Par ailleurs, la surface de fracture dans le cas avec une cale présente toujours une morphologie plumeuse, mais avec un relief plus important.

La figure 5.10 montre deux types de surface de rupture d'un essai réalisé à $P_c = 0.8$ MPa. Le premier type de surface est celui qui se caractérise par des plaques ou/et zones pulvérisées comme décrit pour les essais effectués à $P_c \geq 0.8$ MPa. Le deuxième type comprend deux parties distinctes : une lisse et l'autre manifestant une fractographie plumose. Ces fractures ont été créées en deux étapes. L'échantillon a été soumis à une extension axiale à $P_c = 0.8$ MPa. Après le déchargement, la surface de l'échantillon présente une discontinuité/fracture oblique et une autre presque horizontale qui n'a pas traversé tout l'échantillon. Ensuite, l'échantillon est séparé manuellement suivant les discontinuités dans la direction approximativement axiale, ce qui cause les surfaces de fracture comme montrées dans la figure 5.10b et c. Pour la surface

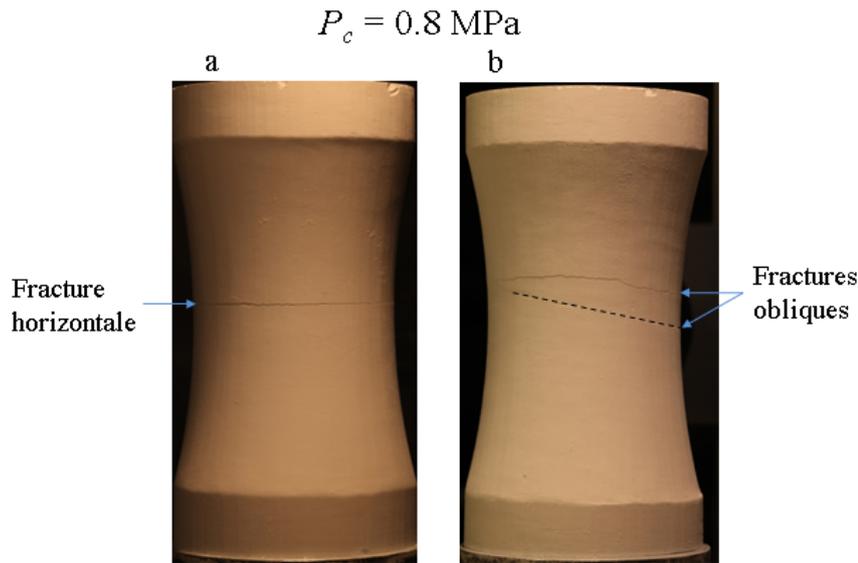


FIGURE 5.8 – Fractures générées dans les essais en extension à $P_c = 0.8 \text{ MPa}$: (a) fracture horizontale (essai E0.8-10T, avec cale); (b) fractures obliques (essai E0.8-06T, sans cale).

de fracture horizontale (cf. Fig. 5.10b), la partie avec une morphologie plumeuse correspond à la discontinuité visible sur la surface de l'échantillon après le déchargement, et la partie lisse a été formée manuellement à $P_c = 0 \text{ MPa}$. Ceci démontre une possibilité de la formation de fractures mixtes horizontale-obliques sous un état de contrainte mixte de traction et de compression.

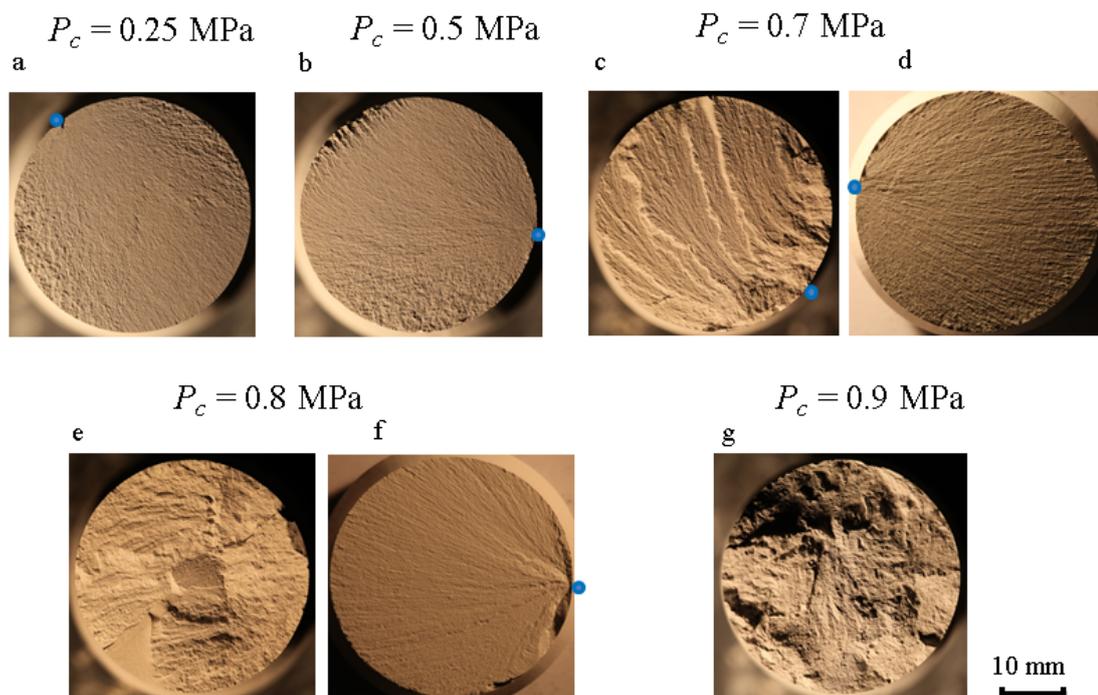


FIGURE 5.9 – Surfaces des fractures orthogonales σ_3 générées à différentes P_c : (a) essai E0.25-02T ; (b) essai E0.5-02T ; (c) essai E0.7-02T ; (d) essai E0.7-06T ; (e) essai E0.8-09T ; (f) essai E0.8-10T ; (g) essai E0.9-02T. Point bleu indique le point d'initiation de la fracture.

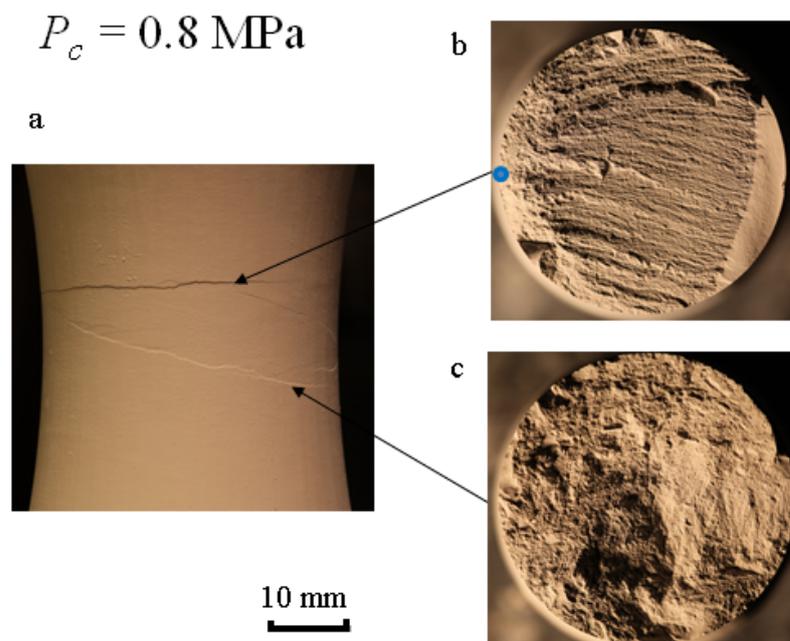


FIGURE 5.10 – Surfaces des fractures dans l'essai à $P_c = 0.8$ MPa (a) essai E0.8-08T qui comprend (b) la surface plumeuse de la fracture faible inclinée et (c) la surface pulvérisée de la fracture oblique. Le point bleu indique le point d'initiation de la fracture.

5.4 Mesure de la déformation axiale

Comme dans les essais en compression, nous utilisons la technique de corrélation d'images pour mesurer la déformation de l'échantillon pendant un essai en extension à partir des images enregistrées au cours du chargement. Une zone d'analyse couvre presque toute la surface de l'échantillon et une grille d'analyse y est définie. La figure 5.12a présente l'exemple de l'échantillon E0.8-10T. La zone d'analyse est en jaune et la grille d'analyse est en rouge. La corrélation d'images est réalisée avec le logiciel 7D. Afin d'assurer une bonne qualité de mesure, nous utilisons également l'interpolation bi-cubique pour accéder aux niveaux de gris en position sous-pixels, le coefficient de corrélation est de type "zero mean normalized cross correlation". La taille de fenêtre de corrélation (ou *subset*) et le pas de la grille sont respectivement 10×10 pixels² et 10 pixels. Le champ de déformation est calculé en dérivant le champ de déplacement obtenu après le processus de corrélation. L'échantillon utilisé dans les essais en extension est en forme bobine. Cette forme cause une difficulté en assurant une bonne profondeur de champs sur toute la surface de l'échantillon, surtout entre les parties près de l'extrémités et celle au centre (cf. Fig. 5.3). Ceci peut diminuer la précision en mesurant la déformation par la technique DIC. Les figures 5.12c et d présentent l'exemple de la carte de déformation axiale accumulée au stade de chargement correspondant au point A3 sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ (courbe 3) de l'essai E0.8-10T (Figure 5.11) et les déformations dans le profil central le long de la hauteur de l'échantillon. Ces cartes montrent que le matériau dans la partie centrale d'environ 30 mm de hauteur se déforme de façon homogène. Afin de mieux représenter la courbe contrainte différentielle - déformation axiale $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$, la déformation axiale globale est calculée dans cette zone centrale de 30 mm de hauteur.

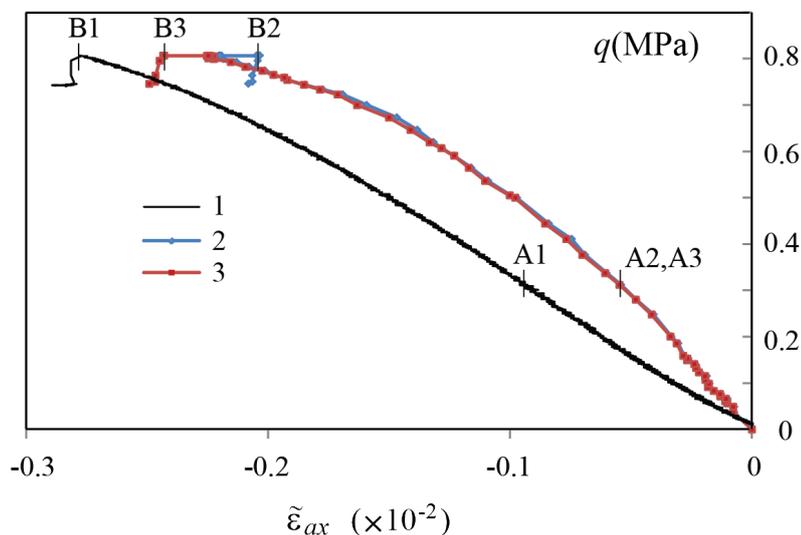


FIGURE 5.11 – Essai E0.8-10T. Courbes contrainte différentielle - déformation axiale $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$: (1) $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est calculée en divisant la valeur de déplacement mesuré par le capteur LVDT externe par la hauteur initiale de l'échantillon; (2) $\tilde{\varepsilon}_{ax}$ est la moyenne des déformations dans la zone de 30 mm de hauteur; (3) dans les deux zone de 30×30 pixels hors de la zone de fracture. Les points A1, A2, A3 sont les mêmes points au même stade de chargement, les points B1, B2, B3 au moment de rupture.

La courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ résultante est montrée sur la figure 5.11 (la courbe 3 en rouge). Cette courbe est évidemment différente de celle obtenue par capteur externe LVDT (courbe 1, Fig. 5.8). Le module d'Young estimé est de $E \approx 6.5 \times 10^8$ Pa. Cette valeur est également proche de

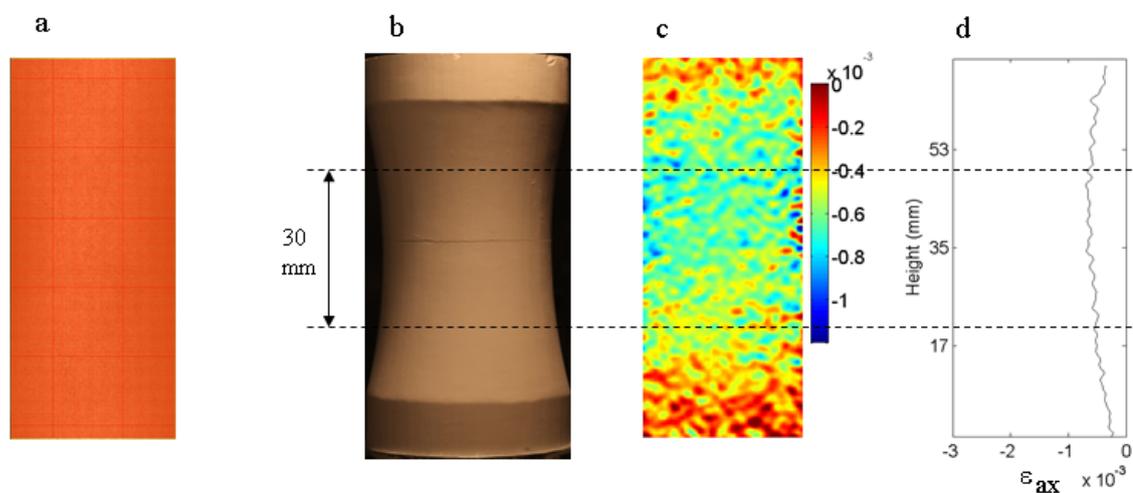


FIGURE 5.12 – Essai E0.8-10T. (a) Un exemple d’une image enregistrée au cours de l’essai ayant la résolution 1 pixel $\approx 31.2\mu\text{m}$, zone d’analyse en jaune, grille d’analyse en rouge; (b) échantillon post-mortem; (c) carte de déformations axiales accumulées entre les stades correspondant à 0 (initial) et point A1 comme indiqué sur la courbe 1 5.11; (d) les déformations au profil central le long de hauteur de l’échantillon.

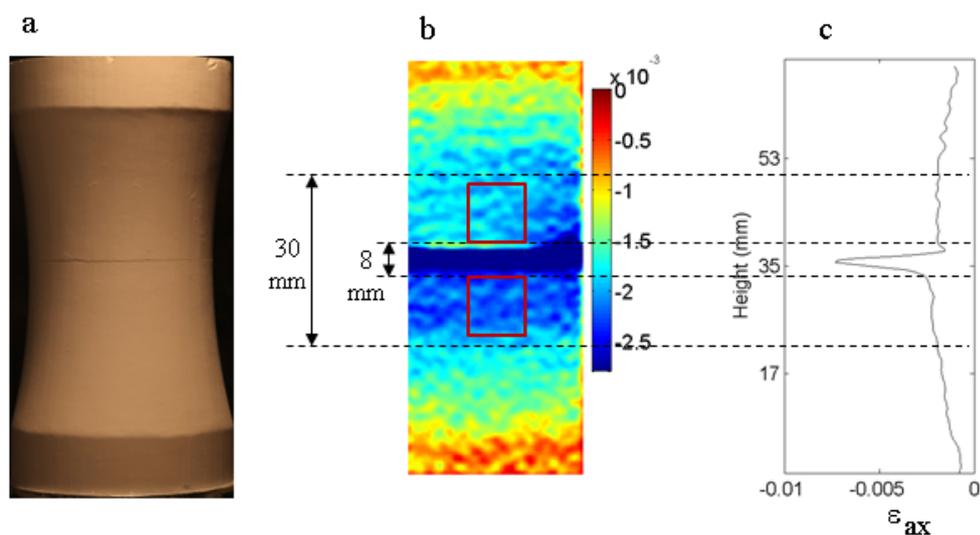


FIGURE 5.13 – (a) Échantillon post-mortem de l’essai E0.8-10T; (b) Carte de déformations axiales accumulées entre l’état initial (point 0) et le moment de rupture (point B1 ou B2, B3 sur les courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ 1, 2, 3, respectivement); (c) Carte de déformation axiale au profil central le long de la hauteur de l’échantillon. L’épaisseur de la zone fracturé est d’environ 8 mm. Les deux carrés en rouge de 30×30 pixels sont utilisés pour calculer la déformtion globale.

celle déterminer par la même technique dans les essais en compression. Cependant, au moment de la rupture, cette courbe montre un plateau à déformation axiale constante (courbe 3, cf. Fig. 5.11). Ce phénomène peut être expliqué par l'impact de la membrane qui entre dans la fracture lors de son ouverture. La membrane se déforme en suivant la déformation du matériau au cours du chargement. Dès la rupture, la membrane peut être pressée vers l'intérieur de l'espacement produit pendant l'ouverture de la fracture et également abîmer les deux lèvres de la fracture. Ceux-ci induit donc une très grande valeur de déformation au cœur de la zone fracturée (Figure 5.13c) et une fracture très épaisse comme illustrée par DIC (Figure 5.13b). Afin d'éviter l'existence du plateau de déformation sur la courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$, nous choisissons deux zones carrées de 30×30 pixels² ($\approx 9.4 \times 9.4$ mm²) au-dessus et au-dessous de la fracture horizontale pour calculer la déformation globale pour les essais en extension. La courbe $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ obtenue par cette méthode de calcul (courbe 2) (cf. Fig. 5.11) coïncide avec la courbe obtenue précédemment (courbe 3). Le retour de la valeur de déformation au moment de la rupture (point B2) présente la libération de l'énergie élastique dans le matériau lorsque la fracture se produit.

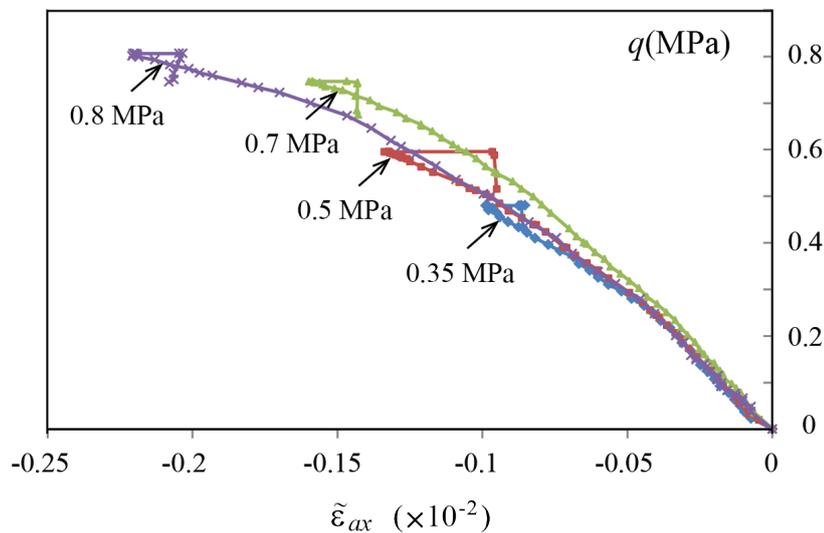


FIGURE 5.14 – Courbes de contrainte différentielle par rapport la déformation axiale calculée dans les deux carrés de 30×30 pixels² (illustrés dans la figure 5.13b) $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ pour différentes P_c , indiquées sur les courbes; $P_c = 0.35$ MPa (E0.35-04T); $P_c = 0.5$ MPa (E0.5-05T); $P_c = 0.7$ MPa (E0.7-03T); $P_c = 0.8$ MPa (E0.8-10T).

La figure 5.14 présente les courbes $q(\tilde{\varepsilon}_{ax})$ pour différentes P_c dont la déformation axiale globale est la moyenne des déformations axiales dans les deux zones carrées de 30×30 pixels² situées de part et d'autre de la fracture. Les courbes coïncident pratiquement dans la première partie quasi-linéaire et puis évoluent sur une portion non-linéaire jusqu'au pic de contrainte. La chute de contrainte est suivie juste après la formation de la fracture. Ce phénomène peut être dû à une perte de contrôle du dispositif expérimental induisant un retard entre les acquisition des images et des contraintes axiales données par le capteur de force.

5.5 Évolution de la déformation au cours du chargement

Dans les essais en extension, une fracture horizontale (fracture en mode d'ouverture) se forme en général sous un état de contrainte extensif à faible pression de confinement P_c . À P_c plus élevée, des fractures obliques (mode de cisaillement) se forment sous un état de contrainte compressif (Ramsey et Chester, (2004) [121]; Bobich (2005), [23]). Nos essais en extension réalisés à différentes pressions de confinement de 0.25 à 0.9 MPa montrent que le type de fracture horizontale peut se produire également sous l'état de contrainte mixte de traction et de compression à P_c compris entre 0.7 et 0.8 MPa. Nous choisissons donc un essai à $P_c = 0.7$ MPa et un essai à $P_c = 0.8$ MPa pour présenter l'évolution de la déformation au cours du chargement en appliquant la technique de corrélation d'images.

L'essai E0.7-04T est réalisé à la pression de confinement $P_c = 0.7$ MPa, alors que l'essai E0.8-10T à $P_c = 0.8$ MPa avec une cale collée au centre de l'échantillon (Figure 5.16). Les fractures produites dans les deux essais sont perpendiculaires à la direction de la contrainte axiale ($\sigma_{ax} = \sigma_3$) (angle $\Psi < 1^\circ$) (Figures 5.15 et 5.16). Les contraintes axiales à la rupture respectivement de -0.059 MPa (l'essai E0.7-04T) et -0.0066 MPa (l'essai E0.8-10T). La rupture est par ailleurs accompagnée d'émissions acoustiques attestant d'un mode de rupture fragile et dynamique. Les courbes de contrainte axiale σ_{ax} en fonction de la déformation axiale ε_{ax} (calculée par DIC) de ces essais sont présentées sur les figures 5.15a, 5.16c. Les courbes comprennent une partie linéaire, une partie non-linéaire et un plateau après le pic puis une saut de contrainte. Ces courbes sont produites en analysant respectivement 2979 images (pour l'essai E0.7-04T) et 3340 images (pour l'essai E0.8-10T) enregistrées pendant les deux essais. Pour chaque essai, six cartes de déformations axiales cumulées correspondantes à différents stades ont été choisies pour montrer l'évolution de la déformation dans le matériau jusqu'à la rupture (Figures 5.15d et 5.16e). Elles sont indiquées sur la courbe $\sigma_{ax}(\varepsilon_{ax})$. L'image 0 correspond au début de l'essai, l'image 1 correspond au stade pour lequel la courbe vient à s'écarter de la partie linéaire. Les images 2, 3, 4 correspondent aux trois stades du chargement de façon décroissante. Les images 5 et 6 sont les images consécutives avant et après l'initiation de la fracture. Par ailleurs, les graphiques des valeurs de déformation suivant un profil longitudinal au centre de l'échantillon $\varepsilon_{ax}(h)$ correspondants à ces cartes de déformation sont également montrés sur les figures 5.15e et 5.16f. Notons que, les résultats des analyses de corrélation d'images pour les essais en extension utilisent aussi la convention de signe de mécanique des roches comme dans les essais en compression : une valeur négative de déformation correspond à une extension et une valeur positive à une compression.

La figure 5.16 présente les cartes de déformations axiales cumulées pour l'essai E0.7-04T. La zone d'analyse couvre tout l'échantillon. Une ligne pointillée indique la position de la fracture. On peut constater un bruit important aux extrémités de l'échantillon. Ceci peut être expliqué par une faible profondeur de champ et par la forme de bobine, ce qui donne un effet flou au bord de l'échantillon. De ce fait, nous n'analysons l'évolution de la déformation que dans la zone centrale d'environ 30 mm de la hauteur sur les cartes ε_{ax} et les graphiques $\varepsilon_{ax}(h)$ associées (cf. Fig. 5.15e). Sur la figure 5.15d, nous pouvons voir que l'échantillon se déforme de manière homogène au stade 1, puis hétérogène à partir du stade 2. La déformation se concentre dans le centre de l'échantillon (0-2), puis se diffuse vers le haut et le bas de l'échantillon (stade 0-3). Au stade (0-4), une concentration de la déformation se localise juste au-dessus de la ligne pointillée et se déplace vers l'endroit où la fracture se forme en suite. Avant la rupture, l'échantillon se déforme plus dans la partie supérieure que la partie inférieure (stade 0-5). Nous observons une

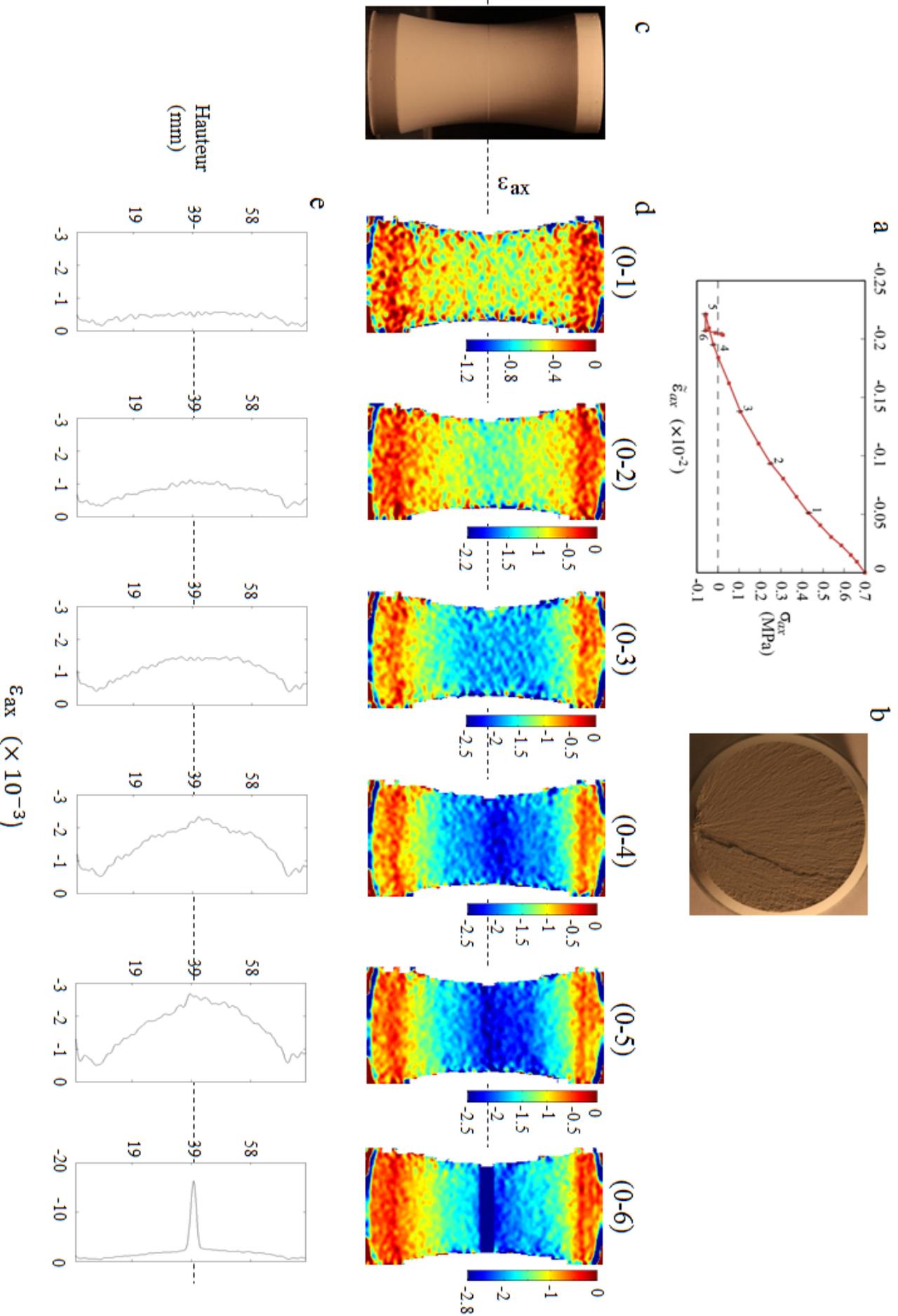


FIGURE 5.15 – Essai E07-04T. (b) Surface plieuse de la fracture produit dans la partie amincie de l'échantillon en forme de bobine (c) ; (d) (e) Cartes de déformations axiales accumulées et des déformations dans le profil central le long de la hauteur de l'échantillon obtenues à partir de DIC entre les points 0 (au début d'essai) et n ($0 - n$), où $n = 1, 2, \dots, 6$ sont indiqués sur la courbe contrainte-déformation $\sigma_{ax}(\tilde{\epsilon}_{ax})$ (a).

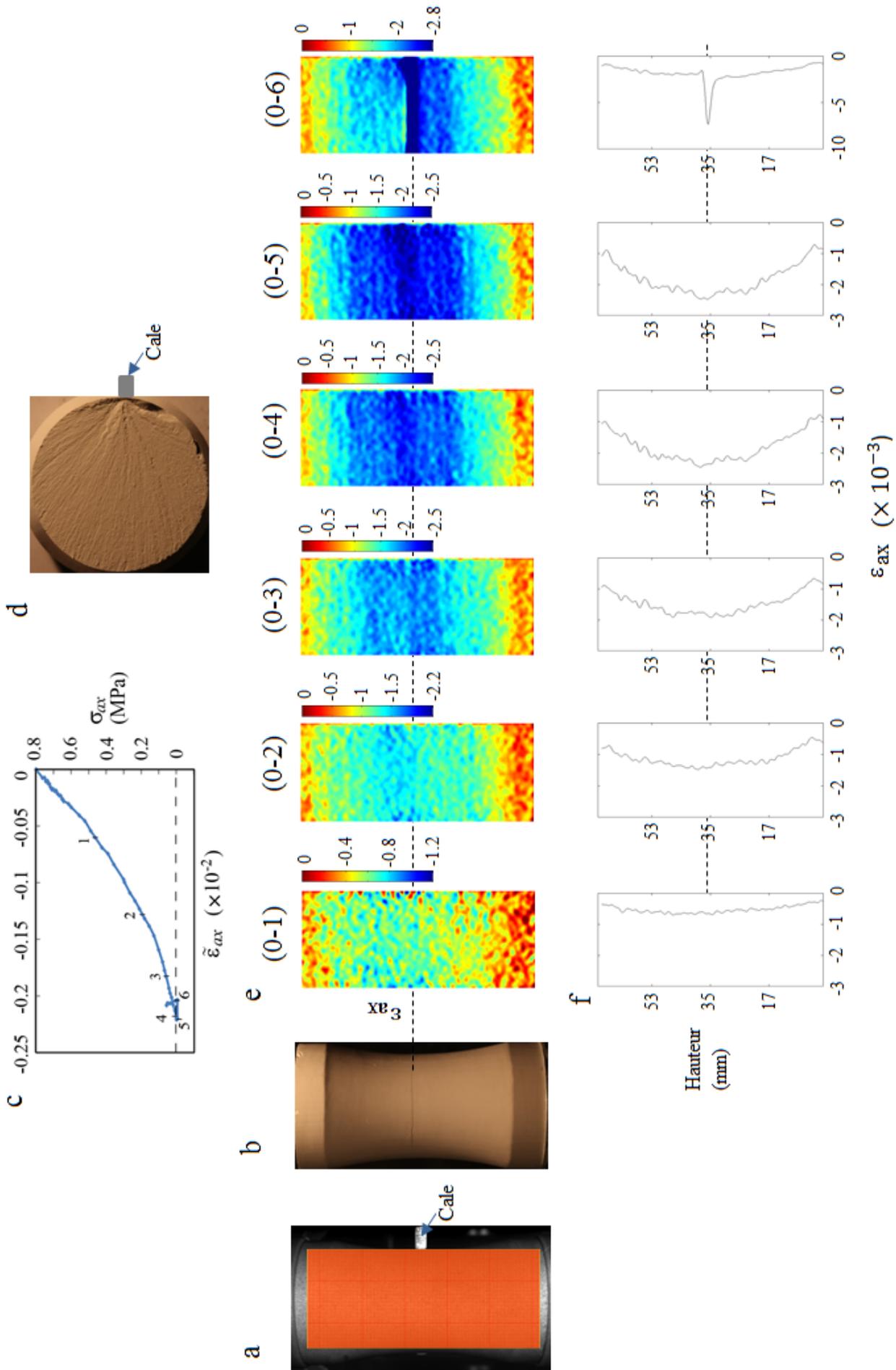


FIGURE 5.16 – Essai E0.8-10T. (a) Échantillon mise en place avant le test. La cale est collée à l’extérieur de la membrane à droite; (b) Échantillon post-mortem avec la fracture horizontale; (c) Surface plumose de la fracture. Le point d’initiation de fracture coïncide avec l’endroit du collage de la cale; (d) Cartes de déformations axiales accumulées et des déformations dans le profil central le long de la hauteur de l’échantillon obtenues à partir de DIC entre les points 0 (au début d’essai) et n ($0 - n$), où $n = 1, 2, \dots, 6$ sont indiqués sur la courbe contrainte-déformation $\sigma_{ax}(\tilde{\epsilon}_{ax})$ (c).

accélération de la déformation à l'endroit de la fracture sur la carte ε_{ax} au stade (0-6). Ceci traduit le fait que la fracture est bien formée et a traversé complètement l'échantillon. La fracture entraîne la diminution de la déformation dans les zones environnantes, ce qui montre qu'il y a eu libération de l'énergie élastique stockée dans le matériau lors de la rupture. La fracture présente une surface avec des plumoses et son point d'initiation se situe sur la côté d'observation de la caméra (Figure 5.15b).

Pour l'essai E0.8-10T, l'échantillon se déforme également de manière hétérogène après la partie linéaire sur la courbe $\sigma_{ax}(\varepsilon_{ax})$ (phase 0-2, figure 5.16e). Les cartes ε_{ax} aux stades 3, 4, 5 montrent une déformation uniforme dans les deux parties de l'échantillon. Une déformation plus importante se concentre toujours au milieu de l'échantillon où la fracture se produit plus tard. Aux stades (0-4), nous pouvons constater que la déformation se localise au centre droit de la carte de déformation où une cale est collée à l'extérieur de la membrane. Cette localisation est plus claire sur la carte ε_{ax} au stade (0-5). Une fracture horizontale se forme complètement au stade (0-6). Un relâchement de la déformation est également observé comme l'essai précédent. La fractographie plumeuse présentée sur la figure 5.16d indique que la fracture s'initie sur la droite puis se propage vers la gauche. Ce point d'initiation coïncide avec la position de la cale.

5.6 Discussion

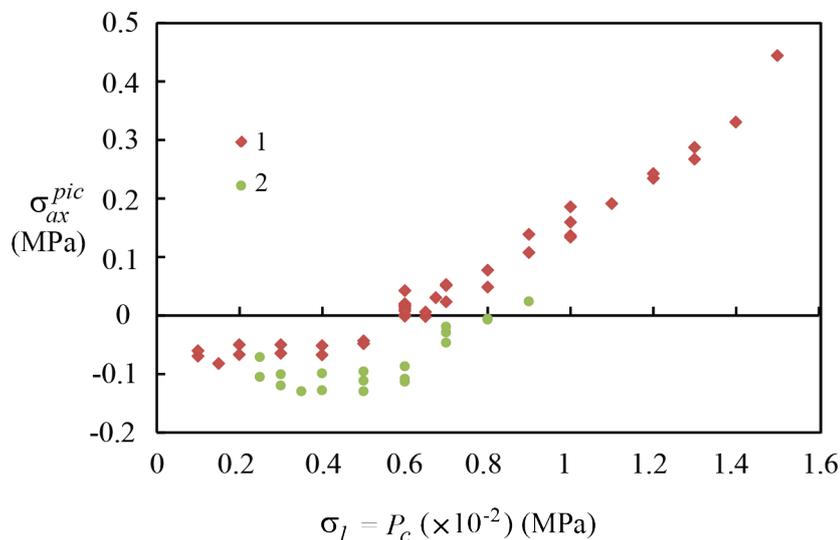


FIGURE 5.17 – Contraintes axiales au pic $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ versus la pression de confinement P_c dans les essais en extension réalisés avec le matériau GRAM1 : (1) les résultats obtenus par Nguyen, (2009) [98]; (2) nos résultats.

La série d'essais en extension triaxiaux a été réalisée sur les échantillons du matériau GRAM1 de forme bobine pour différentes pressions de confinement P_c . La figure 5.17 présente l'ensemble des courbes de contrainte axiale au pic en fonction de la pression de confinement P_c ($\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$, $\sigma_1 = P_c$) pour nos résultats et de ceux de Nguyen (2009) ([98]). Les essais en extension de Nguyen (2009) ont également été effectués avec le matériau GRAM1 mais avec différentes formes d'échantillon. La forme bobine (type I, Fig. 5.2a) a été utilisée pour les essais

ayant $\sigma_{ax}^{pic} < 0$ ($P_c < 0.6$ MPa) alors que la forme cylindrique a été utilisée pour les essais à $\sigma_{ax}^{pic} > 0$. Les deux courbes présentent la même tendance, mais les contraintes principales mineures à la rupture σ_3^{pic} dans nos essais sont plus faibles (plus négatives) que celles obtenues par Nguyen (2009) pour la même valeur de P_c . Ceci montre que la forme de l'échantillon influence à la valeur de la résistance en traction.

Nos résultats présentent une transition continue de la fracture extensive à la fracture cisailante avec une augmentation de la contrainte compressive. En fait, les fractures horizontales (extensives) se forment pour les essais à $P_c = 0.25$ à 0.7 MPa sous un état de contrainte négative. Alors qu'à $P_c = 0.7$ à 0.9 MPa, les fractures cisailantes se produisent avec une augmentation de l'angle de rupture Ψ en fonction de P_c sous un état de contrainte de négatif à positif. Ceci est en accord avec les résultats pour les essais en extension réalisées sur des roches naturelles dans lesquelles la même forme de l'échantillon a été utilisée (Ramsey et Chester (2004) ([121]) sur les marbres de Carra ; Bobich (2005) ([23]), sur les grès de Berea).

Pour les essais à $P_c = 0.7$ MPa et 0.8 MPa, deux types d'essais ont été réalisées : avec ou sans cale dans la partie centrale. La contrainte axiale à la rupture $\sigma_{ax}^{pic} = \sigma_3^{pic}$ sont quasi-similaire dans les deux cas. La cale n'affecte donc pas la résistance à la rupture du matériau. Cependant, elle permet de créer une fracture horizontale et de guider le point d'initiation de la fracture. Grâce à la technique de corrélation d'images, nous pouvons suivre l'évolution de la déformation dans le matériau. Une concentration de la déformation avant la formation de la fracture peut être détectée. Cependant, la détection de l'initiation et de la propagation de la bande de dilataance n'était pas possible dans notre étude du fait de la limitation en résolution et fréquence d'échantillonnage de notre caméra.

Conclusions générales

Le travail présenté dans ce manuscrit est dédié à l'étude des mécanismes de localisation de la déformation et la rupture des géomatériaux soumis à différentes conditions de chargement. Ceci a été réalisé en utilisant une approche de modélisation physique s'appuyant sur la technique de corrélation d'images (DIC) et l'utilisation d'un matériau analogue de roche (GRAM1) développé au laboratoire Géoazur depuis plusieurs années. Ce matériau possède toutes les caractéristiques mécaniques fondamentales d'une roche comme le frottement interne, la cohésion et la dilatance, mais présente également des grands avantages par rapport à des roches naturelles. Il permet en particulier d'avoir une très bonne reproductibilité des résultats et de travailler sous des niveaux de contraintes faibles. Ce travail a été réalisé suivant trois phases :

- La première phase a consisté à développer de nouveaux dispositifs expérimentaux. Il s'agit en particulier :
 - de la conception et fabrication d'une nouvelle cellule de confinement avec deux fenêtres transparentes et un nouveau protocole expérimental permettant de suivre la déformation de la surface des échantillons au cours du chargement par la technique de corrélation d'images ;
 - de l'adaptation du programme de pilotage de la machine d'essai et d'acquisition des données permettant la synchronisation de la prise d'image et l'acquisition des capteurs de force et de déplacement ;
 - Le développement d'une nouvelle machine de taillage pour réduire le temps de préparation des échantillons et d'assurer la meilleure reproductibilité possible des échantillons.
- La deuxième phase a consisté en la réalisation des expériences en compression et en extension afin de générer les différents types de fracture/bande de localisation de la déformation en utilisant la technique de corrélation d'images pour calculer le champ de déformation en surface des échantillons.
- La troisième partie a consisté quant à elle à analyser les données expérimentales pour caractériser les modalités d'initiation et d'évolution des différentes bandes de localisation de la déformation en fonction du régime de contrainte et de la pression de confinement. Les résultats expérimentaux obtenus ont été confrontés à la caractérisation détaillée des propriétés constitutives de GRAM1 (Mas et Chemenda, (2015) [92])

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

1. L'initiation des bandes de déformation est bien identifiée et leur évolution peut être suivie pendant les essais par la technique de corrélation d'images. Les résultats obtenus montrent qu'à la pression de confinement $P_c = P_{bd} = 0.3$ MPa correspondant à la transition "fragile-ductile" dans les essais en compression, les bandes de déformation observées à la surface de l'échantillon se forment séquentiellement et se développent (s'épaississent) avec le chargement pour créer un réseau de bandes de déformation conjuguées. Ce réseau comprend deux types de bandes : les bandes de déformation majeures et les bandes de déformation secondaires. Les bandes de déformation majeures traversent toute la hauteur de l'échantillon et sont toujours actives pendant toute la durée de l'essai. À l'inverse, les bandes secondaires ne traversent pas tout l'échantillon et se connectent à une bande majeure. Le motif de ce réseau de bandes expérimental est très similaire à celui obtenu dans les modèles numériques.

2. La formation et l'évolution d'une bande de déformation est dépendant de l'évolution du module d'écroutissage h et du coefficient de dilatance β en fonction de la contrainte moyenne σ_m et la déformation inélastique cisailante équivalente accumulée $\bar{\gamma}^p$. À la contrainte moyenne correspondant à la transition fragile-ductile $\sigma_m = \sigma_{bd}$, h passe d'une valeur positive à négative puis devient à nouveau positif avec l'augmentation de $\bar{\gamma}^p$, alors que β augmente pour passer d'une valeur négative (compactance) à positive (dilatance), puis réduit pour repasser à une valeur négative. Ainsi, la compaction est associée au durcissement, tandis que la dilatance est associée à l'adoucissement. Par conséquent, la localisation de la déformation est supposée avoir été initiée à $h < 0$ ($\beta > 0$) et évolue le long de la même bande jusqu'à ce que h devienne positif ($h > 0$ ou $\beta < 0$). Ceci explique pourquoi l'évolution d'une bande individuelle comprend sa propagation et son épaississement et ce processus est accompagné par la formation (ou réactivation) de nouvelles bandes et aboutit au développement d'un réseau de bandes.

3. Les fractures horizontales (parallèles à σ_1) se forment dans les essais en extension avec une contrainte axiale σ_3 à la rupture qui augmente de négatif (traction) vers positif (compression) avec l'augmentation de la pression de confinement P_c . La forme en bobine de l'échantillon conduit à une augmentation de la résistance à la traction du matériau en fonction de P_c . Nos résultats présentent une transition continue de la fracture extensive à la fracture cisailante avec une augmentation de la contrainte compressive. Ceci est en accord avec les résultats obtenus pour les essais en extension réalisés sur des roches naturelles (Ramsey et Chester, (2004) [121]; Bobich (2005) [23]).

La cale utilisée comme concentrateur de contrainte dans les essais en extension réalisés à la pression de confinement correspondant à la transition fragile-ductile ($P_c = 0.7 - 0.8$ MPa) n'affecte pas la valeur de la contrainte axiale σ_3 à la rupture et permet également de manifester une fracture parallèles à σ_1 et de guider le point d'initiation de la fracture. Les cartes de déformations axiales obtenues par corrélation d'images montrent une concentration de la déformation à l'endroit où la cale est collée et la formation de la fracture dès que la contrainte axiale σ_3 atteint sa valeur minimale.

Bibliographie

- [1] G. B. O. Ple, E. Astudillo de la Vega and . Bayard. Biaxial tensile behavior of the reactive powder concrete. *ACI Special Publication*, 209, 2002.
- [2] L. Allais, M. Bornert, T. Bretheau, and D. Caldemaison. Experimental characterization of the local strain field in a heterogeneous elastoplastic material. *Acta Metallurgica et materialia*, 42(11) :3865–3880, 1994.
- [3] R. Ambu, F. Aymerich, and F. Bertolino. Investigation of the effect of damage on the strength of notched composite laminates by digital image correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 40(5) :451–461, 2005.
- [4] B. K. Atkinson. *Fracture mechanics of rock*. Elsevier, 2015.
- [5] A. Aydin. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4-5) :913–930, 1978.
- [6] A. Aydin and R. Ahmadov. Bed-parallel compaction bands in aeolian sandstone : their identification, characterization and implications. *Tectonophysics*, 479(3) :277–284, 2009.
- [7] A. Aydin, R. I. Borja, and P. Eichhubl. Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock. *Journal of Structural Geology*, 28(1) :83–98, 2006.
- [8] A. Aydin and A. M. Johnson. Analysis of faulting in porous sandstones. *Journal of Structural Geology*, 5(1) :19–31, 1983.
- [9] C. Badulescu. *Calcul précis des déformations planes par la méthode de la grille. Application à l'étude d'un multicristal d'aluminium*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2010.
- [10] D. Bahat. Tectonofractography. In *Tectonofractography*, pages 239–324. Springer, 1991.
- [11] D. Bahat and T. Engelder. Surface morphology on cross-fold joints of the appalachian plateau, new york and pennsylvania. *Tectonophysics*, 104(3) :299–313, 1984.
- [12] G. Ballas, R. Soliva, A. Benedicto, and J.-P. Sizun. Control of tectonic setting and large-scale faults on the basin-scale distribution of deformation bands in porous sandstone (provence, france). *Marine and Petroleum Geology*, 55 :142–159, 2014.
- [13] P. Baud, E. Klein, and T.-f. Wong. Compaction localization in porous sandstones : spatial evolution of damage and acoustic emission activity. *Journal of Structural Geology*, 26(4) :603–624, 2004.
- [14] P. Baud, P. Meredith, and E. Townend. Permeability evolution during triaxial compaction of an anisotropic porous sandstone. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 117(B5), 2012.

- [15] P. Baud, A. Schubnel, and T.-f. Wong. Dilatancy, compaction, and failure mode in solnhofen limestone. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 105(B8) :19289–19303, 2000.
- [16] V. Bense, E. Van den Berg, and R. Van Balen. Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments; the roer valley rift system, the netherlands. *Hydrogeology Journal*, 11(3) :319–332, 2003.
- [17] L. Berka, M. Sova, and G. Fischer. Residual stress evaluation by microscopic strain measurement. *Experimental techniques*, 22(3) :22–25, 1998.
- [18] P. Bésuelle. *Déformation et rupture dans les roches tendres et les sols indurés : comportement homogène et localisation*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 1999.
- [19] P. Bésuelle. Compacting and dilating shear bands in porous rock : Theoretical and experimental conditions. *J. geophys. Res*, 106(13) :435–13, 2001.
- [20] P. Bésuelle, J. Desrues, and S. Raynaud. Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a vosges sandstone in a triaxial cell. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(8) :1223–1237, 2000.
- [21] A. R. Bhandari and J. INDUE. Experimental study of strain rates effects on strain localization characteristics of soft rocks. *Soils and Foundations*, 45(1) :125–140, 2005.
- [22] J.-L. Blès and B. Feuga. La fracturation des roches. 1981.
- [23] J. K. Bobich. *Experimental analysis of the extension to shear fracture transition in Berea sandstone*. PhD thesis, Texas A&M University, 2005.
- [24] R. Boissière. *Effet de la température sur les capacités de mise en forme d'alliages de magnésium corroyés*. PhD thesis, Grenoble, INPG, 2008.
- [25] M. Bornert. X-ray micro ct for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, 118 :35, 2010.
- [26] M. Bornert, F. Brémand, P. Doumalin, J.-C. Dupré, M. Fazzini, M. Grédiac, F. Hild, S. Mistou, J. Molimard, J.-J. Orteu, et al. Assessment of digital image correlation measurement errors : methodology and results. *Experimental mechanics*, 49(3) :353–370, 2009.
- [27] W. Brace. An extension of the griffith theory of fracture to rocks. *Journal of Geophysical Research*, 65(10) :3477–3480, 1960.
- [28] W. F. Brace. Brittle fracture of rocks, state of stress in the earth's crust wr judd, 110–178, 1964.
- [29] S. Cattaneo and G. Rosati. Effect of different boundary conditions in direct tensile tests : experimental results. *Magazine of Concrete Research*, 51(5) :365–374, 1999.
- [30] C. Chang and B. Haimson. True triaxial strength and deformability of the german continental deep drilling program (ktb) deep hole amphibolite. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 105(B8) :18999–19013, 2000.
- [31] I. Chasiotis and W. G. Knauss. A new microtensile tester for the study of mems materials with the aid of atomic force microscopy. *Experimental Mechanics*, 42(1) :51–57, 2002.

- [32] A. Chemenda. The formation of shear-band/fracture networks from a constitutive instability : Theory and numerical experiment. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 112(B11), 2007.
- [33] A. Chemenda. The formation of tabular compaction-band arrays : theoretical and numerical analysis. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57(5) :851–868, 2009.
- [34] A. Chemenda, S.-H. Nguyen, J.-P. Petit, and J. Ambre. Mode i cracking versus dilatancy banding : Experimental constraints on the mechanisms of extension fracturing. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 116(B4), 2011.
- [35] A. I. Chemenda. Origin of compaction bands : Anti-cracking or constitutive instability? *Tectonophysics*, 499(1) :156–164, 2011.
- [36] A. I. Chemenda, G. Ballas, and R. Soliva. Impact of a multilayer structure on initiation and evolution of strain localization in porous rocks : Field observations and numerical modeling. *Tectonophysics*, 631 :29–36, 2014.
- [37] A. I. Chemenda, S.-H. Nguyen, J.-P. Petit, and J. Ambre. Experimental evidences of transition from mode i cracking to dilatancy banding. *Comptes Rendus Mécanique*, 339(4) :219–225, 2011.
- [38] A. I. Chemenda, C. Wibberley, and E. Sallet. Evolution of compactive shear deformation bands : Numerical models and geological data. *Tectonophysics*, 526 :56–66, 2012.
- [39] S. Choi and S. Shah. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. *Experimental Mechanics*, 37(3) :307–313, 1997.
- [40] T. Chu, W. Ranson, and M. Sutton. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental mechanics*, 25(3) :232–244, 1985.
- [41] T. Coudert. *Reconstruction tridimensionnelle du volume intérieur d'une chaussure : évaluation du chaussant*. PhD thesis, Chambéry, 2005.
- [42] J. Cugnoni, J. Botsis, V. Sivasubramaniam, and J. JANCZAK-RUSCH. Experimental and numerical studies on size and constraining effects in lead-free solder joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 30(5) :387–399, 2007.
- [43] J. Dautriat, M. Bornert, N. Gland, A. Dimanov, and J. Raphanel. Localized deformation induced by heterogeneities in porous carbonate analysed by multi-scale digital image correlation. *Tectonophysics*, 503(1) :100–116, 2011.
- [44] G. H. Davis. *Structural geology of the Colorado Plateau region of southern Utah, with special emphasis on deformation bands*, volume 342. Geological Society of America, 1999.
- [45] G. H. Davis and S. Reynolds. Structural geology of rocks and regions. In *Wiley*, 1996.
- [46] J. G. Dennis. *Structural geology : an introduction*. William C Brown Pub, 1987.
- [47] J. Desrues, R. Chambon, M. Mokni, and F. Mazerolle. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, 46(3) :529–546, 1996.
- [48] P. Doumalin. *Microextensometrie locale par correlation d'images numeriques application aux etudes micromecaniques par microscopie electronique a balayage*. PhD thesis, 2000.

- [49] X. Du Bernard, P. Eichhubl, and A. Aydin. Dilation bands : A new form of localized failure in granular media. *Geophysical Research Letters*, 29(24) :29–1, 2002.
- [50] S. Ehrenberg. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite : examples from the norwegian continental shelf. *AAPG Bulletin*, 77(7) :1260–1286, 1993.
- [51] P. Eichhubl, J. N. Hooker, and S. E. Laubach. Pure and shear-enhanced compaction bands in aztec sandstone. *Journal of Structural Geology*, 32(12) :1873–1886, 2010.
- [52] A. El Bied. *Etude expérimentale et modélisation du comportement des roches granulaires : écrouissage, radoucissement et rupture en mode localisé*. PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech, 2000.
- [53] T. Engelder. Loading paths to joint propagation during a tectonic cycle : an example from the appalachian plateau, usa. *Journal of Structural Geology*, 7(3) :459–476, 1985.
- [54] D. Faulkner, C. Jackson, R. Lunn, R. Schlische, Z. Shipton, C. Wibberley, and M. Withjack. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11) :1557–1575, 2010.
- [55] R. J. Finno and A. L. Rechenmacher. Effects of consolidation history on critical state of sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(4) :350–360, 2003.
- [56] R. C. Fletcher and D. D. Pollard. Anticrack model for pressure solution surfaces. *Geology*, 9(9) :419–424, 1981.
- [57] J. Fortin, A. Schubnel, and Y. Guéguen. Elastic wave velocities and permeability evolution during compaction of bleurswiller sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(7) :873–889, 2005.
- [58] J. Fortin, S. Stanchits, G. Dresen, and Y. Guéguen. Acoustic emission and velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 111(B10), 2006.
- [59] J. Fortin, S. Stanchits, G. Dresen, and Y. Gueguen. Acoustic emissions monitoring during inelastic deformation of porous sandstone : comparison of three modes of deformation. In *Rock Physics and Natural Hazards*, pages 823–841. Springer, 2009.
- [60] H. Fossen, R. A. Schultz, Z. K. Shipton, and K. Mair. Deformation bands in sandstone : a review. *Journal of the Geological Society*, 164(4) :755–769, 2007.
- [61] H. Fossen, R. A. Schultz, and A. Torabi. Conditions and implications for compaction band formation in the navajo sandstone, utah. *Journal of Structural Geology*, 33(10) :1477–1490, 2011.
- [62] M. Fouinneteau and A. Pickett. Failure characterisation of heavy tow braided composites using digital image correlation (dic). In *Applied Mechanics and Materials*, volume 5, pages 399–406. Trans Tech Publ, 2006.
- [63] C. Franck, S. Hong, S. Maskarinec, D. Tirrell, and G. Ravichandran. Three-dimensional full-field measurements of large deformations in soft materials using confocal microscopy and digital volume correlation. *Experimental Mechanics*, 47(3) :427–438, 2007.

- [64] C. Froidevaux, C. Paquin, and M. Souriau. Tectonic stresses in France : in situ measurements with a flat jack. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 85(B11) :6342–6346, 1980.
- [65] J. J. Gibson. The perception of the visual world. 1950.
- [66] M. Guler, T. B. Edil, and P. J. Bosscher. Measurement of particle movement in granular soils using image analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13(2) :116–122, 1999.
- [67] P. Hancock. Brittle microtectonics : principles and practice. *Journal of structural geology*, 7(3) :437–457, 1985.
- [68] P. L. Hancock and T. Engelder. Neotectonic joints. *Geological Society of America Bulletin*, 101(10) :1197–1208, 1989.
- [69] K. Hatanaka, T. Fujimitsu, and H. Inoue. A measurement of three-dimensional strains around a creep-crack tip. *Experimental mechanics*, 32(3) :211–217, 1992.
- [70] J. Hesthammer, P. A. Bjorkum, and L. Watts. The effect of temperature on sealing capacity of faults in sandstone reservoirs : Examples from the gullfaks and gullfaks sor fields, north sea. *AAPG bulletin*, 86(10), 2002.
- [71] R. Hill. Analysis of deformation bands in the aztec sandstone. *Valley of Fire State Park, Nevada [MS thesis] : Las Vegas, University of Nevada*, 1, 1989.
- [72] K. Issen and J. Rudnicki. Theory of compaction bands in porous rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A : Solid Earth and Geodesy*, 26(1) :95–100, 2001.
- [73] Y. Ji, S. A. Hall, P. Baud, and T.-f. Wong. Characterization of pore structure and strain localization in majella limestone by x-ray computed tomography and digital image correlation. *Geophysical Journal International*, 200(2) :701–719, 2015.
- [74] E. Jiménez-Piqué, L. Dortmans, and G. De With. Fracture and crack profile fictitious crack modeling of porous poly (methyl methacrylate). *Journal of Polymer Science Part B : Polymer Physics*, 41(10) :1112–1122, 2003.
- [75] C. Jorand. *Modélisation expérimentale de la fracturation d'un milieu sédimentaire*. PhD thesis, Université Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [76] C. Jorand, A. Chemenda, and J.-P. Petit. Formation of parallel joint sets and shear band/fracture networks in physical models. *Tectonophysics*, 581 :84–92, 2012.
- [77] T. Keating, P. Wolf, and F. Scarpace. An improved method of digital image correlation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41(8), 1975.
- [78] S. Kishimoto, X. Huimin, and N. Shinya. Electron moiré method and its application to micro-deformation measurement. *Optics and lasers in engineering*, 34(1) :1–14, 2000.
- [79] W. Knauss and W. Zhu. Nonlinearly viscoelastic behavior of polycarbonate. i. response under pure shear. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 6(3) :231–269, 2002.
- [80] B. R. Kulander, C. C. Barton, and S. L. Dean. Application of fractography to core and outcrop fracture investigations. Technical report, Department of Energy, Morgantown, WV (USA). Morgantown Energy Research Center, 1979.

- [81] B. R. Kulander, S. L. Dean, and B. J. Ward. *Fractured core analysis : interpretation, logging, and use of natural and induced fractures in core*. Number 8. Amer Assn of Petroleum Geologists, 1990.
- [82] F. Labbe and R. R. Cordero. Monitoring the plastic deformation progression of a specimen undergoing tensile deformation by moiré interferometry. *Measurement Science and Technology*, 16(7) :1469, 2005.
- [83] F. Lagattu, F. Bridier, P. Villechaise, and J. Brillaud. In-plane strain measurements on a microscopic scale by coupling digital image correlation and an in situ sem technique. *Materials Characterization*, 56(1) :10–18, 2006.
- [84] P. Lanata. *Full-field experimental characterization of mechanical behaviour and failure in a porous rock in plane strain compression : homogeneous deformation and strain localization*. PhD thesis, Grenoble Alpes, 2015.
- [85] N. Lenoir, M. Bornert, J. Desrues, P. Bésuelle, and G. Viggiani. Volumetric digital image correlation applied to x-ray microtomography images from triaxial compression tests on argillaceous rock. *Strain*, 43(3) :193–205, 2007.
- [86] X. Li, W. Xu, M. Sutton, M. Mello, et al. In situ nanoscale in-plane deformation studies of ultrathin polymeric films during tensile deformation using atomic force microscopy and digital image correlation techniques. *Nanotechnology, IEEE Transactions on*, 6(1) :4–12, 2007.
- [87] J. J. Liao, M.-T. Yang, and H.-Y. Hsieh. Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(5) :837–849, 1997.
- [88] J. Liu and M. Iskander. Adaptive cross correlation for imaging displacements in soils. *Journal of computing in civil engineering*, 18(1) :46–57, 2004.
- [89] S. P. Ma, L. G. Wang, and G. C. Jin. Damage evolution inspection of rock using digital speckle correlation method (dscm). In *Key engineering materials*, volume 326, pages 1117–1120. Trans Tech Publ, 2006.
- [90] S. Marshak and B. van der Pluijm. *Earth structure : An introduction to structural geology and tectonics*, 1997.
- [91] D. Mas and A. Chemenda. Dilatancy factor constrained from the experimental data for rocks and rock-type material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67 :136–144, 2014.
- [92] D. Mas and A. I. Chemenda. An experimentally constrained constitutive model for geomaterials with simple friction–dilatancy relation in brittle to ductile domains. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 77 :257–264, 2015.
- [93] F. McClintock and J. Walsh. Friction on griffith cracks in rocks under pressure. In *Proc. 4th US Nat. Congr. Appl. Mech*, volume 2, pages 1015–1022, 1962.
- [94] D. T. McConaughy and T. Engelder. Joint initiation in bedded clastic rocks. *Journal of Structural Geology*, 23(2) :203–221, 2001.
- [95] P. J. Millar and D. R. Murray. Triaxial testing of weak rocks including the use of triaxial extension tests. In *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*. ASTM International, 1988.

- [96] K. Mogi. Effect of the intermediate principal stress on rock failure. *Journal of Geophysical Research*, 72(20) :5117–5131, 1967.
- [97] P. Mollema and M. Antonellini. Compaction bands : a structural analog for anti-mode i cracks in aeolian sandstone. *Tectonophysics*, 267(1) :209–228, 1996.
- [98] S. H. Nguyen. *Étude expérimentale de la fracturation et du comportement constitutif d'un matériau frictionnel et dilatant analogue de roche réservoir*. PhD thesis, Nice, 2009.
- [99] S.-H. Nguyen, A. Chemenda, and J. Ambre. Influence of the loading conditions on the mechanical response of granular materials as constrained from experimental tests on synthetic rock analoguematerial. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1) :103–115, 2011.
- [100] T. L. Nguyen. *Endommagement localisé dans les roches tendres. Expérimentation par mesure de champs*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2011.
- [101] G. Nicoletto. On the visualization of heterogeneous plastic strains by moiré interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 37(4) :433–442, 2002.
- [102] G. Nicoletto, G. Anzelotti, and E. Riva. Mesoscopic strain fields in woven composites : experiments vs. finite element modeling. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3) :352–359, 2009.
- [103] T. Nishioka, J. Yao, K. Sakakura, and J. S. Epstein. Measurements of near-tip displacement fields, separated j integrals and separated energy release rates for interfacial cracks using phase-shifting moire interfrometry. *JSME International Journal Series A*, 43(4) :334–342, 2000.
- [104] M. Obata, H. Shimada, and A. Kawasaki. Fine-grid method for large-strain analysis near a notch tip. *Experimental Mechanics*, 23(2) :146–151, 1983.
- [105] S. Okubo and K. Fukui. Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, volume 33, pages 549–556. Elsevier, 1996.
- [106] A. Ord, I. Vardoulakis, and R. Kajewski. Shear band formation in gosford sandstone. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, volume 28, pages 397–409, 1991.
- [107] M. Orkisz and P. Clarysse. Estimation du flot optique en présence de discontinuités : une revue. *Traitement du signal*, 13(5) :489–513, 1996.
- [108] B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review. *Measurement science and technology*, 20(6) :062001, 2009.
- [109] A. V. Panin, A. A. Panina, and Y. F. Ivanov. Deformation macrolocalisation and fracture in ultrafine-grained armco iron. *Materials Science and Engineering : A*, 486(1) :267–272, 2008.
- [110] G. Perrin and J. Leblond. Rudnicki and rice's analysis of strain localization revisited. *J. Appl. Mech*, 60(4) :842–846, 1993.
- [111] W. Peters and W. Ranson. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical engineering*, 21(3) :213427–213427, 1982.

- [112] J.-P. Petit and M. Barquins. Can natural faults propagate under mode II conditions? *Tectonics*, 7(6) :1243–1256, 1988.
- [113] H.-J. Pohl, O. Weibrecht, and U. Wiesenburg. Arrangement for control of aerial cameras, Dec. 14 1976. US Patent 3,997,795.
- [114] D. D. Pollard, P. Segall, and P. T. Delaney. Formation and interpretation of dilatant echelon cracks. *Geological Society of America Bulletin*, 93(12) :1291–1303, 1982.
- [115] T. Pottier, F. Toussaint, and P. Vacher. An inverse method for material parameters determination of titanium samples under tensile loading. *International Journal of Material Forming*, 1(1) :21–24, 2008.
- [116] G. Poupinet, N. Arndt, and P. Vacher. Seismic tomography beneath stable tectonic regions and the origin and composition of the continental lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1) :89–101, 2003.
- [117] N. J. Price. Mechanics of jointing in rocks. *Geological Magazine*, 96(02) :149–167, 1959.
- [118] N. J. Price and J. W. Cosgrove. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, 1990.
- [119] J. G. Ramsay and M. I. Huber. *The techniques of modern structural geology : Folds and fractures*, volume 2. Academic press, 1987.
- [120] J. G. Ramsay and R. Lisle. The techniques of modern structural geology, volume 3 : Applications of continuum mechanics in structural geology. *Academic, San Diego, Calif*, 2000.
- [121] J. M. Ramsey and F. M. Chester. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture. *Nature*, 428(6978) :63–66, 2004.
- [122] G. C. Rawling and L. B. Goodwin. Cataclasis and particulate flow in faulted, poorly lithified sediments. *Journal of Structural Geology*, 25(3) :317–331, 2003.
- [123] A. L. Rechenmacher and R. J. Finno. Digital image correlation to evaluate shear banding in dilative sands. *ASTM geotechnical testing journal*, 27(1) :13–22, 2004.
- [124] O. Reynolds. Lvii. on the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. with experimental illustrations. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 20(127) :469–481, 1885.
- [125] J. Rice. The initiation and growth of shear bands. Technical report, 1973.
- [126] T. Rives. *Mécanismes de formation des diaclases dans les roches sédimentaires : approche expérimentale et comparaison avec quelques exemples naturels*. PhD thesis, 1992.
- [127] J. W. Rudnicki and J. Rice. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 23(6) :371–394, 1975.
- [128] E. Sallet and C. A. Wibberley. Evolution of cataclastic faulting in high-porosity sandstone, bassin du sud-est, provence, france. *Journal of Structural Geology*, 32(11) :1590–1608, 2010.

- [129] F. Santarelli. Etude expérimentale de la bifurcation dans les roches. *Revue Française de géotechnique*, (50), 1990.
- [130] C. Scholz. Correction to paper by ch scholz experimental study of the fracturing process in brittle rock. *Journal of Geophysical Research*, 73(14) :4794–4794, 1968.
- [131] R. A. Schultz. Scaling and paleodepth of compaction bands, nevada and utah. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 114(B3), 2009.
- [132] X. Shi, Y. Zhang, and W. Zhou. Determination of fracture toughness of underfill/chip interface with digital image speckle correlation technique. *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, 30(1) :101–109, 2007.
- [133] G. Sierra, B. Wattrisse, and C. Bordreuil. Structural analysis of steel to aluminum welded overlap joint by digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 48(2) :213–223, 2008.
- [134] R. Soliva, R. A. Schultz, G. Ballas, A. Taboada, C. Wibberley, E. Sallet, and A. Benedicto. A model of strain localization in porous sandstone as a function of tectonic setting, burial and material properties ; new insight from provence (southern france). *Journal of Structural Geology*, 49 :50–63, 2013.
- [135] S. Stanchits, J. Fortin, Y. Gueguen, and G. Dresen. Initiation and propagation of compaction bands in dry and wet bentheim sandstone. In *Rock Physics and Natural Hazards*, pages 846–868. Springer, 2009.
- [136] K. R. Sternlof, J. W. Rudnicki, and D. D. Pollard. Anticrack inclusion model for compaction bands in sandstone. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 110(B11), 2005.
- [137] V. Storvoll, K. Bjørlykke, D. Karlsen, and G. Saigal. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite : a study of the jurassic garn formation from the kristin and lavrans fields, offshore mid-norway. *Marine and Petroleum Geology*, 19(6) :767–781, 2002.
- [138] J. Sulem. Bifurcation theory and localization phenomena. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(8-9) :989–1009, 2010.
- [139] J. Sulem and H. Ouffroukh. Shear banding in drained and undrained triaxial tests on a saturated sandstone : Porosity and permeability evolution. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2) :292–310, 2006.
- [140] J. Sulem, I. Vardoulakis, E. Papamichos, A. Oulahna, and J. Tronvoll. Elasto-plastic modelling of red wildmoor sandstone. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 4(3) :215–245, 1999.
- [141] Y. Sun and J. H. Pang. Digital image correlation for solder joint fatigue reliability in microelectronics packages. *Microelectronics Reliability*, 48(2) :310–318, 2008.
- [142] Z. Sun, J. S. Lyons, and S. R. McNeill. Measuring microscopic deformations with digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 27(4) :409–428, 1997.
- [143] J. Suppe. *Principles of structural geology*. Prentice Hall, 1985.
- [144] M. Sutton, C. Mingqi, W. Peters, Y. Chao, and S. McNeill. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3) :143–150, 1986.

- [145] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, and S. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3) :133–139, 1983.
- [146] M. A. Sutton, J. J. Orteu, and H. Schreier. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements : basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [147] T. Tran Anh. *Corrélation entre les charges d'espace accumulées et les déformations mécaniques induites dans des isolants organiques solides soumis à un champ électrique*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [148] R. J. Twiss and E. M. Moores. *Structural geology*. Macmillan, 1992.
- [149] S. Ukyo and M. Masuda. Investigation of the true stress-strain relation in shear using the digital image correlation method. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)*, 2004.
- [150] E. Umezaki and T. Ichikawa. Measurement of deformation of epoxy resin plates with an embedded sma wire using digital image correlation. *International Journal of Modern Physics B*, 17(08n09) :1750–1755, 2003.
- [151] P. Vacher. Strain measurement in tests on fibre fabric by image correlation method. *Advanced Composites Letters*, 11(1) :pp–15, 2002.
- [152] P. Vacher, S. Dumoulin, F. Morestin, and S. Mguil-Touchal. Bidimensional strain measurement using digital images. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 213(8) :811–817, 1999.
- [153] V. Vajdova, P. Baud, and T.-f. Wong. Compaction, dilatancy, and failure in porous carbonate rocks. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 109(B5), 2004.
- [154] I. Vardoulakis and J. Sulem. *Bifurcation analysis in geomechanics*. Chapman & Hall, 1995.
- [155] G. Vendroux, N. Schmidt, and W. Knauss. Submicron deformation field measurements : Part 3. demonstration of deformation determinations. *Experimental Mechanics*, 38(3) :154–160, 1998.
- [156] G. Vendroux and W. Knauss. Submicron deformation field measurements : Part 1. developing a digital scanning tunneling microscope. *Experimental Mechanics*, 38(1) :18–23, 1998.
- [157] G. Vendroux and W. Knauss. Submicron deformation field measurements : Part 2. improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 38(2) :86–92, 1998.
- [158] G. Viggiani and J. Desrues. *Experimental observation of shear banding in stiff clay*. Verlag Glückauf Essen, pages 649–658, 2004.
- [159] B. Voight and B. St Pierre. Stress history and rock stress. *3rd Rock Mech. Cong. ISRM*, 2 :580–582, 1974.
- [160] H. Wang, H. Xie, Y. Ju, and Q. Duan. Error analysis of digital speckle correlation method under scanning electron microscope. *Experimental Techniques*, 30(2) :42–45, 2006.
- [161] D. W. Whitten and J. R. V. Brooks. *The penguin dictionary of geology*. Technical report, 1972.

-
- [162] T.-f. Wong and P. Baud. The brittle-ductile transition in porous rock : A review. *Journal of Structural Geology*, 44 :25–53, 2012.
- [163] T.-f. Wong, P. Baud, and E. Klein. Localized failure modes in a compactant porous rock. *Geophysical Research Letters*, 28(13) :2521–2524, 2001.
- [164] T.-f. Wong, C. David, and W. Zhu. The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones : Mechanical deformation. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 102(B2) :3009–3025, 1997.
- [165] C. A. Zapffe and M. Clogg Jr. Fractography—a new tool for metallurgical research. *Trans. ASM*, 34 :71–107, 1945.
- [166] D. Zhang, M. Luo, and D. D. Arola. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation. *Optical Engineering*, 45(3) :033605–033605, 2006.
- [167] W. Zhu, L. G. Montési, and T.-f. Wong. A probabilistic damage model of stress-induced permeability anisotropy during cataclastic flow. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 112(B10), 2007.