



**HAL**  
open science

# Endommagement localisé dans les roches tendres. Expérimentation par mesure de champs

Tuong Lam Nguyen

► **To cite this version:**

Tuong Lam Nguyen. Endommagement localisé dans les roches tendres. Expérimentation par mesure de champs. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENI013 . tel-00576834v2

**HAL Id: tel-00576834**

**<https://theses.hal.science/tel-00576834v2>**

Submitted on 19 Mar 2012

**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.

**THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE**

Spécialité : Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Electrochimie

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Tuong Lam NGUYEN**

Thèse dirigée par **Gioacchino VIGGIANI**

codirigée par **Pierre VACHER** et **Stephen HALL**

préparée au sein du **Laboratoire 3S-R** et du **Laboratoire SYMME**  
dans **l'École Doctorale IMEP2**

**Endommagement localisé dans les  
roches tendres – expérimentation  
par mesure de champs**

Thèse soutenue publiquement le **23 février 2011** devant le jury  
composé de :

**M. François RENARD**

Professeur, Université Joseph Fourier (Président du jury)

**M. Claudio SCAVIA**

Professeur, Politecnico di Torino (Rapporteur)

**M. André VERVOORT**

Professeur, Katholieke Universiteit Leuven (Rapporteur)

**M. Fabrice MORESTIN**

Maitre de conférences, INSA de Lyon (Examineur)

**M. Jean SULEM**

Professeur, École Nationale des Ponts et Chaussées (Examineur)

**M. Gioacchino VIGGIANI**

Professeur, Université Joseph Fourier (Directeur de thèse)

**M. Pierre VACHER**

Professeur, Université de Savoie (Co-directeur de thèse)

**M. Stephen HALL**

Chercheur, CNRS (Co-directeur de thèse)





# Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à mes trois directeurs de thèse : **Cino Viggiani**, **Pierre Vacher** et **Steve Hall**, qui ont autant contribué à la réussite de cette thèse. Merci à vous de m'avoir offert la chance de connaître le monde des roches (particulièrement, une roche napolitaine que l'on ne trouvera (mal)heureusement jamais au Vietnam), de m'avoir appris à jouer avec des photos et à entendre les « cris de roches », de m'avoir consacré le temps de discuter de choses aussi bien scientifiques que non-scientifiques. Merci à vous qui, par, votre disponibilité, vos remarques, vos conseils précieux et votre aide, m'avez permis de mener à bien ce travail. Je tiens également à vous remercier sincèrement pour la gentillesse, la sympathie et l'amitié que vous m'avez témoignées pendant ces années de thèse... Travailler avec vous était, pour moi, un très grand plaisir.

Je tiens à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail. Je souhaite, plus particulièrement, remercier **André Vervoort** et **Claudio Scavia** d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, d'avoir attentivement lu mon mémoire, de s'être déplacés pour participer à ma soutenance. Merci à **Jean Sulem**, à **Fabrice Morestin** d'avoir accepté de faire partie du Jury, et à **François Renard** d'avoir accepté de le présider.

Par ailleurs, je remercie le cluster **MACODEV** (Matériaux et conception pour un Développement durable) de la région Rhône-Alpes d'avoir financé ses travaux et rendu cette étude possible.

Un grand merci à **Georg Dresen** et à toute son équipe, au GeoForschungsZentrum (GFZ) de Potsdam en Allemagne, pour leur accueil, de m'avoir permis d'utiliser leur formidable système d'acquisition des EA. En particulier, je souhaite de remercier vivement **Sergei Stanchits** d'avoir passé beaucoup de temps pour le traitement de données. Merci aux techniciens du laboratoire 3SR de m'avoir beaucoup aidé à faire fonctionner mes manip au laboratoire 3SR ; particulièrement à **Pascal** (scan ?) pour les scans tomographiques de mes échantillons.

Et maintenant, je voudrais remercier les amis que j'ai eu la chance de rencontrer pendant ces années de thèse. D'abord les polonais : **Michal**, **Ola**, **Krzysztof** qui ont passé avec moi de très bons moments (un peu trop) à l'O'Calagan, à EVE ainsi que dans la zone fumeur du labo. Je vous remercie pour les conversations (souvent vides de sens) dans la queue devant le resto qui rendent la vie plus agréable et améliorent énormément mon anglais (quand même). Je remercie les copains qui ont (malheureusement) partagé le bureau super « propre » avec moi : **Michal**, **Jérémy**, **Mohammad**, **Nando** et **Khadi** (*ma prof de français*). Merci aux responsables de la K'fet : **Anca**, **Ola**, **Hana**, **Matias** et **Khadi** de m'avoir fourni du café (d'énergie) pendant ces années. Je n'oublie pas les grèces : **Christina** (ou Cri) et **Elma**. Merci à Elma de m'avoir aidé quand j'étais à Potsdam, à **Daiki** pour les aides au scanner, à **Nicolas** pour la résiliation des échantillons au CEA. Enfin un sincère merci à tous ceux que je ne peux pas citer ici.

Je termine ici en remerciant ma famille et mes amis vietnamiens (en vietnamien) :

Rất cảm ơn anh chủ tịch cũng như các thành viên khác của tập thể sinh viên Việt Nam tại 3SR (theo tiếng việt: Sắp Sửa Sướng Rồi) đã thức suốt đêm chuẩn bị Pot và luôn tích cực tham gia các buổi họp thường kỳ. Đặc biệt cảm ơn sự giúp đỡ của **Kiên** và **Lân** trong mấy tháng ở cùng tại avenue de Vizille, **Mạnh** đã cung cấp chỗ ăn ở (miễn phí?) trong những ngày cuối tại Grenoble. Cảm ơn **Tuấn** và **Tùng** đã đi tàu từ Lyon lên Grenoble (mặc dù không có 12-25) để tham dự buổi bảo vệ. Chúc mọi người gặt hái nhiều thành công trong cuộc sống, công việc và... thể thao (đặc biệt là môn bi lắc tại Grenoble). Hẹn gặp lại tại Việt Nam.

**Thanh Tú**, cảm ơn em đã đồng ỷ ở bên cạnh và kiên nhẫn động viên anh trong suốt 3 năm vừa qua (cũng như rất nhiều năm sau nữa).

Cuối cùng, cảm ơn sự giúp đỡ to lớn về mặt vật chất cũng như tinh thần của bố mẹ, anh chị và toàn thể gia đình trong hơn 4 (28) năm vừa qua. Chắc chắn sẽ không một lời cảm ơn nào đủ để nói lên sự biết ơn này !



# Résumé

La compréhension des phénomènes d'endommagement et de fissuration dans les roches est très importante dans de nombreuses applications de l'ingénierie (génie civil, génie pétrolier, séquestration de CO<sub>2</sub>, stockage de déchets nucléaires, *etc.*). La recherche dans ce domaine nécessite des études expérimentales avancées, pour mieux comprendre des processus qui ont une nature complexe (multi-échelle, multi-physique) et dont les mécanismes fondamentaux ne sont pas encore complètement compris. C'est l'objectif principal de notre travail, qui a recours à plusieurs méthodes de mesure de champs.

Le travail de recherche que nous présentons dans cette thèse concerne, tout d'abord, une étude expérimentale sur le processus de fissuration sous compression uniaxiale d'échantillons de roche ayant des entailles rectilignes (et ouvertes) inclinées par rapport à la direction du chargement. Ensuite, nous présentons une étude de l'évolution de la localisation des déformations vers la rupture dans des échantillons ayant une géométrie particulière à encoches arrondies ; cette géométrie (inspirée par les travaux de Meuwissen et *al.* (1998) sur les métaux) favorise la localisation de la déformation de cisaillement en compression uniaxiale avant l'apparition de fissures. Notre étude expérimentale a été réalisée sur deux matériaux différents: une roche naturelle d'origine volcanique (le Tuf de Naples) et une « roche » artificielle (le CPIR09).

Nous utilisons dans cette thèse une combinaison de trois techniques de mesure de champs : (i) la corrélation d'images numériques (*Digital Image Correlation*, DIC) pour les mesures des champs cinématiques à la surface d'échantillons; (ii) l'enregistrement d'Emissions Acoustiques (EA) et la localisation des sources des EA, qui permettent de suivre l'endommagement dans un échantillon au cours du chargement; (iii) la tomographie à Rayons-X, avant et après chaque essai, afin de caractériser les défauts et les discontinuités préexistants dans le volume des éprouvettes et de mieux comprendre la fissuration dans le volume.

Les techniques de DIC permettent d'obtenir des cartes de déplacement de la surface d'un échantillon durant sa déformation, à partir desquelles nous pouvons calculer, par dérivation spatiale, des champs de déformation. Cependant, la déformation n'est pas une description pertinente pour les fissures, qui sont des discontinuités de déplacement. Nous avons, donc, développé une méthode spécifique de post-traitement de DIC (la « DIC-F ») qui permet de caractériser quantitativement l'évolution des fissures, *i.e.*, tracer automatiquement les fissures et quantifier les sauts de déplacement (composantes normales et tangentielles) sur leur longueur.

Un grand nombre de résultats expérimentaux, qui sont dans certains cas tout à fait originaux, ont été obtenus dans notre travail. Nous avons mis notamment en évidence un nouveau mode de rupture dans le cas des échantillons présentant des entailles rectilignes : les « fissures compactantes » (observés pour le CPIR09). De plus, grâce à l'utilisation simultanée de plusieurs mesures de champs, nous avons pu caractériser la transition de la déformation de cisaillement localisée vers la fissuration dans des échantillons de Tuf de type Meuwissen. D'une part, l'analyse par DIC a montré l'évolution de la localisation des déformations en surface des échantillons. D'autre part, l'enregistrement des EA et les mesures ultrasonores ont mis en évidence la présence de micro-fissures qui se situent dans la zone de déformation localisée jusqu'à la formation de macro-fissures (quantifiées par DIC-F). L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus dans cette thèse constituent une base de données qui sera fort utile pour la modélisation de l'endommagement localisé et de la rupture dans les roches tendres.

Mots clé : Endommagement localisé, localisation des déformations, fissuration, mesure de champs, roche tendre.

# Abstract

The understanding of damage and fracture phenomena in rocks is very important in many engineering applications (civil engineering, petroleum engineering, CO<sub>2</sub> sequestration, nuclear waste storage, etc.). The research in this domain requires advanced experimental studies to better understand these complex (multi-scale, multi-physics) processes, for which the fundamental mechanisms are not yet totally understood. Addressing this experimental challenge, using a number of laboratory full-field measurement methods, is the main objective of our work in this thesis.

The research presented in this thesis concerns, firstly, an experimental study on the process of fracture in uniaxial and biaxial compression of rock samples containing narrow, rectilinear notches inclined with respect to the axis of loading. Secondly, we study the evolution of shear strain localisation towards fracturing and failure in specimens of the same materials with a particular geometry, involving two rounded notches. This geometry, inspired by the work of Meuwissen *et al.* (1998) for tension tests on metals, promotes the localisation of shear strain in simple compression before fracture. Two different materials were studied: a natural rock of volcanic origin (Neapolitan Tuff) and an artificial “rock” (CPIR09).

In the studies presented, three full-field measurement techniques have been employed in combination: (i) the Digital Image Correlation (DIC), for measurement of kinematic fields at a sample’s surface; (ii) Acoustic Emission measurements (AE) and AE source location, to follow the evolution of damage in samples during loading; (iii) X-ray tomography (pre-and post-mortem studies), to characterise pre-existing defects and discontinuities in the specimens and to better understand the fracturing in 3D.

DIC techniques allow the mapping of displacements over a sample surface during deformation. Strain fields can be determined from the spatial derivatives of these displacements. However, strain is not a pertinent measure for fractures, which are displacement discontinuities. Therefore, an extended DIC method (*Digital Image Correlation for Fracture DIC-F*) has been developed that allows quantitative characterisation of fracture evolution, through automatic tracing of discontinuities and their quantification in terms of the displacement jumps (decomposed into normal and tangential components) along their length.

A large number of experimental results were obtained in our work, which are in some cases quite original. For example, a new failure mode has been identified in samples with rectilinear notches: “compaction fractures” (observed in the CPIR09). In addition, interesting phenomena were observed in the study of the transition from localised shear deformation to fracture in samples of Tuff, with Meuwissen-type geometry, through the use of several full-field measurement techniques. On the one hand, DIC analysis revealed the evolution of strain localisation at the sample surface. On the other hand, AE monitoring and ultrasonic measurements highlighted the presence of damage (micro-cracks), which localised, within the zone of localised deformation, until the development of macro-fractures (quantified by DIC-F). These experimental results, with the others presented in this thesis, constitute a database that will be very useful for modelling of localised damage and fracture in soft rocks.

Keywords: localised damage, strain localisation, fracture, full-field measurement, soft rock.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>5</b>
1.1. Introduction	6
1.2. Généralités sur la mécanique de la rupture fragile	6
1.3. Observations de l'endommagement localisé et de la fissuration dans les roches	8
1.3.1. Fissures dans les roches	8
1.3.2. Propagation et coalescence de fissures à partir d'entailles préexistantes	10
1.4. Conclusion	25
<b>Chapitre 2 : TECHNIQUES DE MESURES DE CHAMPS ET MISE EN ŒUVRE</b>	<b>27</b>
2.1. Introduction	28
2.2. La corrélation d'images numériques	28
2.2.1. Corrélation d'images numériques 2D (DIC-2D)	29
2.2.2. Stéréo-corrélation d'images (SIC)	32
2.2.3. Logiciel de DIC et appareils photographiques	33
2.2.4. Quelques exemples d'utilisation de la DIC en géomécanique	38
2.3. L'émission acoustique (EA)	43
2.3.1. Définitions principales	43
2.3.2. Techniques de mesure des EA en laboratoire	44
2.3.3. Caractéristiques des signaux acoustiques	45
2.3.4. Techniques de localisation d'un événement	46
2.3.5. Quelques exemples d'étude de l'endommagement dans les roches par l'EA	47
2.3.6. Dispositifs de la technique des EA	54
2.4. La tomographie à rayons X (RX)	57
2.4.1. Principes de la méthode	57
2.4.2. Exemples d'utilisation de la tomographie RX dans l'étude de l'endommagement des géomatériaux	59
2.4.3. Appareil de tomographie à RX au laboratoire 3SR	62
2.5. Conclusion	64
<b>Chapitre 3 : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION QUANTITATIVE DE FISSURES PAR LA TECHNIQUE DIC-F</b>	<b>67</b>
3.1. Introduction	68
3.2. Méthodologie	68
3.2.1. Identification des discontinuités	70
3.2.2. Tracé des fissures	72
3.2.3. Quantification des sauts de déplacement	73

3.3. Incertitude sur la quantification des sauts de déplacement	76
3.3.1. Choix des méthodes de calcul des sauts de déplacement	78
3.3.2. Incertitude sur le tracé des fissures	79
3.4. Conclusion	82
<b>Chapitre 4 : MATERIAUX ETUDIES ET MACHINES D'ESSAI</b>	<b>83</b>
4.1. Introduction	84
4.2. Matériaux étudiés	84
4.2.1. Tuf à grains fins de Naples	84
4.2.2. CPIR09	86
4.2.3. Comparaison des deux matériaux	88
4.3. Machines de compression	88
4.3.1. Machine de traction/compression Instron	88
4.3.2. Appareil de compression en déformation plane	89
4.3.3. Appareil de compression servo-contrôlé (Material Test Systems - MTS)	90
4.4. Technique de mesure de la déformation globale d'un échantillon	90
4.5. Conclusion	93
<b>Chapitre 5 : FISSURATION DANS LES ROCHES TENDRES</b>	<b>95</b>
5.1. Introduction	96
5.2. Etude de la fissuration dans le Tuf	97
5.2.1. Configuration des échantillons entaillés de Tuf	97
5.2.2. Observations générales	98
5.2.3. Essai Tf-E-03	100
5.3. Etude de la fissuration dans le CPIR09	109
5.3.1. Configuration des échantillons	109
5.3.2. Echantillons comportant une seule entaille	110
5.3.3. Echantillons comportant deux entailles	125
5.4. Conclusion	136
<b>Chapitre 6 : DE LA LOCALISATION DES DEFORMATIONS VERS LA FISSURATION</b>	<b>139</b>
6.1. Introduction	140
6.2. Configuration des échantillons de type Meuwissen	140
6.3. Etude sur le Tuf	143
6.3.1. Observations générales	143
6.3.2. Essai Tf-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ )	150
6.3.3. Essai Tf-tm-45-03 ( $\beta=45^\circ$ )	157
6.3.4. Essai Tf-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ )	166
6.4. Etude sur le CPIR09	178
6.4.1. Observations générales	178
6.4.2. Essai Cpir-tm-35-01	182
6.5. Conclusion	188

<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>191</b>
Conclusion générale	191
Perspectives	193
<b>Références</b>	<b>195</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>203</b>
A1. Réalisation des échantillons	203
A2. Essai de compression uniaxiale sur un échantillon de Tuf fortement fissuré	206
A3. Fissuration dans les échantillons de Tuf avec des entailles rectilignes	211
A4. Fissuration dans les échantillons de CPIR09 entaillés	213
A5. Essais de type Meuwissen sur le Tuf	219
A6. Essais de type Meuwissen sur le CPIR09	231



# Liste des figures

Figure 1.1. Les trois modes principaux de propagation d'une fissure [d'après Irwin].....	7
Figure 1.2. Fissures inter-granulaires (autour du grain B dans l'image à gauche) et intra-granulaires (indiquées par les flèches dans l'image à droite) dans le Marbre de Carrara [Wong et Einstein, 2008b].....	9
Figure 1.3. Process Zone dans un Granite de Barre [Nasseri et al., 2006].....	9
Figure 1.4. Fissures ramifiées (branching crack) dans un Marbre [Zang et al., 2000a].....	10
Figure 1.5. Exemple d'entaille ouverte (open flaw) dans l'image (a) et d'entaille fermée (entailles de très faible largeur - closed flaw) dans l'image (b) utilisées dans l'étude de [Park et Bobet, 2009].....	11
Figure 1.6. Schéma des fissures communément observées dans un échantillon de roche avec une entaille préexistante [Bobet, 2000].....	12
Figure 1.7. Sept types de propagation de fissures dans un échantillon contenant une entaille [Wong et Einstein, 2009].....	13
Figure 1.8. Evolution de l'endommagement dans un échantillon de Plâtre de Paris contenant une entaille ouverte [Laitaj, 1974].....	13
Figure 1.9. Classification de [Wong et Einstein, 2009] pour les fissures observées par [Laitaj, 1974]. (Les types des fissures sont donnés dans la Figure 1.7).....	14
Figure 1.10. (A gauche) développement des fissures dans un échantillon pré-entailé de calcaire [Ingraffea et Heuze, 1980] et (à droite) la classification de ces fissures par [Wong et Einstein, 2009]. (Les types de fissure sont donnés dans la Figure 1.7).....	14
Figure 1.11. Phases du processus d'endommagement dans le Marbre de Fangshan [Huang et al., 1990] cité par [Wong et Einstein, 2009]. 1-PFTCs (primary forward tensile cracks); 2-SFTCs (secondary forward tensile cracks); 3-BTCs (backward tensile cracks); 4-FSBs (forward shear belts); 5-BSBs (backward shear belts).....	15
Figure 1.12. Trajectoires des fissures après rupture observées lors d'essais CSNBD sur des échantillons cylindriques de calcaire [Al-Shayea, 2005].....	15
Figure 1.13. Trajectoires et types de fissures après rupture dans des essais de compression en déformation plane sur le Tuf de Naples [de Sanctis, 2005].....	16
Figure 1.14. Développement de fissures de traction initiées aux pointes d'entailles préexistantes dans un échantillon de verre sous compression uniaxiale [Brace et Bombolakis, 1963].....	17
Figure 1.15. Endommagement d'une plaque de CR39 contenant de multiples entailles : (a) géométrie des entailles; (b) endommagement en l'absence de pression de confinement; (c) endommagement sous pression de confinement [Horii et Nemat-Nasser, 1985].....	17
Figure 1.16. Coalescence dans le gypse : (a) dimensions des échantillons; (b) détail des entailles et de pont ; (c) développement de la coalescence induite par traction et cisaillement pour l'échantillon avec $\alpha=45^\circ$ et $\beta=90^\circ$ . La coalescence démarre au centre du pont et se propage vers les deux pointes des entailles [Shen et al., 1995].....	18
Figure 1.17. Résumé des observations de coalescence faites par [Shen et al.,1995].....	19
Figure 1.18. Détails des géométries des éprouvettes [Bobet et Einstein, 1998].....	21
Figure 1.19. Cinq types de coalescence observés dans des échantillons entaillés de gypse [Bobet et Einstein, 1998].....	22
Figure 1.20. Détails des géométries des éprouvettes [Park et Bobet, 2009].....	23
Figure 1.21. Huit types de coalescence dans les échantillons entaillés de gypse [Park et Bobet, 2009].....	24
Figure 1.22. Trajectoires des fissures observées sur les échantillons entaillés de Tuf de Naples [de Sanctis, 2005].....	25

Figure 2.1. Illustration du principe de la technique de corrélation d'images numériques [Coudert, 2005].	29
Figure 2.2. Différentes interpolations d'intensité : (a) représentation discrète de niveaux de gris d'une zone de taille 10x10 pixels ; (b) représentation en trois dimensions de niveaux de gris du motif, la hauteur représente la valeur du niveau de gris de chaque pixel ; (c) champs d'intensité de niveaux de gris du motif obtenu par interpolation bilinéaire ; (d) champs d'intensité de niveaux de gris du motif obtenu par interpolation spline cubique [Suton et al., 2009].	30
Figure 2.3. Définition de la zone d'analyse (en jaune), de la grille (en rouge), du motif ou ZOI (en gris) et des nœuds des éléments.	34
Figure 2.4. Vecteur de déplacement d'un élément carré de centre P.	35
Figure 2.5. Evolution de la valeur du paramètre de corrélation $C_2$ selon le type d'interpolation des niveaux de gris : (a) interpolation linéaire et (b) interpolation bicubique (taille du motif : 20x20 pixels, pas de la grille : 10 pixels).	37
Figure 2.6. Evolution de la valeur du paramètre de corrélation $C_2$ selon la taille du motif (interpolation bicubique des niveaux de gris, pas de la grille 10 pixels): (a) 8 pixels, (b) 10 pixels, (c) 16 pixels et (d) 20 pixels.	37
Figure 2.7. Montage des trois appareils photos.	38
Figure 2.8. Champs incrémentaux de l'intensité de la déformation de cisaillement évalués par FRS (en haut) et DIC (en bas) obtenus sur la marne de Beaucaire [Viggiani et Desrues, 2004].	39
Figure 2.9. Evolution de la localisation de la déformation relevée par technique DIC à différents incréments pendant toute la durée d'un essai de déformation plane sur une argile norvégienne [Thakur, 2007].	40
Figure 2.10. Cartes des déformations verticales ( $\epsilon_y$ ) et horizontales ( $\epsilon_x$ ) et photos de l'échantillon, obtenues par une méthode de photogrammétrie à différents niveaux de charge sur un échantillon de marne de Farina d'Olmi [Ferrero et al., 2008].	41
Figure 2.11. Déformations de cisaillement maximum obtenues pour différents incréments dans un essai de compression en déformation plane sur un échantillon parallélépipédique entaillé de Tuf [Hall et al., 2007].	42
Figure 2.12. Deux types de signaux acoustiques : signal impulsif (à gauche) et signal semi-continu (à droite) [Hardy, 2003].	43
Figure 2.13. Salve typique d'émission acoustique et principaux paramètres temporels [Marec, 2008].	45
Figure 2.14. Variation du taux de coups enregistrés par minute en fonction du chargement pour deux granites [Obert et Duvall, 1942 – cité par Hardy, 2003].	48
Figure 2.15. Identification des seuils de fissuration dans les roches par observation (a) des taux de coups des EA ; (b) de la durée moyenne des événements EA et (c) de la rigidité volumique en fonction de contrainte axiale [Eberhardt et al., 1998].	49
Figure 2.16. Détermination des seuils d'endommagements dans la courbe cumulative des EA [Chang et Lee 2004].	50
Figure 2.17. Rapport $\Sigma N/\Sigma E$ pendant la durée de l'essai de compression uniaxiale sur un Tuf. Mise en évidence des trois phases du comportement caractérisées et corrélées avec l'activité acoustique [Hall et al., 2006].	51
Figure 2.18. Courbe contrainte - déformation (en haut) et évolution de la fracturation dans un échantillon de granite par la localisation des EA [Lockner et al., 1991].	52
Figure 2.19. Localisation des sources des EA du granite d'Aue [Zang et al., 2000b].	53
Figure 2.20. (Haut) Evolution de la compaction dans un échantillon de grès de Bentheim par la localisation des événements acoustiques et la vitesse des ondes P mesurées pour les trajectoires traversant la zone de compaction ( $V_{P-CB}$ ) ou en dehors de la zone de compaction ( $V_P$ ) [Stanchits et al., 2009].	54
Figure 2.21. Composants d'un capteur piézoélectrique du laboratoire 3SR.	55
Figure 2.22. Présentation des fenêtres temporelles PDT, HDT et HLT [Manuel Mistras, 2001].	56
Figure 2.23. Principe général de la reconstruction [Thiery et Gerstenmayer, 2002].	58

Figure 2.24. (a) Structures complexes de bandes de cisaillement observées sur le sable dense d'Hostun à l'état sec en fin d'un essai triaxial. (b) Illustration du schéma de la localisation [Desrues et al., 1996].	60
Figure 2.25. En haut : réponse mécanique de l'essai avec indication des étapes des scans. En bas : coupes verticales perpendiculaires à la zone localisée d'une région de l'échantillon en cours d'essai. L'emplacement des coupes est indiqué sur la coupe horizontale en haut à droite. Les vues de détail à droite correspondent à la région indiquée par le rectangle blanc lors des étapes 4 à 8 [Lenoir, 2006].	61
Figure 2.26. Déformations équivalentes de Von Mises issues des analyses incrémentales pré-pic (2-3) et post-pic (3-4) de l'essai présenté dans la Figure 2.25 [Lenoir et al., 2007].	62
Figure 2.27. Scanner à rayons X du Laboratoire 3SR. Vue d'ensemble de la cabine et de l'ordinateur de pilotage (photo à gauche), et des principaux éléments du système (photo à droite).	63
Figure 3.1. Exemple d'une analyse par technique DIC. (a) Image de référence ; (b) image à corréler; (c) déplacements horizontaux (mm); (d) déplacements verticaux (mm); (e) intensités et orientation des déformations principales ; (f) intensités des déformations volumiques ; (g) déformations de cisaillement maximum.	69
Figure 3.2. Discontinuité dans un élément.	70
Figure 3.3. Méthode d'identification des fissures : (a) fenêtre contenant une fissure bien marquée, (b) carte des valeurs originales (à gauche) et filtrées (à droite) (ici, $K_{\text{mini}} = 7\mu\text{m}$ ).	71
Figure 3.4. (a) Visualisation des éléments contenant de fortes probabilités de discontinuités, la taille des éléments est de 10x10 pixels. (b) Position et géométrie des fissures détectées.	72
Figure 3.5. Quantification des sauts de déplacements le long de la fissure. 3 points choisis de part et d'autre de la fissure.	74
Figure 3.6. Composantes normales et tangentielles de sauts de déplacement suivant une fissure (fissure détectée dans la Figure 3.4b) calculées par trois méthodes : moyenne de trois points, interpolation linéaire et interpolation parabolique.	75
Figure 3.7. Comparaison des composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long de la fissure détectée dans la Figure 3.4b, calculées par trois méthodes : moyenne de trois points, interpolation linéaire et interpolation parabolique.	75
Figure 3.8. Calcul des sauts de déplacements des trois points 1,2 et 3 (indiqués dans la Figure 3.7) par trois méthodes. L'axe horizontal représente la distance entre les trois points et la lèvres de la fissure. Les flèches indiquent les trois points dont les déplacements sont utilisés pour estimer les déplacements des points situés sur la fissure.	76
Figure 3.9. Description de l'essai.	77
Figure 3.10. Déplacements horizontaux (suivant x) en haut et verticaux (suivant y) en bas issus de l'analyse DIC.	77
Figure 3.11. Les discontinuités identifiées manuellement sur l'image.	78
Figure 3.12. Sauts de déplacement à travers les discontinuités $C_1$ à $C_7$ calculés par trois méthodes (moyenne de trois points, interpolation linéaire, interpolation parabolique) dans le cas $br_0$ (figure gauche) et $br_{0,5}$ (figure droite). Les figures supérieures correspondent aux composantes normales et les figures inférieures aux composantes tangentielles.	79
Figure 3.13. Visualisation des lignes de discontinuités: les lignes rouges sont les discontinuités identifiées automatiquement par la méthode DIC-F, les lignes jaunes sont celles identifiées manuellement sur l'image.	80
Figure 3.14. Erreur sur l'orientation locale de la discontinuité $C_5$ . Cette figure correspond à la zone indiquée dans l'image 3 de la Figure 3.13. Les carrés blancs sont les éléments de la grille de l'analyse contenant la discontinuité qui sont identifiés par la DIC-F.	81
Figure 3.15. Visualisation des composantes des sauts de déplacement normaux et tangentiels identifiés le long des discontinuités (identification automatisée à gauche et manuelle à droite). Les couleurs des composantes normales indiquent l'ouverture (en rouge) et la fermeture (en vert). Pour les composantes tangentielles, les couleurs indiquent les sens de glissement relatif de deux côtés d'une discontinuité.	81

Figure 3.16. Composantes des sauts de déplacement le long des discontinuités C5 mesurées avec la trajectoire identifiée automatiquement (trajectoire « manuelle »), identifiée manuellement (trajectoire manuelle) et valeur théorique.....	82
Figure 4.1. Visualisations de deux échantillons de Tuf par Tomographie RX avec visualisation en 3D et deux coupes, verticale et horizontale. (a) échantillon sans fissure visible et, (b) échantillon présentant des fissures visibles préexistantes indiquées par les flèches. La résolution spatiale est de 0.125 mm. ....	85
Figure 4.2. Rupture axiale de Tuf après chargement de compression [De Sanctis, 2005]. ....	85
Figure 4.3. Visualisation interne d'un échantillon cylindrique (diamètre 20 mm et hauteur 50 mm) de CPIR 09 par Tomographie RX avec une taille de voxels de 23µm (a) Coupe verticale, (b) Coupe horizontale. ....	86
Figure 4.4. Réponse mécanique du CPIR09 en compression uniaxiale. ....	87
Figure 4.5. (a) Quatre photos (indiquées dans la Figure 4.4) acquises lors du chargement ; (b) rupture de l'échantillon après le chargement ; (c) les déformations principales issues de l'analyse des photos 1 et 2 - lors de la première chute de contrainte, montrent de la compaction. ....	87
Figure 4.6. (a) Machine de traction/compression INSTRON 5569 avec le logiciel de pilotage Blue Hill [ <a href="http://www.instron.tm.fr">http://www.instron.tm.fr</a> ] ; (b) mise en place d'un échantillon.....	89
Figure 4.7. Schéma de l'appareil de compression en déformation plane [Desrues et Viggiani, 2004]. ....	89
Figure 4.8. Vue d'ensemble de l'appareil MTS. ....	90
Figure 4.9. Essai de compression sur un échantillon parallélépipédique. La zone d'analyse ABCD couvre la quasi totalité de la surface d'un échantillon de CPIR09.....	91
Figure 4.10. (En haut) courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale sur un échantillon parallélépipédique de CPIR09 mesurées par LVDT et par DIC. (En bas) courbes déplacement-temps d'un essai de compression uniaxiale sur un échantillon parallélépipédique de CPIR09 mesurées par LVDT et par DIC.....	92
Figure 5.1. Configuration des échantillons de Tuf : (a) Tf-E-01, (b) Tf-E-02 et (c) Tf-E-03. ....	97
Figure 5.2. Rupture des échantillons : (a) Tf-E-01, (b) Tf-E-02 et (c) Tf-E-03. ....	99
Figure 5.3. Essai Tf-E-03. Position des capteurs acoustiques. ....	100
Figure 5.4. Essai Tf-E-03. Courbes de la contrainte axiale, du nombre cumulé $N_C$ (en haut) et de l'énergie $E_{abs}$ (en bas) des EA enregistrés par le capteur 5 en fonction du temps. ....	101
Figure 5.5. Essai Tf-E-03. Contraintes principales autour des pointes des entailles ( $\sigma_1$ -contrainte principale majeure et $\sigma_3$ – contrainte principale mineure) issues d'une simulation en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis. ....	102
Figure 5.6. Essai Tf-E-03. Exemple du tracé manuel de l'entaille centrale. ....	103
Figure 5.7. Essai Tf-E-03. Sauts de déplacement à travers les entailles entre les photos 1 et 6.....	103
Figure 5.8. Essai Tf-E-03. Composantes normales et tangentielles des déplacements relatifs des lèvres de l'entaille centrale avec indication des numéros des photos (valeur moyenne sur toute la longueur de l'entaille). Composantes normales positives correspondent à l'ouverture de l'entaille au cours du chargement. ....	103
Figure 5.9. Essai Tf-E-03. Champs de déplacement horizontal (à gauche) et vertical (à droite) calculés entre l'image initiale et l'une des 6 images suivantes. ....	105
Figure 5.10. Essai Tf-E-03. Evolution des fissures identifiées pendant l'essai en utilisant la méthode DIC-F. $K_{min}=7\mu m$ . ....	106
Figure 5.11. Essai Tf-E-03. Composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement au travers de chaque fissure identifiée.....	107
Figure 5.12. Essai Tf-E-03. Longueur des wing cracks ( $f_1$ et $f_2$ ) en fonction du temps. ....	108
Figure 5.13 . Essai Tf-E-03. Vecteurs déplacement dans la zone de rupture du pont de roche entre deux entailles (analyse entre les photos 6 et 7). Pas de la grille de l'analyse 10 pixels (0.25 mm). ....	108
Figure 5.14. Essai Tf-E-03. Composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement lors de la rupture des deux ponts de roche (analyse entre les photographies 6 et 7).....	108

Figure 5.15. Essai Tf-E-03. Images après rupture de l'échantillon.....	109
Figure 5.16. Configurations des échantillons de CPIR09 avec : (a) une entaille (essais Cpir1-E-45-01, Cpir1-E-45-02, Cpir1-E-45-03) et (b) deux entailles (essais Cpir2-E-45-01, Cpir2-E-45-02, Cpir2-E-45-03).....	109
Figure 5.17. Contraintes principales autour de l'entaille issues d'une simulation en élasticité linéaire isotrope : (a) géométrie de l'échantillon et conditions aux limites ; (b) directions des contraintes principales ; (c) contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ ) ; (d) contrainte principale mineure ( $\sigma_3$ ).....	111
Figure 5.18. Essai Cpir1-E-45-01. (a) Photo acquise en début d'essai ; (b) photo acquise à la rupture ; (c) direction et intensité des déformations principales, pas de la grille: 60 pixels. (d) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), pas de la grille: 40 pixels ; (e) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), pas de la grille: 40 pixels.....	112
Figure 5.19. Essai Cpir1-E-45-02. (a) Photo acquise en début d'essai ; (b) photo acquise à la rupture ; (c) direction et intensité de déformation principale, pas de la grille: 60 pixels ; (d) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), pas de la grille: 40 pixels ; (e) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), pas de la grille: 40 pixels.....	113
Figure 5.20. Essai Cpir1-E-45-03. (a) Photo acquise en début d'essai ; (b) photo acquise à la rupture ; (c) direction et intensité de déformation principale, pas de la grille: 60 pixels ; (d) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), pas de la grille: 40 pixels ; (e) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), pas de la grille: 40 pixels.....	114
Figure 5.21. Essai Cpir1-E-45-02. Position des capteurs sur les trois faces de l'échantillon. La face n°3 est la face opposée à celle étudiée par DIC.....	115
Figure 5.22. Essai Cpir1-E-45-02. Courbe contrainte axiale en fonction de déformation axiale.....	116
Figure 5.23. Essai Cpir1-E-45-02. Taux de coups acoustique et contrainte axiale en fonction du temps (à gauche) et taux d'énergie absolue et contrainte axiale en fonction du temps (à droite).....	116
Figure 5.24. Essai Cpir1-E-45-02. Déformations issues des analyses de chaque couple de photos. Déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ à gauche) et déformation volumique ( $\epsilon_v$ à droite).....	117
Figure 5.25. Essai Cpir1-E-45-02. Evolution des fissures identifiées par la technique DIC-F. $K_{min}= 2 \mu m$ .....	119
Figure 5.26. Essai Cpir1-E-45-02. Composantes des sauts de déplacement le long des fissures.....	120
Figure 5.27. Essai Cpir1-E-45-02. Deux wing cracks à peine détectables à l'œil aux pointes de l'entaille et bandes de compaction invisibles dans la photographie 6.....	121
Figure 5.28. Essai Cpir1-E-45-02. Champs de déplacements autour de la bande C2 (zone encadrée par les tirets blancs) et sens de glissement relatif de deux côtés de cette bande entre les photos 5 et 6.....	122
Figure 5.29. Essai Cpir1-E-45-02. Trois coupes tomographiques verticales (V1, V2, V3) et trois coupes tomographiques horizontales (H1, H2, H3) de l'échantillon avant l'essai (résolution spatiale de $63 \times 63 \times 63 \mu m^3$ ).....	123
Figure 5.30. Essai Cpir1-E-45-02. Trois coupes tomographiques verticales (V1, V2, V3) et trois coupes tomographiques horizontales (H1, H2, H3) de l'échantillon après l'essai (résolution spatiale de $63 \times 63 \times 63 \mu m^3$ ). Les zones plus claires indiquées par les flèches correspondent aux zones de compaction.....	124
Figure 5.31. Essai Cpir1-E-45-02. Visualisation par tomographie RX de l'échantillon après rupture. Vue à $0^\circ$ et à $30^\circ$ .....	124
Figure 5.32. Contraintes principales autour de l'entaille supérieure issues d'un calcul élastique linéaire isotrope : (a) géométrie de l'échantillon et conditions aux limites ; (b) directions des contraintes principales ; (c) contraintes principales majeurs ( $\sigma_1$ ) ; (d) contraintes principales mineures ( $\sigma_3$ ).....	126
Figure 5.33. Essai Cpir2-E-45-01. (a) Déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), (b) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), (c) direction et intensité des déformations principales.....	126
Figure 5.34. Essai Cpir2-E-45-02. (a) Photo de la rupture de l'échantillon, (b) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), (c) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), (d) direction et intensité des déformations principales, (e) zoom sur la zone à rupture dans le pont de roche.....	127
Figure 5.35. Essai Cpir2-E-45-03. (a) Photo de la rupture de l'échantillon, (b) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), (c) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), (d) direction et intensité des déformations principales, (e) zoom sur la zone à rupture dans le pont de roche.....	128

Figure 5.36. Essai Cpir2-E-45-03. Position des capteurs acoustiques sur trois faces de l'échantillon (la face 3 est opposée à celle étudiée par corrélation d'images). .....	129
Figure 5.37. Essai Cpir2-E-45-03. Trois coupes tomographiques verticales à différentes profondeurs de l'échantillon (la taille de voxel est de $63 \times 63 \times 63 \mu\text{m}^3$ ). .....	129
Figure 5.38. Essai Cpir2-E-45-03. Réponse mécanique : courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale mesurée par DIC. ....	130
Figure 5.39. Essai Cpir2-E-45-03. Taux de coups acoustiques et contrainte axiale en fonction du-temps (à gauche) ; taux d'énergie absolue et contrainte axiale en fonction du temps (à droite). .....	130
Figure 5.40. Essai Cpir2-E-45-03. Incréments de déformations issus des analyses de chaque couple de photos. Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{s\text{-max}}$ à gauche) et déformation volumique ( $\epsilon_v$ à droite). .....	131
Figure 5.41. Essai Cpir2-E-45-03. Evolution des fissures identifiées par DIC-F. $K_{\text{min}}=2\mu\text{m}$ . .....	133
Figure 5.42. Essai Cpir2-E-45-03. Composantes de saut de déplacement le long des fissures. ....	134
Figure 5.43. Essai Cpir2-E-45-03. Photos de l'échantillon après essai. ....	135
Figure 5.44. Evolution des fractures principales observées sur les échantillons de CPIR09 contenant (a) une entaille et (b) deux entailles. ....	137
Figure 6.1. Géométrie proposée par [Meuwissen et al., 1998]. .....	141
Figure 6.2. Essai de traction sur un titane T40 à partir de la géométrie proposée par [Meuwissen et al., 1998] : (a) 2 images enregistrées avant et en cours d'essai ; (b) champ des déformations principales obtenu par l'analyse DIC à partir de ces 2 images. La localisation de la déformation de cisaillement est mise en évidence dans la zone entre les encoches [Pottier, 2010]. .....	141
Figure 6.3. Cartes des déformations suivant x et y et des déformations de cisaillement obtenues par simulations en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis 2D pour : (a) la configuration retenue dans notre étude et (b) la configuration originalement proposée par [Meuwissen et al., 1998]. .....	142
Figure 6.4. Configurations des échantillons de « type Meuwissen » de Tuf et de CPIR09. ....	143
Figure 6.5. Courbes contrainte axiale-déformation axiale des trois essais : Tf-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ ), Tf-tm-45-03 ( $\beta=45^\circ$ ) et Tf-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ ). .....	144
Figure 6.6. Essai Tf-tm-35-02. Trois coupes horizontales (H1-3) et quatre coupes verticales de l'échantillon avant le chargement. Le matériau dans les zones supérieure (en dessus de H3) et inférieure (en dessous de H2) est très hétérogène, tandis que la région centrale de l'échantillon (entre H2 et H3) présente une plus faible hétérogénéité. Taille du voxel : $108 \mu\text{m}$ . .....	150
Figure 6.7. Essai Tf-tm-35-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC. ....	151
Figure 6.8. Essai Tf-tm-35-02. Positionnement des six capteurs acoustiques. L'analyse DIC-2D est effectuée sur la face 4. ....	152
Figure 6.9. Essai Tf-tm-35-02. Courbes contrainte axiale ( $\sigma_{\text{axiale}}$ ) et nombre cumulatif ( $N_C$ ) de coups des EA enregistrés par le capteur 5 en fonction du temps : vue complète à gauche et un zoom sur $N_C$ à droite. ....	152
Figure 6.10. Essai Tf-tm-35-02. Courbes contrainte axiale ( $\sigma_{\text{axiale}}$ ) et nombre cumulatif de l'énergie absolue des EA ( $E_{\text{abs}}$ ) enregistrée par le capteur 5 en fonction du temps : vue complète à gauche et un zoom sur $E_{\text{abs}}$ à droite. ....	152
Figure 6.11. Essai Tf-tm-35-02. Cartes de vecteurs de déplacement relatifs $d_r$ . ....	154
Figure 6.12. Essai Tf-tm-35-02. Cartes des déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s\text{-max}}$ ). Quatre zones de déformation localisée $Z_{1-4}$ sont indiquées dans l'analyse 1-7. ....	154
Figure 6.13. Essai Tf-tm-35-02. Cartes des déformations volumiques ( $\epsilon_v$ ). ....	155
Figure 6.14. Essai Tf-tm-35-02. Photos 7 et 8 : déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s\text{-max}}$ ), déformations volumiques ( $\epsilon_v$ ) et vecteurs déplacement dans la zone de la fissure $f_1$ . ....	155
Figure 6.15. Essai Tf-tm-35-02. Photos 7-8 : Composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long de la fissure $f_1$ . ....	155

Figure 6.16. Essai Tf-tm-35-02. Photos 8-9 : (à gauche) déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et déformation volumiques ( $\epsilon_v$ ) ; (à droite) tracé des trois fissures identifiées $f_{1-3}$ et composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures $f_{1-3}$ .	156
Figure 6.17. Essai Tf-tm-35-02. Photos 9-10 : photo 10 où les fissures sont visibles à l'œil, la carte de la déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et vecteurs déplacement en zone fracturée.	156
Figure 6.18. Essai Tf-tm-45-03. Inclusion visible sur la surface étudiée de l'échantillon.	157
Figure 6.19. Essai Tf-tm-45-03. Contrainte axiale en fonction de la déformation mesurée par DIC avec les numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.	158
Figure 6.20. Essai Tf-tm-45-03. Déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) issues des analyses des photos 1-2 (à gauche) et 2-3 (à droite). Pas de la grille d'analyse 30 pixels, taille du motif 20x20 pixels <sup>2</sup> .	159
Figure 6.21. Essai Tf-tm-45-03. Photos 3-4 : (à gauche) carte de déformation de cisaillement maximum et déformations principales dans la zone de la fissure $f_1$ avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif 20x20 pixels <sup>2</sup> ; (à droite) composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long de la fissure $f_1$ .	159
Figure 6.22. Essai Tf-tm-45-03. Photos 4-5 : (à gauche) carte de déformation de cisaillement maximum et les déformations principales dans la zone de la fissure $f_1$ avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif de 20x20 pixels <sup>2</sup> ; (à droite) composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures.	160
Figure 6.23. Essai Tf-tm-45-03. Photos 5-6 : (à gauche) carte de déformation de cisaillement maximum et les déformations principales dans la zone de la fissure $f_1$ avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif de 20x20 pixels <sup>2</sup> ; (à droite) composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures.	160
Figure 6.24. Essai Tf-tm-45-03. Photos 6-7 : (en haut) carte de déformations de cisaillement maximum, déformations principales et vecteurs de déplacement mesurés dans la zone entre les encoches avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif 20x20 pixels <sup>2</sup> ; (en bas) les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures.	161
Figure 6.25. Essai Tf-tm-45-03. Positions des capteurs piézoélectriques.	162
Figure 6.26. Essai Tf-tm-45-03. Evolution de la vitesse de propagation des ondes P dans l'échantillon. (A gauche) Les courbes de la contrainte axiale et des vitesses normalisées d'ondes P mesurées pour différents couples émetteur-récepteur. Les indications sur la courbe de la contrainte axiale correspondent aux numéros des photos utilisées dans l'analyse DIC. (A droite) Position des capteurs et trajectoires des ondes utilisées pour la mesure des vitesses.	162
Figure 6.27. Essai Tf-tm-45-03. Distribution des hypocentres des EA en cours de chargement. La figure du haut présente les courbes de la contrainte axiale et du nombre cumulatif des événements localisés en fonction du temps et de la déformation axiale. Les figures centrales présentent les positions spatiales des événements et le nombre d'événement de différents types dans les différents incréments. Les figures du bas montrent les fissures identifiées par la technique DIC-F dans les quatre derniers incréments.	164
Figure 6.28. Essai Tf-tm-45-03. Trois coupes horizontales (H1-3) et quatre coupes verticales de l'échantillon avant le chargement. Taille du voxel : 128x128x128 $\mu\text{m}^3$ .	165
Figure 6.29. Essai Tf-tm-45-03. Trois coupes horizontales (H1-3) et quatre coupes verticales de l'échantillon après la rupture. Largeur du voxel : 128x128x128 $\mu\text{m}^3$ .	165
Figure 6.30. Essai Tf-tm-55-01. Trois coupes tomographiques horizontales et quatre coupes tomographiques verticales de l'échantillon avant le chargement.	166
Figure 6.31. Essai Tf-tm-55-01. Courbe contrainte-déformation avec l'indication des numéros des photos analysées.	167
Figure 6.32. Essai Tf-tm-55-01. Cartes des déplacements après la soustraction du déplacement moyen de l'ensemble des points d'analyse issues des analyses des photos 1-4, 1-5 et 1-6 avant l'apparition des fissures.	167
Figure 6.33. Essai Tf-tm-55-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures.	168

Figure 6.34. Essai Tf-tm-55-01. Cartes de la déformation volumique et des déformations principales issues de l'analyse de l'incrément 1- 6. ....	168
Figure 6.35. Essai Tf-tm-55-01. Photos 6-7 : apparition des fissures f1 et f2 dans l'Incrément 6-7.....	170
Figure 6.36. Essai Tf-tm-55-01. Photos 7-8 : évolution des fissures f1 et f2.....	170
Figure 6.37. Essai Tf-tm-55-01. Photos 8-9 : évolution des fissures f1 et f2.....	171
Figure 6.38. Essai Tf-tm-55-01. Photos 9-10 : évolution des fissures f1 et f2.....	171
Figure 6.39. Essai Tf-tm-55-01. Photos 10-11 : coalescence des fissure f1 et f2.....	172
Figure 6.40. Essai Tf-tm-55-01. Deux vues différentes de la surface de l'échantillon. La grille verte est la grille d'analyse (pas de la grille : 80 pixels) ; le déplacement de chaque nœud sera calculé par SIC. La surface étudiée est dans le plan x-y ; l'axe z est perpendiculaire à cette surface. ....	173
Figure 6.41. Essai Tf-tm-55-01. Vues dans les plan yz et xy des vecteurs déplacement 3D issus des analyses SIC. Une rotation suivant l'axe horizontal (l'axe x) apparaît dès le début de l'essai (cf., analyse 1-2).....	174
Figure 6.42. Effet d'une rotation hors plan de l'objet sur les mesures de déplacements par DIC-2D. ....	175
Figure 6.43. Essai Tf-tm-55-01. Déplacements 3D dans la zone de pont de roche issus de l'analyse SIC entre les photos 9 et 10.....	176
Figure 6.44. Essai Tf-tm-55-01. Mise en place du microscope Questar. La zone observée est située en pointe de l'entaille inférieure, sur la face opposée à celle étudiée par la DIC.....	176
Figure 6.45. Essai Tf-tm-55-01. Les deux images enregistrées correspondant aux instants 1 et 10 indiqués sur la courbe contrainte-déformation. Il est très difficile de détecter à l'œil nu la présence de la compaction sur l'image 10. ....	177
Figure 6.46. Essai Tf-tm-55-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) (en haut) et cartes des déformations volumiques (en bas) issues des analyse entre la photo 1 avec les photos 2,3, et 4 de la zone d'analyse indiquée par la grille verte dans la photo à gauche. ....	177
Figure 6.47. Courbes des contraintes axiales en fonction des déformations axiales mesurées par DIC pour l'ensemble des essais de type Meuwissen sur le Cpir09. ....	178
Figure 6.48. Essai Cpir-tm-35-01. Positionnement des six capteurs acoustiques. ....	182
Figure 6.49. Essai Cpir-tm-35-01. Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale mesurée par DIC avec indication des 9 photos utilisées dans les analyses des fissures. ....	183
Figure 6.50. Essai Cpir-tm-35-01. Contrainte axiale et taux des coups des EA ( $dN_C$ ) en fonction du temps (à gauche). Contrainte axiale et taux des énergies absolues des EA ( $dE_{abs}$ ) en fonction du temps avec l'indication des photos utilisées dans les analyses des fissures (à droite). ....	183
Figure 6.51. Essai Cpir-tm-35-01. Carte des vecteurs déplacement relatif, de la déformation de cisaillement maximum et de la déformation volumique issues de l'analyse DIC entre les photos 1-2.....	184
Figure 6.52. Essai Cpir-tm-35-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum et des déformations volumiques issues de l'analyse incrémentales DIC. Dimension des motifs : $20 \times 20 \text{ pixel}^2$ ; pas de la grille : 10 pixels.....	184
Figure 6.53. Essai Cpir-tm-35-01. Fissures identifiées par la technique DIC-F dans des couples de photos successives. $K_{min} = 5 \mu\text{m}$ . ....	185
Figure 6.54. Essai Cpir-tm-35-01. Cartes des composantes normales et tangentielles des sauts de déplacements le long des fissures quantifiées par la méthode DIC-F. ....	186
Figure 6.55. Essai Cpir-tm-35-01. Deux coupes horizontales (H1-2) et trois coupes verticales (V1-3) de l'échantillon après la rupture. Taille du voxel : $128 \times 128 \times 128 \mu\text{m}^3$ . ....	188
Figure 6.56. Figures « typiques » des localisations des déformations de cisaillement avant l'apparition des fissures dans les essais de type Meuwissen sur le Tuf. Déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{z-max}$ ) et volumique ( $\epsilon_v$ ) présentées sont issues de l'essai Tf-tm-55-01. ....	190
Figure 6.57. Localisation de la compaction au niveau des encoches et bandes de compactions dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09. ....	190

# Liste des tableaux

Tableau 2.1. Les principales sources d'erreur de la technique DIC-2D.....	32
Tableau 2.2. Méthodologie modifiée pour déterminer différents seuils du développement des fissures [Chang et Lee, 2004].....	50
Tableau 2.3. Réglage des paramètres utilisés en émission acoustique.....	56
Tableau 2.4 Caractéristiques techniques du scanner du Laboratoire 3SR.....	64
Tableau 3.1. Composantes des sauts de déplacement le long des discontinuités identifiées automatiquement (trajectoire numérique), trajectoire identifiée manuellement (trajectoire manuelle) et valeurs théoriques estimées directement à partir des déplacements relatifs des feuilles.....	80
Tableau 4.1. Composants chimiques du CPIR 09 [d'après Hosseini, 2005].....	86
Tableau 4.2. Récapitulatif des matériaux étudiés.....	88
Tableau 5.1. Référence des essais sur le Tuf.....	98
Tableau 5.2. Récapitulatif des essais réalisés.....	110
Tableau 5.3. Bilan des techniques expérimentales utilisées.....	125
Tableau 6.1. Paramètres correspondant au CPIR09 utilisés dans les simulations en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis.....	142
Tableau 6.2. Référence des échantillons de type Meuwissen de Tuf et de CPIR09. Les essais encadrés seront discutés plus en détail dans la suite.....	143
Tableau 6.3. Présentation des techniques expérimentales, contrainte axiale au pic et déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures et lors de la rupture des échantillons de Tuf de type Meuwissen.....	145
Tableau 6.4. Présentation des techniques expérimentales utilisées, contrainte axiale au premier pic et déformations de cisaillement maximum et volumique dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09.....	179

## Notations

$\sigma_{\text{axiale}}$  : est la contrainte axiale mesurée en divisant la force appliquée par la surface d'appui de l'échantillon sans prendre compte la présence des entailles.

$\epsilon_{\text{axiale}}$  : est la déformation axiale définie comme étant le rapport entre le déplacement de l'échantillon et la hauteur initiale de l'échantillon.

$N_C$  : est le nombre cumulé de coups des émissions acoustiques (voir la section 2.3.3).

$E_{\text{abs}}$  (aJ) : est l'énergie absolue des émissions acoustiques enregistrée par le système d'acquisition (voir la section 2.3.3).

$dN_C$  (1/s) : est le taux de coups des émissions acoustiques (nombre de coups enregistré par seconde)

$dE_{\text{abs}}$  (aJ/s) : est le taux d'énergie absolue des émissions acoustiques (énergie enregistrée par seconde)

$\vec{d}_{ri}$  : sont les vecteurs déplacements après la soustraction du déplacement moyen ( $\vec{d}_m$ ) de l'ensemble des points  $i$  d'analyse ( $\vec{d}_i$  est le déplacement mesuré pour le point  $i$ ) :  $\vec{d}_{ri} = \vec{d}_i - \vec{d}_m$ .

$\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  et  $\epsilon_{xy}$  : sont les déformations suivant x (horizontale), suivant y (verticale) et la déformation de cisaillement.

$\epsilon_1$  et  $\epsilon_3$  : sont les valeurs majeure et mineure du tenseur de déformation logarithmique (Tenseur de Hencky) mesurées en surface de l'échantillon par l'analyse DIC-2D.

$\epsilon_{s\text{-max}}$  : déformation de cisaillement maximum donnée par :  $\epsilon_{s\text{-max}} = (\epsilon_1 - \epsilon_3)/2$ .

$\epsilon_v$  : déformation « volumique » donnée par :  $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_3$ .

# INTRODUCTION

## Objectifs

Les phénomènes d'endommagement localisé et de fissuration dans les roches sont très importants dans de nombreuses applications de l'ingénierie des roches, aussi bien dans le génie civil (tunnels, fondations, barrages, ...) que dans le stockage des déchets radioactifs, le stockage souterrain de gaz, ou encore l'extraction de pétrole. La prévision de l'évolution de l'endommagement dans les roches est importante à la fois pour l'étude de la stabilité des ouvrages et dans l'estimation de la durée de vie des structures, où l'objectif est de garantir la performance de l'ouvrage en évitant sa défaillance prématurée. L'amélioration de nos connaissances sur les phénomènes d'endommagement localisé et de fissuration dans les roches représente donc un enjeu majeur – par ailleurs, il s'agit sans doute de l'un des domaines les plus « pointus » de la recherche actuelle en géomécanique.

Les massifs rocheux présentent des discontinuités de différentes dimensions (failles, inclusions, pores, fissures à toutes échelles) qui, avec la matrice rocheuse, déterminent la stabilité globale du massif. Lors de sollicitations mécaniques, de tels défauts deviennent des zones de forte concentration de la contrainte qui favorisent l'endommagement et la fissuration. L'effondrement d'une structure rocheuse est souvent une conséquence de l'interaction, la propagation et la coalescence de fissures. Ces deux dernières décades abondent d'études en laboratoire consacrées à ces phénomènes. Ces études ont été typiquement réalisées sur des échantillons de roche (naturelle ou artificielle) présentant des discontinuités (entailles) préexistantes (*e.g.*, de Sanctis, 2005; Hall *et al.*, 2006 ; Bobet, 2000; Wong et Einstein, 2008a-c). Diverses techniques de mesure non conventionnelles ont été utilisées dans ces travaux expérimentaux, y compris des caméras numériques à haute résolution et haute vitesse d'enregistrement. L'utilisation de ces techniques d'observation a fourni des renseignements détaillés permettant la caractérisation géométrique de l'évolution des fissures en surface d'échantillons. Cependant, les roches sont intrinsèquement (naturellement) hétérogènes à cause des discontinuités préexistantes, ainsi des observations en surface ne reflètent pas forcément les phénomènes qui ont lieu au cœur de l'échantillon chargé. De plus, lorsque l'ouverture ou le glissement d'une fissure est d'une taille inférieure au pixel de l'image acquise, leur observation directe sur les images n'est pas évidente. Par conséquent, l'initiation, la propagation et le mode de fonctionnement des fissures ne peuvent pas être interprétés correctement. Pour cette raison on fait de plus en plus appel aux techniques modernes de mesure de champs ; celles-ci représentent des outils très puissants pour caractériser de façon quantitative l'évolution des fissures.

Dans le contexte décrit ci-dessus, le développement relativement récent des techniques de corrélation d'images (DIC 2D et 3D), ainsi que les avancées dans le domaine de la tomographie à Rayons X permettent d'envisager l'observation de l'endommagement localisé et de la fissuration dans les roches à l'échelle « locale » (*i.e.*, à une échelle bien plus petite de celle de l'échantillon de roche). Par ailleurs, les techniques d'enregistrement des émissions acoustiques et de la localisation dans l'échantillon des sources de ces événements, permettent de suivre l'endommagement au cœur des échantillons lors d'un essai mécanique. L'utilisation de ces techniques, éventuellement de façon simultanée, pourrait fournir une vision plus complète des processus d'endommagement et de rupture. Le premier objectif de ce travail de recherche a été, donc, de mettre en œuvre la combinaison de différentes techniques de mesures dans des essais mécaniques sur des échantillons préalablement entaillés (pour simuler les fissures préexistantes) de différentes roches tendres afin d'observer les mécanismes de fissuration de leur naissance jusqu'à la rupture. En particulier, nous nous sommes intéressés à l'évolution de l'endommagement localisé vers la fissuration. Au cours d'un chargement mécanique, la localisation des déformations induit un endommagement important dans les zones de localisation (« *bandes de cisaillement* »), qui sont des lieux privilégiés d'apparition de nouvelles fissures. Les macro-ruptures apparaissent dans ces zones comme une conséquence du processus d'initiation, d'évolution et de coalescence des microfissures. La visualisation quantitative de ces phénomènes, dans le but d'en observer les stades précoces et à quantifier l'évolution progressive, n'est pas simple, car elle nécessite entre autre des mesures *in-situ* (*i.e.*, pendant le chargement).

Les matériaux choisis dans notre étude sont deux roches tendres : le Tuf de Naples (d'origine volcanique) et le CPIR09 (une « roche » artificielle). Bien que les porosités de ces matériaux soient comparables, leurs microstructures sont très différentes, ce qui fait que les caractéristiques de l'endommagement localisé et de la fissuration mises en évidence dans ces deux roches ne sont pas les mêmes.

En plus de quelques configurations (plus ou moins classiques) d'échantillons contenant une ou plusieurs entailles, nous avons utilisé dans ce travail une forme particulière d'échantillons de roche, ayant des encoches arrondies qui favorisent la localisation de la déformation de cisaillement en compression simple, avant l'apparition de fissures. Avec cette configuration, les bandes de cisaillement sont caractérisées directement en surface de l'échantillon, ainsi l'étude de l'endommagement dans les zones de localisation peut être plus aisément effectuée. Pour suivre la transition d'une déformation diffuse à une déformation localisée, puis caractériser l'évolution des fissures qui apparaissent, les techniques de mesures de champs se sont révélées des outils très puissants. Les résultats obtenus représentent une base de données très riche pour toutes modélisations de ces phénomènes.

## Organisation du mémoire

Le présent mémoire comporte, en plus de l'introduction, six chapitres distincts, une conclusion générale et six annexes. Le chapitre 1 correspond à une étude bibliographique présentant les principales observations expérimentales de l'endommagement localisé et de la fissuration dans les roches. Ce chapitre s'attache notamment à décrire les phénomènes d'initiation, de propagation et de coalescence des fissures.

Dans le deuxième chapitre, sont présentées quelques techniques de mesure de champs. Nous retrouvons en particulier les techniques de mesure de champs cinématiques par la corrélation d'images (*Digital Image Correlation*, DIC), les techniques d'enregistrement et de localisation des émissions acoustiques (EA), ainsi qu'une présentation de la méthode de la tomographie à Rayons X. Pour chacune de ces techniques, après des brefs rappels des principes généraux, sont présentées, en guise d'exemple, quelques applications dans le domaine de géomécanique.

Le troisième chapitre détaille la technique DIC-F (*Digital Image Correlation for Fracture*), qui représente un développement original effectué dans le cadre de cette thèse. Cette technique est un post-traitement de l'approche DIC qui permet d'automatiser le tracé des lignes de discontinuité de déplacement, puis de quantifier les sauts de déplacement le long de telles discontinuités en utilisant les mesures de déplacement. Les sauts de déplacement sont décomposés en composantes normales et tangentielles, par rapport à la trajectoire locale de la fissure. Trois étapes clé de la technique sont présentées : l'identification des discontinuités et leur tracé, la quantification des sauts de déplacement, et finalement une étude sur les incertitudes associées à la méthode.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les caractéristiques principales des deux matériaux étudiés (Tuf de Naples et CPIR09). Ces matériaux ont tous les deux des valeurs de résistance à la rupture qui les situent dans la classe des roches tendres. Ce chapitre présente ensuite les différents dispositifs de sollicitation mécanique utilisés dans notre travail.

Les chapitres 5 et 6 représentent le cœur du mémoire, puisqu'ils présentent l'ensemble des essais réalisés et les résultats les plus significatifs – les résultats de tous les essais sont présentés dans les annexes de A2 à A6. Le cinquième chapitre est consacré à l'étude de la fissuration observée sur des échantillons ayant des géométries « classiques », *i.e.*, avec des entailles rectilignes de faible largeur. Quant au sixième chapitre, il concerne l'étude réalisée sur des échantillons présentant une forme particulière, avec des encoches arrondies qui favorisent la localisation de la déformation de cisaillement en compression simple, avant l'apparition de fissures. Cette géométrie, tout à fait originale pour les roches, est inspirée des travaux de Meuwissen et *al.* (1998) sur la traction dans les métaux. La procédure de réalisation des échantillons est exposée dans l'annexe A1.

Dans le dernier chapitre, nous faisons une synthèse générale des résultats obtenus et nous proposons, dans le même contexte, de nouvelles perspectives de recherche.

*Ce travail de thèse a été réalisé au sein de deux laboratoires de la région Rhône Alpes, le laboratoire 3SR UJF/INPG/CNRS localisé à Grenoble et le laboratoire SYMME, Université de Savoie localisé sur Annecy. Cette thèse est financée par le Cluster MACODEV (Région Rhône Alpes).*



# **Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

1.1. Introduction	6
1.2. Généralités sur la mécanique de la rupture fragile	6
1.3. Observations de l'endommagement localisé et de la fissuration dans les roches	8
1.3.1. Fissures dans les roches	8
1.3.2. Propagation et coalescence de fissures à partir d'entailles préexistantes	10
1.4. Conclusion	25

## 1.1. Introduction

D'une manière générale, l'endommagement peut être défini comme « la détérioration progressive de la cohésion de la matière sous l'action de sollicitations monotones, ou répétées, conduisant à la rupture de l'élément de volume considéré » [Lemaire et Chaboche, 1978]. Autrement dit, l'endommagement correspond à l'apparition et à l'évolution de nouvelles surfaces de non-adhérence (*i.e.*, micro-fissures) et implique la perte de résistance du matériau.

Nous distinguons expérimentalement trois étapes successives dans le processus de l'endommagement d'une roche lors qu'elle est sujette à une sollicitation mécanique : l'endommagement diffus, l'endommagement localisé et la rupture. L'éventuelle transition d'un endommagement diffus à un endommagement localisé se fait par la propagation et la coalescence de (micro-)fissures. Dans les massifs rocheux, le développement de ces micro-fissures est souvent lié à la présence de systèmes d'hétérogénéités et de discontinuités préexistantes (*e.g.*, compositions minérales, pores, fissures préexistantes) qui sont des lieux privilégiés de concentration des contraintes et donnent naissance aux nouvelles fissures.

Nous commençons ce chapitre par un bref rappel des concepts de base de la mécanique de la rupture fragile, qui comprennent deux approches : la mécanique de la rupture linéaire élastique et celle élastoplastique. Ensuite, nous présentons une méthode simple de détection de l'endommagement lors d'un essai de compression, basée sur la réponse mécanique globale. Nous terminons ce chapitre par une présentation des principales observations expérimentales de la propagation et de la coalescence de fissures dans les roches.

## 1.2. Généralités sur la mécanique de la rupture fragile

Les travaux fondateurs de la moderne mécanique de la rupture fragile ont essentiellement eu lieu au début du 20<sup>e</sup> siècle (*e.g.*, Griffith, 1920). En considérant la propagation d'une fissure préexistante dans le verre, Griffith a utilisé l'analyse en contrainte développée initialement par Inglis (1913) pour formuler un concept, aujourd'hui bien connu, basé sur la première loi de la thermodynamique qui indique qu'une fissure dans un matériau fragile s'accroît quand l'énergie élastique libérée lors de la prolongation de la fissure est supérieure à celle nécessaire pour créer une nouvelle surface. La théorie de Griffith permet ainsi d'estimer la résistance d'un solide fragile et fournit une relation entre la résistance à la rupture et la taille du défaut préexistant dans le solide. Considérons un solide élastique contenant une fissure de longueur  $2a$ , soumis à une contrainte axiale de traction  $\sigma$ . La contrainte axiale exigée pour que la fissure se propage est :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E'\gamma_s}{\pi a}} \text{ avec } \begin{cases} E' = E, & \text{Contrainte plane} \\ E' = E/(1-\nu^2), & \text{Déformation plane} \end{cases} \quad , \quad 1.1$$

où  $E$  est le module d'Young,  $\nu$  est le coefficient de Poisson et  $\gamma_s$  est l'énergie spécifique de surface, elle aussi caractéristique du matériau.

Irwin (1948) a introduit la notion de « taux de restitution de l'énergie » ( $G$ ), qui correspond à l'énergie totale libérée par unité de prolongement de la fissure et est définie comme suit :

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E'} \quad . \quad 1.2$$

Ainsi, le taux de restitution  $G$  dépend à la fois du matériau (via le paramètre  $E$ ) et des conditions de chargement ( $\sigma$ ) – outre que de la taille initiale de la fissure ( $a$ ). Le critère de propagation de la fissure se traduit ainsi par :

$$G \geq G_c = 2\gamma_s \quad . \quad 1.3$$

La valeur critique  $G_c$  est la valeur de  $G$  qui correspond à la contrainte à la rupture  $\sigma_f$ .

Orowan (1950) a proposé une modification de l'équation 1.3 en ajoutant l'énergie dissipée par déformation plastique au voisinage de la pointe de la fissure :

$$G \geq G_c = 2(\gamma_e + \gamma_p), \quad 1.4$$

où  $\gamma_p$  est le travail de déformation plastique par unité de surface nouvellement créée. La contrainte exigée pour la propagation d'une fissure dans ce cas est

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E(\gamma_e + \gamma_p)}{\pi a}} \quad 1.5$$

Il existe deux types de propagation d'une fissure :

- *propagation stable* : si, à tout moment on a l'égalité  $G = G_c$ , il n'y a pas d'augmentation d'énergie cinématique. Dans ce cas, la fissure s'arrête et il est nécessaire d'avoir davantage d'énergie pour reprendre la propagation ;
- *propagation instable* : dès que  $G$  devient supérieur à  $G_c$ , une partie de l'énergie est dépensée pour rompre les liaisons (énergie de séparation). Le reste ( $G - G_c$ ) est transformé en énergie cinématique et se dissipe dans la création de la nouvelle surface. La fissure peut se propager en l'absence de toute modification de la sollicitation externe.

En 1957, Irwin a introduit trois « modes » fondamentaux de fissuration qui jouent depuis un rôle important dans l'analyse des mécanismes de propagation d'une fissure. En termes de mouvement des surfaces de la fissure, les modes de fissuration sont classifiés de la manière suivante :

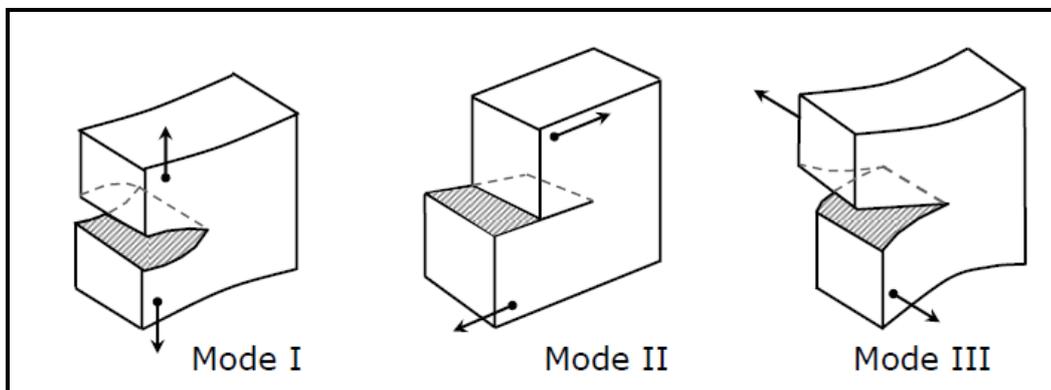


Figure 1.1. Les trois modes principaux de propagation d'une fissure [d'après Irwin].

- *mode I (ouverture)* : les surfaces de la fissure se déplacent dans deux directions opposées et perpendiculairement au plan de la fissure. La propagation de la fissure est dirigée en direction du plan de la fissure. Aucune trace de déplacement en cisaillement n'est visible ;
- *mode II (glissement de translation)* : les points sur les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure. La direction de cisaillement est parallèle au plan de la propagation de la fissure ;
- *mode III (glissement de rotation)* : les surfaces de la fissure se déplacent en cisaillement dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure et perpendiculaire à la direction de la propagation de la fissure ;

On parlera de mode mixte lorsqu'il y a plusieurs de ces modes simultanément présents.

Irwin (1957) a contribué à nouveau à un avancement important en proposant le concept de « facteur d'intensité de la contrainte » ( $K$ ). Selon lui, la nouvelle fissure se produit lorsque la distribution critique de la contrainte au voisinage de la fissure est atteinte. Les propriétés du matériau qui régissent la propagation de la fissure sont « la ténacité à la rupture » (toughness -  $K_c$ ), ou la valeur critique de l'énergie ( $G_c$ ). L'approche énergétique et l'approche de l'intensité de contrainte deviennent actuellement fondamentales en mécanique linéaire élastique de la rupture (Linear Elastic Fracture Mechanics- LEFM).

Dans une petite région autour de la pointe d'une fissure, se situe le comportement inélastique du matériau ; c'est la zone où se produit la séparation du matériau (rupture de liaisons atomiques, décohésion de joints de grain). Cette zone est généralement appelée « zone de process de fissures » (fracture process zone, FPZ). De nombreux modèles de FPZ ont été proposés. Les trois modèles les plus importants, selon Dascalu (2007), sont ceux proposés par Dugdale (1960), Barenblatt (1962) et Hilleborg et al. (1976). Barenblatt a introduit dans son modèle l'hypothèse des forces de cohésion qui sont des forces attractives s'exerçant entre les particules de part et d'autre du plan de séparation. Dugdale a utilisé le concept simple d'une FPZ pour modéliser la déformation plastique. Hilleborg et al. (1976) ont proposé le modèle de la fissure fictive. Dans ce modèle, une fissure fictive est supposée s'étendre à la pointe de la FPZ et les contraintes à la fermeture de la fissure sont fonction de l'ouverture de la fissure.

Une version élastoplastique de la mécanique de la rupture fragile (Elasto-Plastic Fracture Mechanics - EPFM) a été également développée. Wells (1961) ont proposé d'utiliser l'ouverture de fissure (CTOD) comme un paramètre de mécanique de la rupture pour le cas de grandes déformations plastiques. En 1968, un paramètre pour étudier le comportement non linéaire de la rupture a été introduit par Rice (appelée l'intégrale J). Bien que le CTOD et l'intégrale J soient des concepts bien établis, la mécanique élastoplastique de la rupture est encore une discipline évoluant à cause de la complexité des analyses élastoplastiques.

## 1.3. Observations de l'endommagement localisé et de la fissuration dans les roches

### 1.3.1. Fissures dans les roches

D'une manière générale, une fissure est une discontinuité de la matière qui a une ou deux dimensions beaucoup plus petites que la troisième. Dans une roche naturelle, se trouvent plusieurs types des fissures, à toutes les échelles. A l'échelle des grains constituant une roche, il s'agit de micro-fissures : soit inter-granulaires – c'est-à-dire situées à l'interface de grains ; soit intra-granulaires

correspondent aux micro-fissures qui traversent un grain. Un exemple de ces fissures observées dans le Marbre de Carrara est présenté dans la Figure 1.2 par Wong et Einstein (2008b).

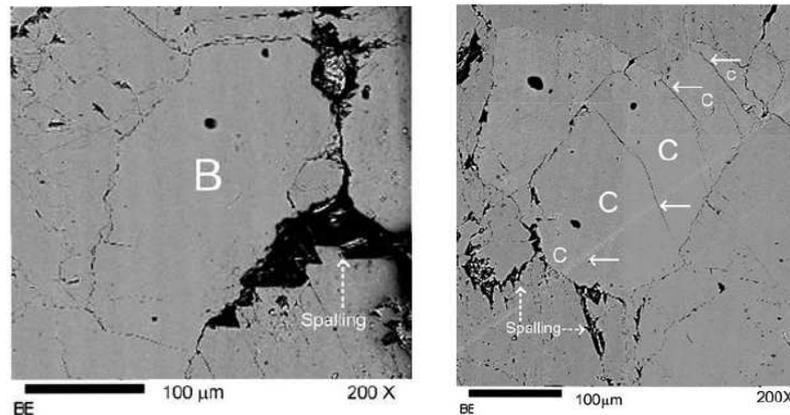


Figure 1.2. Fissures inter-granulaires (autour du grain B dans l'image à gauche) et intra-granulaires (indiquées par les flèches dans l'image à droite) dans le Marbre de Carrara [Wong et Einstein, 2008b].

A l'échelle mésoscopique, la discontinuité correspond à des méso-fissures traversant de nombreux grains et éventuellement liant plusieurs micro-fissures. A l'échelle de l'échantillon de laboratoire, le terme de discontinuité concerne des macro-fissures de quelques millimètres à quelques décimètres qui sont appelées aussi « fractures ».

La « Fracture Process Zone » (FPZ, Figure 1.3) est définie comme la zone intéressée par de la micro-fissuration autour de la pointe d'un défaut où se trouvent les micro- et méso-fissures. La largeur de la FPZ est définie comme la plus grande distance entre les (micro-)fissures visibles des deux côtés de la fissure principale et sa longueur est définie comme la distance entre la pointe du défaut et la (micro-)fissure la plus éloignée de la pointe du défaut. Les fissures mésoscopique ou macroscopique qui se propagent hors de la fissure principale sont appelées « fissures ramifiées » (Figure 1.4).

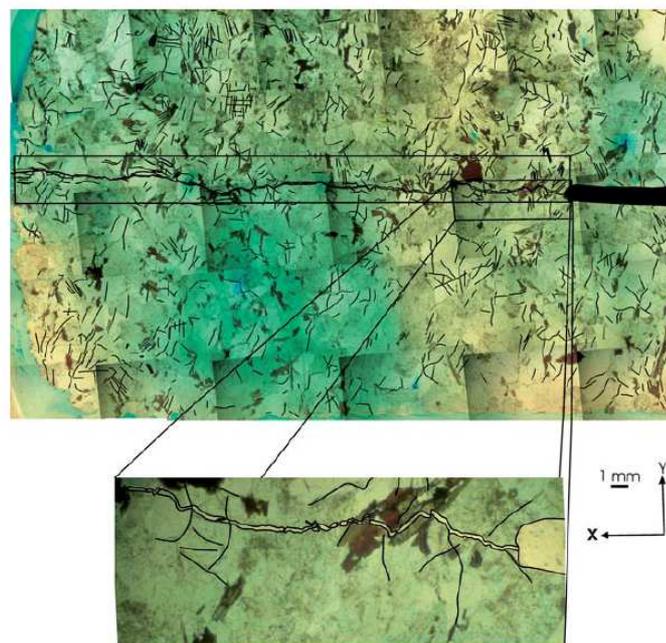


Figure 1.3. Process Zone dans un Granite de Barre [Nasseri et al., 2006]

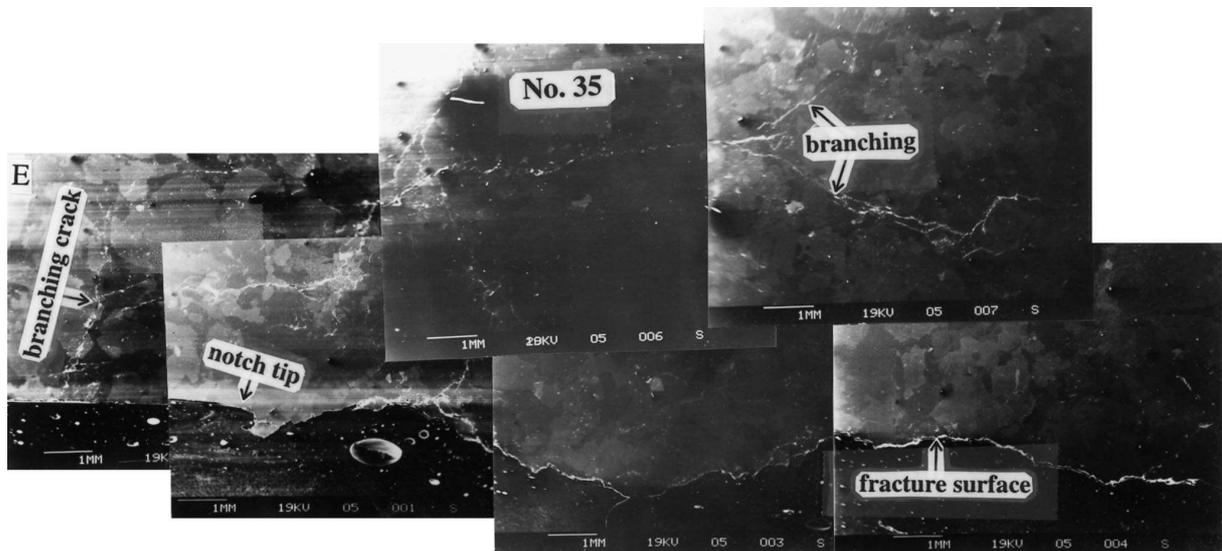


Figure 1.4. Fissures ramifiées (branching crack) dans un Marbre [Zang et al., 2000a].

### 1.3.2. Propagation et coalescence de fissures à partir d'entailles préexistantes

La propagation et la coalescence des fissures dans les matériaux fragiles a été le but de recherches expérimentales intensives depuis les années soixante. L'une des premières observations de la propagation des fissures de traction (mode I) a été reportée dans une éprouvette entaillée de verre [Brace et Bomlakis, 1963]. Depuis, plusieurs études se trouvent dans la littérature, aussi bien sur des roches naturelles que sur des « roches artificielles » (ou « rock-like materials »), c'est-à-dire des matériaux ayant un comportement mécanique similaire à une roche.

Dans la plupart de ces études, les éprouvettes utilisées sont de forme prismatique et elles contiennent une ou plusieurs entailles rectilignes réalisées préalablement à l'essai ; la taille des éprouvettes varie de (50x22x0.15 mm<sup>3</sup>) [Brace et Bomlakis, 1963] à (635x279x203 mm<sup>3</sup>) [Mughieda et Alzo'ubi, 2004]. Les essais de type « Centrally Straight-Notched Brazilian Disk » (CSNBD) ont été également utilisés pour l'étude de la trajectoire et du mode de propagation des fissures [Al-Shayea, 2005]. Les entailles sont artificiellement créées et leurs caractéristiques en termes de longueur et de largeur varient également. Dans certains cas, les entailles dites fermées (entailles de très faible largeur créées expérimentalement – Figure 1.5) sont également abordées [Hoek et Bieniawski, 1965 ; Horii et Nemat-Nasser, 1985 ; Shen et al., 1995 ; Wong et Chau, 1998, Park et Bobet, 2009]. Par la suite, nous présentons les résultats principaux que l'on trouve dans la littérature pour deux cas : (a) éprouvettes ayant une seule entaille et (b) éprouvettes avec plusieurs entailles.

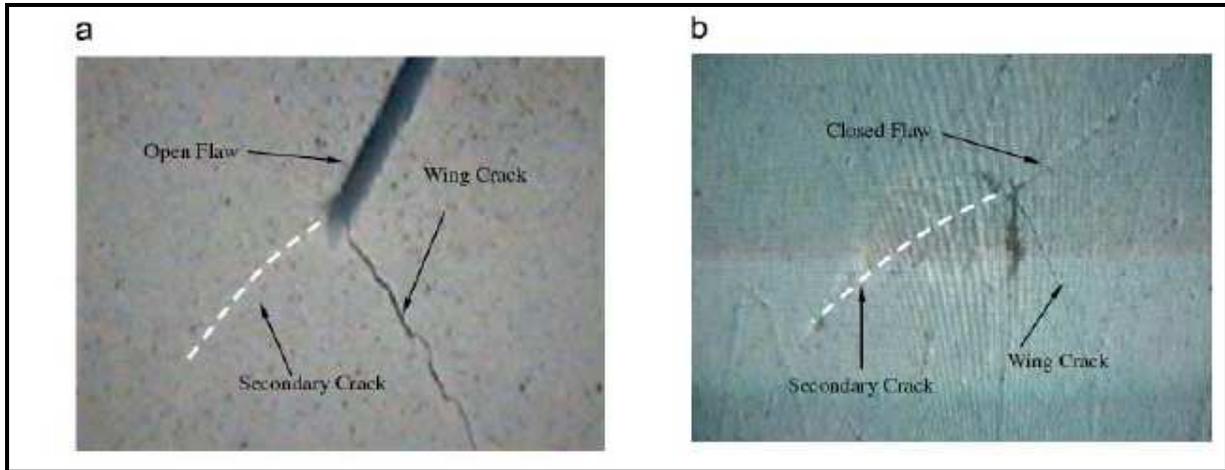


Figure 1.5. Exemple d'entaille ouverte (*open flaw*) dans l'image (a) et d'entaille fermée (entailles de très faible largeur - *closed flaw*) dans l'image (b) utilisées dans l'étude de [Park et Bobet, 2009].

### 1.3.2.1. Eprouvettes avec une seule entaille

Des recherches approfondies ont été réalisées sur les processus de fissuration qui se produisent dans les roches (roches naturelles et artificielles) en compression dans les conditions bidimensionnelles (c'est à dire avec des entailles traversant l'épaisseur des échantillons). Un schéma résumant les fissures communément rencontrées a été résumé par Bobet (2000) (Figure 1.6)

Les premières fissures à apparaître sont des fissures de traction (de mode I prépondérant) qui s'initient à l'extrémité de l'entaille et se propagent avec l'augmentation de la charge selon une trajectoire curviligne. Ces fissures se propagent de manière stable et tendent à s'aligner avec la direction de la contrainte principale majeure (de compression). Dans la littérature, ces fissures sont reportées sous plusieurs noms : « *Tensile Fractures* » par Lajtai (1974) ; « *Branch Cracks* » par Brace et Bombolakis (1963), « *Primary Cracks* » par Ingraffea et Heuze (1980) ; « *Primary Forward Tensile Cracks (PFTCs)* » par Huang et al. (1990) ; et wing cracks par Shen et al. (1995), Li et al. (2005), Bobet (2000).

Après un chargement additionnel, de nouvelles fissures apparaissent, couramment appelées « *Fissures Secondaires* ». Ces fissures secondaires sont généralement décrites comme fissures (ou zones) de cisaillement. Elles s'initient aux extrémités de l'entaille. Deux directions d'initiation sont possibles : (1) coplanaire avec la fissure préexistante ou (2) de même inclinaison que les wing cracks mais dans la direction opposée. Ces fissures se trouvent citées dans la littérature sous différents noms: « *Inclined, Normal Shear Fractures and Shear Zone* » [Lajtai, 1974] ; « *Secondary Cracks* » [Ingraffea and Heuze, 1980 ; Li et al., 1995]; « *Forward and Backward Shear Belts (FSBs et BSBs)* » [Huang et al., 1990] .

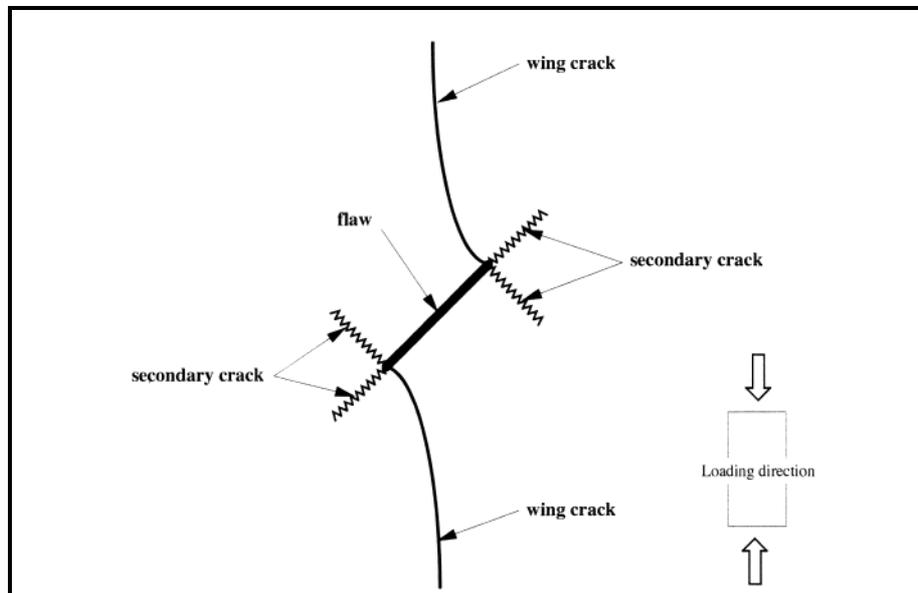


Figure 1.6. Schéma des fissures communément observées dans un échantillon de roche avec une entaille préexistante [Bobet, 2000].

**Wong et Einstein (2009)** ont étudié la propagation des fissures sur des échantillons parallélépipédiques de gypse et de Marbre de Carrara (dimensions :  $152 \times 76 \times 32 \text{ mm}^3$ ) avec une entaille (longueur 12.5 mm) ayant différentes inclinaisons. En utilisant une camera à haute vitesse (de 500 à 3000 images/s), le développement des fissures a été enregistré au cours des essais. En adaptant la fréquence d'échantillonnage et la résolution de l'image, les auteurs ont visualisé précisément la fissuration et déterminé la nature des fissures (cisaillement ou traction). Sept différents types de fissures (Figure 1.7), dont 3 types de traction, 3 types de cisaillement et un type mixte, ont été observés. Notons que les trois types de cisaillement ne sont observés que dans le marbre.

**Laitaj (1974)** a réalisé des essais de compression uniaxiale sur des éprouvettes de plâtre de Paris, de dimensions  $76 \times 152 \times 152 \text{ mm}^3$ , contenant une entaille inclinée de largeur 0.5 mm. L'angle d'inclinaison des entailles varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  par l'intervalle de  $5^\circ$ . La séquence du développement des fissures, schématiquement résumée dans la Figure 1.8 se compose des quatre étapes suivantes : (a) les « *Tensile Fractures* », fissures de traction (mode I), sont celles qui apparaissent les premières. Avec l'augmentation de la charge, ces fissures se propagent de manière stable et tendent à s'aligner avec la direction de la charge ; (b) les « *Normal Shear Fractures* », fissures de cisaillement (mode II), ayant une direction normale à la charge, s'initient dans la zone de contrainte de compression, à la pointe de l'entaille ; (c) avec l'augmentation de charge, des zones de cisaillement se forment autour des « *Normal Shear Fractures* » ; (d) ces zones de cisaillement s'étendent dans la direction normale à celle de la charge et des « *Inclined Shear Fracture* » apparaissent dans ces zones. Ces fissures sont ensuite reclassées par Wong et Einstein (2009) dans la Figure 1.9.

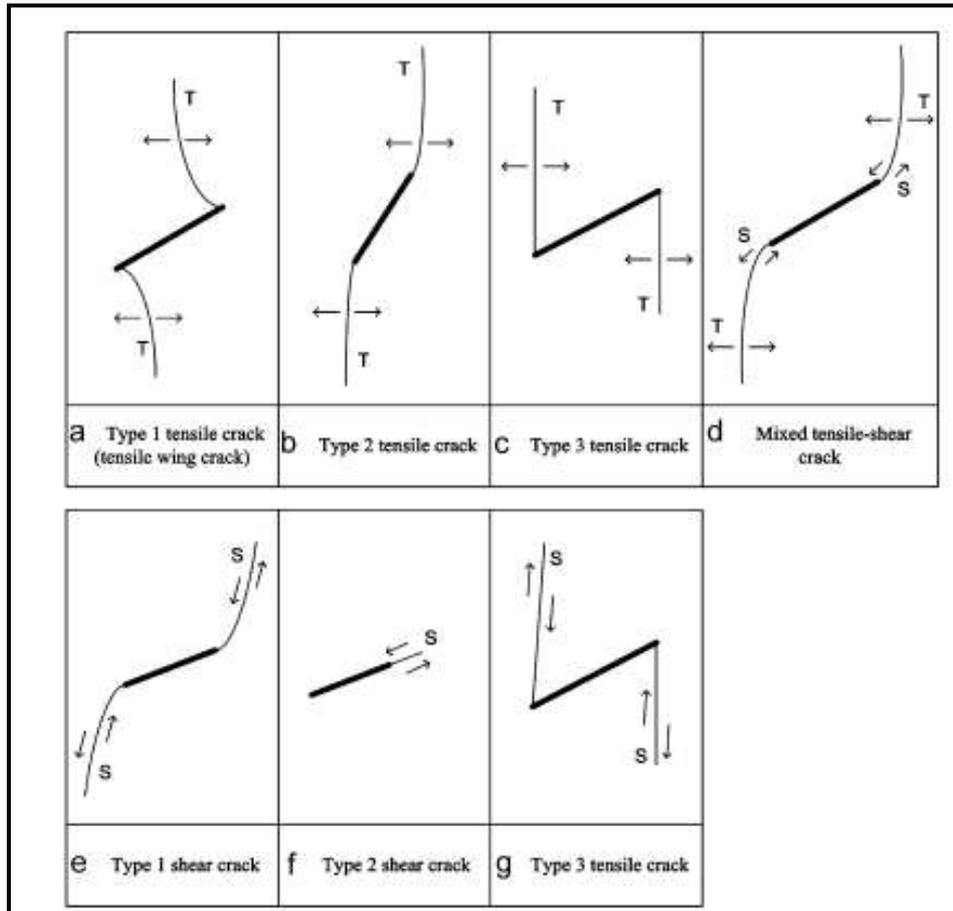


Figure 1.7. Sept types de propagation de fissures dans un échantillon contenant une entaille [Wong et Einstein, 2009].

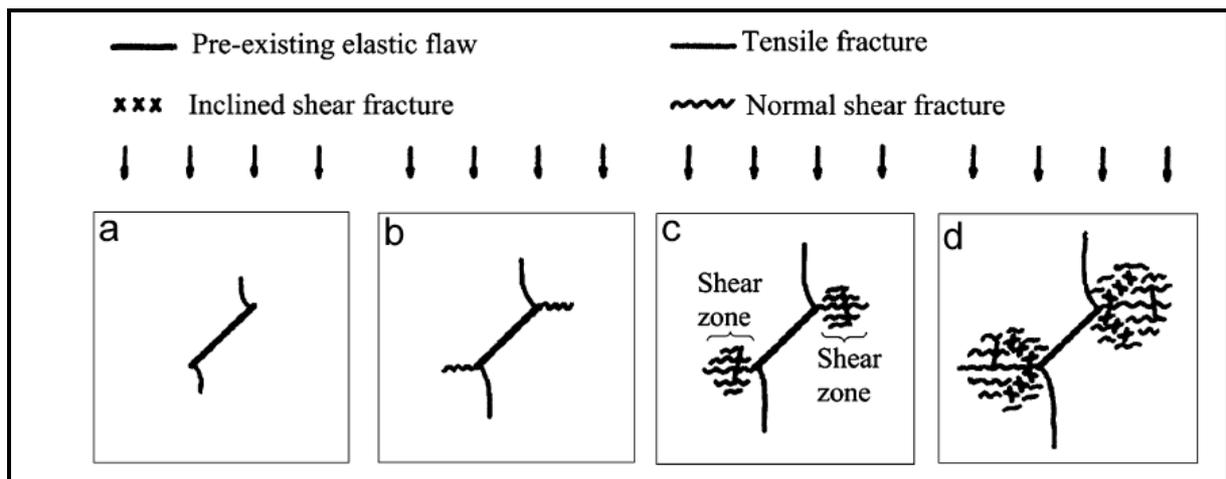


Figure 1.8. Evolution de l'endommagement dans un échantillon de Plâtre de Paris contenant une entaille ouverte [Laitaj, 1974].

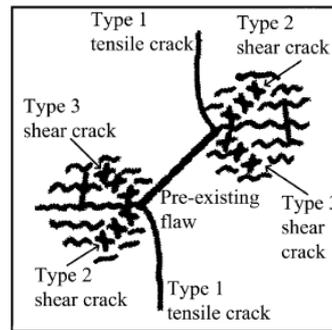


Figure 1.9. Classification de [Wong et Einstein, 2009] pour les fissures observées par [Laitaj, 1974]. (Les types des fissures sont donnés dans la Figure 1.7).

**Ingraffea et Heuze (1980)** ont réalisé des essais de compression uniaxiale sur des échantillons de calcaire et de granodiorite pour étudier l'initiation et la propagation de fissures. Les auteurs font les remarques suivantes (Figure 1.10) : tout d'abord des fissures primaires (primary cracks) s'initient à partir des points de concentration de la contrainte de traction, aux extrémités de l'entaille. Ces « fissures primaires » se propagent dans une trajectoire curviligne et s'orientent vers la direction de la contrainte principale majeure (de compression). D'autres fissures, appelées fissures secondaires (secondary cracks), s'initient plus tard à partir des zones de concentration de la contrainte de compression aux pointes de l'entaille. Ces fissures secondaires se propagent de manière instable et conduisent à la rupture de l'éprouvette. Les trajectoires des fissures observées sont illustrées dans la Figure 1.10. Dans ce travail, la nature (le « mode » de propagation) des fissures observées n'a pas été notée. D'après Wong et Einstein (2009), (Figure 1.10b) les fissures primaires sont des fissures de traction de type 1 (type 1 tensile wing crack – voir Figure 1.7) mais la nature des fissures secondaires n'est pas encore claire : soit fissures de traction, soit fissures de cisaillement ou soit de type mixte traction-cisaillement.

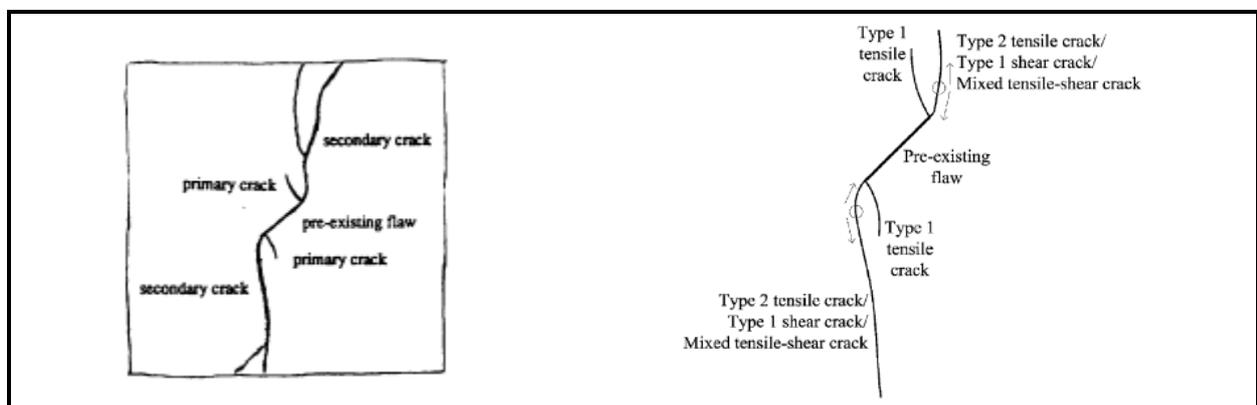


Figure 1.10. (A gauche) développement des fissures dans un échantillon pré-entaillé de calcaire [Ingraffea et Heuze, 1980] et (à droite) la classification de ces fissures par [Wong et Einstein, 2009]. (Les types de fissure sont donnés dans la Figure 1.7).

**Huang et al. (1990)** ont réalisé des essais de compression uniaxiale sur des éprouvettes de Marbre de Fangshan (dimensions : 104x80x6 mm<sup>3</sup>) et reporté les différentes phases de l'endommagement (Figure 1.11) : (a) l'initiation et propagation de « Primary Forward Tensile Cracks-PFTCs » (fissures n<sup>o</sup> 1). (b) l'initiation et propagation de « Secondary Forward Tensile Cracks- SFTs » (fissures n<sup>o</sup> 2). (c) l'initiation et l'intensification de « Backward Shear Belts-BSBs » (zone no 5) et « Forward Shear Belts-FSBs » (zone n<sup>o</sup> 4). (d) l'initiation et la propagation de « Backward Tensile Cracks-BTCs » (fissure n<sup>o</sup> 3). (e) Rupture de l'éprouvette. Ici, la nature des fissures a été indiquée et classifiée en deux

modes principaux : mode de traction et mode de cisaillement. Wong et Einstein (2009) ont reclassé ces fissures comme suit : PFTCs et SFTs sont de type 1 de traction (tensile wing cracks) ; BTCs est de type 3 de traction ; FSBs est de type 2 de cisaillement ; BTCs est de type 3 de cisaillement (voir Figure 1.7 pour la notion de type de fissures).

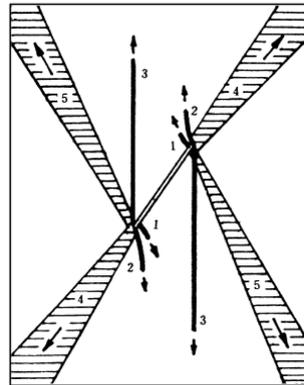


Figure 1.11. Phases du processus d'endommagement dans le Marbre de Fangshan [Huang et al., 1990] cité par [Wong et Einstein, 2009]. 1-PFTCs (primary forward tensile cracks); 2-SFTCs (secondary forward tensile cracks); 3-BTCs (backward tensile cracks); 4-FSBs (forward shear belts); 5-BSBs (backward shear belts).

**Al-Shayea (2005)** a étudié la propagation de fissures en réalisant des essais « Centrally Straight Notched Brazilian Disk – CSNBD » sur des éprouvettes cylindriques de calcaire d'épaisseur 22 mm, et de diamètre 98 mm ou 84 mm. L'inclinaison de l'entaille ( $\alpha$ ) varie de  $0^\circ$  à  $75^\circ$  par l'intervalle de  $15^\circ$  (Figure 1.12) Les nouvelles fissures s'initient aux pointes de l'entaille dans le cas où  $\alpha$  est inférieur à  $75^\circ$  et elles se propagent vers les points d'application de la charge. Dans le cas où  $\alpha$  est égale à  $75^\circ$ , les nouvelles fissures se propagent à partir du centre de l'entaille. Les observations sous *Microscope Electronique à Balayage* (Scanning Electron Microscopic –SEM) des surfaces des fissures indiquent la nature des fissure : soit mode I ( $\alpha = 0^\circ$  et  $75^\circ$ ), soit une combinaison de mode I et mode II ( $\alpha = 15^\circ$ ), soit cisaillement ( $\alpha = 30^\circ$ ), soit encore compression et cisaillement ( $\alpha = 45^\circ$  et  $60^\circ$ ).

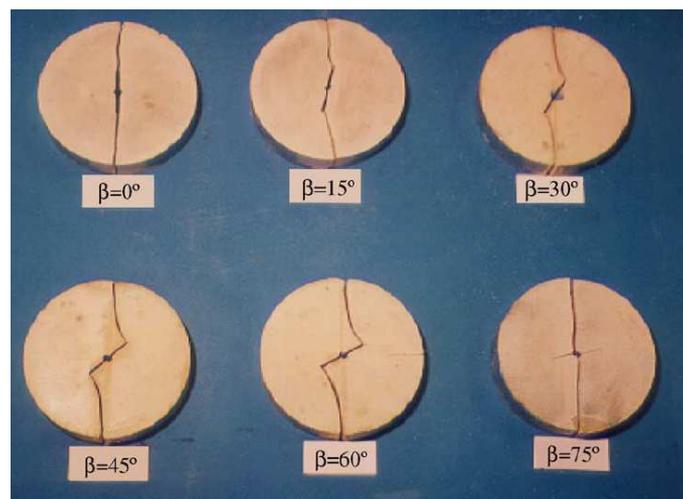


Figure 1.12. Trajectoires des fissures après rupture observées lors d'essais CSNBD sur des échantillons cylindriques de calcaire [Al-Shayea, 2005].

**De Sanctis (2005)** a mené cinq essais de compression en déformation plane sur des échantillons parallélépipédiques entaillés (dimensions 100 x 50 x 35 mm) d'un Tuf de Naples (cette roche est l'un des matériaux étudiés dans notre étude expérimentale). Les entailles ont une largeur de 0.4 mm, une longueur de 12 mm et une inclinaison de 45° par rapport à la direction de la charge. Les traces des fissures observées sont présentées dans la Figure 1.13. L'auteur a reporté deux types des fissures : i) des fissures primaires (wing cracks), s'initiant aux pointes de l'entaille, et ii) des fissures secondaires. Notons qu'ici, le terme «secondaire» a été utilisé pour indiquer une relation temporelle sans impliquer le mode de fissuration. Toutes les fissures observées « fonctionnent » en mode I.

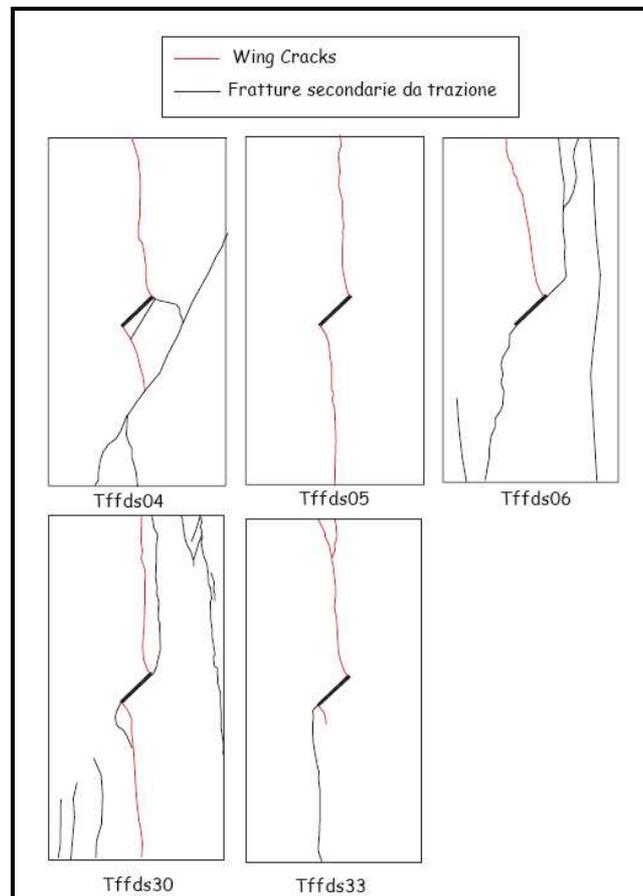


Figure 1.13. Trajectoires et types de fissures après rupture dans des essais de compression en déformation plane sur le Tuf de Naples [de Sanctis, 2005].

### 1.3.2.2. Eprouvettes avec plusieurs entailles

La coalescence se produit lorsque deux entailles initiales sont reliées par une fissure nouvellement formée dans les échantillons. Cette coalescence peut résulter de fissures de traction, de fissures de cisaillement, ou d'une combinaison des deux. Expérimentalement, la coalescence et l'interaction des fissures ont été intensivement étudiées depuis les années soixante [Brace et Bombolakis, 1963; Horii et Nemat-Nasser, 1985 ; Shen et *al.*, 1995; Bobet et Einstein, 1998; Bobet, 2000; Li et *al.*, 2005; Park et Bobet, 2009; Sagong et Bobet, 2002; Wong et Chau, 1998; Wong et *al.*, 2001; Wong et Einstein, 2008a-b; de Sanctis, 2005].

L'une des premières recherches a été réalisée par **Brace et Bombolakis (1963)** sur un échantillon de verre avec des entailles de forme « en échelons » sous compression uniaxiale. Dans cette expérience, les auteurs n'ont observé ni coalescence ni interaction entre les entailles et ont indiqué que

le développement des fissures de traction (wing cracks) est essentiellement le même que celui observé dans le cas d'une entaille isolée (Figure 1.14).

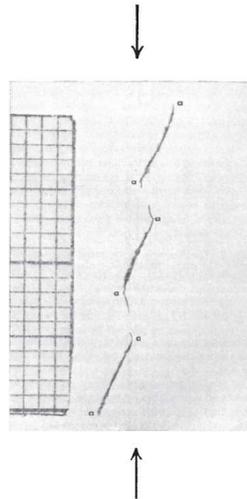


Figure 1.14. Développement de fissures de traction initiées aux pointes d'entailles préexistantes dans un échantillon de verre sous compression uniaxiale [Brace et Bombolakis, 1963].

**Horii et Nemat-Nasser (1985)** ont utilisé des échantillons constitués de plaques minces de Résine de Colombia CR39 (Figure 1.15 a), avec d'entailles préexistantes, rectilignes de faible largeur et de différentes tailles. Ils ont montré que, en l'absence de confinement latéral, des fissures émanant des pointes des grandes entailles se propagent dans la direction de la compression (verticale) (Figure 1.15 b). D'autre part, la présence d'une contrainte de compression latérale (horizontale) modifie le mode de propagation. Sous un certain état de chargement, les fissures émanant des petites entailles deviennent instables, et forment une zone localisée d'endommagement (Figure 1.15 c).

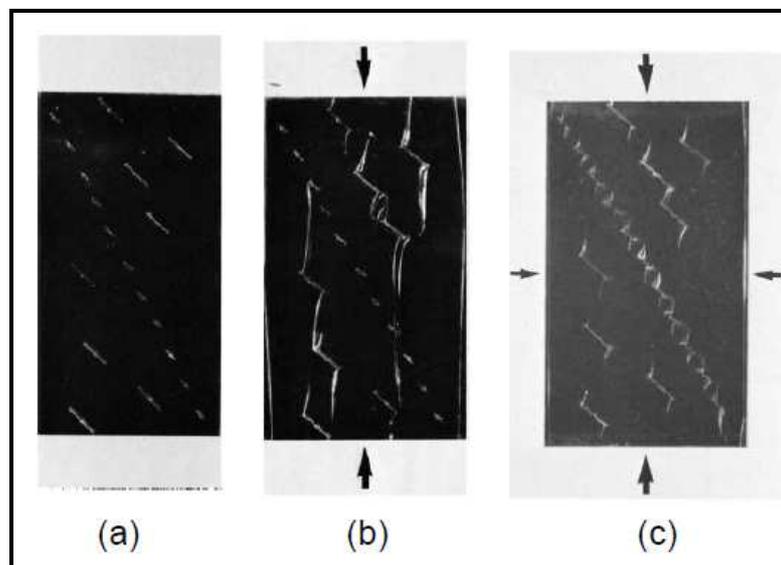


Figure 1.15. Endommagement d'une plaque de CR39 contenant de multiples entailles : (a) géométrie des entailles; (b) endommagement en l'absence de pression de confinement; (c) endommagement sous pression de confinement [Horii et Nemat-Nasser, 1985].

**Shen et al. (1995)** ont réalisé des essais sur des éprouvettes de gypse ( $154 \times 76.2 \times 30 \text{ mm}^3$ ) en modifiant les angles d'inclinaison des entailles ( $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ) ainsi que l'inclinaison du « pont de

roche » ( $\beta$  varie de  $45^\circ$  à  $120^\circ$  par l'intervalle de  $15^\circ$ ) (le « pont de roche » est le ligament de matière entre les deux extrémités internes des entailles). La géométrie des éprouvettes utilisées dans leurs travaux est présentée dans la Figure 1.16 (a et b). Dans ce travail, le processus de la rupture a été suivi à l'aide d'un microscope associé à une camera.

Les auteurs ont remarqué que le type de coalescence est notamment fonction de l'inclinaison du pont de roche. Pour les cas des entailles ouvertes et fermées, trois types différents de coalescence ont été observés :

- coalescence causée par des fissures en mode I, dans le cas d'une inclinaison importante de pont ( $\beta = 105^\circ$  et  $120^\circ$ ).
- coalescence causée par la combinaison de fissures en mode I et en mode II, pour des valeurs intermédiaires de l'angle d'inclinaison du pont ( $\beta = 75^\circ$  et  $90^\circ$ ).
- coalescence causée par des fissures en mode II pour des faibles inclinaisons du pont ( $\beta = 45^\circ$  et  $60^\circ$ )

Le détail de ces observations est présenté dans la Figure 1.17. Notons que les modes de coalescence sont identifiés en examinant les surfaces des fissures par une étude de fractographie : les fissures en mode II ont généralement des surfaces très rugueuses, bien différentes des surfaces relativement lisses des fissures en mode I. Ces fissures de cisaillement peuvent être le résultat de nombreuses microfissures de traction qui pourraient former les surfaces rugueuses.

Shen et al. (1995) ont également constaté que la coalescence induite par des fissures de cisaillement se développe à partir des pointes internes des entailles (Figure 1.16c), tandis que la coalescence induite par la combinaison de fissures de traction et de fissures de cisaillement démarre souvent au centre du pont et se propage ensuite vers les deux pointes internes des entailles. En utilisant la méthode numérique des discontinuités des déplacements (Displacement Discontinuity Method - DDM), les auteurs ont analysés l'influence de la condition du contact des entailles sur l'allure des wing crack (contact frottant pour le cas des entailles fermées ou non frottant pour le cas de entailles ouvertes). Les wing cracks avec une condition attritive du contact sont moins curvilignes que ceux observés en l'absence de frottement entre les deux lèvres de l'entaille.

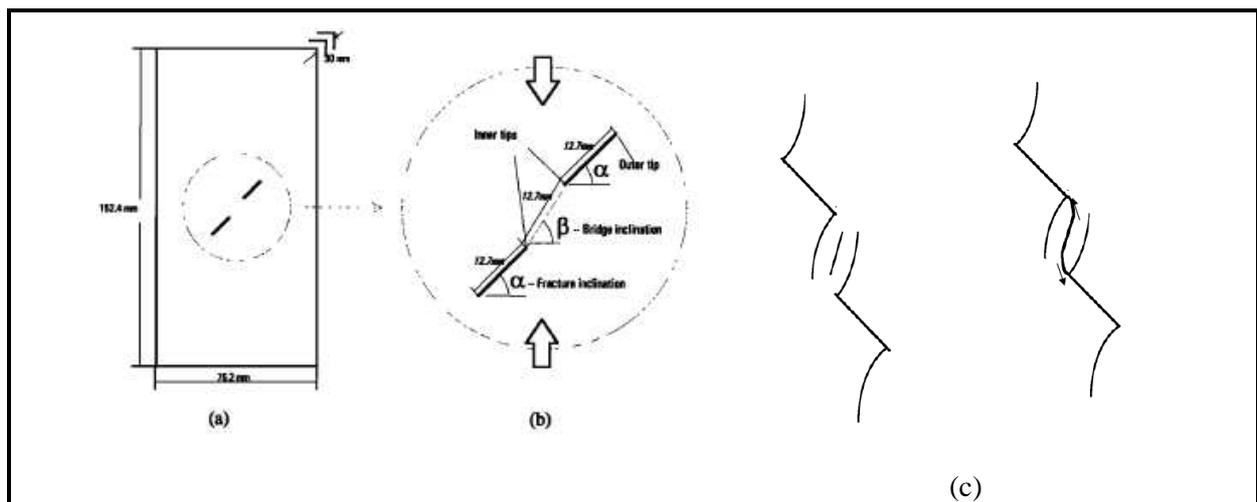


Figure 1.16. Coalescence dans le gypse : (a) dimensions des échantillons; (b) détail des entailles et de pont ; (c) développement de la coalescence induite par traction et cisaillement pour l'échantillon avec  $\alpha = 45^\circ$  et  $\beta = 90^\circ$ . La coalescence démarre au centre du pont et se propage vers les deux pointes des entailles [Shen et al., 1995].

Specimen $\alpha/\beta$	Critical Load at Coalescence, MPa	Schematic Path of Coalescence (a) frictional (b) nonfrictional	Description of Coalescence	Mode of Coalescence
<b>30°/45°</b> (2 specimens with friction fractures + 1 specimen with nonfrictional fractures)	No coalescence (frictional fractures)  17.2 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: rough, with many small kink steps; containing crushed gypsum.	Shearing
<b>45°/45°</b> (2 + 2)	21.9, 22.2 MPa (frictional fractures)  19.4, 17.9 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: rough, with many small kink steps; containing crushed gypsum.	Shearing
<b>45°/60°</b> (1 + 1) <sup>§</sup>	17.8 MPa (frictional fractures)  14.1 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: rough, with several large kink steps. Noticeable crushed gypsum presented.	Shearing
<b>45°/75°</b> (1 + 1) <sup>§</sup>	19.2 MPa (frictional fractures)  14.1 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: unclear. Surface characterization: rough, with two big kink steps. No noticeable crushed gypsum.	Shearing + tension
<b>45°/90°</b> (2 + 1)	(a) 17.8, MPa (frictional fractures) (a') 16.8* MPa (frictional fractures)  (b) 16.4 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: (a) wing fracture + secondary fracture; (a') and (b) secondary fracture. Initiation position: (a) preexisting fracture tips; (a') and (b) intact material. Surface characterization: some parts are clean and smooth while other parts are rough with crushed gypsum.	Shearing + tension
<b>45°/105°</b> (2 + 1)	17.8, 16.8 MPa (frictional fractures)  16.4 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: wing fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: smooth and clean. Note: additional secondary fractures occur from the outer tips in case (b).	Tension
<b>45°/120°</b> (2 + 1)	(a) 21.0 MPa (frictional fractures) (a') 23.1 MPa (frictional fractures)  (b) 17.6 MPa (nonfrictional fractures)		Type of coalescing fracture: wing fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: smooth and clean. Note additional coalescence by secondary fractures occurs in case (b).	Tension

Figure 1.17. Résumé des observations de coalescence faites par [Shen et al.,1995].

Specimen $\alpha/\beta$	Critical Load at Coalescence MPa	Schematic Path of Coalescence		Description of Coalescence	Mode of Coalescence
		(a) frictional	(b) nonfrictional		
<b>60°/45°</b> (2 + 1)	22.4, 21.4 MPa (frictional fractures)  17.8 MPa (nonfrictional fractures)			Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: rough, with many small kink steps; containing crushed gypsum.	Shearing
<b>60°/60°</b> (4 + 1)	20.5, 17.8, 20.3, 20.9 MPa (frictional fractures)  15.2 MPa (nonfrictional fractures)			Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: rough, with several large kink steps. Noticeable crushed gypsum presented.	Shearing
<b>60°/75°</b> (1 + 1) <sup>†</sup>	18.5 MPa (frictional fractures)  13.7 MPa (nonfrictional fractures)			Type of coalescing fracture: (a) secondary fracture ; (b) secondary fracture + wing fracture. Initiation position: pre-existing fracture tips. Surface characterization: rough, with a few kink steps. No noticeable crushed gypsum.	Shearing + tension
<b>60°/90°</b> (1 + 1) <sup>†</sup>	19.2 MPa (frictional fractures)  14.2 MPa (nonfrictional fractures)			Type of coalescing fracture: (a) wing fracture ; (b) wing fracture + secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips; Surface characterization: most parts are clean and smooth.	Tension + shearing
<b>60°/105°</b> (2 + 1)	19.9, 22.2 MPa (frictional fractures)  18.0 MPa (nonfrictional fractures)			Type of coalescing fracture: wing fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: smooth and clean.	Tension
<b>60°/120°</b> (1 + 1) <sup>†</sup>	23.5 MPa (frictional fractures)  21.0 MPa (nonfrictional fractures)			Type of coalescing fracture: secondary fracture. Initiation position: preexisting fracture tips. Surface characterization: very rough, coated with a lot of crushed gypsum.	Shearing

Figure 1.17. Résumé des observations de coalescence faites par [Shen et al.,1995] (suite).

**Bobet et Einstein (1998)** ont effectué des essais de compression uniaxiale sur des échantillons entaillés de gypse. Le détail de la géométrie des éprouvettes est présenté dans la Figure 1.18. Deux types des fissures sont reportés : les wing cracks et les « fissures secondaires ». Dans ces essais, les auteurs observent trois types de coalescence (I, II, III dans la Figure 1.19) qui ressemblent à ceux observés par Shen et al. (1995). La nature des fissures (de cisaillement ou de traction) a été identifiée par une étude de fractographie des surfaces.

- La coalescence de type I apparait lorsque le rapport  $s/c$  est inférieur à  $1/3$ , les deux entailles sont coplanaires ou quasi-coplanaires. Dans ce cas, la coalescence se produit par la connexion des fissures secondaires internes. La propagation des fissures secondaires est stable après l'initiation mais devient instable lors de la coalescence. L'inspection des surfaces des fissures produisant la coalescence montre la présence de gypse concassé et des poudres de gypse, ce qui suggère que la coalescence se produit par cisaillement.

- La coalescence de type II se produit en reliant deux fissures secondaires internes par une fissure secondaire de mode I. Ce type de coalescence est observé lorsque le rapport  $s/c$  est supérieur à  $1/3$ . Les fissures secondaires internes de cisaillement se propagent de manière stable à partir des pointes intérieures des entailles. Ensuite, le lien entre ces deux fissures se produit par l'apparition d'une fissure secondaire de mode I qui s'initie aux pointes des fissures secondaires originales. La surface de la fissure produite est caractérisée par deux zones rugueuses situées à côté des pointes internes des entailles avec du gypse concassé et de la poudre de gypse, ce qui indique à nouveau la présence d'un cisaillement. Une zone centrale plus propre et plus lisse correspond à une ouverture pure.
- Le type III est obtenu lorsque le rapport  $s/c$  est égal à 1. Ce type correspond à la propagation d'une fissure secondaire s'initiant à partir de la pointe interne d'une entaille qui atteint la fissure wing crack interne de l'autre entaille.

Bobet et Einstein (1998) n'ont pas directement observé les types IV et V (Figure 1.19) dans leurs expériences, mais ces types de coalescence ont été définis en utilisant les résultats de Rey et Einstein (1991) et Shen et *al.* (1995) pour des géométries où les entailles se chevauchent. Les auteurs ont également constaté que la nature des entailles (fermée ou ouverte) avait un effet significatif sur la valeur de la contrainte d'initiation des fissures. Cette contrainte est plus élevée dans le cas des entailles fermées que dans le cas des entailles ouvertes, que ce soit pour les wing cracks mais également pour les fissures secondaires.

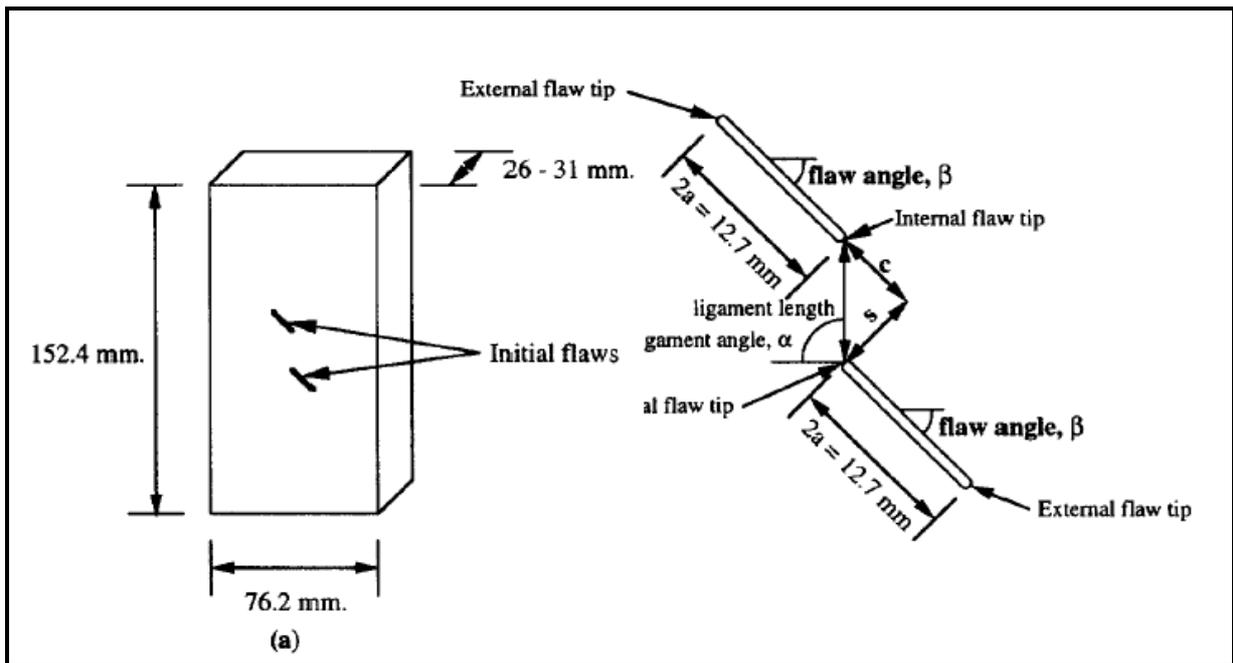


Figure 1.18. Détails des géométries des éprouvettes [Bobet et Einstein, 1998].

Type	Schematic path of Coalescence	Description of Coalescence	Mode of Coalescence
I		Type of coalescing fracture: secondary shear crack. Initiation position: preexisting flaw tips. Crack surface characterization: rough, with many small kink steps; contains crushed gypsum	Shearing
II		Type of coalescing fracture: secondary shear and tensile cracks. Initiation position: preexisting flaw tips. Crack surface characterization: some parts are clean and smooth while other parts are rough with crushed gypsum	Shearing + tension
III		Type of coalescing fracture: secondary shear crack and wing crack. Initiation position: preexisting flaw tips. Crack surface characterization: some parts are clean and smooth while other parts are rough with crushed gypsum	Shearing + tension
IV		Type of coalescing fracture: wing crack. Initiation position: preexisting flaw tips. Crack surface characterization: smooth and clean.	Tension
V		Type of coalescing fracture: secondary crack. Initiation position: preexisting flaw tips. Crack surface characterization: very rough, coated with a lot of crushed gypsum	Shearing?

Figure 1.19. Cinq types de coalescence observés dans des échantillons entaillés de gypse [Bobet et Einstein, 1998].

**Park et Bobet (2009)** ont mené un grand nombre d'essais de compression uniaxiale sur des échantillons de gypse avec deux, trois ou seize entailles - ouvertes ou fermées. Le détail de la configuration des entailles est présenté dans la Figure 1.20. Les mêmes processus de propagation des fissures observés avec les entailles ouvertes ont également été observés avec les entailles fermées. Essentiellement, trois types de fissures ont été reportés : des fissures de traction, des fissures « secondaires » coplanaires et obliques de cisaillement.

Les auteurs ont identifié huit types de coalescence, présentés ici dans la Figure 1.21. La coalescence peut à nouveau être pilotée par les fissures de traction, par des fissures secondaires ou par la combinaison de fissures de traction et fissures de cisaillement. Les types de coalescence dépendent de la géométrie des entailles qui est définie par l'angle d'inclinaison des entailles et par l'inclinaison du pont de roche (degré de chevauchement des entailles). Lorsque la coalescence est produite par les fissures de traction ou par une combinaison de fissures de traction et de fissures secondaires, la phase finale de propagation est stable. Au contraire, lorsque la coalescence se produit par les fissures secondaires seules, la phase finale de propagation est instable.

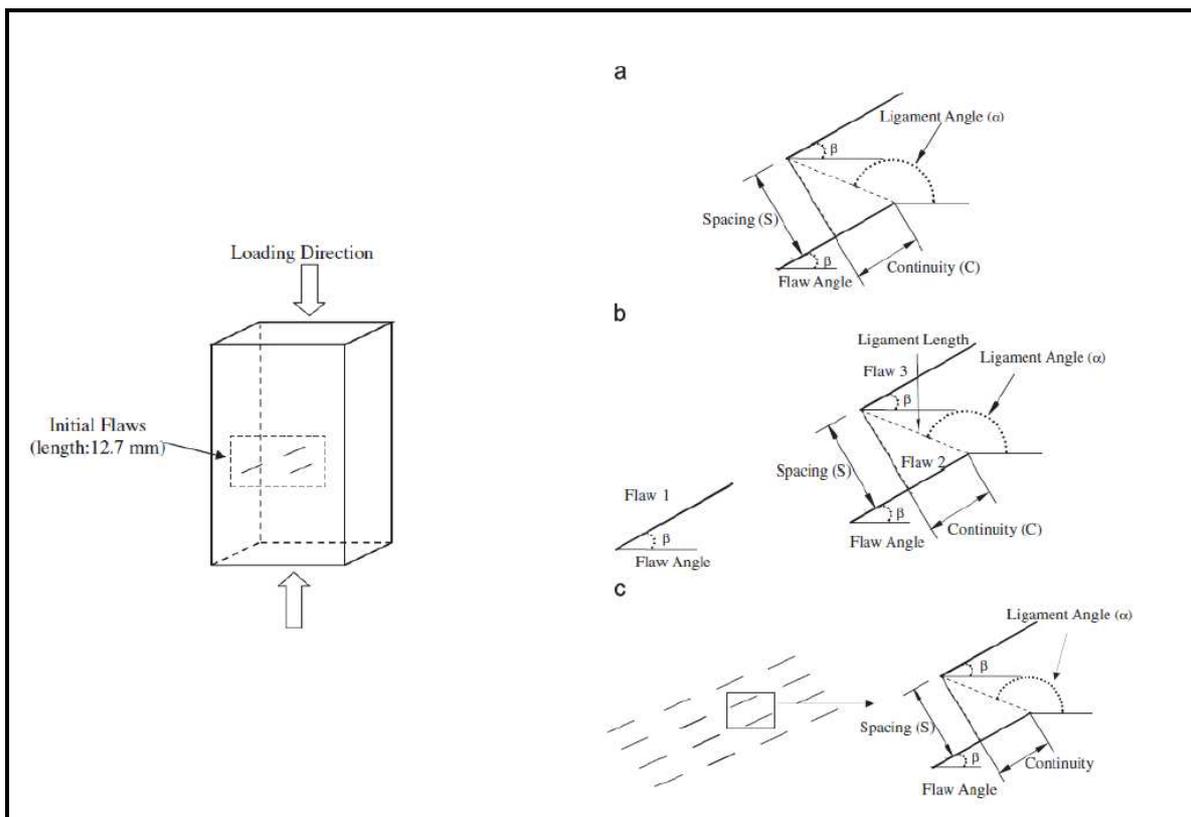


Figure 1.20. Détails des géométries des éprouvettes [Park et Bobet, 2009].

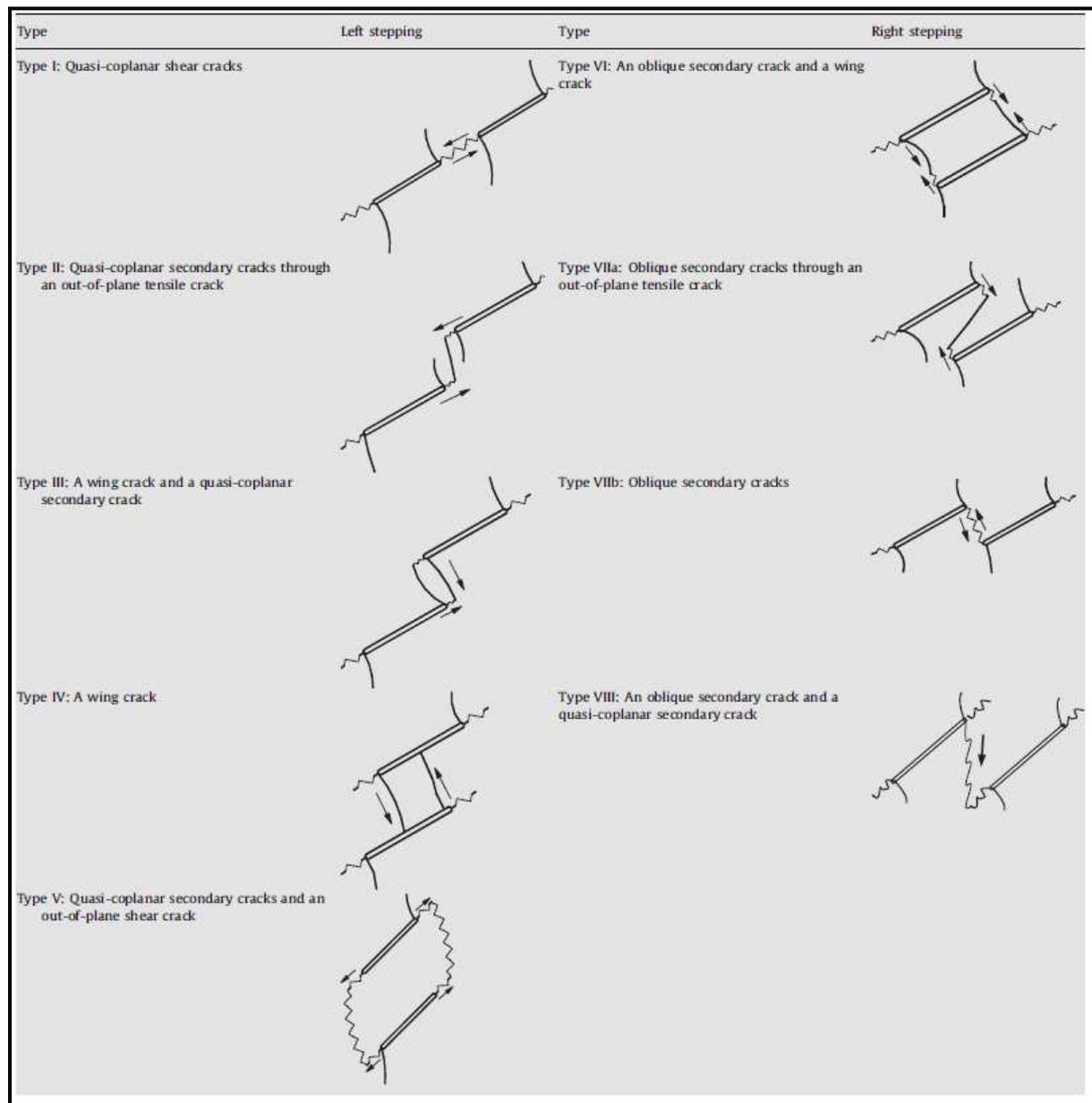


Figure 1.21. Huit types de coalescence dans les échantillons entaillés de gypse [Park et Bobet, 2009].

**De Sanctis (2005)** a mené des essais de compression en déformation plane ( $\varepsilon_z=0$ ) sur des éprouvettes parallélépipédiques entaillées ( $100 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ ) de Tuf de Naples avec divers angles d'inclinaison  $\beta$  du pont de roche (de  $45^\circ$  à  $120^\circ$  comme montré dans les Figure 1.22 a-f). Les entailles ont une ouverture de 0.4 mm, une longueur de 12mm et une inclinaison de  $45^\circ$  par rapport à la direction (verticale) de chargement. La longueur D du pont est égale à 12 mm dans tous les essais. L'auteur a reporté trois différents types de coalescence qui dépendent notamment de l'angle  $\beta$  :

- $45^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$  : la coalescence est produite par la fissure secondaire.
- $75^\circ \leq \beta \leq 105^\circ$  : la coalescence est produite par la combinaison des fissures secondaires et des wing cracks.
- $105^\circ \leq \beta$  : la coalescence est produite par les wing crack.

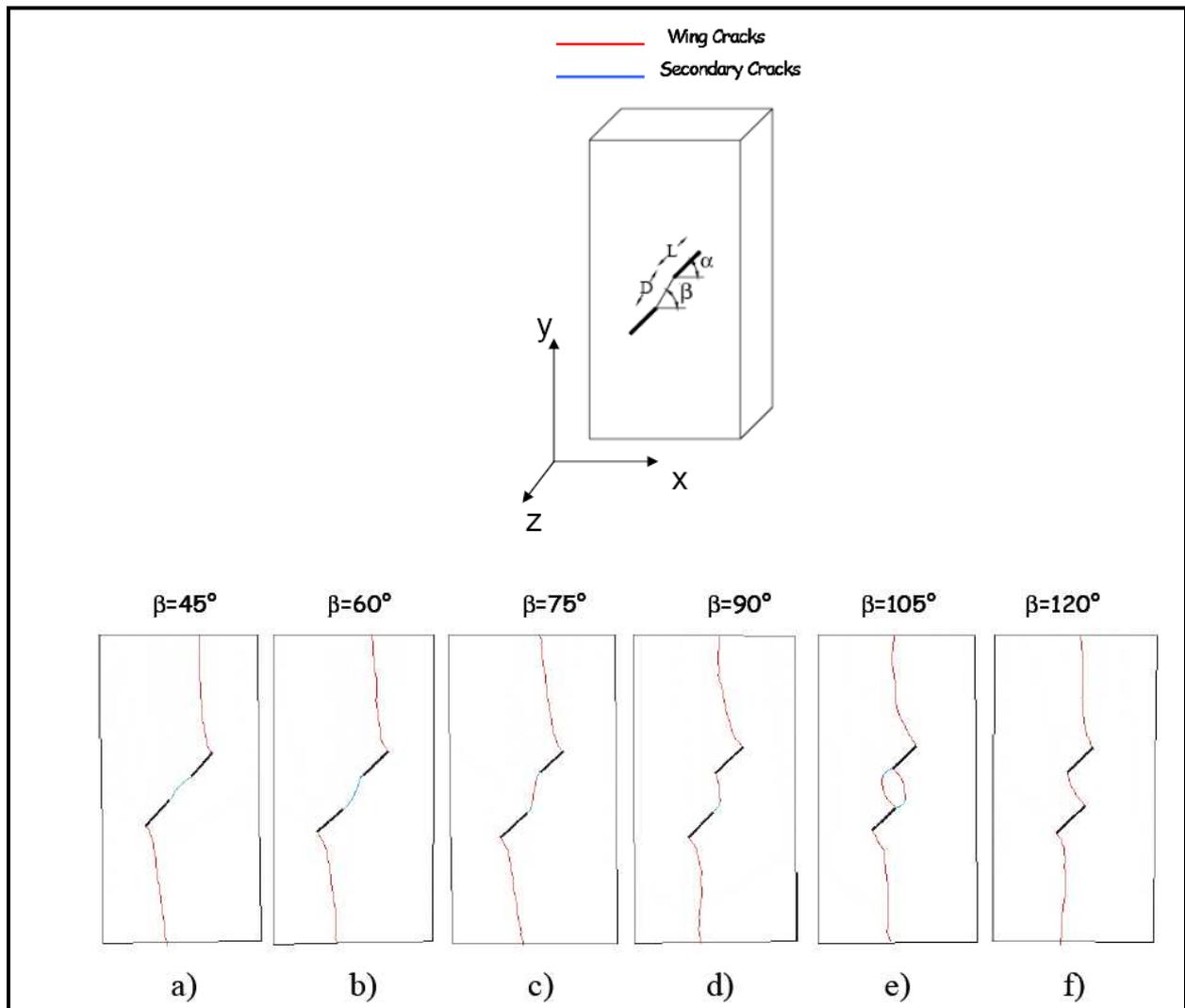


Figure 1.22. Trajectoires des fissures observées sur les échantillons entaillés de Tuf de Naples [de Sanctis, 2005].

## 1.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases de la théorie de la mécanique de la rupture et rappelé quelques observations expérimentales de la fissuration dans les roches, faites sur des éprouvettes testées en laboratoire. Quand l'échantillon ne comporte qu'une entaille préalable, deux types des fissures sont observés : (1) des fissures de traction appelées wing cracks, qui s'initient toujours en premier à la pointe de l'entaille dans la zone de traction élevée, et (2) des « fissures secondaires », qui sont des fissures (ou des zones) de cisaillement. Pour des échantillons contenant de multiples entailles, la propagation des fissures et la coalescence des entailles sont des phénomènes relativement compliqués. La coalescence dépend à la fois du matériau et de la géométrie des entailles. D'une manière générale, la coalescence peut se produire par la liaison des fissures de traction (mode I), des fissures secondaires (fissures de cisaillement-mode II) ou par la combinaison des deux. La phase finale de propagation est stable pour la coalescence causée par les fissures de traction ou par la combinaison des fissures de traction et des fissures secondaires. Par contre, cette phase est instable si la coalescence se produit par les fissures secondaires uniquement.

Soulignons que dans tous ces différents travaux, les fissures sont examinées en surface de l'échantillon par l'utilisation éventuelle des photos numériques à haute résolution, des cameras à haute vitesse d'acquisition ou par l'étude de la fractographie des fissures. Toutefois, il semble que dans certains cas, les fissures ne sont pas observables dans les images, même à haute résolution, ce qui est particulièrement le cas des fissures ayant une faible ouverture, inférieure au pixel de l'image (*e.g.*, fissures de cisaillement). En plus, les faibles mouvements relatifs des faces des fissures sont très difficiles à interpréter à l'œil (notamment dans le cas des fissures de cisaillement) ; l'identification correcte du « mode » de la fissure (traction ou cisaillement) dans ce cas est alors très délicate. L'étude de la fractographie peut permettre d'identifier le mode de fissure, mais seulement après la ruine de l'échantillon. Dans les roches naturelles, d'autres discontinuités sont fréquemment rencontrées et peuvent influencer la trajectoire et la nature des fissures observée en surface. Pour surmonter ces difficultés, l'utilisation des techniques de mesure de champs complets est indispensable et constitue en effet l'un des objectifs principaux de cette thèse

# **Chapitre 2 : TECHNIQUES DE MESURES DE CHAMPS ET MISE EN ŒUVRE**

2.1. Introduction	28
2.2. La corrélation d'images numériques	28
2.2.1. Corrélation d'images numériques 2D (DIC-2D)	29
2.2.2. Stéréo-corrélation d'images (SIC)	32
2.2.3. Logiciel de DIC et appareils photographiques	33
2.2.4. Quelques exemples d'utilisation de la DIC en géomécanique	38
2.3. L'émission acoustique (EA)	43
2.3.1. Définitions principales	43
2.3.2. Techniques de mesure des EA en laboratoire	44
2.3.3. Caractéristiques des signaux acoustiques	45
2.3.4. Techniques de localisation d'un événement	46
2.3.5. Quelques exemples d'étude de l'endommagement dans les roches par l'EA	47
2.3.6. Dispositifs de la technique des EA	54
2.4. La tomographie à rayons X (RX)	57
2.4.1. Principes de la méthode	57
2.4.2. Exemples d'utilisation de la tomographie RX dans l'étude de l'endommagement des géomatériaux	59
2.4.3. Appareil de tomographie à RX au laboratoire 3SR	62
2.5. Conclusion	64

## 2.1. Introduction

Dans les dernières décennies, diverses techniques de mesure de champs ont été développées et utilisées pour la caractérisation du comportement des matériaux. Ces mesures permettent d'identifier différentes variables physiques : des champs cinématiques (déplacements, déformations), des champs de densité, de température, *etc.* Dans le but de suivre le processus de la déformation dans les roches au cours d'un chargement mécanique, nous utilisons trois techniques de mesure non destructives :

- la corrélation d'images numériques (Digital image correlation-DIC) pour les mesures des champs cinématiques à la surface d'échantillons,
- l'utilisation de techniques d'émissions acoustiques (EA) qui reflète l'activité de déformation inélastique (micro-ruptures) dans l'échantillon et ainsi aide à évaluer la localisation de ces micro-ruptures et la caractérisation des modes de rupture,
- l'étude comparative d'un échantillon sain et *post-mortem* par tomographie à rayon X (RX) utilisée pour la caractérisation de la structure interne et l'identification de l'endommagement localisé au cœur des matériaux.

Ce chapitre présente tout d'abord brièvement les principes des techniques de mesure utilisées. Quelques applications de ces techniques aux études du comportement des géomatériaux rencontrées dans littérature seront ensuite abordées. Enfin, pour chaque technique, nous présentons la mise en œuvre dans notre étude expérimentale.

## 2.2. La corrélation d'images numériques

Dans les essais mécaniques utilisant les techniques de mesure classiques avec capteurs à jauges positionnés aux limites des éprouvettes, la réponse mécanique des matériaux fournit une information à l'échelle globale ; le point (la région) de mesure devient représentant(e) de l'ensemble de l'échantillon. La réponse mécanique obtenue ne reflète le comportement « vrai » du matériau que dans le cas où ce dernier est parfaitement homogène, les conditions aux limites parfaitement contrôlées et la déformation parfaitement uniforme, ce qui n'est en effet jamais le cas. En outre, même si le matériau est homogène, la déformation d'un échantillon peut, pour certains états de chargement, se « localiser » (*e.g.*, bande de cisaillement, bande de compaction, striction, fissure, *etc.*). Dans le cas des géomatériaux qui nous intéressent ici (roches), des fissures préexistantes, des pores et des inclusions sont communément présentes, ce qui conduit à des très fortes hétérogénéités de comportement. Les mesures des champs sont des outils très avantageux pour interpréter plus correctement les résultats.

La corrélation d'images numériques (DIC) est une méthode de métrologie optique basée sur la comparaison d'images numériques. Au cours des 30 dernières années, les techniques DIC se sont répandues comme un outil puissant et flexible pour la mesure de déformation dans le domaine de la mécanique expérimentale des solides. L'une des premières études proposant l'utilisation de méthodes de traitement d'images pour évaluer la déformation est apparue dans les années 80, [Peters et Ranson, 1982]. A ce jour, cette technique est de plus en plus utilisée dans nombreuses disciplines. Elle apparaît sous plusieurs dénominations, avec parfois quelques variantes, Digital Image Correlation, Texture Correlation, Digital Speckle Correlation Methode (DSCM), Electronic Speckle Photography, Computer Aided Speckle Interferometry. [cf. Pan *et al.*, 2009]. En outre, il convient de noter que la vélocimétrie par images de particules (Particule Image Velocity - PIV) - une technique importante utilisée pour déterminer le champ de vitesse d'un fluide [Adrian, 2005], est similaire à la technique DIC. Les applications directes de PIV pour la mesure de la déformation du sol ont également été reportées [White *et al.*, 2003]

Une autre remarque importante concerne la facilité de la mise en œuvre des techniques DIC dans les expériences mécaniques. Elles ne nécessitent qu'un appareil photo pour la mesure 2D ou deux appareils photo montés sur un banc rigide si nous souhaitons acquérir les trois composantes des déplacements d'une surface.

## 2.2.1. Corrélation d'images numériques 2D (DIC-2D)

### 2.2.1.1. Principe

Le principe de cette méthode est d'évaluer le champ de déplacements (et ainsi le champ de déformations) à la surface plane d'un objet qui se déforme. La méthode s'appuie sur la comparaison de deux images numériques de la surface d'un objet, l'une à l'état initial – avant déformation (image de référence) et l'autre à l'état déformé (l'image à corrélérer). Plusieurs implémentations ont été développées mais généralement, le principe des techniques DIC 2D consiste en un certain nombre d'étapes de base [Sutton et al., 1986; Sutton et al., 2009 ; Pan et al., 2009; Vacher, 1999 ; Coudert, 2005] :

- en premier lieu, un domaine de mesure dans l'image de référence doit être choisi. Des nœuds virtuels sont ensuite définis sur l'image de référence, généralement à l'interception d'une grille carrée. Il s'agit ensuite de rechercher la position de ces nœuds dans l'image déformée ;
- afin de rechercher les points correspondants entre deux images, un ensemble de pixels (appelé « motif » ou « ZOI, Zone Of Interest ») centrés autour du point P est défini. Ce motif est aussi choisi généralement de forme carré (Figure 2.1) ;

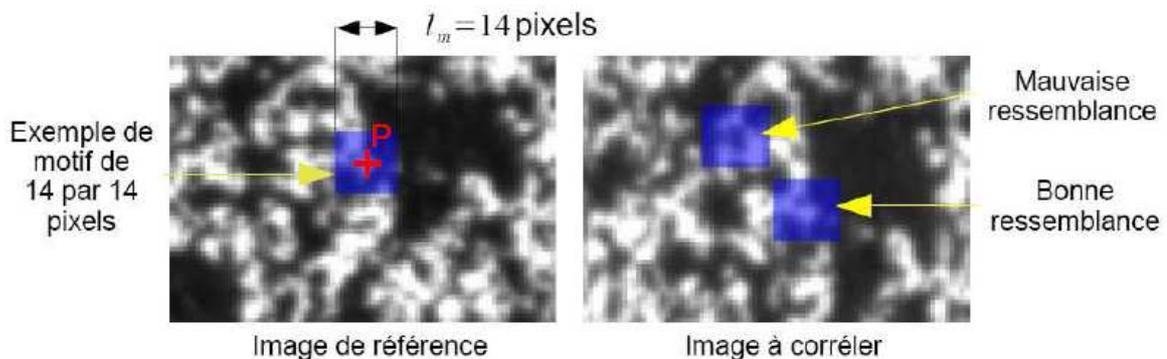


Figure 2.1. Illustration du principe de la technique de corrélation d'images numériques [Coudert, 2005].

- la recherche de motifs similaires entre les deux images nécessite le calcul d'un coefficient de corrélation. Différents types de coefficients de corrélation sont communément utilisés : les deux principaux sont les coefficients nommés « normalized cross-correlation (NCC) », « zero normalized cross-correlation (ZNCC) » [Coudert, 2009]. Nous trouvons également des coefficients de type « Sum-Squared difference (SSD) » [Pan et al., 2009], ou “normalized sum of square difference”-NSSD, “zero normalized sum of square difference”-ZNSSD. La procédure d'identification de motifs homologues entre deux images s'appuie sur la recherche de la position d'un optimum dans la distribution du coefficient de corrélation correspondant à la fenêtre de recherche ;

- le raffinement du sous-pixel : cette étape est importante pour la mesure de déplacement avec une précision sub-pixellique. De nombreux algorithmes de raffinement permettant d'atteindre une précision sub-pixellique ont été développés [Pan et al., 2006 et Pan et al., 2009]. La prise en compte de la déformation et des rotations du motif dans l'image déformée, est fortement conseillée pour les cas des grandes déformations [Bruck et al., 1989]. Bien évidemment, les déplacements du motif entre les deux images ne correspondent jamais à un nombre entier de pixels. Il est donc nécessaire, avant de calculer le coefficient de corrélation, d'estimer l'intensité des niveaux de gris de ces points en position sub-pixel en utilisant certaines interpolations (e.g, l'interpolation bilinéaire, bicubique, bicubique B-spline, biquintique B-Spline ou autres). A titre d'exemple, la Figure 2.2 donne une illustration de deux différentes interpolations (bilinéaire et spline cubique) appliquées sur une zone de dimension 10x10 pixels par Sutton et al. (2009). Une interpolation d'un ordre élevé est recommandée puisqu'elle donnera lieu à une meilleure précision et à une meilleure convergence des algorithmes ;
- le calcul des déformations est un post-traitement de DIC. Les déformations au sens de Green Lagrange [E] sont extraites des champs de déplacements identifiés (voir section 2.2.3.1)

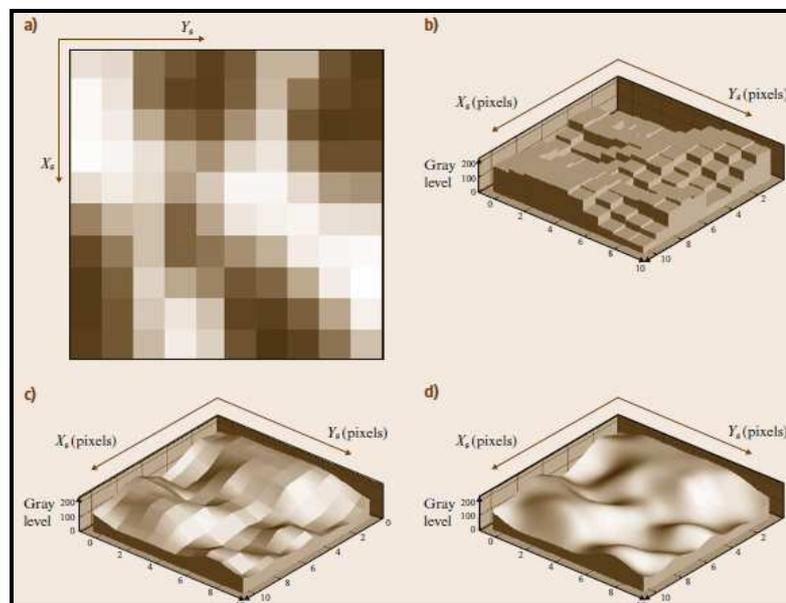


Figure 2.2. Différentes interpolations d'intensité : (a) représentation discrète de niveaux de gris d'une zone de taille 10x10 pixels ; (b) représentation en trois dimensions de niveaux de gris du motif, la hauteur représente la valeur du niveau de gris de chaque pixel ; (c) champs d'intensité de niveaux de gris du motif obtenu par interpolation bilinéaire ; (d) champs d'intensité de niveaux de gris du motif obtenu par interpolation spline cubique [Sutton et al., 2009].

### 2.2.1.2. Incertitude de mesure par technique DIC -2D

Les principaux avantages des techniques DIC 2D sont leur simplicité de mise en œuvre expérimentale et la large étendue de mesure de déformation ( $10^{-5} < \epsilon < 2$ ). Les incertitudes de mesure en termes de déplacements et de déformations sont liées à un grand nombre de paramètres que l'on peut séparer en trois grandes familles : (i) l'éprouvette et le système de chargement, (ii) le système d'acquisition, (iii) le choix des algorithmes utilisés. Les principales sources d'erreur sont données dans le Tableau 2.1. Pour une discussion plus compétente, le lecteur pourra se reporter aux travaux de Bornet et al., 2008.

Pour évaluer l'incertitude de mesure de déplacements et de déformations par ces techniques DIC, Coudert (2005), en s'appuyant sur le logiciel **7D** utilisé dans ces travaux, a réalisé des études expérimentales et a proposé certains critères (*e.g.* critère sur les écarts entre quadrilatères, critère par rapport à une mesure extérieure de référence, critère par rapport à des déformations numériques d'images, critère par rapport à des déplacements de corps solides). Il conclut que dans un cas de petites déformations (inférieures à 5%) associé à l'utilisation d'un système d'acquisition de qualité (caméra numérique Hamamatsu, éclairage stable), l'incertitude de mesure en termes de déplacements est de l'ordre de 0.01 pixels et en termes de déformations est de  $2 \cdot 10^{-3}$  pour une taille d'élément de  $10 \times 10$  pixel<sup>2</sup>. Étant donné le nombre considérable de sources d'erreur présentées ci-dessous, les valeurs indiquées ne sont qu'indicatives. Pour améliorer la précision de mesure DIC 2D, quelques suggestions ont été proposées par Haddadi et Belhabib (2008):

- *minimisation des déplacements hors plan* : l'utilisation d'un objectif télécentrique est une bonne solution pour minimiser les effets du déplacement hors plan. Une autre solution consiste à utiliser des stéréo-corrélations permettant alors d'accéder aux trois composantes du déplacement puis quantifier l'influence des déplacements hors plan sur la mesure de DIC-2D. Nous présentons un exemple de l'utilisation de la stéréo-corrélation dans la section 6.3.4;
- *source lumineuse* : les erreurs liées à la variation de la source d'éclairage peuvent être importantes (effets spéculaires par exemple). Ainsi, on doit assurer un éclairage diffus et suffisant couvrant toute la zone d'intérêt de la surface de l'échantillon pendant l'essai mécanique ;
- *niveaux de gris aléatoire* : un bon marquage aléatoire est une garantie importante de qualité des mesures par corrélation. L'analyse d'images peu contrastées ou trop contrastées conduit à des évolutions du paramètre de corrélation qui rendent l'analyse difficile. Ce marquage aléatoire peut être réalisé très simplement par projection de peinture quelques minutes avant l'essai afin de conserver une forte élasticité de la peinture. Les dimensions moyennes des taches ne doivent pas être inférieures à 2 pixels et ne doivent pas trop excéder la dimension du motif. Une récente méthode qui permet de quantifier la qualité des images analysées a été proposée par [Pan, 2010].
- *choix de la taille du motif* : le rôle principal du motif est de permettre une singularisation des régions. Un motif trop petit est susceptible de donner de fausses corrélations à cause de l'augmentation du nombre de minima locaux sur la surface des coefficients de corrélation. Au contraire, l'augmentation de la taille du motif améliore la qualité de la corrélation à condition que la forme du champ de déplacement théorique utilisé corresponde à la forme du champ de déplacement réel. On peut noter que le temps de calcul augmente significativement lorsque l'on accroit la dimension du motif. Les dimensions de la ZOI habituellement utilisées sont comprises entre 8 et 40 pixels ;
- *choix du pas de grille*: dans le cas de champs de déformation homogène, un pas de grille important peut être utilisé. Le nombre de points de mesure sera alors faible. A contrario, dans le cas de déformations fortement hétérogènes, un pas de grille faible est nécessaire. Ainsi, la taille optimisée de la grille doit être choisie en fonction de l'application visée. En deçà de  $4 \times 4$  pixels, les incertitudes de déplacement sur les 4 points de la grille ne vont plus permettre d'identifier correctement le champ de déplacement ;
- *choix de l'interpolation* : une interpolation d'un ordre élevé est toujours recommandée pour une meilleure incertitude de mesure ;

<b>Sources d'erreur de DIC-2D</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreurs liées à l'éprouvette et au chargement mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déplacement hors plan de l'éprouvette</li> <li>• Vibration du système de chargement</li> <li>• Amplitude de la déformation</li> <li>• Gradient de la déformation</li> <li>• Planéité de l'échantillon</li> <li>• Mouchetis (en termes de taille et de contraste)</li> <li>• ...</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreurs liées au système d'acquisition des images</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Positionnement de la caméra perpendiculairement à l'échantillon</li> <li>• Réglage de netteté</li> <li>• Vibration du dispositif d'acquisition (dans le cas d'utilisation d'appareils reflex par exemple)</li> <li>• Distorsion optique des objectifs</li> <li>• Bruit des capteurs CCD et de l'électronique associée</li> <li>• Lumière</li> <li>• Résolution des images en termes de pixels</li> <li>• Codage des images (8 bits ou plus, interpolation...)</li> <li>• ...</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreurs liées à l'algorithme de la corrélation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimension du motif</li> <li>• Dimension de la grille</li> <li>• Choix du Coefficient de corrélation</li> <li>• Type d'interpolation des niveaux de gris</li> <li>• Forme du champ de déplacement</li> <li>• Algorithme de recherche sub pixelique</li> <li>• ...</li> </ul>

Tableau 2.1. Les principales sources d'erreur de la technique DIC-2D.

### 2.2.2. Stéréo-corrélation d'images (SIC)

Les mesures de déplacements hors-plan ont été réalisées dans le cadre de cette thèse par la technique de Stéréo-corrélation d'images (Stereo Image Correlation- SIC) qui permet d'évaluer les composantes du déplacement à la surface de pièces planes. Nous présentons ci-dessous très brièvement les étapes de la procédure de cette méthode ; une présentation plus détaillée peut être trouvée dans [Garcia, 2001 ; Coudert, 2005 ; Sutton et *al.*, 2009 ; Pottier, 2010] :

- calibration du montage optique stéréoscopique: deux vues différentes d'une surface sont enregistrées par deux appareils photographiques posés sur un banc rigide. Les paramètres intrinsèques de chacun des appareils (distances focales, facteurs d'échelle pix/mm, correction des distorsions radiales, de décentrages et prismatiques des objectifs) et extrinsèques (position et orientation relative de ces deux appareils) nécessite une étape de calibrage. Dans ce but, une image représentant une surface à niveau de gris aléatoire est imprimée puis collée sur un plan.

Cette mire est observée par le banc stéréoscopique suivant un minimum de 6 positions non prédéfinies. L'analyse de ces images stéréoscopiques permet de retrouver l'ensemble des paramètres extrinsèques et intrinsèques [Coudert, 2005]; Sans modification du banc stéréoscopique, le système est ainsi opérationnel pour reconstruire en 3D tout les points visibles que l'on peut mettre en correspondance dans les deux images stéréoscopiques.

- triangulation : la détermination de la position d'un point en 3D à partir de deux images est réalisée communément par des méthodes appelées de triangulation, qui consistent à calculer la plus proche distance dans l'espace des rayons optiques associés aux points des images.
- mesure des champs de déplacements d'un objet: elle consiste à calculer les déplacements des points d'un objet entre deux surfaces 3D reconstruites par stéréo-corrélation, l'une correspondant à l'état initial et l'autre à l'état déformé. Les incertitudes de mesures identifiées sur une surface de 100\*100mm<sup>2</sup>, dans un cadre de petit déplacement qui concerne cette étude, présentent une variance de +/- 2,3 μm [Pottier, 2010]. La connaissance des champs de déplacements en surface permet de retrouver les déformations surfaciques.

### 2.2.3. Logiciel de DIC et appareils photographiques

Dans cette section, nous présentons tout d'abord les paramètres de la corrélation d'images utilisés dans le logiciel **7D**. Nous montrerons ensuite le montage des appareils photos dans nos essais.

#### 2.2.3.1. Logiciel 7D

Le logiciel de DIC/SIC utilisé « **7D** » est développé par le laboratoire SYMME de l'université de Savoie. Cet outil supporte la plupart des formats usuels de photos (*e.g.* tif, jpeg, bmp, emf, wmf), images codées sur 8 ou 12 bits, noir et blanc ou couleur. Après avoir défini une image de référence et une ou plusieurs images à corréler, l'utilisateur définit sur l'image de référence une zone d'analyse, choisit le pas de grille et la taille de motif. La recherche de points communs entre deux images s'appuie sur l'évolution des niveaux de gris d'une zone d'intérêt appelée ZOI (Zone Of Interest) centrée autour du point dont on cherche à identifier le déplacement. Dans cet outil, la ZOI est représentée par une zone carrée de dimension minimale de 6x6 pixel<sup>2</sup>. Pour évaluer la similarité de deux motifs dans deux images, deux types de coefficient de corrélation ont été implémentés :

- formulation de type «normalized cross correlation » :

$$C_1 = 1 - \frac{\sum_{i \in M} f(u_i, v_i) \times g(u_i^f, v_i^f)}{\sqrt{\sum_{i \in M} (f(u_i, v_i))^2 \times \sum_{i \in M} (g(u_i^f, v_i^f))^2}}, \quad 2.1$$

- formulation de type « zero mean normalized cross correlation » :

$$C_2 = 1 - \frac{\sum_{i \in M} (f(u_i, v_i) - \bar{f}) \times (g(u_i^f, v_i^f) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i \in M} (f(u_i, v_i) - \bar{f})^2 \times \sum_{i \in M} (g(u_i^f, v_i^f) - \bar{g})^2}}. \quad 2.2$$

Pour chaque pixel  $i$  du motif  $M$ , les fonctions  $f$  et  $g$  retournent respectivement la valeur du niveau de gris du pixel de coordonnées  $(u_i, v_i)$  dans l'image de référence et du point  $(u_i^f, v_i^f)$  dans l'image à corréler.  $\bar{f}$  et  $\bar{g}$  sont respectivement les valeurs moyennes des niveau de gris du motif  $M$  dans l'image de référence et dans l'image à corréler. Ces formalismes utilisant les moyennes normalisées

impliquent une quasi invariance des valeurs des coefficients de corrélation lors d'un changement des conditions d'éclairage entre les deux photos. Dans un cas non déformé, ces critères tendent vers zéro lorsque les deux motifs sont homologues ou lorsque la variation des niveaux de gris peut être définies par une fonction affine ( $C_1$ ) ou linéaire ( $C_2$ ).

Dans les faits, la position d'un point de l'image initiale  $(u_i, v_i)$  dans l'image à corrélérer  $(u_i^f, v_i^f)$  ne correspond pas à un déplacement en pixels entiers. Par conséquent, une valeur interpolée du niveau de gris  $g_i$  est nécessaire. Les deux types d'interpolations des niveaux de gris utilisés dans **7D** sont de forme bilinéaire ou bi-cubique.

- **Calcul d'un champ de déplacement :**

Le fonctionnement du logiciel est basé sur la recherche d'un champ de déplacements sur chacun des éléments carrés de la grille.

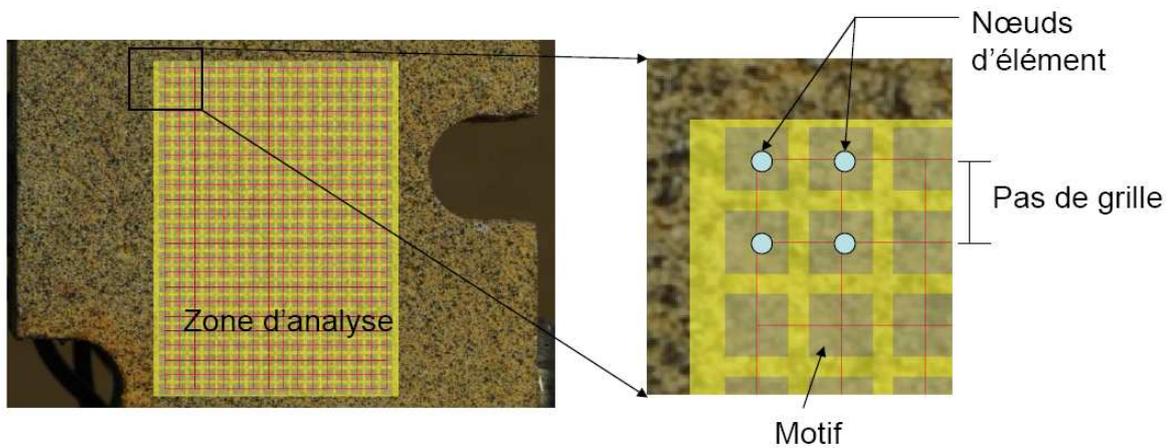


Figure 2.3. Définition de la zone d'analyse (en jaune), de la grille (en rouge), du motif ou ZOI (en gris) et des nœuds des éléments.

Nous considérons un point P (Figure 2.4) de coordonnées  $u, v$  dans l'image de référence, l'expression bilinéaire du déplacement du point P suivant la direction  $u$  et  $v$  est donnée par :

$$\vec{d}_P = \begin{pmatrix} U_{(u,v)} \\ V_{(u,v)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cdot u + b \cdot v + c \cdot u \cdot v + d \\ e \cdot u + f \cdot v + g \cdot u \cdot v + h \end{pmatrix}, \quad 2.3$$

$a, b, c, d, e, f, g$  et  $h$  sont inconnues du vecteur déplacement. Ces coefficients seront déterminés si les déplacements de 4 nœuds d'un élément carré (voir Figure 2.3) sont connus. Les coefficients du champ de déplacements d'un élément carré de la grille seront déterminés par un processus itératif et la forme du motif est adaptée dynamiquement aux informations présentes dans les images (voir Coudert, 2005 pour plus de détails).

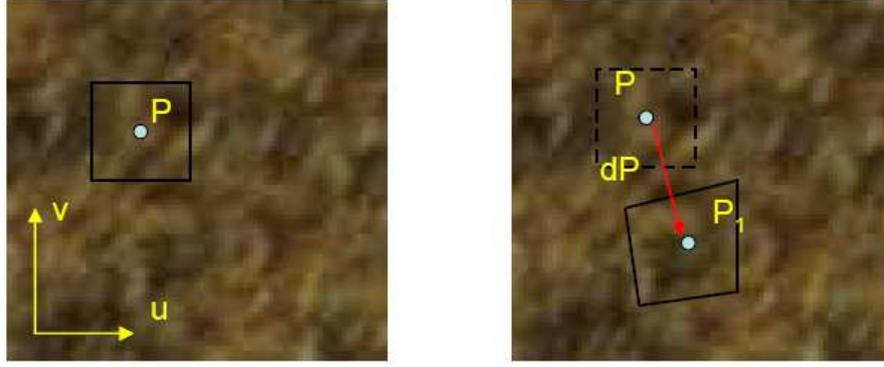


Figure 2.4. Vecteur de déplacement d'un élément carré de centre P.

- **Calcul d'un champ de déformation**

A partir du champ de déplacement de chaque élément, les champs de déformation en surfaces au sens de Green-Lagrange et de Hencky sont ensuite calculés. Considérons un point de coordonnées (u, v) dans l'image de référence, ses coordonnées dans l'image à corrélérer sont données par :

$$\begin{cases} u^f = u + U_{(u,v)} \\ v^f = v + V_{(u,v)} \end{cases} \quad 2.4$$

Le tenseur gradient de la transformation F est déduit :

$$F = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\partial U}{\partial u} & \frac{\partial U}{\partial v} \\ \frac{\partial V}{\partial u} & 1 + \frac{\partial V}{\partial v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + a + c \cdot v & b + c \cdot u \\ e + g \cdot v & 1 + f + g \cdot u \end{pmatrix} \quad 2.5$$

Le tenseur de déformations de Green-Lagrange est :

$$E = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} ({}^t F F - I) \quad , \quad 2.6$$

avec **I** est matrice unité et **{}<sup>t</sup>F** est la transposée de **F**

Les déformations principales sont données par :

$$\begin{cases} E_I = \frac{E_{11} + E_{22}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(E_{11} - E_{22})^2 + 4E_{12}^2} \\ E_{II} = \frac{E_{11} + E_{22}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(E_{11} - E_{22})^2 + 4E_{12}^2} \end{cases} \quad 2.7$$

L'angle entre les axes principaux de déformations et les axes du repère image est tel que :

$$\tan(2\alpha) = \frac{2E_{12}}{E_{11} - E_{22}} \quad 2.8$$

Les composantes de la matrice des déformations  $E$  n'étant pas constantes dans un élément carré (elles dépendent de  $u$  et  $v$ ), le champ de déformations d'un carré est donc ici représenté par la déformation calculée en son centre.

Les déformations logarithmiques  $H$  (déformation au sens de Hencky) sont données dans les axes principaux par :

$$\begin{cases} \varepsilon_I = \frac{1}{2} \ln(2E_I + 1) \\ \varepsilon_{II} = \frac{1}{2} \ln(2E_{II} + 1) \end{cases} \quad 2.9$$

Les déformations logarithmiques minimales ( $\varepsilon_{\text{mini}}$ ), maximales ( $\varepsilon_{\text{maxi}}$ ) et la valeur du cisaillement maximum ( $\varepsilon_{\text{s-max}}$ ) dans le plan sont ainsi définies :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{mini}} &= \min(\varepsilon_I, \varepsilon_{II}) \\ \varepsilon_{\text{maxi}} &= \max(\varepsilon_I, \varepsilon_{II}) \\ \varepsilon_{\text{s-max}} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{\text{maxi}} - \varepsilon_{\text{mini}}) \end{aligned} \quad 2.10$$

Le coefficient de Poisson, valable pour un essai de compression, est calculé par :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{mini}}}{\varepsilon_{\text{maxi}}} \quad 2.11$$

En supposant une hypothèse de la déformation plane ( $\varepsilon_{III}=0$ ), la déformation volumique ( $\varepsilon_v$ ) est calculée comme :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{\text{maxi}} + \varepsilon_{\text{mini}} \quad 2.12$$

### 2.2.3.2. Paramètres utilisés

Les paramètres principaux qui déterminent l'incertitude de mesure sont le choix du coefficient de corrélation, le type d'interpolation des niveaux de gris utilisé, la taille du motif, la taille des éléments de la grille de l'analyse (le pas de la grille). Les figures 2.5 et 2.6 présentent l'évolution de la valeur du paramètre de corrélation selon différents paramètres. La position optimale du motif sur l'image à corrélérer correspond au minimum de cette surface. Nous observons que l'utilisation d'une interpolation linéaire (Figure 2.5a) fait apparaître des vaguelettes de période d'un pixel. Ces vaguelettes seront fortement estompées avec l'utilisation du coefficient « *zero means normalized cross correlation* » ( $C_2$ ) et d'une interpolation bicubique (Figure 2.5b). La Figure 2.6 montre l'évolution de  $C_2$  selon la taille du motif utilisée. Nous constatons que l'utilisation d'une taille trop faible du motif (*e.g.*,  $8 \times 8$  pixel<sup>2</sup>) fait apparaître le risque de tomber sur le minimum local et amener au résultat erroné (Figure 2.6a). L'utilisation d'une taille plus élevée du motif est donc fortement recommandée.

Afin d'assurer une bonne qualité de mesure, nous utilisons systématiquement une interpolation bi-cubique pour accéder aux niveaux de gris en position sous-pixels dans l'image déformée et le coefficient de corrélation est du type « *zero mean normalized cross correlation* ». La taille de motif et le pas de la grille sont respectivement  $20 \times 20$  pixel<sup>2</sup> et 10 pixels pour la plupart des analyses. La forme du champ de déplacement identifié est bilinéaire sur chaque élément de la grille.

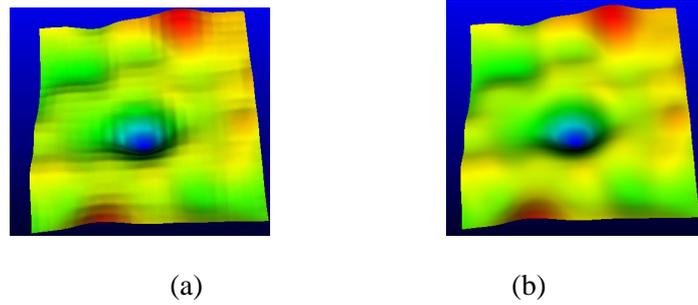


Figure 2.5. Evolution de la valeur du paramètre de corrélation  $C_2$  selon le type d'interpolation des niveaux de gris : (a) interpolation linéaire et (b) interpolation bicubique (taille du motif : 20x20 pixels, pas de la grille : 10 pixels).

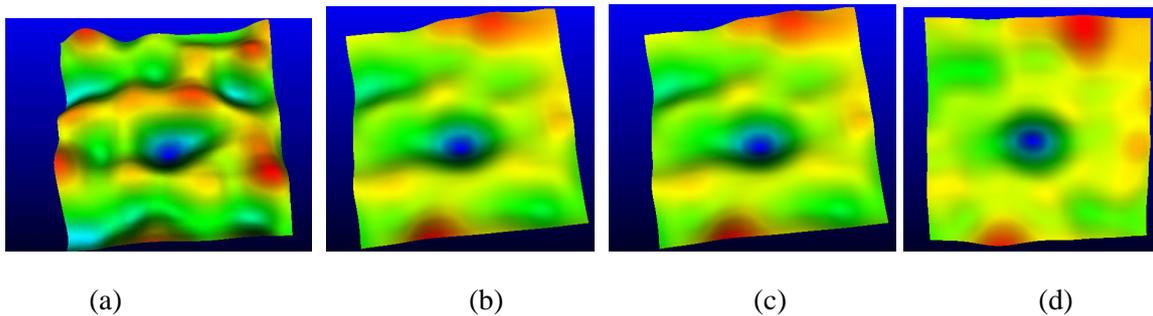


Figure 2.6. Evolution de la valeur du paramètre de corrélation  $C_2$  selon la taille du motif (interpolation bicubique des niveaux de gris, pas de la grille 10 pixels): (a) 8 pixels, (b) 10 pixels, (c) 16 pixels et (d) 20 pixels.

### 2.2.3.3. Appareils photos numériques

Pour photographier, nous avons utilisé des appareils photos réflex numériques de haute résolution :

- 1 Kodak professional DCS Pro 14n (13.5 Méga-pixels)
- 2 Nikon D200 (10.2 Méga-pixels)
- 1 Nikon D3X (24.5 Méga-pixels)

Un exemple du montage des appareils photo est présenté Figure 2.7. Un appareil (numéro 3) est positionné perpendiculairement à la surface de l'échantillon et les deux autres (1 et 2) sont inclinés de quelques degrés afin de fournir une stéréo-vision. Cela nous permet de réaliser des analyses 2D pour avoir les champs cinématiques en 2D de la surface étudiée et des analyses SIC pour obtenir le déplacement suivant la direction perpendiculaire de cette surface.

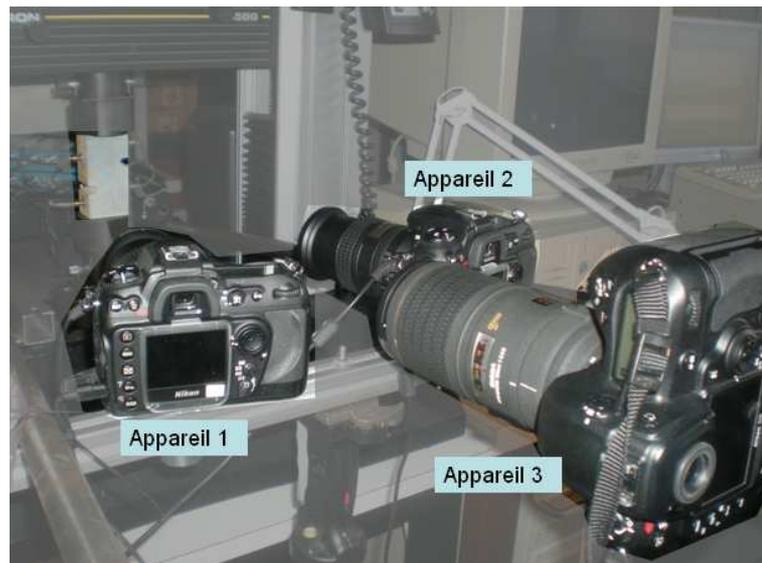


Figure 2.7. Montage des trois appareils photos.

## 2.2.4. Quelques exemples d'utilisation de la DIC en géomécanique

Grace à la simplicité des montages expérimentaux et à la bonne précision de la mesure, le nombre d'applications s'appuyant sur les techniques de la DIC a littéralement explosé au cours des trois dernières décades. Les applications en mécanique ont trois objectifs principaux :

- la visualisation des champs de déplacement et de déformation sur différents types de matériaux (métalliques, composites, polymères,...) soumis à une sollicitation mécanique, thermique ou à d'autres types de chargements ;
- l'obtention de paramètres du matériau (*e.g.*, le module d'Young, le coefficient de Poisson) [Hild et Roux, 2006 ; Avril *et al.*, 2008], le facteur d'intensité de contrainte [Réthoré *et al.*, 2005; Roux et Hild, 2006; Yoneyama *et al.*, 2007], le coefficient de dilatation thermique [Pan *et al.*, (2009)], des paramètres associés à la plasticité [Pottier *et al.*, 2007 ; Haddadi *et al.*, 2005] ;
- la validation des simulations de mise en forme des matériaux par comparaison des champs théoriques et expérimentaux [Pottier *et al.*, 2007] ;

Ces techniques expérimentales se sont révélées très efficaces pour les études en mécanique des sols (*e.g.*, sables, argiles). Guler *et al.* (1999) ont analysé des images pour mesurer le mouvement de particules de sols granulaires ; Liu et Iskander (2004) et White *et al.*, (2003) ont employé ces approches pour étudier la déformation des sols. Dans l'étude de la localisation des déformations en bandes de cisaillement, la technique DIC est très efficace à caractériser l'hétérogénéité des champs de déformation [Rechenmacher et Finno, 2004].

Dans la suite, nous présentons deux exemples de l'utilisation de la technique DIC dans l'étude de la localisation des déformations qui ont été réalisés dans notre laboratoire sur une marne de Beaucaire et sur une argilite « Quick clay » Norvégienne.

La Figure 2.8 montre un exemple d'évolution des bandes de cisaillement sur de la marne de Beaucaire observée lors d'un essai de compression en déformation plane par **Viggiani et Desrues (2004)** en utilisant deux techniques de mesure de déformation. Les détails de l'appareil expérimental (machine Biaxial) sont donnés dans Desrues (1984). La Figure 2.8 (haut) présente le résultat obtenu

par la méthode de stéréophotogrammétrie de faux relief (False Relief Stereophotogrammetry-FRS) (une présentation complète de cette technique se trouve dans Desrues et Viggiani (2004) la

Figure 2.8 (bas) montre le résultat obtenu par la technique DIC et le logiciel **7D** utilisé dans cette thèse. Les auteurs ont remarqué qu'autour du pic de la charge axiale, plusieurs zones parallèles conjuguées de localisation des déformations se formaient dans la partie inférieure de l'échantillon. En comparant les résultats obtenus par ces deux techniques de mesure, il est clair que l'approche par la corrélation fournit des informations beaucoup plus détaillées de la localisation de la déformation que la méthode FRS. Plus de bandes de cisaillement peuvent être identifiées, y compris les bandes mineures conjuguées au dernier incrément qui ne sont pas visibles avec la FRS.

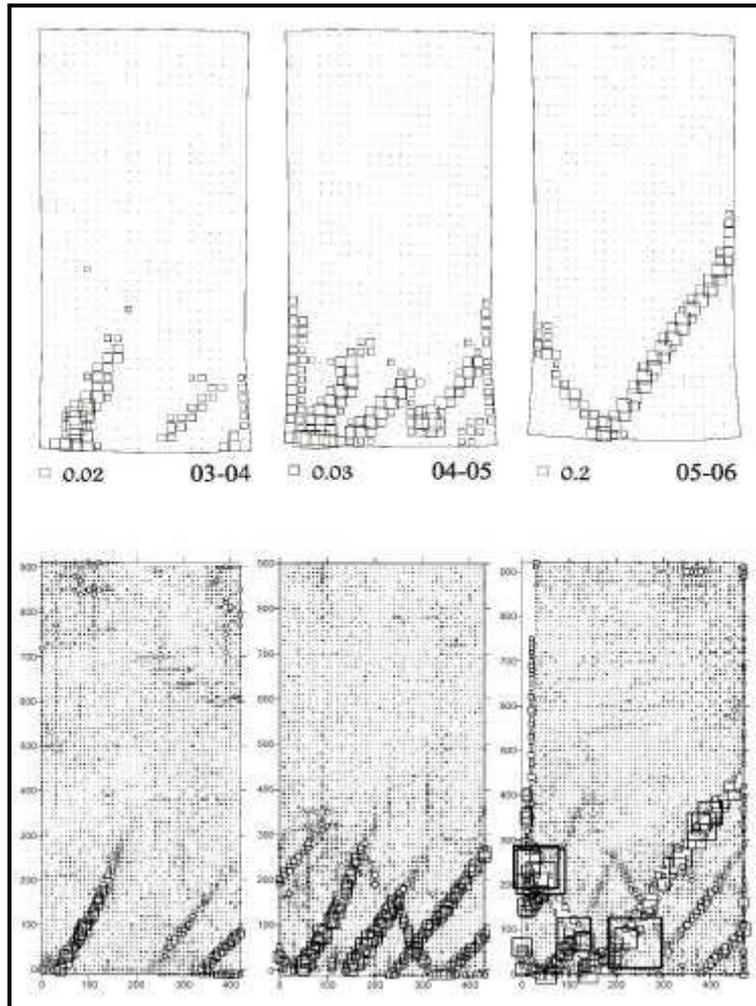


Figure 2.8. Champs incrémentaux de l'intensité de la déformation de cisaillement évalués par FRS (en haut) et DIC (en bas) obtenus sur la marne de Beaucaire [Viggiani et Desrues, 2004].

**Thakur et al. (2007)** ont également employé la méthode DIC (logiciel *DAVIS 6.0*) pour suivre la formation des bandes de cisaillement sur une argile norvégienne (Quick Clay) en utilisant l'appareil de compression en déformation plane au laboratoire 3SR. La vitesse de chargement est lente (0.36%/h). L'analyse des images indique que la première bande de cisaillement émerge bien avant le pic (images 574-579). Ce phénomène est interprété par les auteurs comme associé à une hétérogénéité du matériau à l'intérieur de l'échantillon. La deuxième bande de cisaillement apparaît dans la direction perpendiculaire à la première lorsque le premier pic est passé. Finalement, l'échantillon se sépare en de multiples blocs par les bandes de cisaillement et la force appliquée diminue.

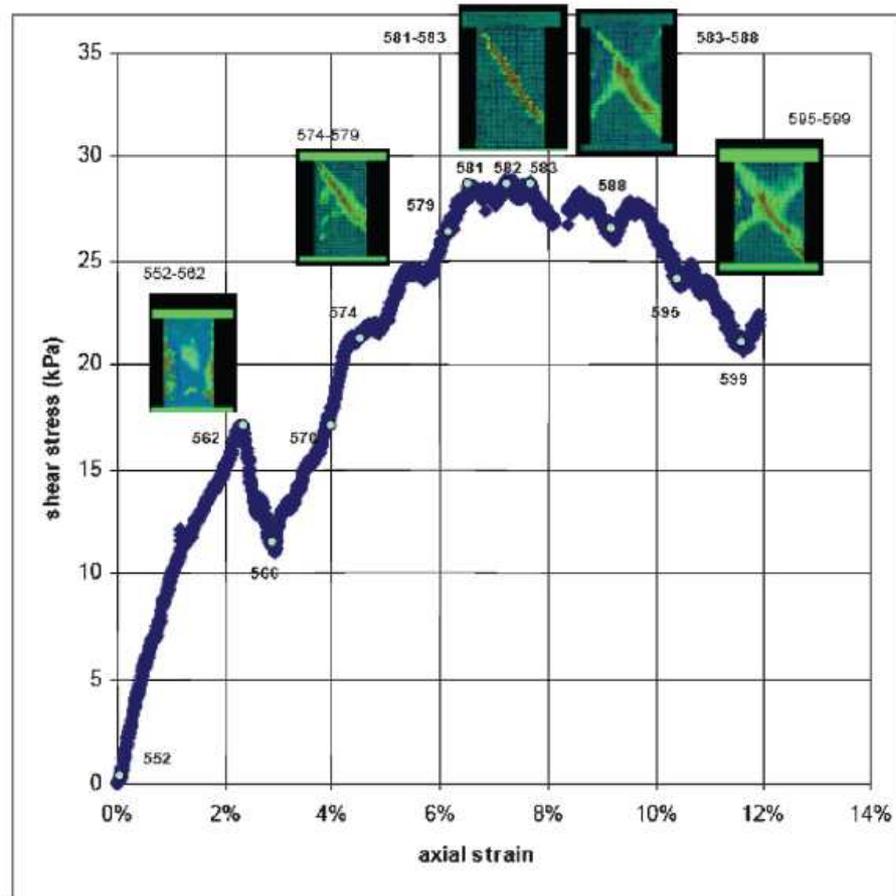


Figure 2.9. Evolution de la localisation de la déformation relevée par technique DIC à différents incréments pendant toute la durée d'un essai de déformation plane sur une argile norvégienne [Thakur, 2007].

Notons que les échantillons dans les deux exemples cités en dessus, ont été enveloppés dans les membranes, qui suivent la déformation des échantillons. Inévitablement, l'épaisseur des bandes de déformation localisées mesurées est probablement plus large que celle en réalité. Par conséquent, les fissures de cisaillement peuvent apparaître dans les résultats de DIC comme étant les bandes de cisaillement avec les épaisseurs importantes.

Dans l'étude sur la fissuration dans les roches, **Ferrero et al. (2008)** ont utilisé la technique DIC pour étudier la rupture de la marne de Beaucaire et de la marne de Farina d'Olmi. La Figure 2.10 présente les résultats issus d'un essai de compression uniaxiale sur la marne de Farina d'Olmi. Dans cette figure, des cartes de déformations verticales ( $\epsilon_y$ ) et horizontales ( $\epsilon_x$ ) obtenues à différents niveaux de charge ainsi que les photos de l'échantillon sont présentées. Les déformations sont homogènes à faible charge appliquée. Elles montrent ensuite les ruptures localisées lorsque les charges sont plus élevées. Sur la partie droite de l'échantillon, une fissure identifiée par les auteurs comme étant probablement due à une imperfection locale au cours de la préparation des échantillons est clairement identifiée (B). La fissure principale se forme sur un coin et s'écarte au cours de la propagation des fissures jusqu'à une rupture axiale classique.

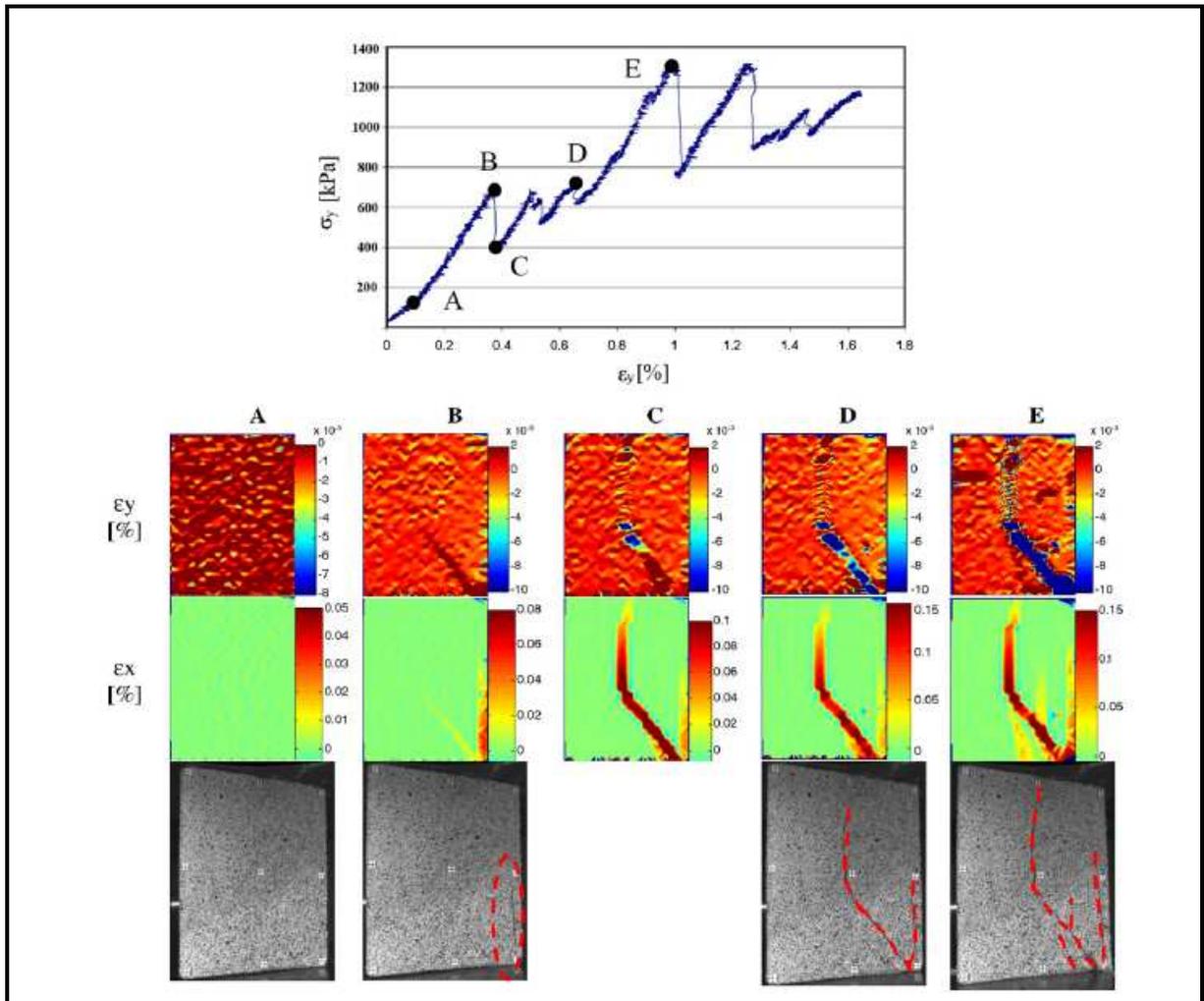


Figure 2.10. Cartes des déformations verticales ( $\epsilon_y$ ) et horizontales ( $\epsilon_x$ ) et photos de l'échantillon, obtenues par une méthode de photogrammétrie à différents niveaux de charge sur un échantillon de marne de Farina d'Olmi [Ferrero et al., 2008].

**De Sanctis (2005)** a réalisé une campagne expérimentale pour étudier la propagation de fissures et leurs coalescences dans le Tuf de Naples (voir Hall et al., 2006 et de Sanctis, 2005) qui est également l'un des matériaux dans notre étude. Les échantillons prismatiques entaillés (dimension  $100 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ ) ont été chargés en compression uniaxiale en déformation plane avec une vitesse de déformation axiale constante. Des photographies de la face principale de ces échantillons ont été acquises en cours de chargement, ce qui a permis de capturer le moment et le lieu de l'initiation des fissures et de suivre leur propagation. **Hall et al. (2007)** ont analysé l'un de ces essais en utilisant la méthode DIC (logiciel *PhotoWarp*), le résultat est donné dans la Figure 2.11. Dans cet exemple, en examinant les déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), les auteurs ont observé que les fissures s'initient aux quatre pointes des entailles, mais les wing cracks externes ( $W_{externe}$ ) se propagent plus rapidement que les wing cracks internes ( $W_{interne}$ ). Lorsque les wing cracks externes se propagent de manière significative vers les limites de l'échantillon, les entailles coalescent à travers le pont de roche et conduisent à la rupture finale de l'échantillon.

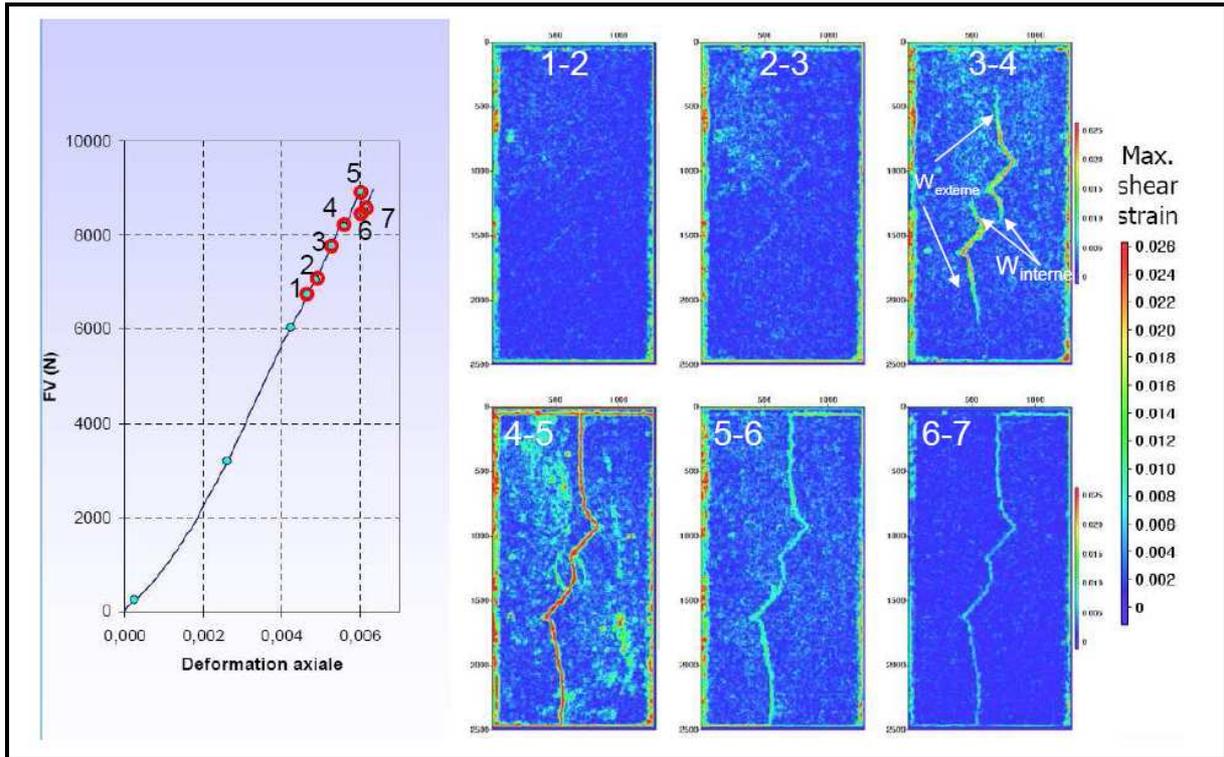


Figure 2.11. Déformations de cisaillement maximum obtenues pour différents incréments dans un essai de compression en déformation plane sur un échantillon parallélépipédique entaillé de Tuf [Hall et al., 2007].

### Remarques

Les exemples présentés dans les paragraphes précédents montrent la capacité des techniques DIC à suivre l'évolution de l'endommagement à la surface des échantillons. Les phénomènes observés en surface ne reflètent le comportement interne du matériau qu'à la condition d'homogénéité du comportement dans l'épaisseur. Les analyses RX montreront que cette hypothèse d'homogénéité dans l'épaisseur ne peut pas être assurée pour les roches. Pour mieux interpréter l'endommagement dans les roches, il est donc nécessaire de combiner ces techniques d'analyse en surface avec d'autres techniques de mesure de champs (*i.e.*, l'émission acoustique et la tomographie RX) qui seront présentées dans la suite.

## 2.3. L'émission acoustique (EA)

### 2.3.1. Définitions principales

Les émissions acoustiques (EA) sont les ondes élastiques transitoires émises lors de la libération brutale de l'énergie provenant de sources localisées dans un matériau lors d'une sollicitation mécanique. Les ondes propagées dans le matériau provoquent une déformation transitoire de très faible amplitude et de fréquence élevée. Les sources des EA ont des origines diverses mais en ce qui concerne les roches, elles sont principalement due à la création ou progression de micro ou macro fissurations.

Les ondes acoustiques sont détectées par des capteurs piézoélectriques posés à la surface d'un objet et sont converties sous forme de signaux électriques. En regardant la forme des signaux (forme d'ondes), nous pouvons classer les signaux en deux catégories (Figure 2.12) [Hady 2003]:

(1) les signaux de type impulsif se produisent lors d'une brusque libération d'énergie élastique d'une source, ils sont liés principalement à l'initiation et à la propagation de (micro)fissures dans un matériau ayant le comportement fragile comme des roches ;

(2) les signaux de type semi-continu dont l'amplitude reste à peu près constante. Ces types de signaux sont généralement associés à des déformations plastiques.

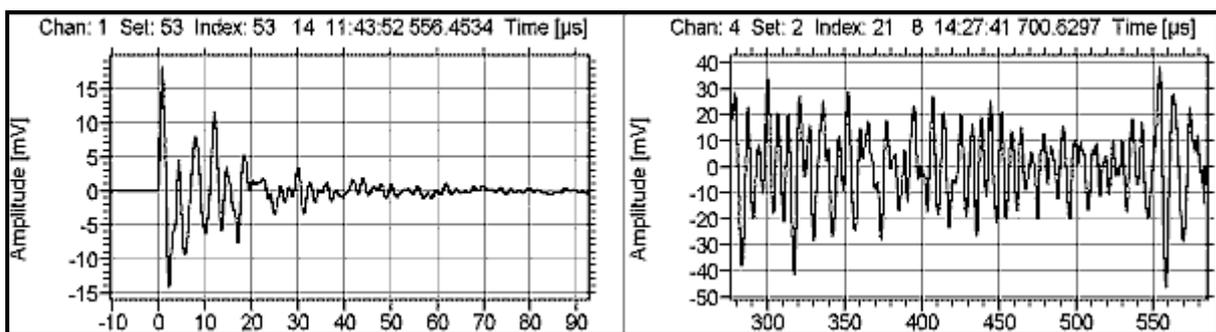


Figure 2.12. Deux types de signaux acoustiques : signal impulsif (à gauche) et signal semi-continu (à droite) [Hardy, 2003].

On retrouve schématiquement deux types d'ondes dans un matériau :

(1) les ondes P, ou ondes primaires, appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du matériau qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements sont parallèles à la direction de propagation de l'onde ;

(2) les ondes S, ou ondes secondaires, appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. À leur passage, les mouvements du matériau s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde.

Dans un matériau supposé élastique, isotrope et homogène, les ondes ont des vitesses de propagation constantes dépendant des caractéristiques du matériau :

$$V_p = \left( \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2},$$
$$V_s = \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2},$$
2.13

où  $\lambda$  et  $\mu$  sont les coefficients de Lamé et  $\rho$  est la densité du matériau.

### 2.3.2. Techniques de mesure des EA en laboratoire

L'onde élastique capturée par un capteur est convertie en signal électrique et passe par un préamplificateur avant d'être traitée par un système d'acquisition. Le préamplificateur a pour rôle d'amplifier des faibles signaux issus des capteurs piézoélectriques afin qu'ils ne soient pas perdus à cause de l'atténuation au cours de la transmission. Les signaux sont ensuite filtrés pour éliminer le bruit externe d'origine mécanique ou électronique en limitant la bande passante. Après filtrage, une deuxième amplification est appliquée aux signaux pour faciliter le dépouillement du signal. Les données arrivent finalement au système d'acquisition qui peut analyser et montrer l'évolution en temps réel de tous les paramètres des signaux.

- *Capteur d'EA:*

La plupart des capteurs utilisés actuellement sont des capteurs piézoélectriques, le plus souvent en céramique. Le nombre de capteurs utilisés est un facteur important pour la localisation des sources des EA. Une localisation linéaire nécessite l'utilisation de deux capteurs. Une localisation en deux dimensions, sur une plaque par exemple, va nécessiter au minimum trois capteurs. Plus la géométrie des structures étudiées devient complexe, plus le nombre de capteurs nécessaire à une identification de la localisation du phénomène acoustique augmente.

Le couplage des capteurs avec la surface du matériau est réalisé en utilisant une graisse silicone, une molasse ou un époxy. Le rôle du couplant est d'améliorer la transmission des ondes entre la surface de l'échantillon et les capteurs.

- *Le seuil de détection de signaux*

L'enregistrement de signal est déclenché lorsque l'amplitude de signal dépasse une certaine limite appelée « seuil de détection ». Le choix de cette valeur doit être réalisé attentivement. L'enregistrement de signaux potentiellement importants peut être manqué pour une valeur trop élevée du seuil. Inversement, si la valeur de seuil est trop faible, le système risque d'enregistrer une énorme quantité de signaux inutiles. En plus, l'amplitude du signal est affectée par de nombreux facteurs qui varient d'un essai à l'autre (capteur, collage, source d'énergie, l'atténuation du signal liée à la distance entre la source et les capteurs, les conditions environnementales, etc.). Ainsi, le seuil de détection doit être réglé pour chaque essai et pour chaque capteur en tenant compte des conditions spécifiques.

- *L'échantillonnage de signaux*

L'échantillonnage est une étape nécessaire à la numérisation des signaux. Cette étape consiste à convertir un signal analogique (continu) en un signal numérique (discret) en capturant des valeurs à un certain intervalle de temps. La fréquence à laquelle les valeurs sont capturées est appelée la fréquence d'échantillonnage. Ainsi, cette étape implique une perte d'information de signal. Une valeur plus élevée de la fréquence rend le signal numérique plus proche du signal analogique mais elle consomme plus de mémoire dans le système d'acquisition.

### 2.3.3. Caractéristiques des signaux acoustiques

Les principaux paramètres exploitables des EA sont présentés dans la Figure 2.13. La plupart de ces paramètres sont définis par rapport au seuil d'acquisition choisi.

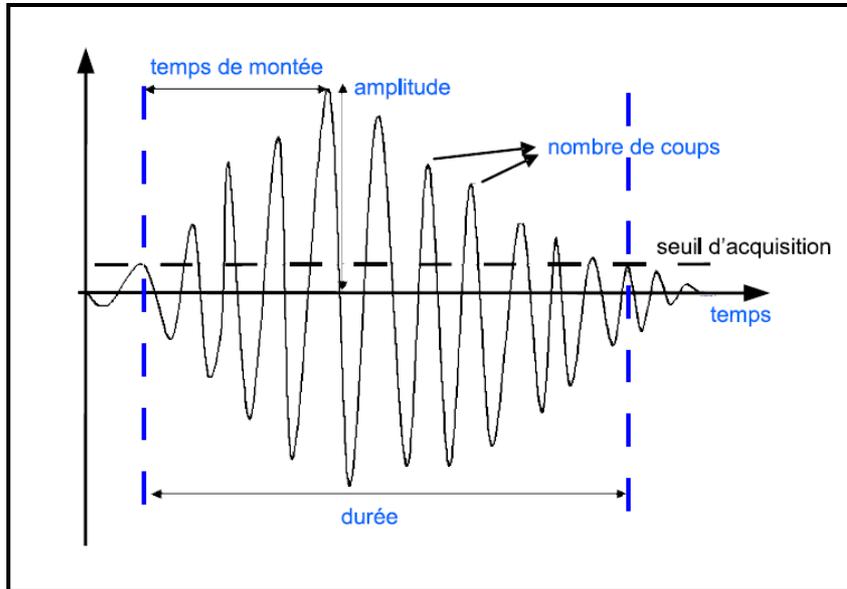


Figure 2.13. Salve typique d'émission acoustique et principaux paramètres temporels [Marec, 2008].

- **l'amplitude de signaux (dB)**

$$A(t) = \log\left(\frac{V(t)}{1\mu V} - \text{pregain}\right) ; \quad 2.14$$

où le « pregain » est la valeur du gain des préamplificateurs, et  $V(t)$  est le voltage détecté. La valeur d'amplitude des salves retenue par le système d'acquisition est l'amplitude crête maximale obtenue pour le voltage maximal détecté ;

- **la durée de signal  $T$  ( $\mu s$ )** correspond au temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil ;
- **le nombre de coups  $N_c$**  correspond au nombre de franchissements du seuil pendant la durée du signal ;
- **l'énergie  $E$  (unité arbitraire)**

$$E(T) = \int_T A dt \quad 2.15$$

- **L'énergie absolue  $E_{abs}$  (aJ)**

$$E_{abs}(T) = \int_T |A|^2 dt \quad 2.16$$

- **le temps de montée ( $\mu s$ )** est le temps qui sépare le premier dépassement de seuil de l'amplitude maximale du signal ;

- la **fréquence moyenne (Hz)** est le nombre de coups d'une salve divisé par sa durée.

## 2.3.4. Techniques de localisation d'un événement

### 2.3.4.1. Technique de la localisation

La localisation spatiale des EA est effectuée pour évaluer le positionnement des régions des endommagements actifs dans matériau. Cette technique est comparable à la détermination des hypocentres de tremblement de terre en sismologie qui utilisent le temps d'arrivée des ondes sismiques enregistrées par plusieurs sismomètres. La procédure de la localisation est basée sur la mesure des différences des temps d'arrivée des ondes captées par un certain nombre de capteurs placés à différentes positions dans l'espace. Une technique d'itération au sens des moindres carrés est utilisée pour la recherche de la meilleure solution pour d'un ensemble de  $n$  équations avec  $n$ , le nombre de capteurs utilisés:

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = V^2(t_i - T_s)^2 \quad 2.17$$

où  $x_i, y_i, z_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) sont les coordonnées du capteur ( $i$ ).  $x_s, y_s, z_s$  sont les coordonnées de la source d'événement.  $t_i$  sont les temps d'arrivée de l'onde sur le capteur  $i$  et  $T_s$  est le temps de la source.  $V$  est la vitesse mesurée de propagation des ondes dans le matériau. Une hypothèse forte de vitesse constante de propagation est ici imposée. Le problème à quatre inconnues est résolu lorsque les temps d'arrivée d'au moins quatre capteurs sont disponibles. Avec une augmentation du nombre de capteur, le problème devient surdéterminé. Le calcul est alors effectué en utilisant un algorithme itératif, améliorant ainsi l'évaluation des paramètres inconnus. Les informations détaillées de la technique de la localisation en 1D, 2D et 3D sont données dans Hardy (2003).

### 2.3.4.2. Identification de temps d'arrivée

La détermination précise du temps d'arrivée des signaux d'EA est bien évidemment très importante pour la localisation d'événements. Cette étape est effectuée visuellement par un opérateur ou automatiquement par un algorithme, et dépend de la définition de la première arrivée elle-même. Le temps d'arrivée peut être identifié comme étant le moment où la première énergie significative d'une phase particulière arrive sur un capteur.

Au cours des dernières années, plusieurs approches ont été utilisées dans ce domaine. La détection utilisant un seuil d'amplitude est la plus simple d'entre elles [Zang *et al.*, 1996]. Toutefois, les signaux qui présentent un faible rapport signal / bruit ne sont pas adaptés à cette approche. Sedlak *et al.* (2009) ont présenté un historique des méthodes de la détection des temps d'arrivée de signal. Ces méthodes sont les suivantes :

- la méthode utilisant le rapport entre la moyenne à court terme (Short-term average –STA) et la moyenne à long terme (long-term average –LTA) (STA/LTA). Cette méthode n'est pas appliquée directement sur le signal brut mais sur une fonction caractéristique définie comme l'enveloppe du signal. La STA mesure l'amplitude du signal à l'instant donné et LTA contient l'information de l'amplitude moyenne du bruit. Le résultat est donné lorsque le rapport STA/LTA atteint un seuil prédéfini ;
- la méthode utilisant des réseaux de neurones artificielle ;
- les méthodes autorégressives basées sur l'hypothèse que le signal peut être divisé en segments localement stationnaire et les intervalles avant et après l'apparition sont deux différents processus stationnaires. Sur la base de cette hypothèse, un critère d'Akaike

(Autoregressive Akaike Information Criterion AR-AIC) a été utilisé pour détecter les phases P et S en sismologie.

### 2.3.4.3. Mécanisme focal

Après l'étape de la localisation des événements, il est possible d'identifier le mécanisme focal des événements qui permet de caractériser le mode et l'orientation de fracture. Deux méthodes de l'étude du mécanisme focal des événements localisés sont utilisées :

(i) **la première**, proposée par Zang et al. (1998) utilise la polarité de la première impulsion des ondes arrivées aux capteurs. Cette méthode a été utilisée principalement par le groupe au GFZ-Potsdam [Stanchits et al., 2006]. La valeur « *pol* » de la polarité d'un événement est calculée comme suit:

$$pol = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k sign(A_i) \quad 2.18$$

$k$  est le nombre de capteurs,  $A_i$  est l'amplitude de la première impulsion. Cette approche simpliste permet de faire la distinction des types de fractures en calculant les premiers mouvements positifs ou négatifs de l'onde arrivant à tous les capteurs. Si la plupart des capteurs ont un premier mouvement de compression ( $-1 < pol < -0.25$ ) ou de dilatation ( $0.25 < pol < 1$ ), les événements sont dits respectivement de type C et type T. Contrairement, l'événement est dit de type S lorsque  $-0.25 < pol < 0.25$ .

(ii) **la deuxième** méthode appelée « l'inversion du tenseur des moments » (Moment Tensor Inversion- MTI) a été développée et utilisée notamment par le groupe de recherche à Stuttgart [Grosse et al., 2003 ; Fink et al., 2003]. Lors de la propagation d'une onde élastique dans un milieu, cette dernière est affectée par plusieurs phénomènes : l'atténuation, la dispersion, réflexion, réfraction, etc. Ainsi, pour obtenir des informations de la source, les données enregistrées par les capteurs acoustiques doivent être inversées. Le problème inverse est résolu par des procédés d'inversion couramment utilisés, les fonctions de Green. Une fonction unique de Green pour un matériau hétérogène est difficile à trouver. Par conséquent, une « inversion de tenseur de moment », tenant compte des amplitudes des ondes P, a été utilisée pour éliminer les influences de l'hétérogénéité et de l'anisotropie. La méthode a été développée pour la détermination du diagramme de rayonnement en utilisant l'analyse des « clusters de sources » plutôt que d'une source individuelle. Les fonctions des sources d'EA dans le cluster peuvent être définies à partir de la distribution des amplitudes relatives. Par conséquent, les amplitudes des premiers pics des ondes P enregistrées par les capteurs doivent être identifiées. En utilisant cette méthode les modes et l'orientation de la fissuration peuvent être déterminés.

## 2.3.5. Quelques exemples d'étude de l'endommagement dans les roches par l'EA

### 2.3.5.1. Mesure de l'activité des EA au cours de chargement

L'application la plus fondamentale des EA dans l'étude du comportement des roches est la mesure du nombre de coups (soit le comptage cumulé, soit le taux de comptage par unité de temps) ou d'énergie. En compression, le nombre de coups augmente considérablement lors de l'endommagement de l'échantillon. La Figure 2.14 présente un résultat typique de la variation de taux de coups des EA au cours de chargement pour deux granites [Obert et Duvall, 1942 – cité par Hardy, 2003].

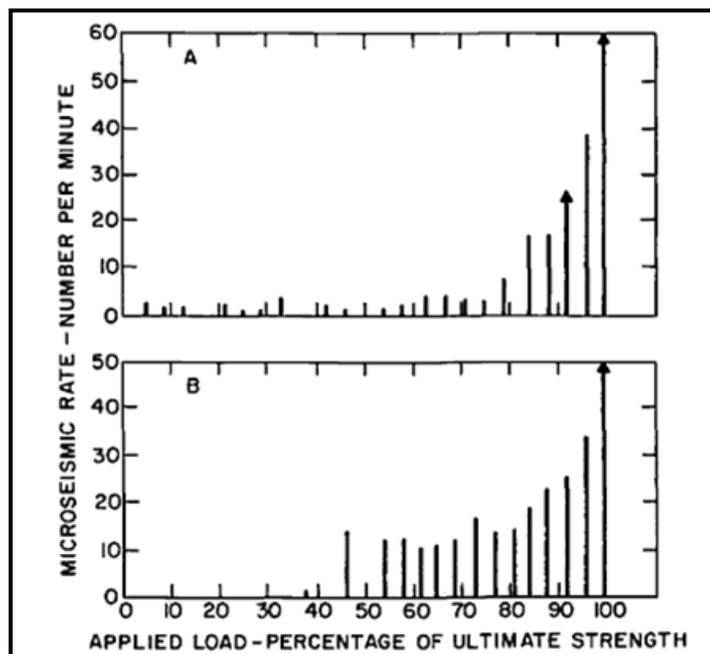
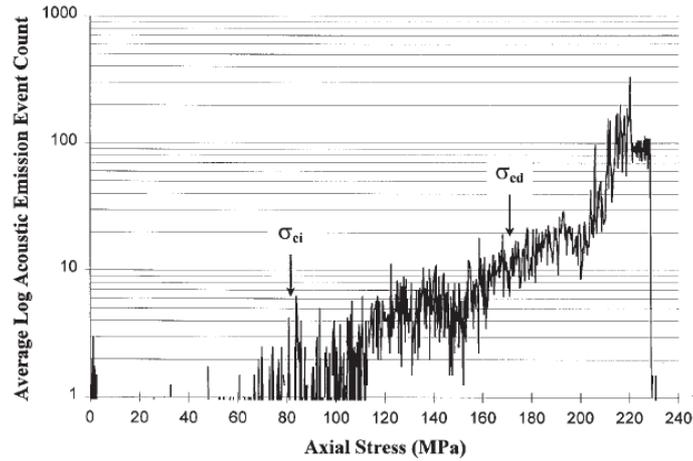
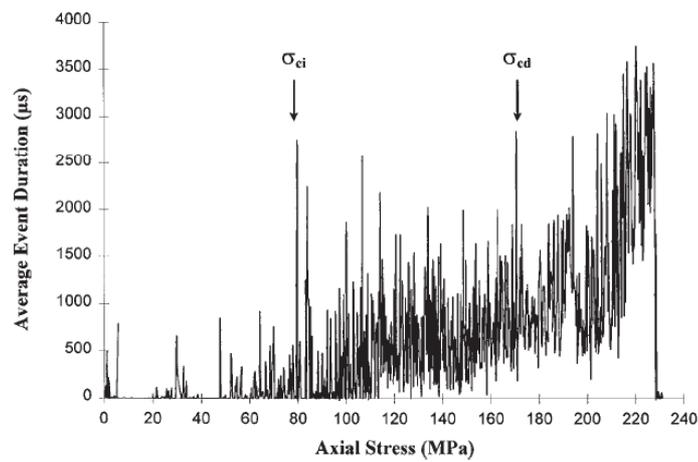


Figure 2.14. Variation du taux de coups enregistrés par minute en fonction du chargement pour deux granites [Obert et Duvall, 1942 – cité par Hardy, 2003].

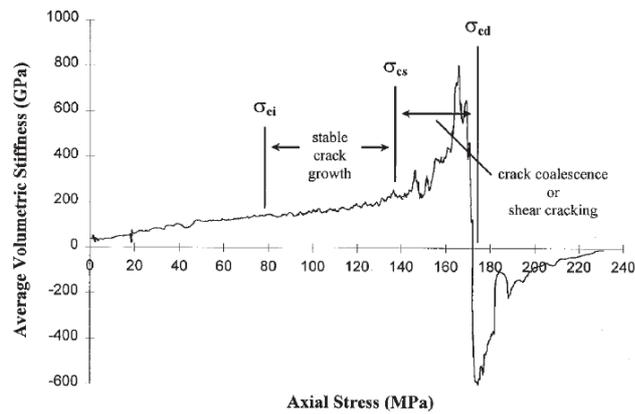
Eberhardt *et al.* (1998) ont présenté une corrélation entre l'activité d'EA et l'évolution des fissures (Figure 2.15). Dans les essais de compression uniaxiale sur le granite du Lac du Bonnet, les contraintes  $\sigma_{ci}$  (correspondant au début de la micro-fracturation) et  $\sigma_{cd}$  (correspondant au seuil de l'endommagement) sont déterminées en examinant plusieurs paramètres [cf. Brace (1964) et Bieniawski (1967)]. Bien que les EA se produisent en permanence tout au long de l'essai, les courbes logarithmiques de taux de coups et de durée des EA dans la Figure 2.15 montrent que le début de l'activité importante d'EA correspond au seuil de contrainte de l'initiation de fissures ( $\sigma_{ci}$ ). Les EA enregistrées avant ce point sont attribuées par les auteurs à la fermeture des (micro-)fissures préexistantes ou à la formation de fissures dans les zones « affaiblies ». En outre, les propriétés d'événements acoustiques (la durée maximale d'événement, nombre de coups) sont différentes avant et après le seuil d'initiation des fissures. Toutefois, le seuil de la propagation instable de fissures ( $\sigma_{cd}$ ), représenté par la chute de la rigidité volumique (rigidité volumique est définie par les auteurs comme étant la pente de la courbe de la déformation volumétrique en fonction de la contrainte axiale) (Figure 2.15-c), est difficile à détecter par la réponse des EA.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.15. Identification des seuils de fissuration dans les roches par observation (a) des taux de coups des EA ; (b) de la durée moyenne des événements EA et (c) de la rigidité volumétrique en fonction de contrainte axiale [Eberhardt et al., 1998].

**Chang et Lee (2004)** ont réalisé les essais de compression triaxiale sur deux roches différentes : le Granite de Hwandeung et le Marbre de Yeosan. Ils ont proposé une méthodologie modifiée basée sur le changement du gradient de la courbe de nombre cumulatif des EA en fonction de la contrainte axiale pour déterminer les seuils d'endommagement (Tableau 2.2 et Figure 2.16).

Seuils	Méthodologie
Initiation des fissures	( $\sigma_{ci}$ ) définie par le point de la première augmentation significative de l'enregistrement des EA
Propagation des fissures secondaires	( $\sigma_{ci2}$ ) correspond au point où la courbe cumulative des EA s'écarte du premier intervalle linéaire
Coalescence de fissures	( $\sigma_{cs}$ ) est associé au point où les valeurs de rigidité du matériau s'écartent de la linéarité et augmentent brusquement ou au point d'une nouvelle augmentation de la courbe cumulative des EA
Endommagement	( $\sigma_{cd}$ ) est définie par le changement de positive à négative de la raideur volumique de l'échantillon, ou comme le point où les courbes cumulatives d'EA s'écartent du deuxième intervalle linéaire et augmentent fortement.

Tableau 2.2. Méthodologie modifiée pour déterminer différents seuils du développement des fissures [Chang et Lee, 2004].

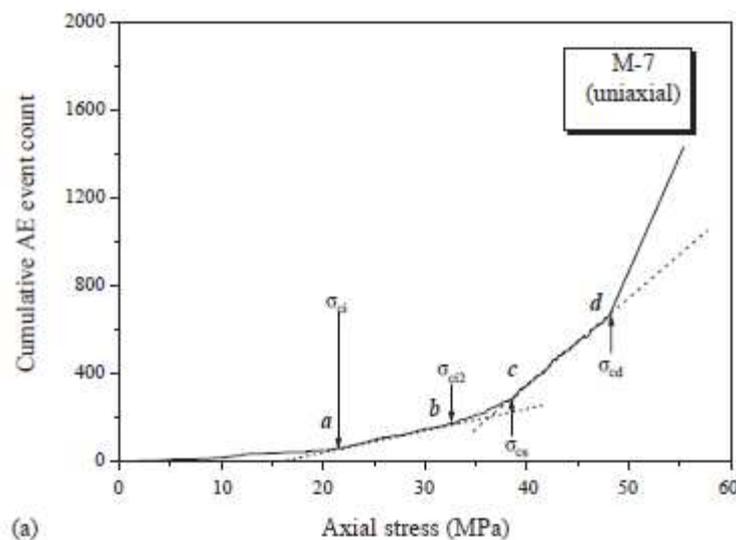


Figure 2.16. Détermination des seuils d'endommagements dans la courbe cumulative des EA [Chang et Lee 2004].

Hall et al. (2006), en examinant le rapport de nombre cumulé des coups et de l'énergie cumulative ( $\Sigma N/\Sigma E$ ) des EA, ont indiqué trois différentes phases du comportement du Tuf de Naples sollicité en compression en déformation plane avec une vitesse constante de chargement (Figure 2.17).

- (Phase 1) : fermeture de fissures : la courbe contrainte en fonction de temps augmente de manière non-linéaire avec une rigidité axiale croissante. Au cours de cette phase, faible activité d'AE est enregistrée et le rapport  $\Sigma N/\Sigma E$  augmente jusqu'à une valeur constante, ce qui indique sans doute que la majorité des fissures existantes se ferment au début de l'essai.
- (Phase 2) : elle correspond à la partie linéaire de la courbe contrainte-temps, à l'initiation de fissures et à l'augmentation du rapport  $\Sigma N/\Sigma E$ .
- (Phase 3) : la propagation instable de fissures caractérisée par la partie non-linéaire de la courbe contrainte-déformation (temps) et par une chute significative du rapport  $\Sigma N/\Sigma E$ . Après cette phase non-linéaire.

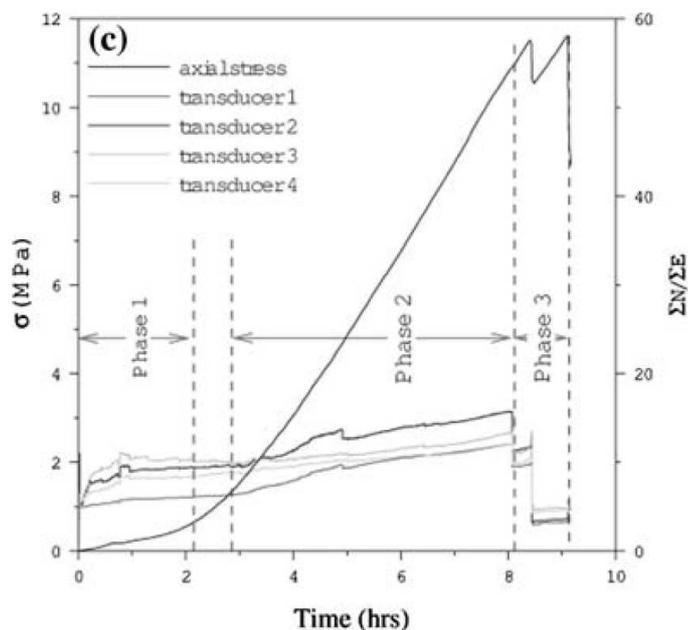


Figure 2.17. Rapport  $\Sigma N/\Sigma E$  pendant la durée de l'essai de compression uniaxiale sur un Tuf. Mise en évidence des trois phases du comportement caractérisées et corrélées avec l'activité acoustique [Hall et al., 2006].

### 2.3.5.2. Localisation des EA

La nucléation et la propagation de fissures dans échantillon sollicité par un chargement mécanique peuvent être localisées et analysées pour mettre en évidence la transition de la déformation diffuse à la déformation localisée [Lockner et al., 1991 ; Meglis et al., 1995 ; Shah et Labuz, 1995 ; Lei et al., 2000, Lei et al., 2003 ; Katsaga et al., 2008]. L'analyse du mécanisme focal des sources d'EA peut aider à comprendre les modes de rupture (*i.e.*, cisaillement, traction ou compression) [Feignier et Young, 1992 ; Zang et al., 1998 ; Chan et Lee, 2004 ; Grosse et Fink, 2006 ; Stanchits et al., 2009 ; Fortin et al., 2009].

Lockner et al. (1991) ont étudié la nucléation et le développement des ruptures macroscopiques des échantillons de grès et de granite en localisant la source des EA. Leur dispositif a été conçu pour contrôler le taux d'émission acoustique plutôt que la vitesse de chargement classique. La pression de confinement reste constante à 50 MPa. La Figure 2.18 présente la courbe contrainte déformation et la

localisation des événements acoustiques dans les différents intervalles de charge obtenue sur un échantillon de granite. Dans l'intervalle (a), les événements d'EA enregistrés sont diffus et localisés au centre de l'échantillon. Dans l'intervalle suivant, la plupart des événements sont regroupés près de la surface de l'échantillon dans la zone de l'initiation de la rupture. A partir de l'intervalle (c), la fracture a tendance à se propager vers le haut et à progresser au cœur de l'échantillon (d, e, f). Les événements d'EA enregistrés au dernier intervalle (g) montrent la croissance de la fracture vers le bas de l'échantillon.

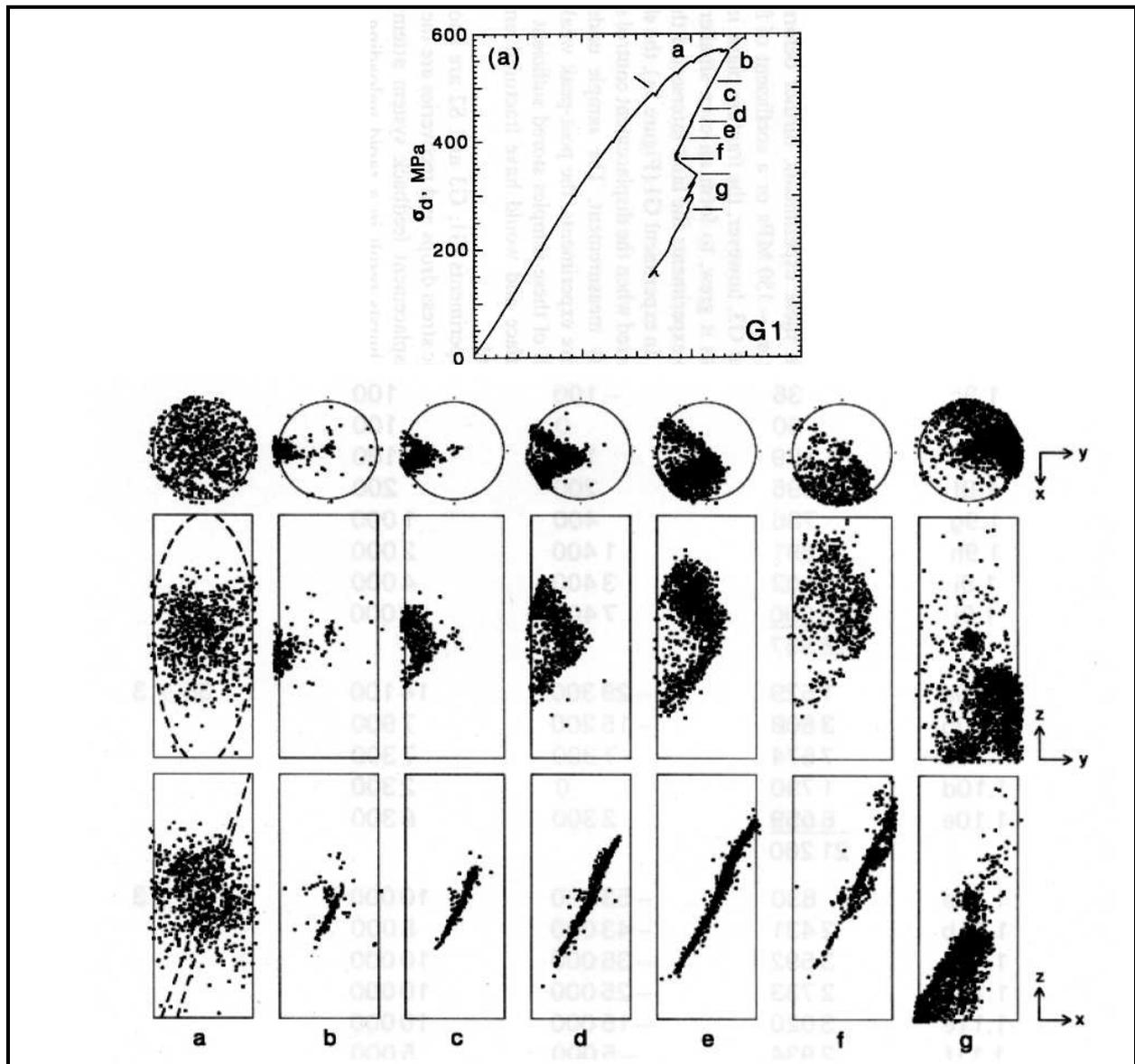


Figure 2.18. Courbe contrainte - déformation (en haut) et évolution de la fracturation dans un échantillon de granite par la localisation des EA [Lockner et al., 1991].

Zang et al. (2000) ont réalisé une série d'essais de compression uniaxiale sur les échantillons cylindriques d'un granite d'Aue en contrôlant le taux d'EA. Dans cette expérience, une plaque d'acier qui couvre 80% la surface supérieure de l'échantillon a été placée entre l'échantillon et le piston. Avec cette condition, la rupture avait été prévue d'initier en mode I sur le bord de la plaque d'acier et de se propager en mode de cisaillement. Les EA localisées associées à la propagation de fracture à différents intervalles de temps sont présentés dans la Figure 2.19. Les EA se regroupent sous la forme d'un nuage dense qui indique la zone de processus de fissure. Les positions de l'extrémité inférieure du

nuage d'EA sont utilisées pour déterminer la vitesse de propagation de la fracture. Dans cet essai, cette vitesse est d'environ  $2\mu\text{m/s}$ . Le mécanisme focal des sources des EA est analysé et indique que 70% des événements sont de type S (*i.e.*, cisaillement), 20% de type T (*i.e.*, traction) et 10% de type C (*i.e.*, collapse). Ce cisaillement domine clairement.

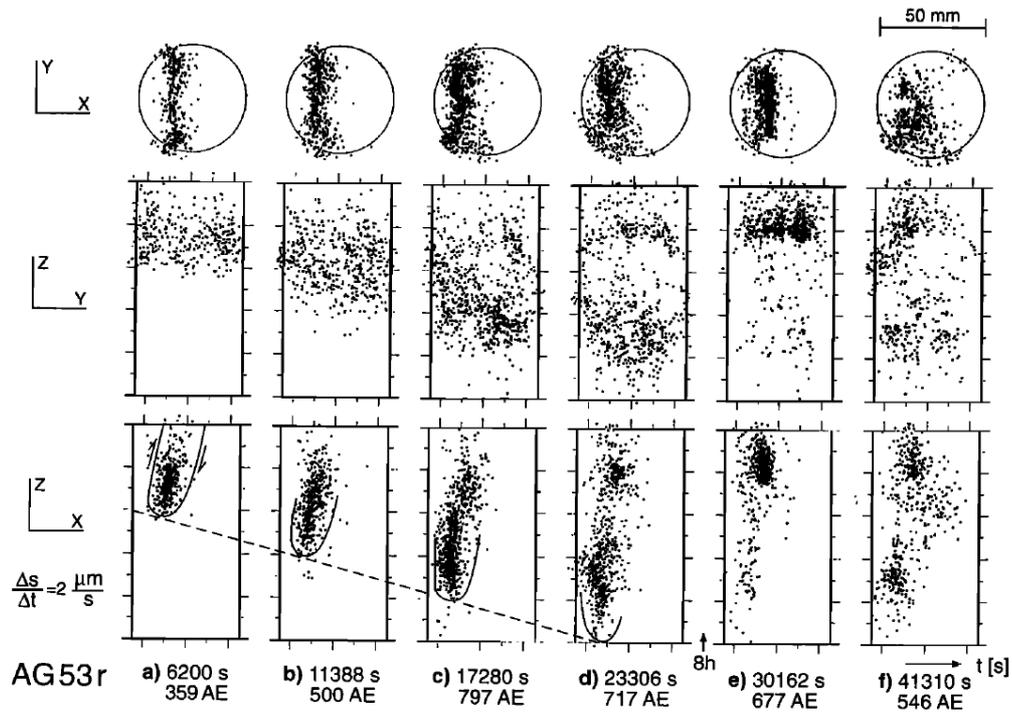


Figure 2.19. Localisation des sources des EA du granite d'Aue [Zang et al., 2000b].

### 2.3.5.3. Mesure de vitesse d'ondes

La vitesse de propagation des ondes dans les roches varie au cours du chargement. Elle est liée à la présence de discontinuités (microfissure, fractures, interface des grains, pores, *etc.*). Cette variation dépend également à l'orientation de ces discontinuités par rapport aux directions principales de la contrainte. La mesure de vitesse d'ondes a été employées par plusieurs études de l'endommagement dans les roches [Schubnel et al., 2003 ; Fortin et al., 2006 ; Stanchits et al., 2010]. A titre d'exemple, la Figure 2.20 [Stanchits et al., 2009] montre un exemple de la variation de vitesse d'ondes P dans un grès de Bentheim au cours du chargement et de l'évolution des bandes de compaction. La Figure 2.20 en haut présente la propagation des bandes de compaction et la Figure 2.20 en bas présente les vitesses d'ondes P dans l'échantillon pour de trajectoires : (i) traversant la zone de la compaction entre deux entailles ( $V_{P-CB}$ ) et (ii) mesuré en dehors de cette zone ( $V_P$ ). Les auteurs confirment que la vitesse des ondes P diminue fortement lors de la formation de la compaction.

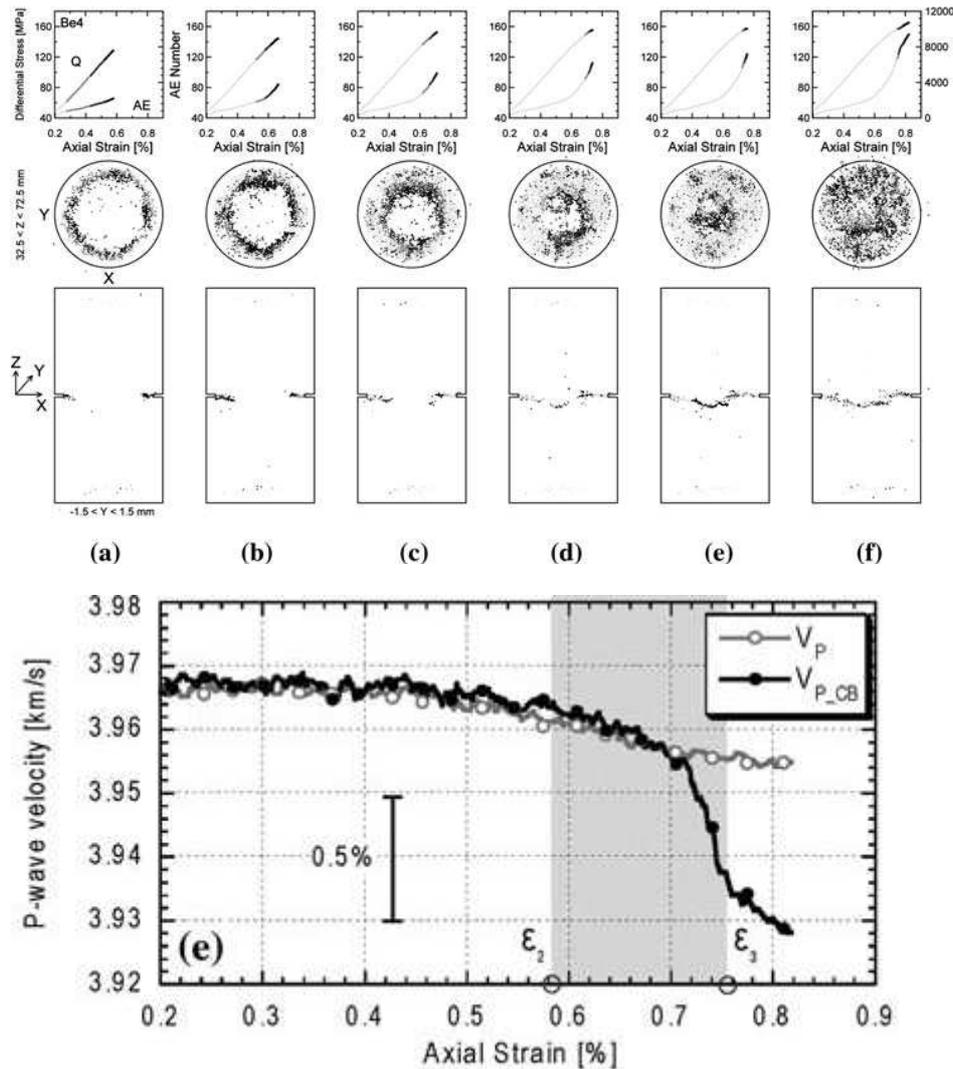


Figure 2.20. (Haut) Evolution de la compaction dans un échantillon de grès de Bentheim par la localisation des événements acoustiques et la vitesse des ondes P mesurées pour les trajectoires traversant la zone de compaction ( $V_{P\_CB}$ ) ou en dehors de la zone de compaction ( $V_P$ ) [Stanchits et al., 2009].

### 2.3.6. Dispositifs de la technique des EA

Les mesures des EA menées dans notre travail ont été réalisées en utilisant deux dispositifs, l'un présent au laboratoire 3SR et l'autre au GeoForschungsZentrum (GFZ) de Potsdam.

#### 2.3.6.1. Système au laboratoire 3SR

##### Matériels

Le dispositif d'analyse des EA utilisé au laboratoire 3SR est composé de six capteurs piézoélectriques, six préamplificateurs PAC (*Physical Acoustic Corporation* 1220A) et du système d'acquisition MISTRAS 2001 AEDSP 32-16 (*Physique Acoustique Corporation*). Ce système ne permet pas la mesure de vitesse de la propagation d'ondes dans le matériau.

- Capteurs d'EA : dans notre application, les capteurs fabriqués au laboratoire 3SR sont composés de céramiques piézoélectriques PZT (Titano-Zirconate de plomb) avec un diamètre

de 2 mm et une épaisseur de 1 mm. Le détail du capteur piézoélectrique est présenté dans la Figure 2.21. Pour avoir un bon contact entre les capteurs et l'éprouvette, les capteurs sont collés sur les échantillons en utilisant une colle époxy.

- Les préamplificateurs PAC (*Physical Acoustic Corporation* 1220A) ont un gain de 40 dB et un filtre 20-1200 kHz.
- Système d'acquisition MISTRAS 2001 : le système d'acquisition d'EA MISTRAS 2001 est constitué par trois cartes d'acquisition (contrôleur de 6 canaux, convertisseur analogique/numérique des signaux, amplificateur 30/99 dB) et d'un logiciel d'acquisition et de traitement des données. Ce logiciel est conçu pour une acquisition rapide et conviviale des salves et des paramètres caractéristiques d'EA. Il permet aux utilisateurs : (i) d'acquies et d'afficher en temps réel les principaux paramètres d'EA ; (ii) de filtrer et stocker les salves en temps réel en fonction de leurs caractéristiques ; (iii) d'extraire les données caractéristiques d'un phénomène.

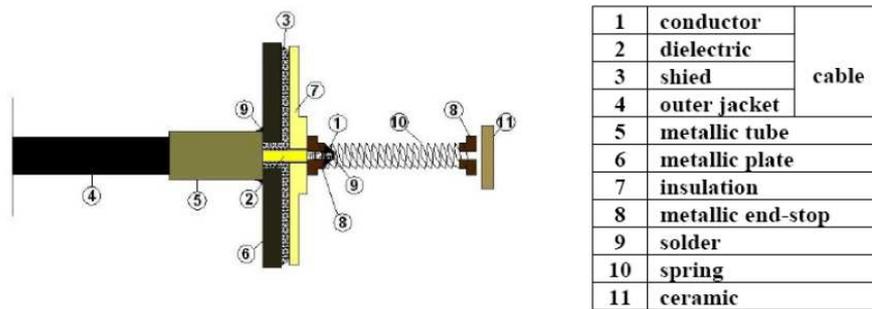


Figure 2.21. Composants d'un capteur piézoélectrique du laboratoire 3SR.

### Réglage

La qualité et la quantité de données obtenues dépendent de plusieurs paramètres. Parmi eux, les plus importants sont la fréquence d'échantillonnage, les fenêtres temporelles de signaux et le seuil de détection :

- la fréquence d'échantillonnage et la longueur des ondes enregistrées ont été choisies respectivement 8MHz et 8192 points.
- les trois paramètres (PDT, HDT, HLT) illustrés dans la Figure 2.22, appelés les fenêtres temporelles glissantes ( $\mu$ s) servent à individualiser les salves et à en extraire les caractéristiques. (i) PDT (Peak Definition Time) sert à la détermination de pic d'amplitude et le temps de montée d'une salve d'EA. Le PDT débute au premier dépassement de seuil ; HDT (Hit Definition Time) est utilisé pour déterminer la fin de la salve. Cette fenêtre est reconduite à chaque dépassement de seuil. Si aucun nouveau dépassement ne se présente dans cette fenêtre, la fin de la salve est définie par le dernier dépassement de seuil. HLT (Hit Lockout Time) permettant d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'EA. Le HLT débute à la fin du dernier HDT.
- le seuil de détection pour chaque capteur est soigneusement choisi par une étape d'étalonnage avant les essais. Ces valeurs sont généralement comprises entre 28 et 35 dB.

Le Tableau 2.3 montre un bilan des paramètres utilisés lors de l'acquisition d'EA.

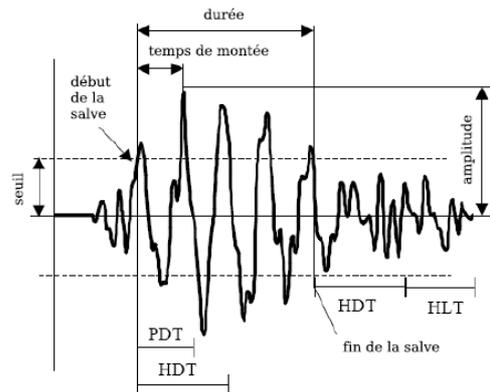


Figure 2.22. Présentation des fenêtres temporelles PDT, HDT et HLT [Manuel Mistras, 2001].

Filtres Bas (kHz)	Filtres Haut (kHz)	Fréquence d'échantillonnage (Mz)	Pré-enregistrement ( $\mu$ s)	Taille de la salve (kHz)
100	1200	8	250	8
Seuil (dB)	PDT ( $\mu$ s)	HDT ( $\mu$ s)	HLT ( $\mu$ s)	Gain de préamp. (dB)
28-35	200	800	1000	40

Tableau 2.3. Réglage des paramètres utilisés en émission acoustique.

### 2.3.6.2. Système au GeoForschungsZentrum de Potsdam

Le dispositif des EA du GFZ a été utilisé par de nombreux chercheurs [Zang et al., 2000b ; Stanchits et al., 2006 ; Stanchits et al., 2009 ; Stanchits et al., 2010 ; Charalampidou et al., 2010]. L'activité AE et la vitesse de propagation des ondes P sont suivies par 12 capteurs d'ondes P fabriqués au GFZ à partir de disques piézo-céramiques de diamètre de 5 mm et d'épaisseur de 2 mm. Les fréquences de résonance, liées au diamètre et à l'épaisseur des disques céramiques, sont de 1 à 2 MHz [Stanchits et al., 2010].

Les signaux capturés sont amplifiés par des préamplificateurs PAC (*Physical Acoustic Corporation* 1220A) ayant un gain de 40 dB. Les formes complètes des ondes sont stockées dans un système d'enregistrement transitoire à 12 canaux (PROKEL, Allemagne) à une fréquence d'échantillonnage de 10 MHz. Le système d'enregistrement AE est équipé d'une mémoire de 6 Go pour le stockage temporaire au cours des expériences, ce qui permet d'enregistrer sans arrêt des signaux numériques.

Dans la mesure de vitesse d'onde élastique en cours d'un essai, 6 capteurs sont utilisés comme émetteurs et les 6 autres comme récepteurs.

Pour la localisation des sources des EA, les temps d'arrivée des ondes sont identifiés automatiquement en utilisant certains critères, y compris le critère « Akaike's information criterion-AIC » [cf. Kurz et al., 2005]. L'amplitude du premier mouvement après l'arrivée des ondes aux capteurs est automatiquement sélectionnée et la polarité du premier mouvement est utilisée pour déterminer les types de sources des événements (type T - traction, type S - cisaillement ou type C - compaction) [cf. Zang et al., 1998].

## 2.4. La tomographie à rayons X (RX)

La tomographie à rayons X est une méthode non-destructive permettant de visualiser la structure interne d'un échantillon opaque en trois dimensions. Ces numérisations 3D sont obtenues par l'analyse d'une multitude d'images X révélatrices de l'atténuation des rayons X traversant l'échantillon étudié. Cette mesure est principalement proportionnelle à la densité locale d'électron. Ainsi, la tomographie RX est une technique non-destructive pour mesurer le champ de densité massique en trois dimensions. Elle permet également de localiser très finement toute hétérogénéité, singularité, vide ou inclusion présents dans l'échantillon.

### 2.4.1. Principes de la méthode

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 5 picomètres et 10 nanomètres. L'énergie de photons va de quelques électron-volts (eV) à plusieurs MeV. Lorsque les rayons X traversent un objet, une partie est dispersée, une autre absorbée et le reste transmis. La technique de tomographie RX la plus simple et la plus utilisée est la tomographie de transmission, *i.e.*, mesurer l'atténuation des rayons X en mesurant les rayons transmis à travers l'objet étudié. La mesure d'atténuation consiste à mesurer la baisse d'intensité des rayons dû au passage à travers l'objet, ce qui permet ensuite d'en déduire la distribution du coefficient d'atténuation linéique  $\mu(x,y)$  grâce à des algorithmes de reconstruction basées sur la loi d'atténuation de Beer-Lambert.

- **Loi d'atténuation de Beer-Lambert :**

La loi de Beer-Lambert calcule, le long d'un trajet donné des rayons X traversant la matière, le rapport entre le nombre de photons transmis  $N$  et le nombre de photons émis  $N_0$  :

$$\ln \frac{N}{N_0} = - \int_s \mu(s) ds , \quad 2.19$$

$\mu$  (en  $m^{-1}$ ) est le coefficient d'absorption (*i.e.*, d'atténuation linéique) du matériau le long du trajet  $s$ . L'absorption  $\mu$  dépend de l'énergie des photons, de la composition et de l'épaisseur du matériau traversé. Si le matériau est homogène, le nombre de photons reçus ne dépend que de l'épaisseur traversée. Si le matériau est hétérogène au sens qu'il est composé de plusieurs matériaux « absorbants » pour les rayons X, ce nombre dépend également de l'atténuation locale en tout point  $i$  du matériau. Dans ce cas, l'équation (2.19) devient

$$\ln \frac{N}{N_0} = - \int_s \sum_i \mu_i(s) ds . \quad 2.20$$

- **Coefficient d'atténuation linéique  $\mu$**

Le coefficient d'atténuation  $\mu$  dépend de l'énergie des photons, de la densité massique et de la composition chimique (*i.e.*, nombre atomique) du matériau étudié. Aux niveaux d'énergie inférieure à 200 kV, le coefficient d'atténuation linéique  $\mu$  dépend essentiellement de deux processus : la diffraction de Compton et l'absorption photoélectrique. Cela peut être exprimée comme suit (Van Geet 2001):

$$\mu = \rho \left( a + b \frac{Z^{3.8}}{E^{3.2}} \right)$$

↙ ↘
↙ ↘

diffraction de Compton
absorption photoélectrique

2.21

où E est énergie du rayon,  $\rho$  est densité du matériau étudié, Z est nombre atomique. a et b sont les coefficients dépendant de l'énergie du rayon. Lorsque le matériau étudié est composé d'un mélange d'atomes, il faut utiliser pour Z un nombre atomique effectif  $Z_e$  défini comme (Van Geet et al., 2000):

$$Z_e = \left( \sum f_i Z_i^{3.8} \right)^{1/3.8},$$

2.22

où  $f_i$  la fraction en nombre d'électrons de l'élément i sur le nombre total et  $Z_i$  le nombre atomique de l'élément i.

- **Technique de la reconstruction**

La Figure 2.23 proposée par Thiery et Gerstenmayer (2002) présente le principe général de la reconstruction. Pour simplifier, le faisceau incident dans cette figure est supposé parallèle. L'image à reconstruire est composée de  $m \times n$  pixels affectés chacun d'un coefficient d'absorption  $\mu_{ij}$ , (correspond à une densité locale  $\rho_{ij}$ ) qu'il convient de déterminer. L'intensité mesurée par le détecteur q quand le réseau de détecteurs est en position p est :  $\ln \left( \frac{N_0}{N_{pq}} \right)$ . Cette valeur correspond à la somme porte sur l'ensemble des pixels de la surface en forme de bande (hachurée sur la Figure 2.23) délimitée par la taille de la source et le détecteur élémentaire concerné. Il en est de même pour toutes les positions successives (1 à n) prises au cours des rotations relatives du couple source-détecteur par rapport à l'objet.

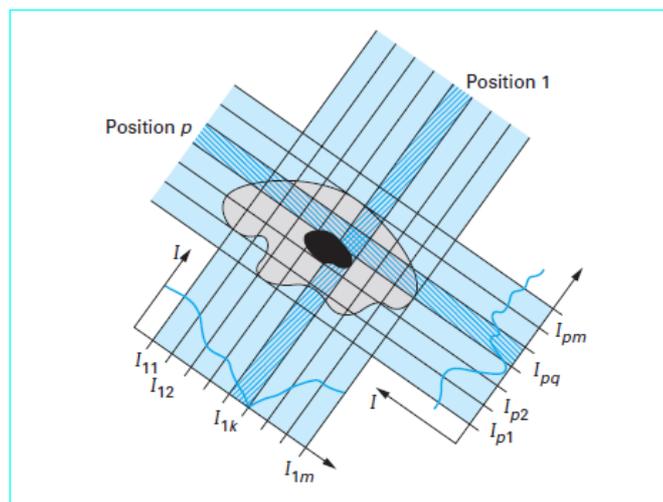


Figure 2.23. Principe général de la reconstruction [Thiery et Gerstenmayer, 2002].

Ainsi, un système d'équations linéaires s'établit dans lequel le logarithme des intensités est déduit des mesures, et les  $\rho_{ij}$  représentent les inconnues à déterminer. Une inversion de matrice doit permettre, en principe, d'exprimer ces inconnues en fonction des intensités mesurées, à condition que le système admette une solution, ce qui suppose au préalable que le nombre de grandeurs mesurées soit égal au nombre d'inconnues. Cela impose  $n$  positions angulaires distinctes (pour obtenir une image de  $m \times n$  pixels avec un réseau de  $m$  détecteurs), soit un pas de variation angulaire  $\Delta\theta = 180^\circ / n$ .

Pour optimiser la qualité des images reconstruites, la technique nécessite un nombre important de position  $n$  de mesure. Néanmoins, la mesure est discrète (nombre fini d'angle de mesure) et nécessite des interpolations pour améliorer la qualité des images.

- **Reconstruction en 3D**

Le paragraphe précédent concerne la reconstruction d'une coupe perpendiculaire à l'axe de rotation. La juxtaposition des  $n$  coupes successives résultant des translations pas à pas de l'objet par rapport au plan source-détecteur permet de mémoriser les données d'un objet à trois dimensions  $\mu(x, y, z)$ . L'outil informatique permet de visualiser ultérieurement l'image d'une section quelconque de l'objet.

- **Résolution spatiale**

La résolution spatiale de mesure est liée à la fois à la résolution du détecteur (*i.e.*, taille de des cellules photoélectriques) et au grossissement (*i.e.*, le rapport entre la taille de l'image de l'échantillon enregistrée par le détecteur et la taille réelle de l'échantillon) influencé par dimension et la forme de l'échantillon, la distance entre la source, le détecteur et l'échantillon.

## 2.4.2. Exemples d'utilisation de la tomographie RX dans l'étude de l'endommagement des géomatériaux

L'utilisation des Rayons X dans l'étude du comportement mécanique des géomatériaux a commencé depuis les années 60 par Roscoe (1970) dans l'étude de déformation d'un sable en suivant les déplacements de balles de plomb dispersées dans l'échantillon à l'aide de radiographie RX. Au cours des quatre décades, l'utilisation des Rayons X a été fréquemment utilisée dans l'étude de la localisation de déformation et de la rupture représentées par variation volumique (*i.e.* densité) lors d'essais triaxiaux. En plus, cette technique expérimentale a également été employée dans l'observation de dilatations localisées observées dans les sols granulaires lors des différents types d'essais en laboratoire *e.g.*, essais de cisaillement direct [Scarpelli et Wood, 1982], essais de compression en conditions de déformation plane [Vardoulakis et Graf, 1982]. Les types de scanner employés sont diversifiés, *i.e.*, scanners médicaux [Desrues et *al.*, 1996], scanners industriels [Alshibli et *al.*, 2000 ; Otani et *al.*, 2002] et le synchrotron [Landis et Nagy, 2000 ; Viggiani et *al.*, 2004 ; Lenoir et *al.*, 2007].

On rencontre trois grands types d'utilisation de la tomographie RX dans les essais mécaniques :

(1) l'étude pre/post-mortem : l'échantillon est scanné avant et après essai. Cette mesure permet de caractériser les zones de déformations localisées;

(2) la deuxième approche consiste à scanner l'échantillon sous différents états de charge. A certains moments de l'essai, on décharge et retire l'échantillon pour le scanner. Ce type de mesure permet de suivre la progression de déformations hétérogènes (*e.g.*, bande de cisaillement, fissures). Cependant, les mesures ne sont pas réalisées sous chargement ; le déchargement complet modifie probablement l'état de déformation dans matériau (*i.e.*, retour élastique) ;

(3) la troisième (l'étude « in-situ ») utilise des cellules spécifique adaptées aux mesures tomographiques pour scanner les échantillons sous chargement. Cette mesure est relativement récente et très conseillée pour caractériser l'initiation et la propagation de déformation sous chargement.

Nous présentons ensuite deux exemples d'utilisation de la tomographie RX dans l'étude de la localisation. Le premier consiste en une mesure d'un sable d'Hostun et le second présente la mesure in-situ de l'étude de la fissuration dans une argilite de Callovo-Oxfordien. Pour plus d'exemples, le lecteur pourra se reporter à l'article de Desrues (2004) ou aux travaux de Lenoir (2006).

**Desrués et al. (1996)** ont réalisé une série d'essais triaxiaux sur le sable dense d'Hostun à l'état sec. Les échantillons ont été scannés à l'état initial sous une contrainte moyenne effective par un scanner médical (résolution de  $0.7 \times 0.7 \times 2 \text{ mm}^3$ ). Les mesures étaient aussi effectuées après retrait complet du chargement. Par la mesure des indices des vides (densité locale moyenne) en certains endroits des bandes de cisaillement, ils ont montré que l'indice des vides dans les zones de cisaillement atteint une limite. Les auteurs ont remarqué que des mesures globales de changement de volume dans de tels essais ne donnent qu'une valeur moyenne, et que les variations de densité (dilatation pour les sables denses) se produisent principalement dans les zones de cisaillement localisé. La Figure 2.24(a) montre un exemple de structure complexe des zones de localisation des déformations observées. Dans ce cas, les zones localisées s'organisent sous la forme de multiples plans associés par paires et deux plans dans chaque paire se croisent suivant un diamètre de l'échantillon. Le schéma de la localisation est illustré dans la Figure 2.24b.

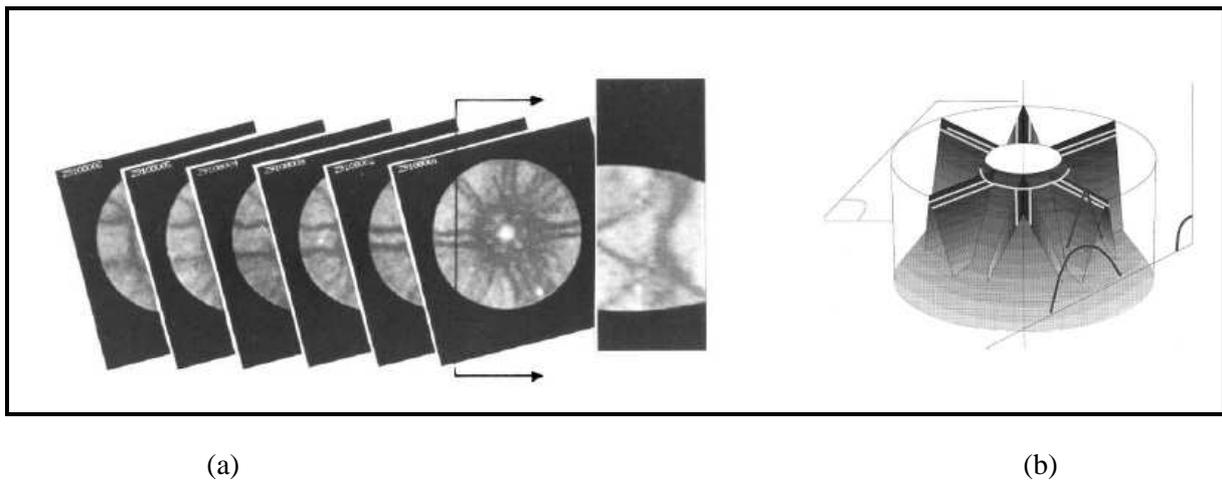


Figure 2.24. (a) Structures complexes de bandes de cisaillement observées sur le sable dense d'Hostun à l'état sec en fin d'un essai triaxial. (b) Illustration du schéma de la localisation [Desrués et al., 1996].

**Lenoir (2006)** a mené une série d'essais triaxiaux *in-situ* sur l'argilite de Callovo-Oxfordien en utilisant la micro-tomographie au Synchrotron qui fournit une haute résolution des scans (dans ce cas  $14 \times 14 \times 14 \mu\text{m}^3$ ) et un temps de scan rapide (15 minutes pour un scan). Comme les échantillons ont été scannés sous charge (*i.e.*, la déformation axiale reste constante en cours de scan), il y a inévitablement une certaine quantité de relaxation de contrainte axiale lors du scan. La Figure 2.25 montre les résultats issus d'un essai sous 10 MPa de pression de confinement. Les sept numéros indiqués sur la courbe déviateur- déformation axiale représentent les numéros des scans. Le huitième scan a été effectué en fin d'essai après l'enlèvement de pression de confinement. Les images tomographiques verticales de ces étapes de scan sont également présentées dans la Figure 2.25. A l'étape 3, aucun signe de déformation localisée n'est détecté à l'étape 3 correspondant à la contrainte maximale. Ensuite, La localisation apparaît visiblement dès l'étape 4. Enfin, à l'étape 8, deux fissures ouvertes sont vues sur les bords de l'échantillon. La comparaison des images aux étapes 7 et 8 indique clairement que l'ouverture de ces fissures est essentiellement liée à l'enlèvement de la pression de confinement.

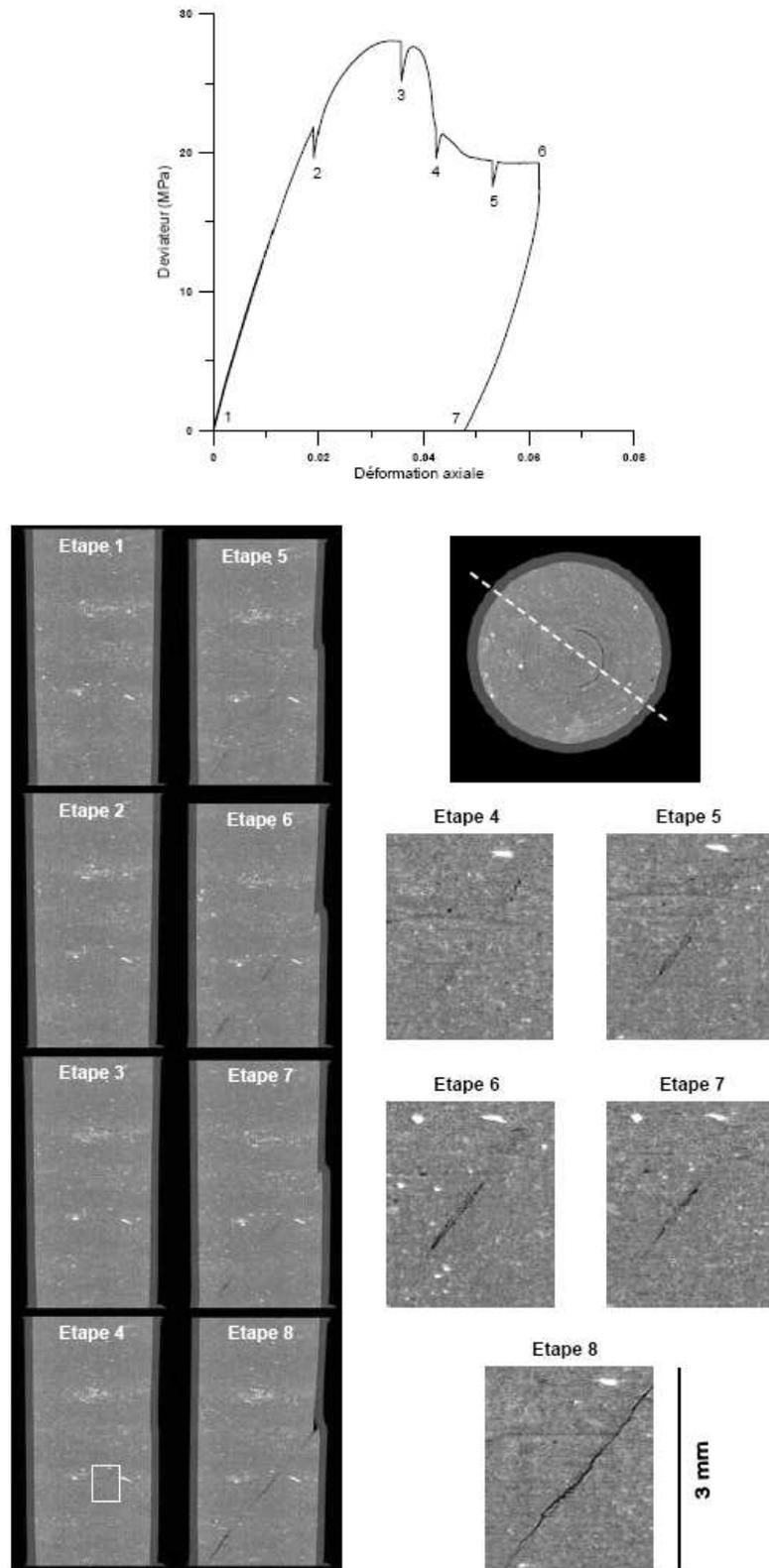


Figure 2.25. En haut : réponse mécanique de l'essai avec indication des étapes des scans. En bas : coupes verticales perpendiculaires à la zone localisée d'une région de l'échantillon en cours d'essai. L'emplacement des coupes est indiqué sur la coupe horizontale en haut à droite. Les vues de détail à droite correspondent à la région indiquée par le rectangle blanc lors des étapes 4 à 8 [Lenoir, 2006].

Dans les exemples précédents, les localisations sont détectées directement sur les images tomographiques. Notons que les images tomographiques ne représentent que le champ de densités locales de matériau. L'endommagement localisé est visible lorsqu'il accompagne un changement local de déformation volumique ainsi un changement local de la densité (*e.g.*, dilatation, compaction) ou dans le cas des fissures ouvertes où les vides sont créés entre les bords des fissures. Toutefois, si la déformation localisée est isochore, *i.e.*, sans changement de volume, (*e.g.*, fermeture de fissures, des fissures de cisaillement), elle est invisible dans les images tomographiques. Une telle limitation peut être surmontée en complétant la tomographie RX par la corrélation d'images numériques en 3D (DIC-3D volumique) qui peut fournir le champ de déformation en volume de l'échantillon. Ces approches de DIC-3D sont une extension de la DIC (les détails de cette approche se trouvent dans Lenoir et *al.* 2007 et Bay et *al.* 2009).

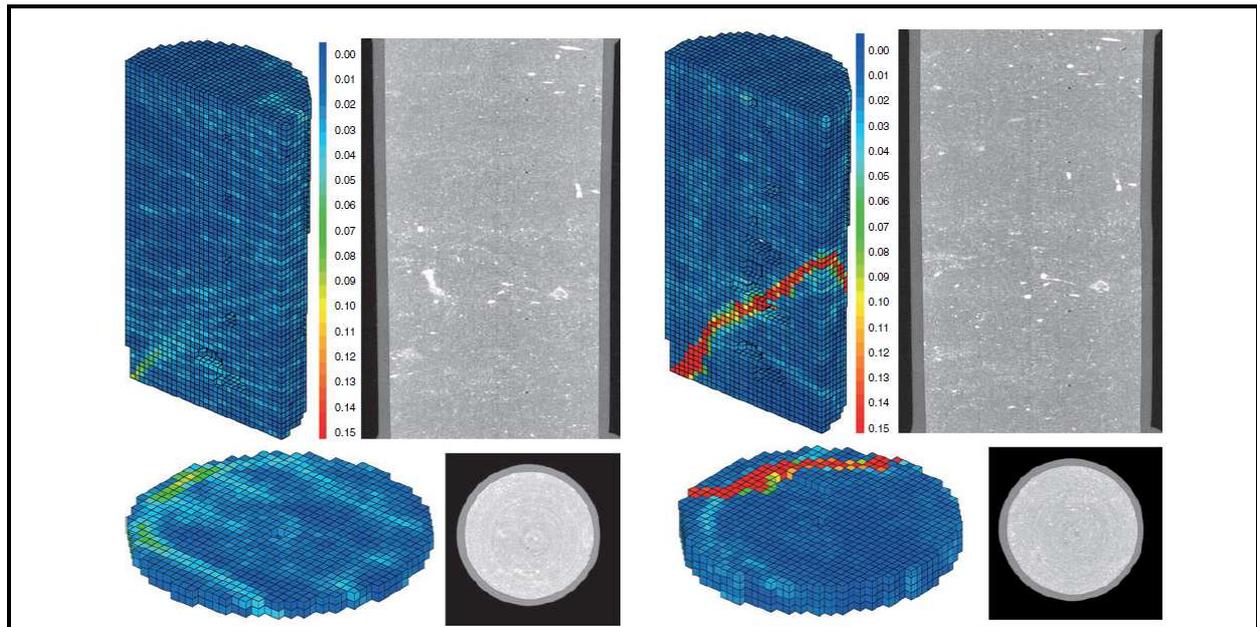


Figure 2.26. Déformations équivalentes de Von Mises issues des analyses incrémentales pré-pic (2-3) et post-pic (3-4) de l'essai présenté dans la Figure 2.25 [Lenoir et *al.*, 2007].

Lenoir et *al.* (2007) ont utilisé l'approche DIC-3D pour analyser les images tomographiques issues de l'essai présenté dans la Figure 2.25. La Figure 2.26 présente les coupes verticales et horizontales de l'échantillon et les champs de déformation équivalentes de Von Mises issus des analyses des incréments pré-pic (2-3) et post-pic (3-4). Les auteurs ont remarqué que la fissure sous forme conique, ce qui est invisible sur les images tomographiques, était nettement détectée dans l'incrément pré-pic (incrément 2-3) (Figure 2.26). Dans l'incrément post-pic (3-4), l'analyse DIC-3D montre une bande de cisaillement complètement développée à travers l'échantillon ce qui correspond à la bande observée dans l'image tomographique (l'étape 4 dans la Figure 2.25).

### 2.4.3. Appareil de tomographie à RX au laboratoire 3SR

Le scanner utilisé dans notre travail est un appareil de tomographie à RX multi-échelle (de 4 à 250  $\mu\text{m}$ ), à faisceau conique, conçu et fabriqué par l'entreprise RX-Solution localisée sur Annecy France et acquis par le laboratoire 3SR. Ce scanner est composé d'une cabine de protection qui offre un espace flexible de travail ( $175 \times 135 \times 290 \text{ cm}^3$ ) permettant de réaliser *in-situ* des essais mécaniques. La distance entre la source RX et le détecteur est fixée à 76 cm. Une platine de rotation mobile est supportée par une équerre motorisée en translation horizontale (zoom), asservie en position et en vitesse. La charge maximale autorisée est de 70 kg. La résolution spatiale peut être réglée par changement la taille du spot de 5 à 50  $\mu\text{m}$  ou par le changement de la distance entre la source de

rayons X et l'objet à numériser en déplaçant la platine de rotation. Le logiciel X-act est utilisé pour le pilotage du générateur de RX, le pilotage et la programmation des axes de translation et de la platine de rotation, l'acquisition, le traitement et l'enregistrement des images radioscopiques ainsi que la calibration automatique du système. Le traitement des données et le calcul des coupes tomographiques sont réalisés à l'aide du logiciel RX-reconstructions. Les détails des spécificités techniques sont donnés dans le Tableau 2.4.

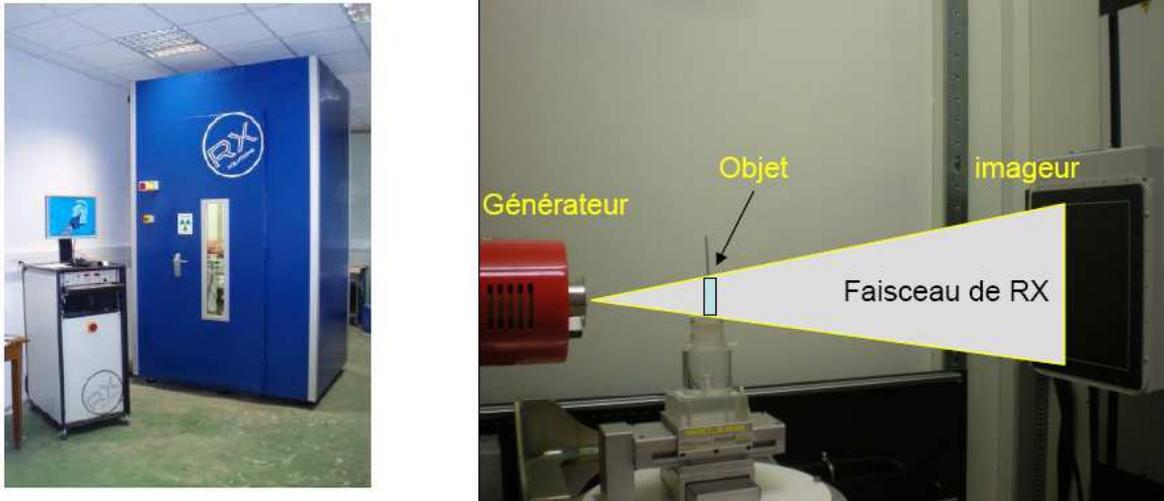


Figure 2.27. Scanner à rayons X du Laboratoire 3SR. Vue d'ensemble de la cabine et de l'ordinateur de pilotage (photo à gauche), et des principaux éléments du système (photo à droite).

<b>Générateur de rayons X</b>	
Type	Tube scellé micro foyer
Haute tension	40-150 kV
Courant d'anode	0-500 $\mu$ A
Puissance maximum	75 W
Taille du point focal	Small Spot mode : 5 $\mu$ m (4W) et 7 $\mu$ m (10W) Middle Spot mode: 20 $\mu$ m (30W) Large Spot mode: 50 $\mu$ m (75W)
Ouverture du faisceau	43°
Position du point focal	Environ 17 mm en arrière de la fenêtre de sortie
Filtration	Fenêtre de sortie Béryllium d'épaisseur 200 $\mu$ m
<b>Détecteur</b>	
Type	Capteur plan Matriciel
Matrice de pixel	1920 x 1536 pixels
Surface de détection	195.07 x 243.84 mm
Frame rate	0.2-30 images/seconde
Scintillateur	CsI (haute résolution, haute rendement)
Data type	14 bits – 16384 niveaux de gris
Taille des pixels	127 $\mu$ m en haute résolution, 254 $\mu$ m en mode normal

Tableau 2.4 Caractéristiques techniques du scanner du Laboratoire 3SR

## 2.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique des techniques de mesures de champs et les dispositifs expérimentaux de ces techniques utilisés dans nos expériences. L'étude bibliographique a confirmé l'intérêt de chacune de ces techniques de mesures non-destructives dans l'étude de l'endommagement localisé dans les roches.

La technique DIC/SIC, pour les mesures de champs cinématiques en surface, est un outil très efficace pour suivre la transition diffuse-localisée de déformation à la surface des échantillons. De plus, cette approche est très simple à mettre en œuvre dans les essais mécaniques. La technique des EA est très puissante dans l'étude des déformations inélastiques (micro-fissures) au cœur de l'échantillon, permettant ainsi d'identifier correctement le début de l'endommagement et de suivre l'évolution de la rupture. Bien que dans nos expériences, l'étude in-situ par la tomographie RX n'ait pas été réalisée, l'étude comparative d'un échantillon sain et *post-mortem* va nous aider à caractériser

en 3D les défauts préexistants dans l'éprouvette et comprendre leur influence sur la rupture finale. Les approches DIC-3D volumique à partir d'images tomographiques n'ont pas été utilisées dans cette étude.



# **Chapitre 3 : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION QUANTITATIVE DE FISSURES PAR LA TECHNIQUE DIC-F**

3.1. Introduction	68
3.2. Méthodologie	68
3.2.1. Identification des discontinuités	70
3.2.2. Tracé des fissures	72
3.2.3. Quantification des sauts de déplacement	73
3.3. Incertitude sur la quantification des sauts de déplacement	76
3.3.1. Choix des méthodes de calcul des sauts de déplacement	78
3.3.2. Incertitude sur le tracé des fissures	79
3.4. Conclusion	82

## 3.1. Introduction

La corrélation d'images numériques (Digital Image Correlation, DIC) pour la mesure de champs de déplacement est essentiellement une analyse de type continu qui suppose qu'il n'y a aucune discontinuité forte (*i.e.*, discontinuité de déplacement) sur la surface étudiée. Dans le cas d'une fissure, cette hypothèse est clairement violée. Par conséquent, la déformation calculée dans la région de la fissure sera dénuée de sens. Ce fait est lié aux deux raisons suivantes. La première est de nature fondamentale : les fissures sont des discontinuités du champ de déplacement qui ne peuvent pas être correctement décrits en termes de déformation. La deuxième raison est plus technique et concerne la distorsion de l'image produite par l'apparition d'une fissure qui a pour conséquence qu'une bonne corrélation entre les images ne peut pas exister en zone fissurée. Récemment, différentes approches ont été proposées pour surmonter les défis de l'utilisation des techniques DIC en tenant compte de discontinuités fortes. Par exemple, Rhéthoré et *al.* (2007, 2008) ont proposé un algorithme de DIC qui utilise la méthode des éléments finis étendus (Extended Finite Element Method X-FEM). Une autre approche a été suggérée par Helm (2008), dans lequel une procédure automatique permet l'identification de fissures et leur exclusion de l'analyse DIC. De nombreuses publications récentes ont employé la DIC pour étudier expérimentalement la fissuration : la DIC "standard" pour la localisation de déformation en pointe de fissure dynamique (Grégoire, 2008) et la mesure de facteur d'intensité de contrainte (Réthoré et *al.*, 2005; Roux et Hild, 2006; Yoneyama et *al.*, 2007), la technique DIC « étendue » (Extended Digital Image Correlation X-DIC) (Rhéthoré et *al.*, 2007, 2008 ; Chen et *al.*, 2010) et la méthode de "subset-splitting" (Poissant et Barthlat, 2009). Il y a une quinzaine d'années, Desrues (1995) a développé une méthode de traitement de fissures à partir d'images analogiques (photos argentiques), basée sur la stéréophotogrammétrie de faux relief. L'approche de Desrues a été récemment reprise par Hall et *al.* (2007), qui ont proposé une méthode de quantification des sauts de déplacements en utilisant la technique DIC ; dans cette méthode, la trace des fissures est identifiée manuellement sur le champ de déformation de cisaillement. Cependant, à notre connaissance, peu d'applications de la DIC existent dans la mécanique des roches en laboratoire (voir Viggiani et Hall, 2008 ; Dauriat et *al.*, 2010 et Valès, 2008 pour plus d'exemples).

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode appelée DIC-F (*Digital Image Correlation for Fracture*), basée sur l'approche DIC, pour caractériser l'évolution de fissures dans les échantillons testés en laboratoire. Cette méthode permet d'abord d'automatiser le tracé des lignes de discontinuité de déplacement (*i.e.*, les fissures), puis de quantifier les sauts de déplacement en utilisant le champ de déplacement issu de l'analyse DIC. Les sauts de déplacements le long de la fissure identifiée sont décomposés en composantes normale et tangentielle, par rapport à la trajectoire locale de la fissure. Ces informations permettent une meilleure compréhension du « mode » (au sens de Irwin) de propagation de la fissure. La méthodologie de cette méthode et sa première application dans l'étude de la fissuration dans le Tuf de Naples ont été présentées dans Nguyen et *al.*, (2010). Dans la suite, après une présentation de la méthodologie de DIC-F, nous montrons un essai effectué sur des mires qui permet de quantifier l'incertitude associée à cette méthode.

## 3.2. Méthodologie

La corrélation d'images numériques est utilisée pour quantifier efficacement les champs de déplacements à la surface d'échantillons et ainsi donner accès aux champs de déformation après une étape de post-traitement. Un exemple d'analyse DIC est fourni en Figure 3.1 : les Figure 3.1(a) et (b) présentent deux photos de la surface d'un échantillon, enregistrées avant et après l'apparition de fissures lors d'un essai de compression en déformation plane ( $\varepsilon_z = \varepsilon_2 = 0$ ). Les Figure 3.1(c) et (d) montrent les champs des composantes horizontales et verticales du déplacement issus de l'analyse DIC.

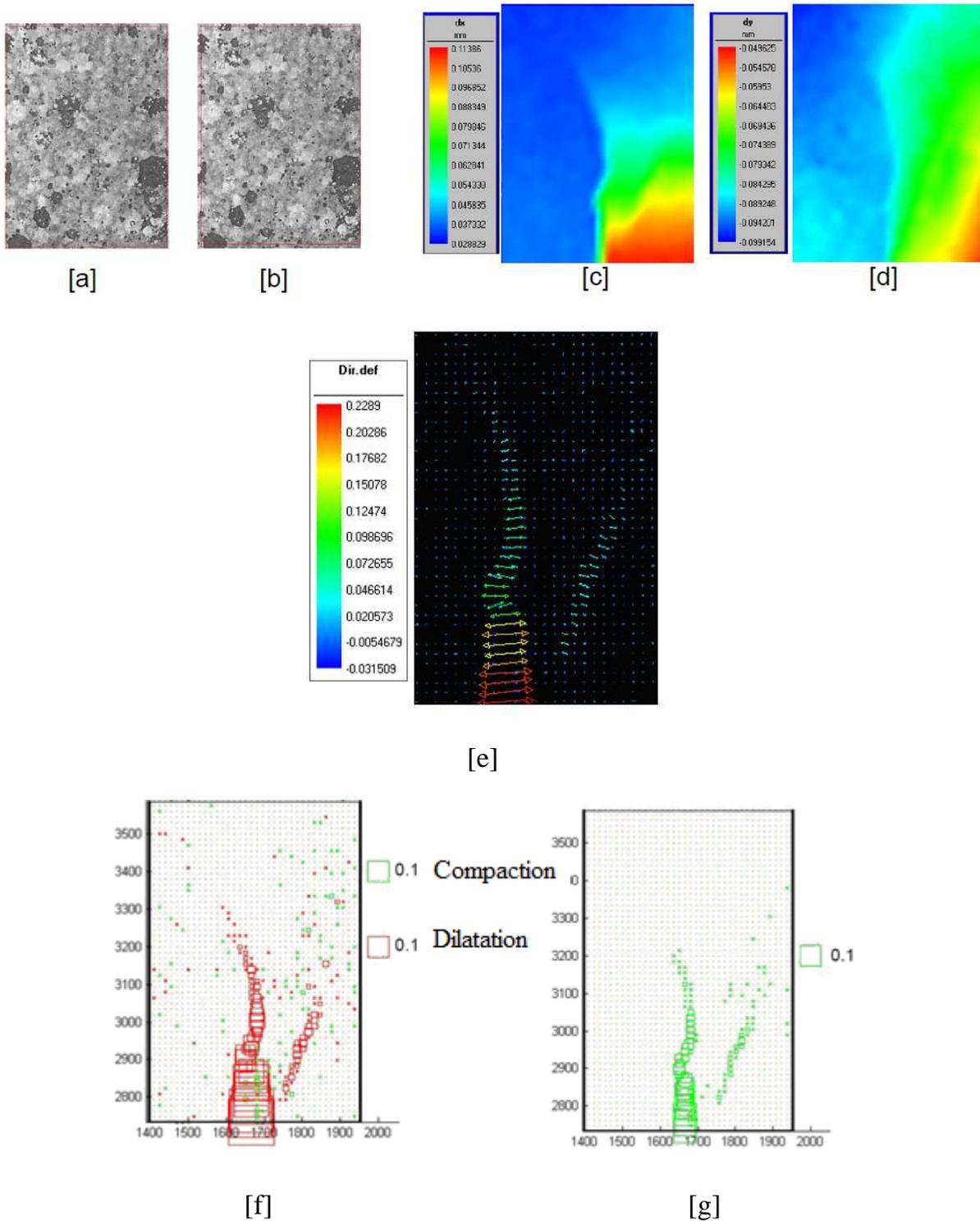


Figure 3.1. Exemple d'une analyse par technique DIC. (a) Image de référence ; (b) image à corrélér; (c) déplacements horizontaux (mm) ; (d) déplacements verticaux (mm) ; (e) intensités et orientation des déformations principales ; (f) intensités des déformations volumiques ; (g) déformations de cisaillement maximum.

Soulignons tout d'abord que la notion de « déformation » telle qu'elle est utilisée ici n'est pas vraiment correcte en présence de discontinuités. Nous devrions dans ce cas avoir localement des déformations infinies. Toutefois, en considérant le matériau comme homogène sur la zone du motif considéré et en utilisant une condition de déformation plane  $\varepsilon_2 = 0$ , nous pouvons estimer la déformation volumique par :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_3, \quad 3.1$$

et la déformation de cisaillement maximum par :

$$\varepsilon_{s-\max} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) / 2, \quad 3.2$$

où  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  sont les valeurs majeure, intermédiaire et mineure du tenseur de déformation logarithmique (Tenseur de Hencky). Les déformations principales, volumiques et de déformations de cisaillement maximum sont présentées respectivement dans les Figure 3.1 (e-g). Les champs de déformations volumiques apportent ainsi des informations en termes de dilatance du matériau en zones de fissures. Les champs de déformations de cisaillement maximum mettent clairement en évidence les éléments contenant des discontinuités. Une description plus pertinente de la fissure dans le cas de telles discontinuités de déplacement consiste à quantifier les sauts de déplacement à travers la fissure. La nouvelle méthode (DIC-F) décrite ci-dessous a pour objectif d'identifier les discontinuités puis de quantifier les sauts de déplacement le long de ces discontinuités.

Cette méthode est composée des trois étapes suivantes :

- détection de forte probabilité de présence de discontinuités ;
- tracé des fissures en surface ;
- calcul des déplacements relatifs entre les deux faces le long de chaque fissure.

### 3.2.1. Identification des discontinuités

La présence d'une discontinuité de déplacement peut être détectée sur des images par différents critères, en localisant par exemple des zones de déformations élevées (comme présentée dans la Figure 3.1e-g), des zones de faibles valeurs de coefficient de corrélation, des zones de fort changement de niveaux de gris, etc... Nous pouvons citer également l'algorithme de Sobel « edge-finding » utilisé pour identifier les fissures à partir de la recherche des lieux où le gradient d'intensité de déplacement tend vers un maximum [López-Crespo et al., 2009]. Dans cette étude, nous utilisons un critère basé sur la différence des déplacements entre les quatre points d'un élément.

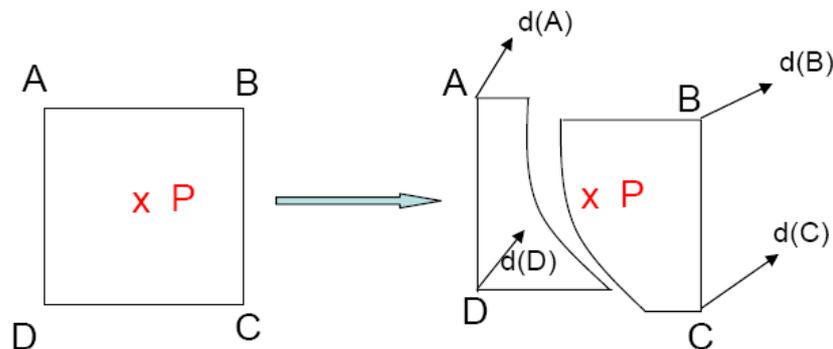


Figure 3.2. Discontinuité dans un élément.

Considérons (Figure 3.2) un élément carré correspondant à l'une des mailles de la grille d'analyse. Son centre est noté P et les quatre coins A, B, C, D sont les quatre nœuds d'analyse dont les déplacements ont été calculés par la technique DIC. Nous reprenons l'idée d'un critère proposé par Grégoire et *al.* (2005) basé sur la différence des déplacements entre les points opposés du quadrilatère:

$$K(P) = \max\left(\left\|\overrightarrow{d(C)} - \overrightarrow{d(A)}\right\|; \left\|\overrightarrow{d(D)} - \overrightarrow{d(B)}\right\|\right); \quad 3.3$$

où  $\overrightarrow{d(A)}$ ,  $\overrightarrow{d(B)}$ ,  $\overrightarrow{d(C)}$  et  $\overrightarrow{d(D)}$  sont, respectivement, les vecteurs déplacement des points A, B, C, D. Les valeurs de K, calculées pour tous les quadrilatères analysés à la surface de l'échantillon, sont filtrées. Seuls sont conservés les éléments ayant des valeurs de K supérieures à un seuil donné. Les éléments ainsi identifiés ont de fortes probabilités de contenir une discontinuité. La valeur du seuil  $K_{\min}$  est une variable donnée par l'utilisateur. Elle doit être attentivement choisie de manière à ne conserver que les éléments présentant une discontinuité probable (par exemple, l'élément traversé par une fissure) et donc être assez élevée pour filtrer les secteurs non concernés par une fissure. La Figure 3.3(a) présente un exemple où une partie d'une fissure peut être facilement identifiée à l'œil dans la photographie. La Figure 3.3(b) présente les valeurs de K non filtrées et filtrées. La valeur de  $K_{\min}$  est choisie ici à  $7 \mu\text{m}$ , la taille des éléments étant de  $10 \times 10 \text{ pixel}^2$ . Nous constatons qu'il est ainsi possible de suivre une fissure sur une longueur bien supérieure à celle détectable à l'œil.

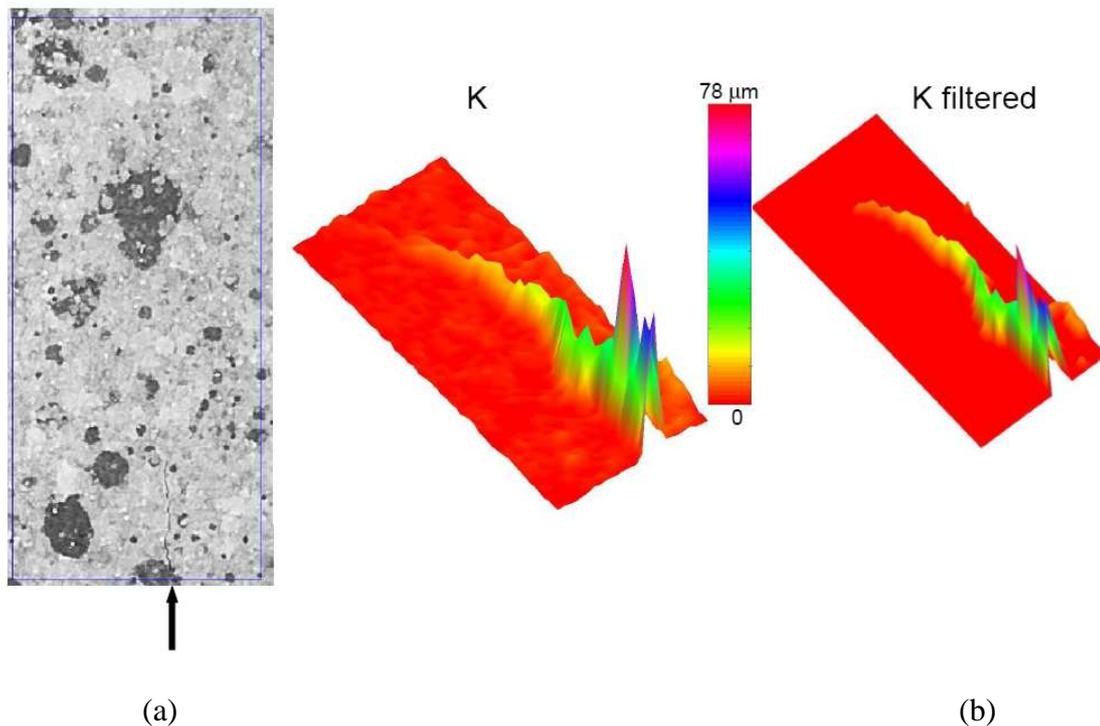


Figure 3.3. Méthode d'identification des fissures : (a) fenêtre contenant une fissure bien marquée, (b) carte des valeurs originales (à gauche) et filtrées (à droite) (ici,  $K_{\min} = 7 \mu\text{m}$ ).

### 3.2.2. Tracé des fissures

La recherche des éléments appartenant à une ligne continue de discontinuité s'appuie sur les trois étapes suivantes :

- (i) un point de départ est choisi. Ce point correspond à l'élément ayant la valeur maximale de  $K$  dans la fenêtre contenant la discontinuité. Ce point de départ peut se situer sur une extrémité ou au cœur de la fissure ;
- (ii) le prochain élément appartenant à la discontinuité est localisé en recherchant le maximum de  $K$  dans une région de  $3 \times 3$  éléments autour de l'élément identifié à l'étape initiale. La valeur de  $K$  de l'élément identifié dans l'étape (i) est alors imposée à zéro afin qu'il ne soit plus identifié ultérieurement. Ce nouvel élément devient le nouveau point de départ pour l'étape (i). La recherche se termine lorsque toutes les valeurs de  $K$  des éléments dans la région de recherche sont nulles ;
- (iii) l'étape (ii) localise les éléments de la fissure dans une seule direction à partir du point de départ. Pour localiser les éléments suivant une autre direction, nous revenons à l'élément de départ défini dans l'étape (i) et recommençons la recherche présentée dans (ii).

Ces étapes sont répétées tant qu'existe un ensemble des éléments présentant une valeur de  $K$  différente de zéro.

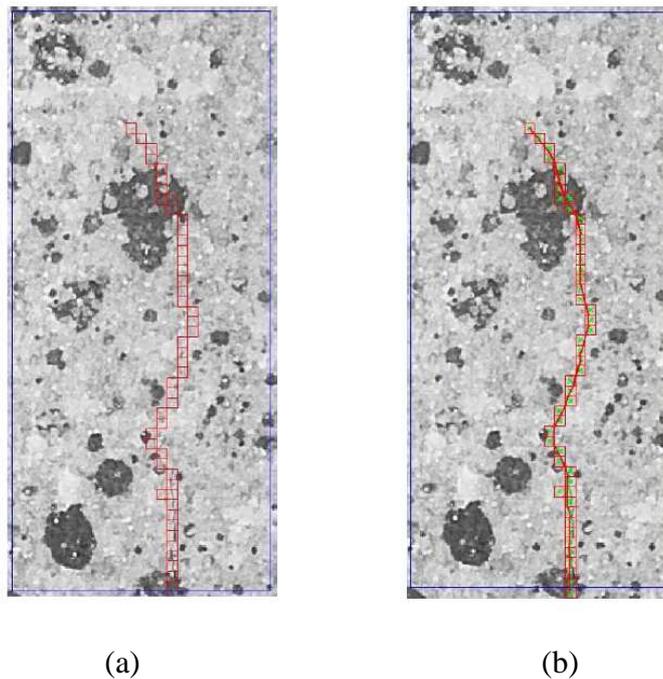


Figure 3.4. (a) Visualisation des éléments contenant de fortes probabilités de discontinuités, la taille des éléments est de  $10 \times 10$  pixels. (b) Position et géométrie des fissures détectées.

Après avoir identifié l'ensemble des éléments appartenant à une même discontinuité (Figure 3.4), le tracé des lignes de fissures est raffiné (Figure 3.4-b) en calculant la moyenne des coordonnées  $x$  et  $y$  des centres de chacun des quatre éléments successifs dans chaque ligne de fissure identifiée. Ceci est basé sur le fait que les éléments identifiés dans les lignes de fissure sont souvent groupés autour d'une fissure ; on suppose ici que la trace passe par le centre de ces groupes. Les deux éléments situés aux deux extrémités sont conservés et considérés comme les fronts de la fissure localisée. En joignant tous ces points, le tracé final de la fissure est défini sous la forme d'une ligne continue de segments droits

(Figure 3.4-b). La précision de positionnement des fissures tracées, et en particulier la position des extrémités de la fissure, dépendra de la valeur du seuil choisi,  $K_{\min}$ , des paramètres de la technique DIC et de l'incertitude dans l'analyse DIC. Il est important de noter que la procédure présentée ci-dessus ne permet d'identifier que des éléments contenant des discontinuités mais pas les points sur la fissure réelle ; la précision de l'identification dépend notamment de la taille des éléments (*i.e.*, du pas de la grille de l'analyse DIC). La diminution de cette taille semble pouvoir améliorer la position du positionnement des fissures, mais il a été montré par Haddadi et Belhabib (2008) qu'une réduction de la dimension des éléments conduit à une augmentation importante des erreurs sur la mesure des champs de déplacements. Dans notre cas, après plusieurs tentatives, la taille choisie est de  $10 \times 10$  pixels.

### 3.2.3. Quantification des sauts de déplacement

Après avoir identifié les fissures, nous cherchons à quantifier les composantes normale et tangentielle des sauts de déplacement, c'est-à-dire des déplacements relatifs des deux lèvres de la fissure. Pour chaque segment identifié le long d'une fissure, le vecteur normal local à la trace de la fissure ( $n$ ) est calculé au centre du segment. Six points situés de part et d'autre du segment suivant cette normale sont choisis avec les distances  $n_1$  et  $n_2$  (Figure 3.5). Les distances  $n_1$  et  $n_2$  sont définies pour satisfaire deux conditions: (i) les 3 points ne sont pas situés dans l'élément contenant la fissure ni dans les éléments immédiatement voisins (la corrélation n'est pas de bonne qualité dans les zones des discontinuités) et (ii) ces 3 points doivent appartenir à 2 éléments de grille différents afin de ne pas dépendre fortement de l'interpolation bilinéaire utilisée dans la technique DIC.

Les vecteurs de déplacement de ces six points sont issus des calculs DIC. Les composantes normale et tangentielle de ces six vecteurs sont extraites par projection sur les axes locaux  $\vec{n}$  et  $\vec{t}$  de la fissure. Nous proposons trois méthodes pour extraire les sauts de déplacement des points situés sur la ligne de fissure.

- Si la déformation dans la zone voisine d'une fissure est supposée nulle et que l'on néglige les rotations locales, les déplacements sont constants des deux côtés de la fissure. Nous calculerons donc la moyenne des déplacements suivant  $\vec{n}$  et  $\vec{t}$  des trois points.
- Si la déformation dans la zone autour d'une fissure est supposée constante, les déplacements sur la lèvre de part et d'autre de la fissure peuvent être calculés par l'extrapolation linéaire à partir des déplacements des trois points correspondants.
- Si nous tenons compte d'une déformation non uniforme dans la zone de la fissure, une extrapolation non-linéaire est utilisée pour identifier les composantes du champ de déplacement suivant  $\vec{n}$  et  $\vec{t}$ .

Les sauts de déplacement sont enfin déterminés en calculant la différence des composantes à travers la fissure.

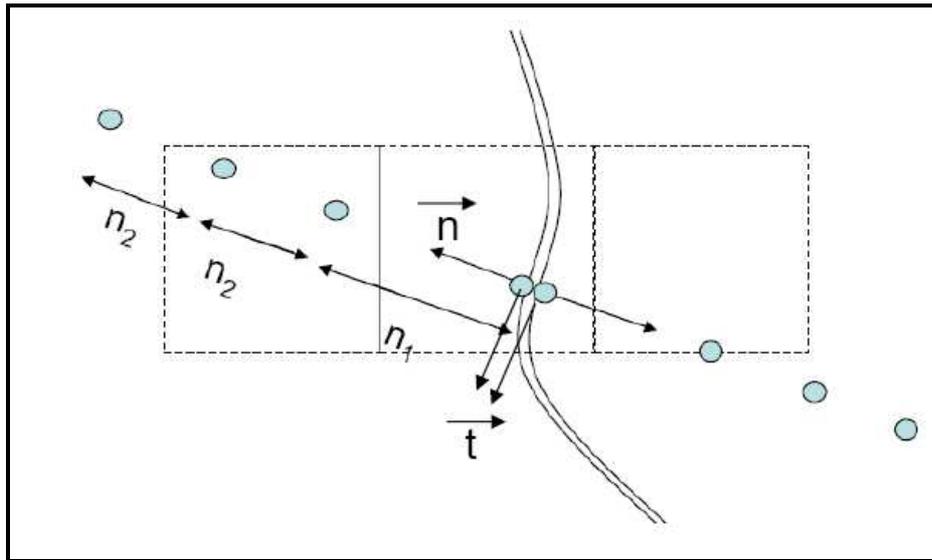


Figure 3.5. Quantification des sauts de déplacements le long de la fissure. 3 points choisis de part et d'autre de la fissure.

La Figure 3.6 présente les cartes des composantes normale et tangentielle à travers une fissure (fissure dans l'exemple présentée dans la Figure 3.4-b) obtenues par les trois méthodes de calcul décrites ci-dessus. Dans cet exemple,  $n_1$  et  $n_2$  sont respectivement de 20 et 10 pixels et l'extrapolation non-linéaire utilisée est parabolique. Une comparaison directe de ces résultats est montrée pour différents points (Figure 3.7). Nous observons que la mesure utilisant le calcul de moyenne de déplacements de trois points donne un résultat beaucoup moins bruité que l'utilisation des interpolations linéaire ou parabolique, notamment dans le calcul des composantes normales (Figure 3.7-a). A titre d'exemple, les calculs par les différentes méthodes des composantes normales des sauts de déplacement pour trois segments choisis sur la fissure (les centres de ces segments sont indiqués dans la Figure 3.7), sont présentés dans la Figure 3.8. Pour chacun de ces segments, les déplacements normaux calculés de 6 points correspondant aux deux côtés de la fissure, (3 à gauche et 3 à droite) sont présentés dans la Figure 3.8. Lorsque les déplacements des trois points correspondants situés dans un côté du segment sont identiques (cas du segment 2), les sauts de déplacement calculés par les trois méthodes sont bien évidemment comparables. Au contraire, lorsque la différence des déplacements mesurés pour ces trois points est importante, ce qui est sans doute liée à une forte déformation en zone de fissure ou à l'incertitude de mesure de déplacement de la technique DIC, l'écart des résultats obtenus par les trois méthodes devient plus important. Considérons le segment 3, la différence de déplacement des trois points correspondants est de l'ordre de 0.1 pixel, ce qui mène à un écart de 1 pixel entre la moyenne de déplacement et le résultat obtenu par l'interpolation parabolique. Toutefois, il n'est pas possible à ce stade de conclure, n'ayant pas de référence connue sur la forme théorique de ces composantes.

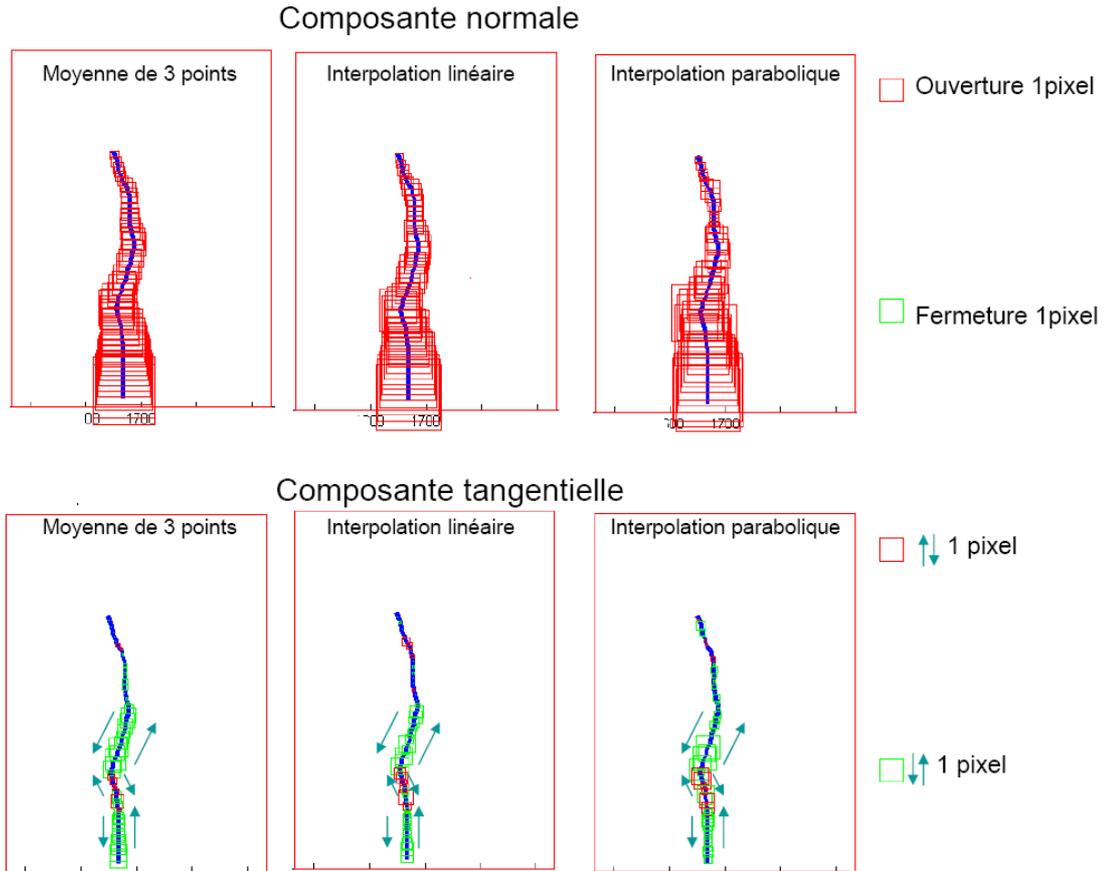


Figure 3.6. Composantes normales et tangentielles de sauts de déplacement suivant une fissure (fissure détectée dans la Figure 3.4b) calculées par trois méthodes : moyenne de trois points, interpolation linéaire et interpolation parabolique.

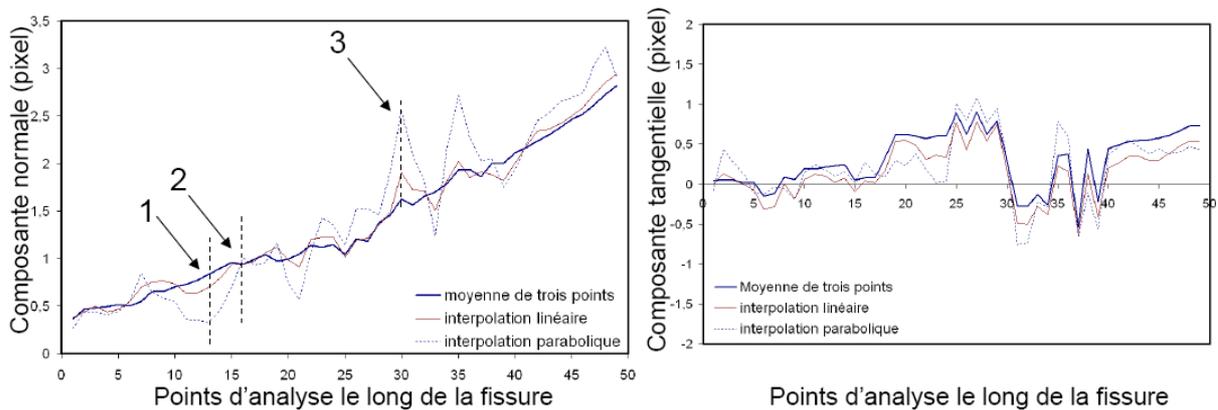


Figure 3.7. Comparaison des composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long de la fissure détectée dans la Figure 3.4b, calculées par trois méthodes : moyenne de trois points, interpolation linéaire et interpolation parabolique.

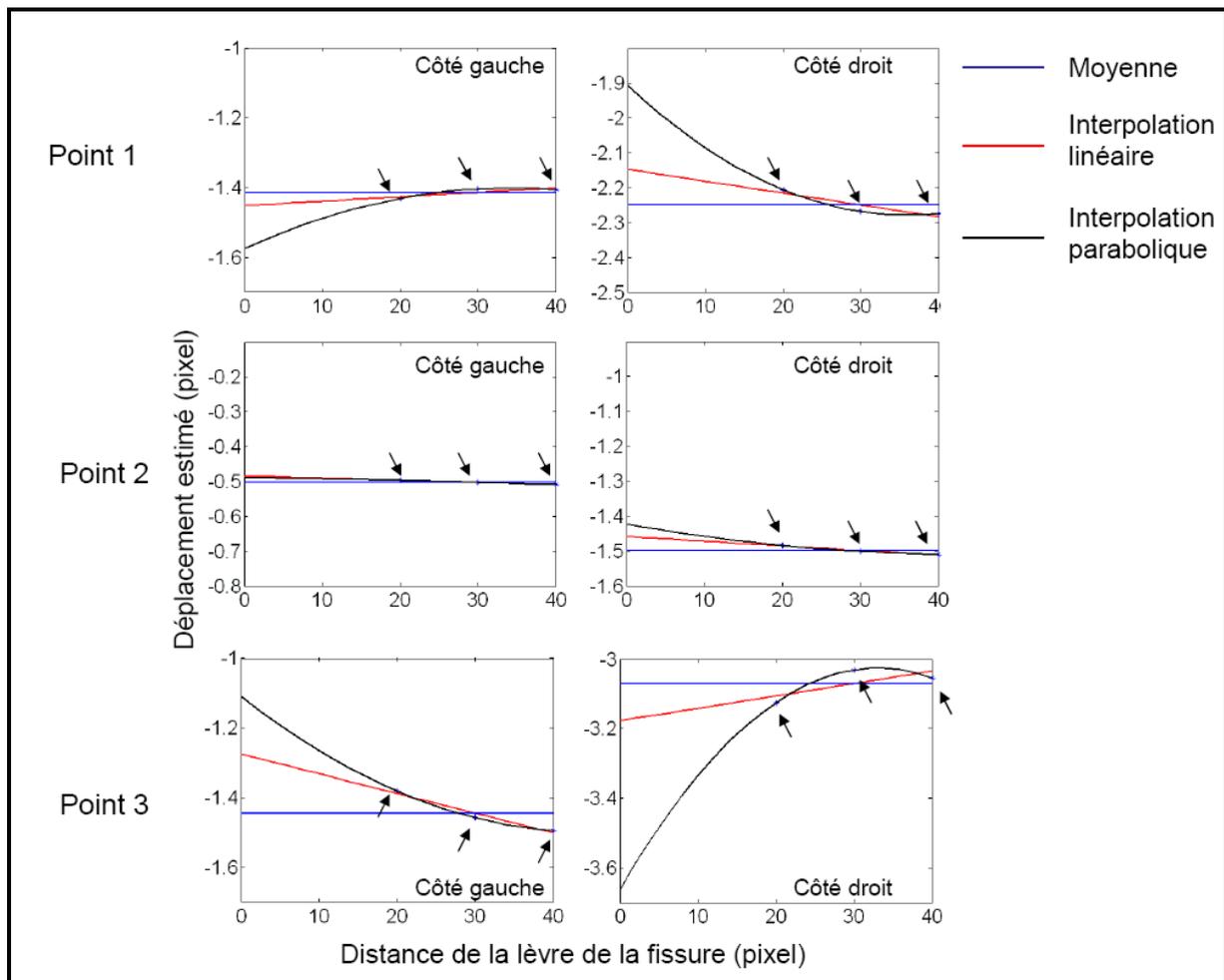


Figure 3.8. Calcul des sauts de déplacements des trois points 1,2 et 3 (indiqués dans la Figure 3.7) par trois méthodes. L'axe horizontal représente la distance entre les trois points et la lèvres de la fissure. Les flèches indiquent les trois points dont les déplacements sont utilisés pour estimer les déplacements des points situés sur la fissure.

### 3.3. Incertitude sur la quantification des sauts de déplacement

Les principales sources d'incertitude sur la quantification des sauts de déplacements concernent la qualité de la mesure des déplacements par technique DIC en zone de fissure, la précision des positions des segments d'une fissure identifiée et l'influence de la méthode de calcul des sauts de déplacements décrite en section 3.2.3 (moyenne des trois points, interpolation linéaire ou interpolation parabolique). Pour estimer l'incertitude de mesure par la technique DIC-F des sauts de déplacement des fissures, nous avons réalisé un essai en utilisant deux « mires » (deux feuilles mouchetées supposées indéformables et glissées entre deux plaques de verre) présentées dans la Figure 3.9. La taille des pixels sur les photos est de  $16.52 \mu\text{m}$ . La feuille du bas (n°2) est fixe et nous sert de référence. La feuille du haut (n°1) est découpée de manière à faire apparaître des lignes verticales et horizontales, des lignes inclinées et un tronçon courbe. Nous imposons sur la machine de traction un déplacement vertical de  $23.5 \mu\text{m}$  à la feuille n°1. Dans cet essai, la trace des discontinuités est détectable à l'œil, ce qui permet de la comparer avec celle détectée automatiquement par la technique DIC-F.

La Figure 3.10 présente les déplacements horizontaux et verticaux issus de l'analyse DIC (« pas » de la grille : 10 pixels ; taille du motif : 16 pixels). Les bruits dans la mesure du déplacement suivant x et y sont de l'ordre de +/- 0.05 pixel. Les déplacements relatifs suivant x et y de ces deux feuilles sont calculés en soustrayant les moyennes des déplacements mesurés respectivement sur la feuille 1 et sur la feuille 2 :  $dx = 0.13$  pixel (soit  $2.1 \mu\text{m}$ ) et  $dy = 1.42$  pixel (soit  $23.5 \mu\text{m}$ ). Le déplacement vertical moyen correspond au déplacement imposé.

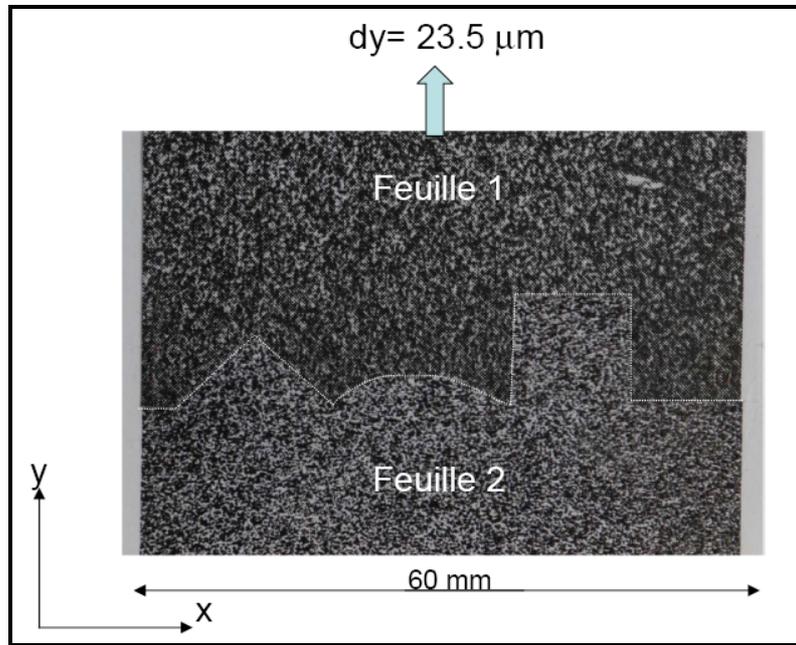


Figure 3.9. Description de l'essai.

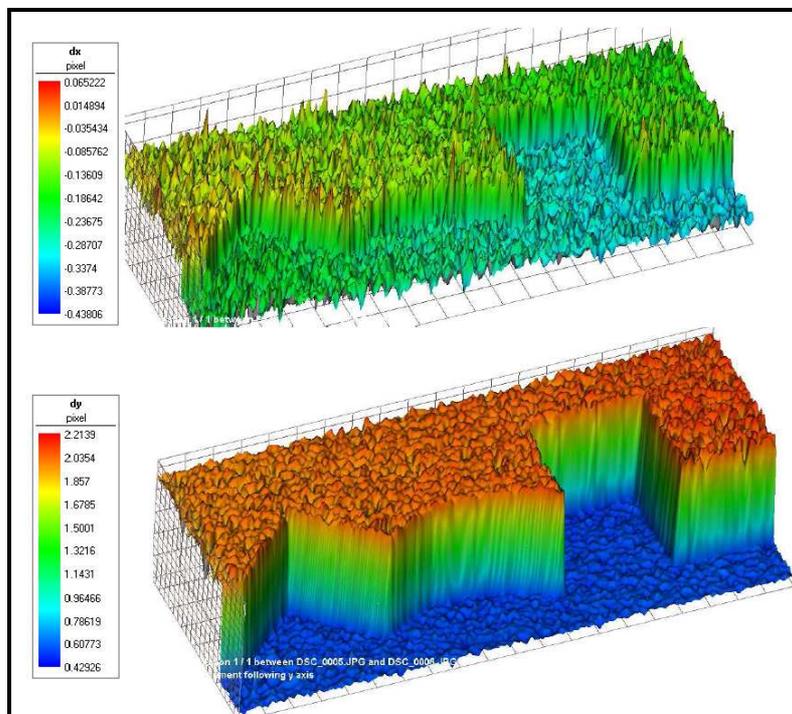


Figure 3.10. Déplacements horizontaux (suivant x) en haut et verticaux (suivant y) en bas issus de l'analyse DIC.

### 3.3.1. Choix des méthodes de calcul des sauts de déplacement

Pour examiner l'influence de choix de la méthode de calcul des sauts de déplacement, nous avons dans un premier temps identifié les discontinuités  $C_1$  à  $C_7$  manuellement sur l'image (Figure 3.11). Ces lignes sont identifiées à  $\pm 1$  pixel et sont considérées comme nos références dans cette étude.

Rappelons que les champs de déplacements mesurés par DIC présentent un bruit de mesure (noté  $\text{bruit}_{\text{DIC}}$ ) de l'ordre de  $\pm 0.05$  pixel (suivant  $x$  et  $y$ ) mais que ce  $\text{bruit}_{\text{DIC}}$  ne correspond a priori pas au bruit de calcul des sauts de déplacement au niveau de fissures.

Afin de mieux caractériser l'influence de ce  $\text{bruit}_{\text{DIC}}$  sur l'identification automatisée des fissures, nous avons ajouté un bruit blanc de 0.5 pixel aux champs de déplacements horizontaux et verticaux de tous les points de l'analyse (noté  $\text{br}_{0,5}$ ).

Les sauts de déplacements au niveau des discontinuités sont calculés en utilisant les méthodes présentées dans la section 0 pour les deux cas (pas de bruit supplémentaire ( $\text{br}_0$ ) et avec un bruit supplémentaire de 0.5 pixel ( $\text{br}_{0,5}$ )). Les composantes normale et tangentielle des sauts de déplacement obtenues sont présentées dans la Figure 3.12.

- Moyenne de déplacements : Nous constatons que le résultat obtenu par la méthode « de moyenne de déplacement » est le moins bruité. Les bruits sur l'identification des composantes de sauts de déplacement dans ce calcul sont de  $\pm 0.1$  pixel lorsqu'aucun bruit n'est ajouté (pas de bruit supplémentaire ( $\text{br}_0$ )). On remarque qu'elles sont du même ordre de grandeur que les incertitudes de déplacements issues de la corrélation d'image. Ce bruit est de  $\pm 0.3$  pixels lorsqu'un bruit blanc de 0.5 ( $\text{br}_{0,5}$ ) pixel est ajouté sur les mesures DIC.
- Interpolation linéaire : Le calcul utilisant l'interpolation linéaire conduit à des incertitudes plus élevées et estimées à  $\pm 0.3$  pixel pour  $\text{br}_0$  et  $\pm 0.7$  pixel pour  $\text{br}_{0,5}$ .
- Interpolation parabolique : L'utilisation de l'interpolation parabolique conduit à des bruits très importants de 1.5 pixel pour  $\text{br}_0$  et jusqu'à 3 pixel pour  $\text{br}_{0,5}$ .

La méthode utilisant le calcul de « moyenne de déplacement » de trois points est basée sur une hypothèse forte de déformation nulle autour d'une fissure, ce qui est le cas dans cette analyse de déplacements de corps solides. Le résultat issu de cette méthode est beaucoup moins sensible au bruit que ceux obtenus lors de l'utilisation des interpolations linéaires ou paraboliques. Les extrapolations ne sont donc conseillées que si la mesure de déplacement est de très bonne qualité (cas jamais satisfait dans les zones des discontinuités) ou si la fissure est associée à des déformations importantes sur une zone éloignée de 30 à 40 pixels de la ligne de fissure. Pour ces raisons, nous avons choisi la méthode calcul de « moyenne de déplacement » dans toutes les analyses présentées dans le chapitre 4 de cette thèse.

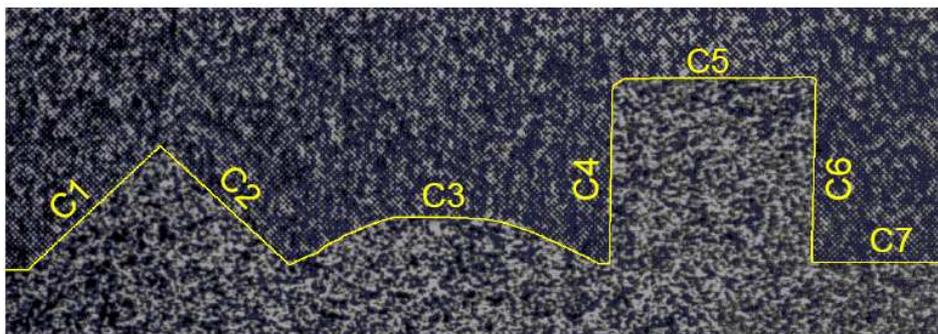


Figure 3.11. Les discontinuités identifiées manuellement sur l'image.

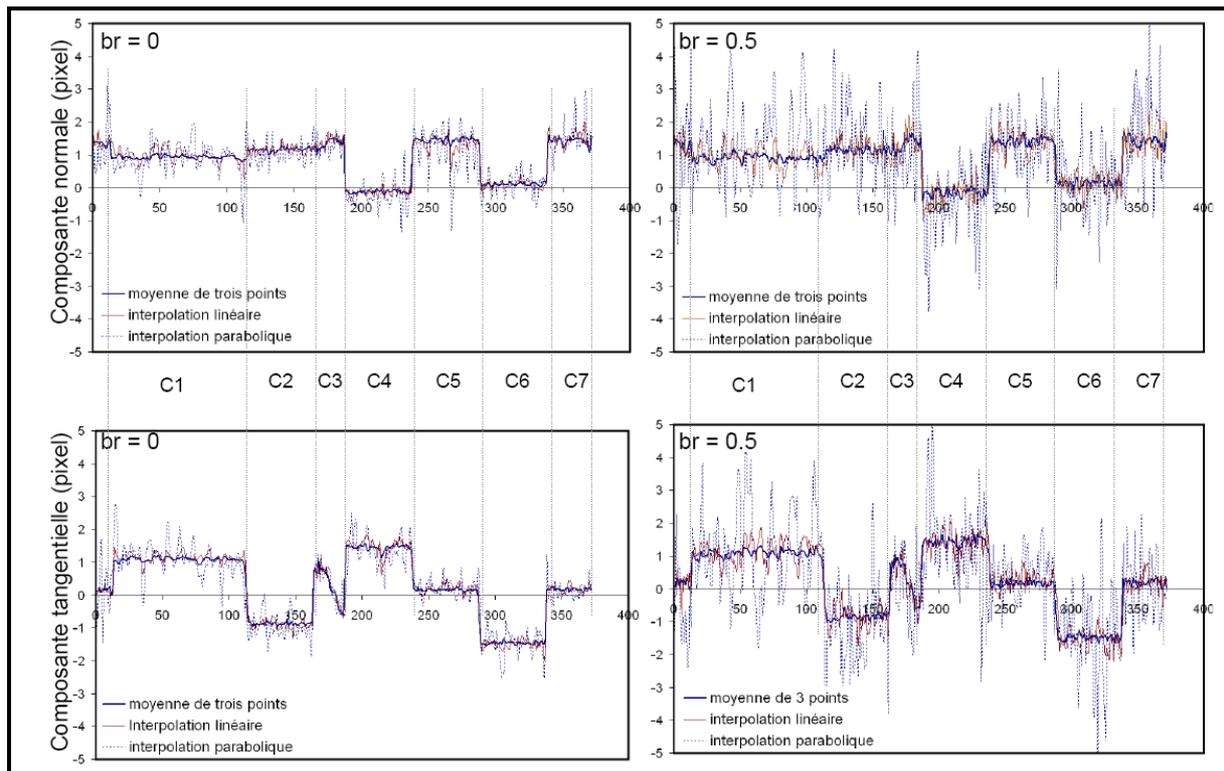


Figure 3.12. Sauts de déplacement à travers les discontinuités  $C_1$  à  $C_7$  calculés par trois méthodes (moyenne de trois points, interpolation linéaire, interpolation parabolique) dans le cas  $br_0$  (figure gauche) et  $br_{0,5}$  (figure droite). Les figures supérieures correspondent aux composantes normales et les figures inférieures aux composantes tangentielles.

### 3.3.2. Incertitude sur le tracé des fissures

L'incertitude sur la position et l'orientation locale des segments identifiés d'une fissure est évidemment un facteur très important dans la quantification des sauts de déplacement le long des fissures. Dans la Figure 3.13, les lignes rouges représentent les discontinuités identifiées automatiquement par la méthode DIC-F (appelé trajectoire numérique) et celles en jaune sont les discontinuités identifiées manuellement sur l'image (appelé trajectoire « manuelle »). Nous observons dans les trois zooms que les trajectoires numériques sont identifiées avec un écart de l'ordre de  $\pm 2$  pixels par rapport à la trajectoire manuelle, excepté en quelques points particuliers indiqués par les flèches dans l'image 3 de la Figure 3.13. Un zoom dans cette zone est présenté dans la Figure 3.14 qui indique les erreurs de l'identification des éléments contenant la discontinuité. Ces erreurs sont liées particulièrement à la perturbation de mesure de déplacement en zone de forte discontinuité.

Les sauts de déplacement sont alors calculés pour ces deux trajectoires (numérique et manuelle) par le calcul de moyenne de trois points (Figure 3.15). La Figure 3.16 présente la comparaison entre les sauts de déplacements mesurés pour les trajectoires « numérique » et « manuelle » de la discontinuité  $C_5$ . La valeur théorique du saut de déplacement calculée à partir des déplacements relatifs des feuilles a également été superposée (dans cet exemple, la discontinuité  $C_5$  est horizontale, les composantes normale et tangentielle du saut de déplacement à travers cette ligne correspondent respectivement aux déplacements verticaux et horizontaux relatif des feuilles). Nous constatons que les sauts horizontaux et verticaux sont identifiés avec une incertitude d'environ  $\pm 0,2$  pixel, sauf pour quelques points correspondant à une mauvaise estimation de l'orientation locale de la discontinuité. Dans ce cas, L'amplitude des erreurs peut être de  $\pm 0,5$  pixels (points indiqués par les flèches sur la ligne  $C_5$  dans la Figure 3.13).

Les résultats pour les discontinuités C4 à C7 sont résumés dans le Tableau 3.1.

N° de discontinuité	Trajectoire « numérique »		Trajectoire « manuelle »		Valeur théorique	
	Tangentielle (pixel/ $\mu\text{m}$ )	Normale (pixel/ $\mu\text{m}$ )	Tangentielle (pixel/ $\mu\text{m}$ )	Normale (pixel/ $\mu\text{m}$ )	Tangentielle (pixel/ $\mu\text{m}$ )	Normale (pixel/ $\mu\text{m}$ )
C4	1,45/24	-0,11/-1.7	1,45/24	-0,13/-2.1	1.42/23.5	-0.13/-2.1
C5	0,148/2.4	1,47/24.3	0,17/2.8	1,45/23.9	0.13/2.1	1.42/23.5
C6	-1,47/24.3	0,15/2.4	-1,47/-24.2	0,11/1.8	-1.42/-23.5	0.13/2.1
C7	0,17/2.8	1,45/23.9	0,18/2.9	1,43/23.6	0.13/2.1	1.42/23.5

Tableau 3.1. Composantes des sauts de déplacement le long des discontinuités identifiées automatiquement (trajectoire numérique), trajectoire identifiée manuellement (trajectoire manuelle) et valeurs théoriques estimées directement à partir des déplacements relatifs des feuilles.

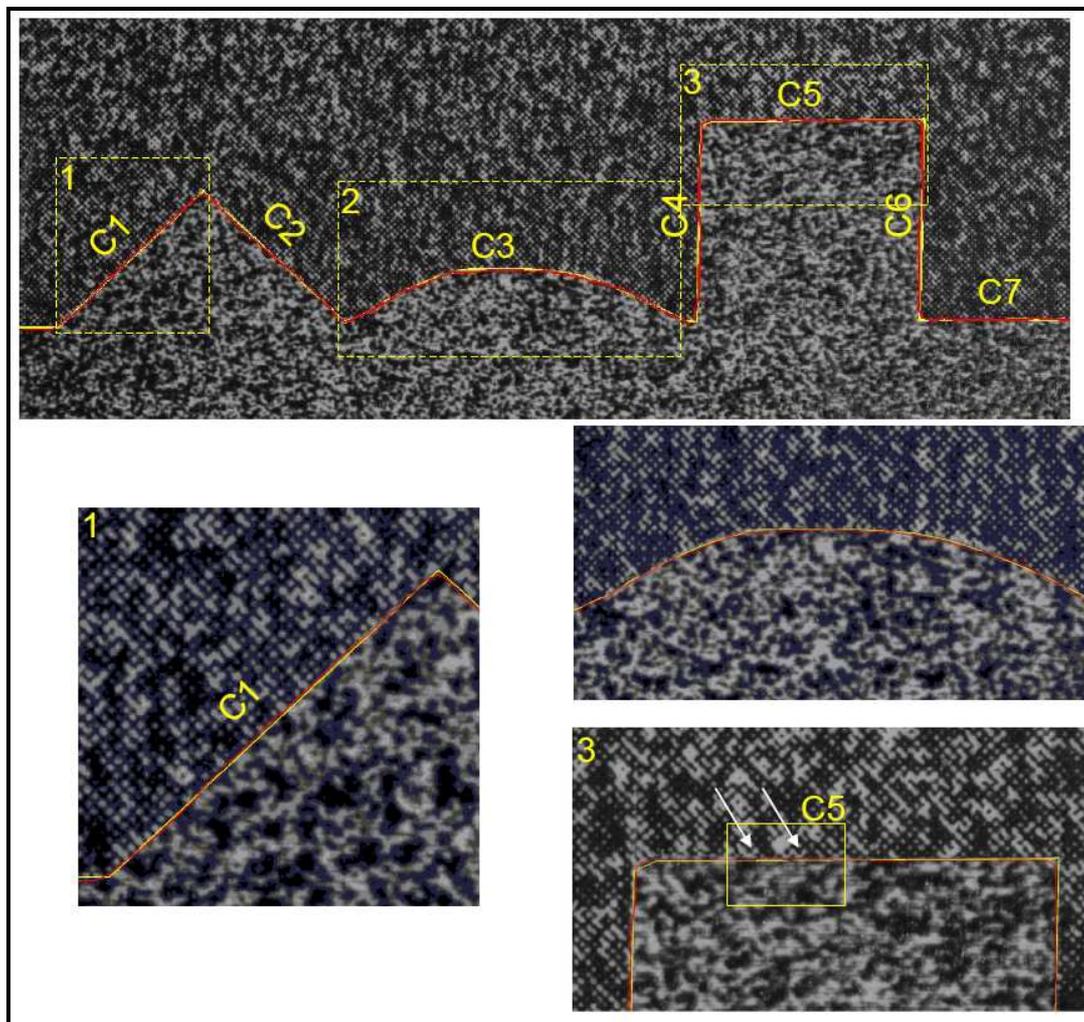


Figure 3.13. Visualisation des lignes de discontinuités: les lignes rouges sont les discontinuités identifiées automatiquement par la méthode DIC-F, les lignes jaunes sont celles identifiées manuellement sur l'image.

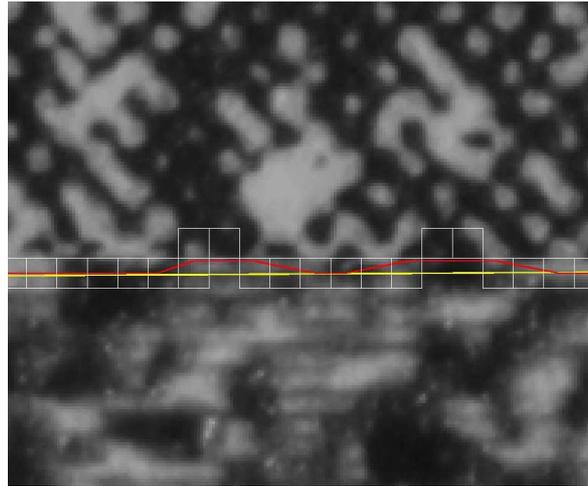


Figure 3.14. Erreur sur l'orientation locale de la discontinuité  $C_5$ . Cette figure correspond à la zone indiquée dans l'image 3 de la Figure 3.13. Les carrés blancs sont les éléments de la grille de l'analyse contenant la discontinuité qui sont identifiés par la DIC-F.

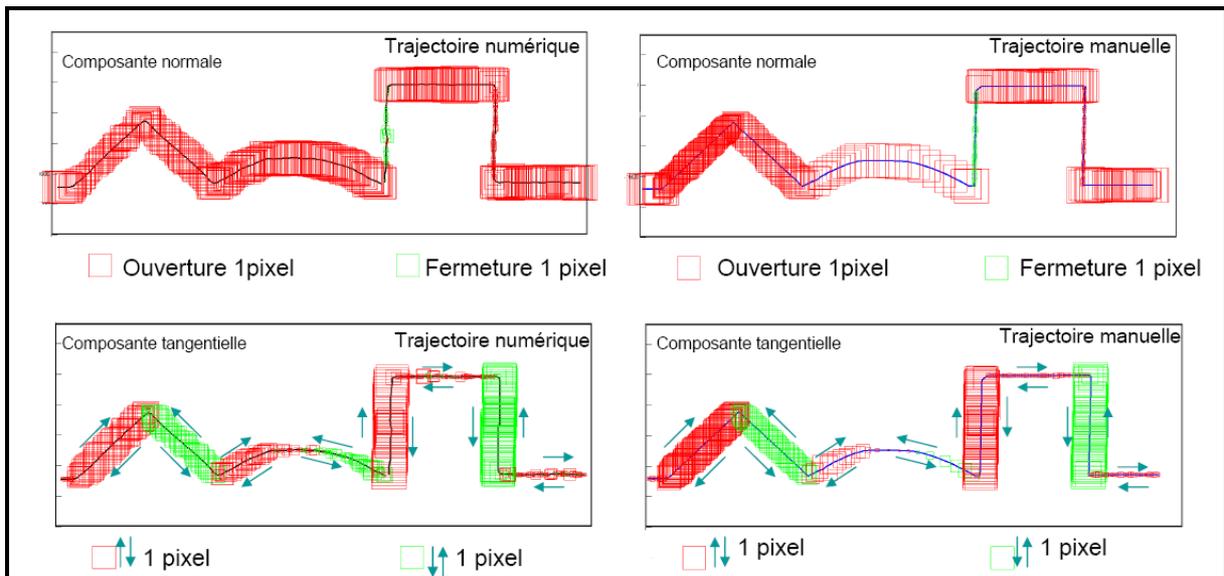


Figure 3.15. Visualisation des composantes des sauts de déplacement normaux et tangentiels identifiés le long des discontinuités (identification automatisée à gauche et manuelle à droite). Les couleurs des composantes normales indiquent l'ouverture (en rouge) et la fermeture (en vert). Pour les composantes tangentielles, les couleurs indiquent les sens de glissement relatif de deux côtés d'une discontinuité.

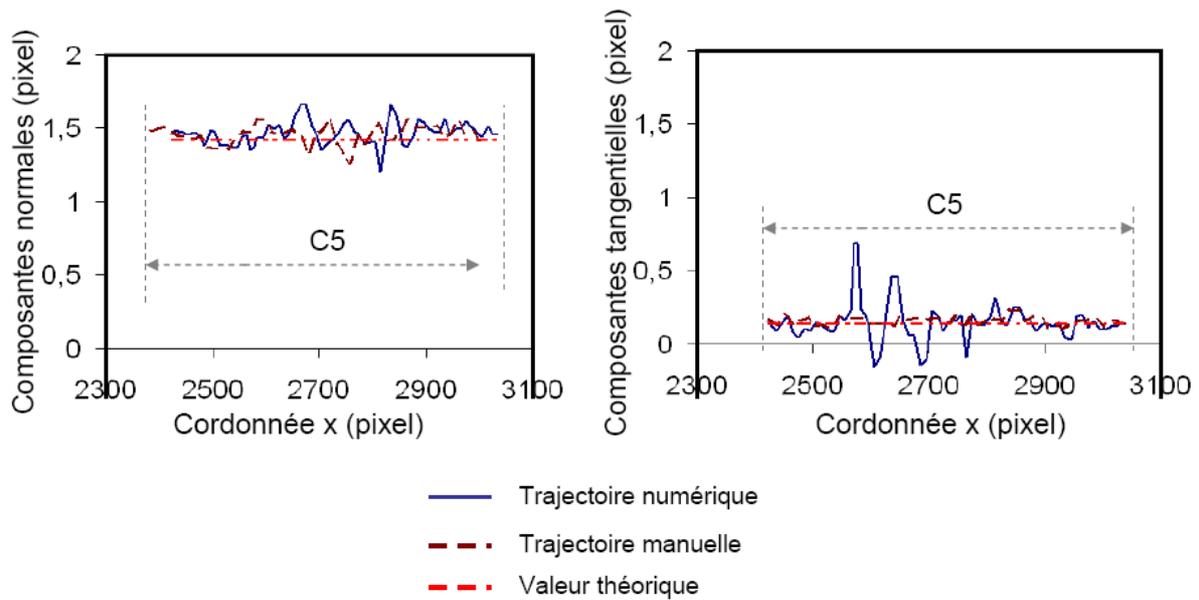


Figure 3.16. Composantes des sauts de déplacement le long des discontinuités C5 mesurées avec la trajectoire identifiée automatiquement (trajectoire « manuelle »), identifiée manuellement (trajectoire manuelle) et valeur théorique.

### 3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle technique « *Digital Images Correlation for Fracture- DIC-F* », qui permet d’automatiser l’identification des discontinuités de déplacement (fissure) et de quantifier les sauts de déplacement correspondant à ces fissures. Cette technique, qui correspond à un post-traitement de la méthode DIC, implique une première étape de recherche automatique et du tracé des lignes de discontinuités de déplacement. Dans une deuxième étape, les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement à travers ces lignes sont quantifiées à partir des champs de déplacements issus de l’analyse de DIC.

En analysant un exemple de fissure réelle et un exemple de discontinuité issue d’un déplacement de corps solides, les principales sources d’incertitude ont été identifiées : l’incertitude de la mesure DIC, ainsi que les incertitudes des positions des segments identifiés et extrapolation des déplacements.

Nous estimons dans un premier temps les incertitudes des positions des segments d’une fissure identifiés. Ces incertitudes sont largement déterminées par la taille des éléments utilisés dans l’analyse de la technique DIC mais également par la qualité de la mesure de déplacements en zones de fissure. Ce dernier point est difficile à évaluer en raison du fort endommagement du matériau en cette zone. Les incertitudes sur les positions des segments sont d’environ  $\pm 2$  pixels pour nos analyses.

L’incertitude du calcul des sauts de déplacement nécessite la prise en compte de la méthode d’extrapolation choisie pour le calcul. La méthode de calcul de moyenne des déplacements des trois points est conseillée parce que les résultats obtenus, pour le cas réel et l’exemple de discontinuité issu d’un déplacement de corps solides, sont moins bruités à cause d’une sensibilité réduite aux bruits dans les mesures par DIC. L’incertitude de la mesure des sauts de déplacement est estimée à  $\pm 0.2$  pixel pour les segments bien identifiés, mais elle peut augmenter fortement pour les points particulièrement mal identifiés.

# Chapitre 4 : MATERIAUX ETUDIÉS ET MACHINES D'ESSAI

4.1. Introduction	84
4.2. Matériaux étudiés	84
4.2.1. Tuf à grains fins de Naples	84
4.2.2. CPIR09	86
4.2.3. Comparaison des deux matériaux	88
4.3. Machines de compression	88
4.3.1. Machine de traction/compression Instron	88
4.3.2. Appareil de compression en déformation plane	89
4.3.3. Appareil de compression servo-contrôlé (Material Test Systems - MTS)	90
4.4. Technique de mesure de la déformation globale d'un échantillon	90
4.5. Conclusion	93

## 4.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériaux étudiés et les machines de compression utilisées dans notre étude expérimentale. Nous avons choisi deux matériaux qui ont la résistance à la rupture correspondant à la gamme des roches tendres: une roche volcanique de Naples (Tuf à grains fins) et (ii) un matériau artificiel à base d'argile (CPIR09). Les modes de rupture de ces roches lors des essais de compression sont assez différents de l'un à l'autre.

Les machines de compression utilisées dans cette étude sont : la machine de traction/compression Instron (au laboratoire SYMME), la machine de compression en déformation plane (au laboratoire 3SR) et la machine *Material Test Systems-* (MTS) à GeoForschungsZentrum de Potsdam (GFZ Potsdam).

## 4.2. Matériaux étudiés

### 4.2.1. Tuf à grains fins de Naples

Le Tuf à grains fins (Fine Grained Tuff - FGT) est une roche pyroclastique, âgée d'environ 15000 ans, qui est issue de dépôt et de diagenèse de produits chauds pyroclastiques éclatés de la zone de Phlegrean. Ce matériau a été étudié par Evangelista et Aversa (1994) ; Aversa et *al.*, (1998) et de Sanctis (2005). Ses principales propriétés physiques et mécaniques sont, d'après Aversa et *al.*, (1998) : une porosité comprise entre 0.45 et 0.5, ce qui est typique des roches pyroclastiques ; une masse volumique absolue de 2430 kg/m<sup>3</sup>. Le rayon des pores est inférieur à 0.1 µm pour près de 25% du volume des pores et il varie de 0.1 µm à 1 µm pour 50%. Les inclusions sont disposées au hasard et leurs tailles sont généralement inférieures à 1 mm, bien que des fragments de pierre ponce de Tuf et des fragments de pierre de quelques centimètres puisse également être rencontrés. La résistance à la rupture en compression uniaxiale de ce Tuf a été mesurée autour de 11 MPa, ce qui le place dans la gamme de la catégorie des roches tendres (1.2-25 MPa) [Associazione Geotecnica Italiana, 1977]. Le module tangentiel lors des essais de compression uniaxiale est d'environ 2.1 GPa [de Sanctis 2005]. Ce type de géomatériaux présente un comportement intermédiaire entre celui des « sols » et des « roches ».

La Figure 4.1 montre les structures internes obtenues par la tomographie RX de deux échantillons de Tuf. Les images tomographiques de l'échantillon sans fissure visible et de l'échantillon pré-fissuré sont présentées dans les Figure 4.1(a) et (b). La résolution spatiale (taille du voxel) dans les scans est de 125 µm. A cette résolution, la plupart des défauts tels que les fissures préexistantes et les inclusions de différentes densités sont détectables (les pierres ponce, moins dense que la matrice de Tuf apparaissent plus sombre dans les images tomographiques alors que les fragments de pierre plus dense que la matrice de Tuf apparaissent plus clair dans les images tomographiques). Notons qu'au cours de la préparation des échantillons, nous n'avons sélectionné que les échantillons sans fissures visibles.

Le mécanisme de rupture de ce Tuf est piloté principalement par l'hétérogénéité (*e.g.*, pores, microfissures, inclusions) du matériau. Comme montré dans la Figure 4.1, le Tuf est une roche poreuse, ayant une structure particulière, constitué de composants granulaires parfois très rigides, des pierres ponce de taille pouvant atteindre quelques centimètres, et éventuellement des fissures préexistantes. [De Sanctis, 2005] a montré que dans un essai de compression, toutes ces hétérogénéités jouent le rôle de concentration de contrainte et deviennent les sources de formation de microfissure. Lors de l'augmentation de la charge de compression, des microfissures se forment et se propagent dans la direction de la charge. A partir d'une certaine densité, les microfissures commencent à interagir, coalescent, puis conduisent à une rupture axiale macroscopique appelée « axial splitting ». Bien que

les trajectoires de ces fissures soient dépendantes de la présence des hétérogénéités dans l'échantillon, la direction principale de la rupture est généralement parallèle à la direction de la charge. La Figure 4.2 présente un exemple typique de rupture axiale sur un échantillon de tuf soumis à une compression en déformation plane.

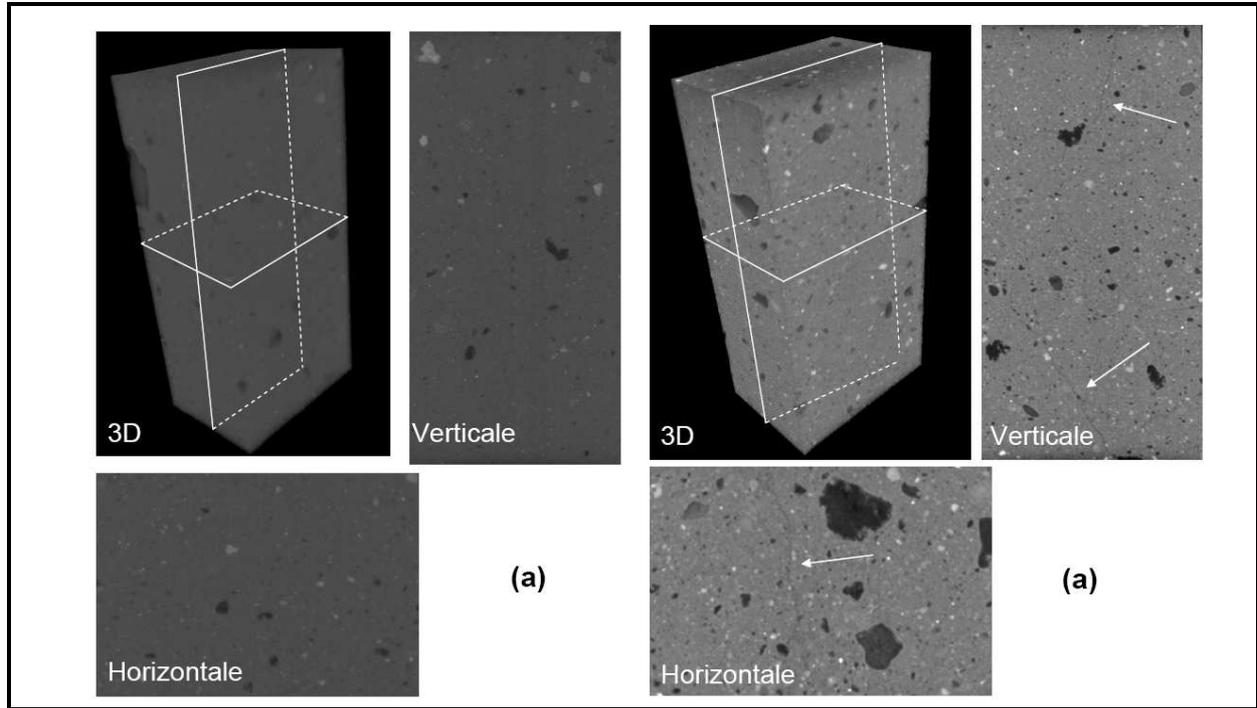


Figure 4.1. Visualisations de deux échantillons de Tuf par Tomographie RX avec visualisation en 3D et deux coupes, verticale et horizontale. (a) échantillon sans fissure visible et, (b) échantillon présentant des fissures visibles préexistantes indiquées par les flèches. La résolution spatiale est de 0.125 mm.

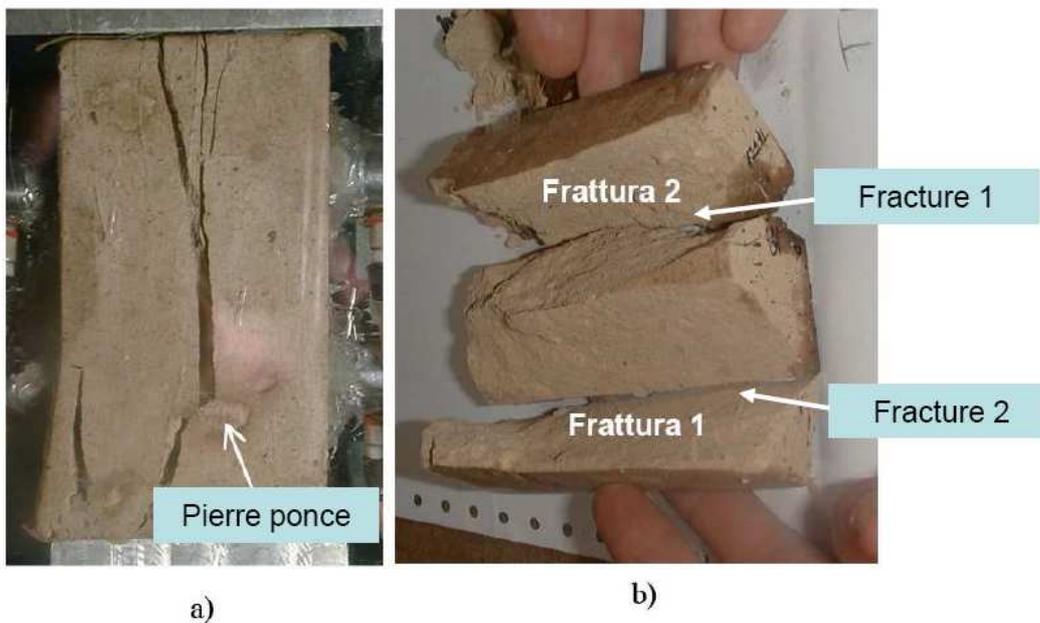


Figure 4.2. Rupture axiale de Tuf après chargement de compression [De Sanctis, 2005].

## 4.2.2. CPIR09

Le CPIR 09 est un matériau artificiel très poreux à base d'argile. L'argile est mélangée avec de l'eau, certaines colles organiques et des cendres volantes. Le mélange est ensuite pressé et cuit à plus de 1300°C. Les composants chimiques de ce matériau sont présentés dans le Tableau 4.1. Ses principales propriétés physiques et mécaniques ont été identifiées par [Hosseini, 2005]: une porosité comprise entre 0.45 et 0.5; une masse volumique absolue de 1650 kg/m<sup>3</sup>.

La structure interne du CPIR 09 a été visualisée par tomographie RX. A titre d'exemple, la Figure 4.3 montre une image tomographique d'une coupes horizontale d'un échantillon cylindrique (la taille de voxel est égale à 7 µm). Dans ce matériau, aucune fissure n'est visible. Pourtant, des pores de diamètre compris entre 0.1 et 0.4 mm représentées par les cercles noirs dans les images tomographiques peuvent être aperçus.

Analyse chimique	Valeur (%)
SiO <sub>2</sub>	56.8
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34
TiO <sub>2</sub>	1.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2
CaO	0.8
MgO	0.7
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Ka <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3

Tableau 4.1. Composants chimiques du CPIR 09 [d'après Hosseini, 2005].

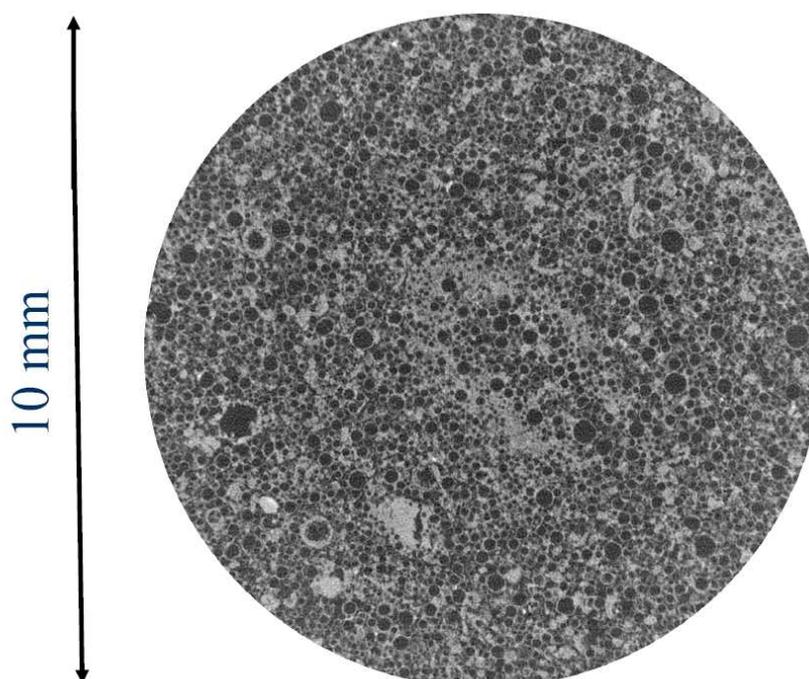


Figure 4.3. Coupe horizontale d'un échantillon cylindrique (diamètre 20 mm et hauteur 50 mm) de CPIR 09 par Tomographie RX avec une taille de voxels de 7µm

Les caractéristiques mécaniques principales du CPIR09 sont : une résistance à la rupture en compression uniaxiale de 18 MPa et un module tangentiel de 8 GPa. La Figure 4.4 présente la courbe de contrainte axiale en fonction de déformation axiale mesurée par la technique DIC d'un essai de compression uniaxiale sur un échantillon parallélépipédique (35x50x100 mm) de CPIR 09. La courbe présente quelques chutes de contrainte qui correspondent aux ruptures fragiles. Quatre photos 1, 2, 3 et 4 présentées dans la Figure 4.5 ont été enregistrées respectivement avant le chargement, après les chutes de contrainte et à la fin de l'essai. La première rupture observée dans la photo 2 lors de la première chute de contrainte correspond à un mode de compaction (bande de compaction). Dans la photo 3, une nouvelle bande de compaction est créée. Les fissures de mode I (ouverture) s'apparaissent dans la photo 4 en fin d'essai.

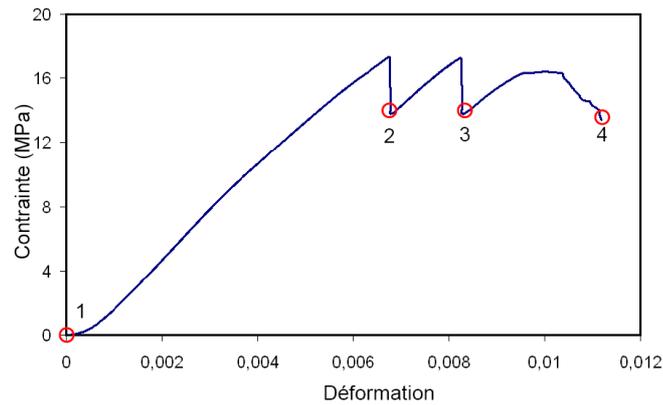


Figure 4.4. Réponse mécanique du CPIR09 en compression uniaxiale.

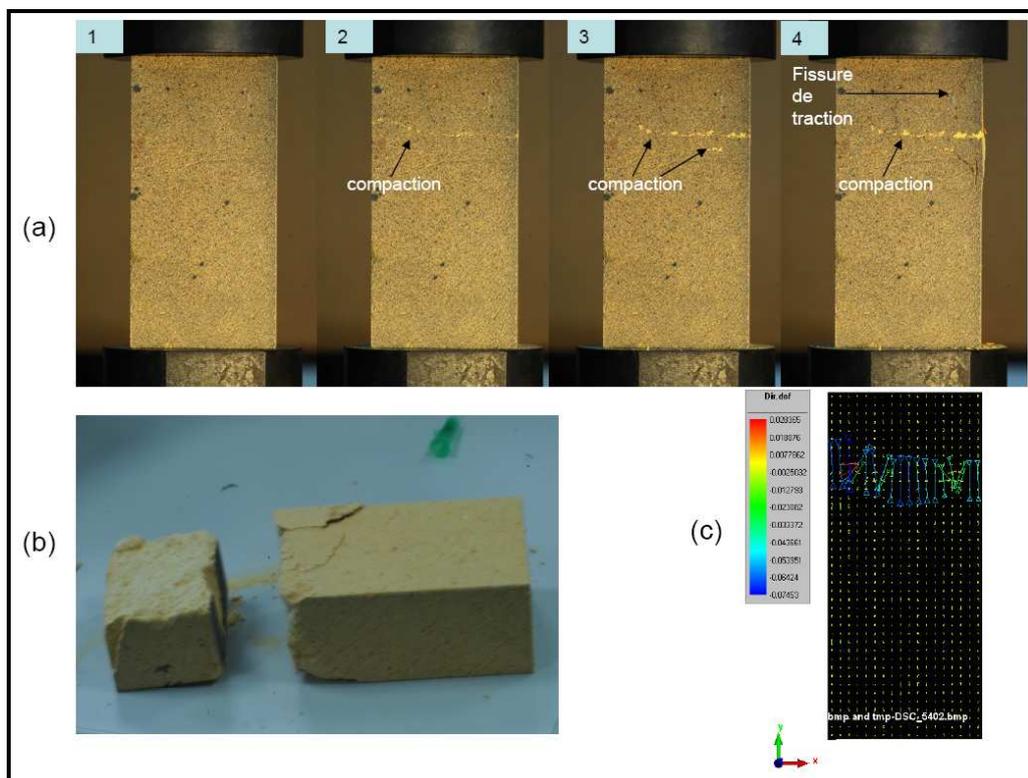


Figure 4.5. (a) Quatre photos (indiquées dans la Figure 4.4) acquises lors du chargement ; (b) rupture de l'échantillon après le chargement ; (c) les déformations principales issues de l'analyse des photos 1 et 2 - lors de la première chute de contrainte, montrent de la compaction.

### 4.2.3. Comparaison des deux matériaux

La comparaison des deux matériaux est présentée dans le Tableau 4.2. La roche artificielle CPIR09 a été originalement choisie pour être proche du comportement du Tuf grâce à des porosités et des résistances à la rupture en compression uniaxiale relativement similaires. De plus, en termes d'hétérogénéité, le CPIR09 ne présente pas d'inclusions ou de fissure préexistante mais des pores de taille importante. Malgré ces ressemblances, lors des essais de compression, le CPIR09 présente un comportement très différent par rapport à celui de Tuf. Le module tangentiel de CPIR09 mesuré est quatre fois plus élevé et le mode principal de rupture dans CPIR09 est un mode de compaction qui est lié généralement à l'écrasement des grains. Le CPIR09 est donc intéressant pour l'étude de différents phénomènes de la rupture dans les roches.

Matériau	Tuf	CPIR09
Porosité	0.4 – 0.5	0.4 – 0.5
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2430	1650
Résistance à la rupture en compression uniaxiale (MPa)	11	18.6
Module tangentiel E (GPa)	2.1	8
Hétérogénéité	Pierre ponce, fragment de pierre, souvent pré-fissuré	Plus homogène, taille des pores importante, non pré-fissuré
Mode de rupture	Rupture axiale de mode I	Rupture horizontale (compaction)

Tableau 4.2. Récapitulatif des matériaux étudiés

## 4.3. Machines de compression

Dans cette section, nous présentons les trois machines de compression utilisées dans nos essais : la machine de traction/compression Instron, l'appareil de compression en déformation plane et la machine de compression servo-contrôlé (Material Test Systems -MTS).

### 4.3.1. Machine de traction/compression Instron

La machine de traction Instron 5569 est une machine d'essai électromécanique de charge maxi 50 kN. Elle est utilisée pour tester une large gamme de matériaux en traction ou en compression en déplaçant le mors supérieur dans une direction ascendante ou descendante par l'intermédiaire de système de vis à billes piloté par logiciel BlueHill. La charge appliquée est mesurée par un capteur de force monté entre l'échantillon et la traverse supérieure. Deux capteurs de force différents (de capacités 2 kN et 50 kN) fournissent une large gamme de capacités de mesure de la charge. Dans nos essais sur les roches, nous avons utilisé le capteur de force de 50 kN. La plage de vitesse de déplacement est comprise entre 1 et 500  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Les vitesses de déplacement dans nos essais sur cette machine sont 0.05 mm/min et 0.1 mm/min



Figure 4.6. (a) Machine de traction/compression INSTRON 5569 avec le logiciel de pilotage Blue Hill [<http://www.instron.tm.fr>] ; (b) mise en place d'un échantillon.

### 4.3.2. Appareil de compression en déformation plane

L'appareil de compression biaxiale au laboratoire 3SR (Figure 4.7) a été conçu et construit par J. Desrues (1984). La condition de déformation plane est obtenue pour empêcher la déformation dans un sens ( $\epsilon_2 = 0$ ) en utilisant deux plaques rigides en verre d'une épaisseur de 50 mm chacune. La distance entre les deux plaques est fixée à 35 mm. Les plaques transparentes en verre nous permettent l'enregistrement des photos de la surface de l'échantillon en cours de chargement.

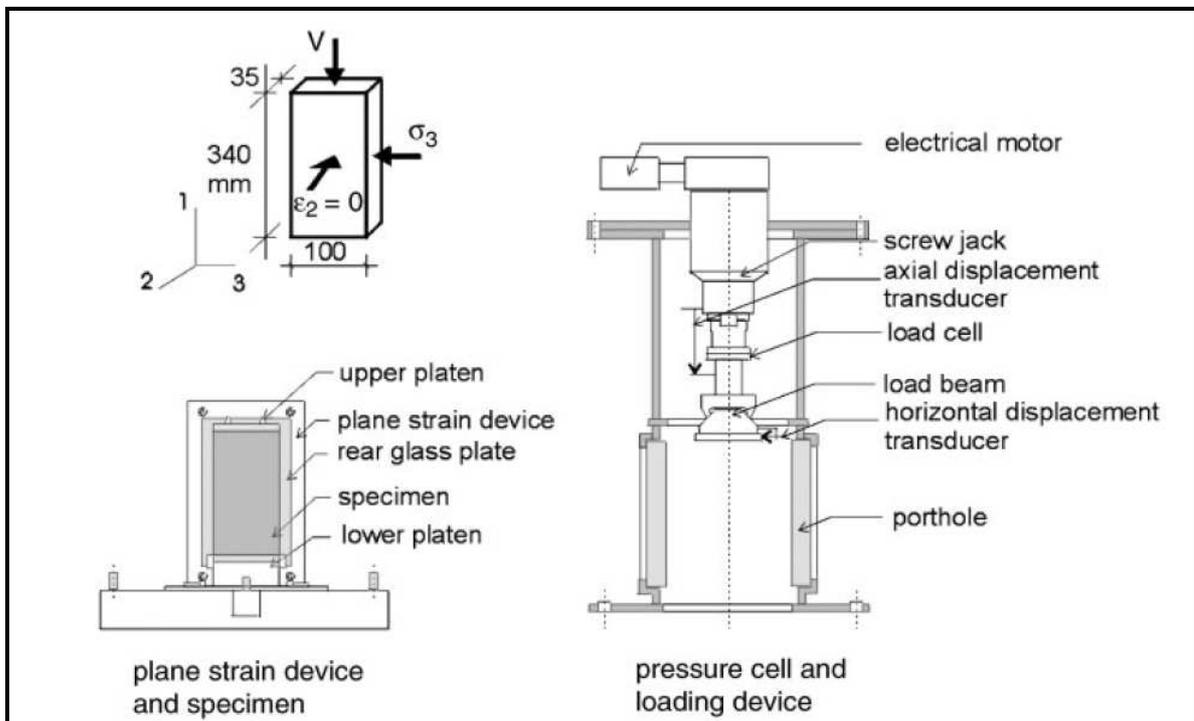


Figure 4.7. Schéma de l'appareil de compression en déformation plane [Desrues et Viggiani, 2004].

Les composants de l'appareil sont présentés dans la Figure 4.7. Il se compose de deux parties: la partie fixe inférieure et la partie mobile supérieure. Deux capteurs de déplacement mesurent le déplacement vertical et horizontal de la platine supérieure, tandis que la charge axiale est mesurée par un capteur interne. La capacité de force de l'appareil est 20kN. Le chargement est appliqué par un vérin de déplacement contrôlé à une vitesse constante dans la direction verticale. La vitesse de déplacement dans nos essais sur cet appareil est de 3  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

### 4.3.3. Appareil de compression servo-contrôlé (Material Test Systems - MTS)

Quelques essais de compression uniaxiale ont été réalisés à GeoForschungsZentrum (GFZ). Nous avons utilisé l'appareil de compression servo-contrôlé (Material Test Systems -MTS) ayant une capacité de force de 4600 kN. Cet appareil a été utilisé dans les travaux de Zang et *al.*, (1996) Stanchits et *al.*, (2006). La Figure 4.8 présente le montage expérimental sur cet appareil. La vitesse de déplacement utilisée dans nos expériences sur cet appareil est égale à 0.05 mm/min.



Figure 4.8. Vue d'ensemble de l'appareil MTS.

## 4.4. Technique de mesure de la déformation globale d'un échantillon

Plusieurs techniques permettent d'identifier les déplacements des surfaces des échantillons en contact avec les mors. Nous pouvons utiliser directement les informations de déplacements fournies par les différents capteurs de déplacements, mais aussi mettre en place un extensomètre à couteaux. Dans ce travail, nous utilisons une mesure sans contact par la technique de la corrélation d'images numériques (DIC).

Considérons un essai de compression sur un échantillon parallélépipédique avec plusieurs images enregistrées à différentes valeurs de charge. Une zone d'analyse ABCD couvre la surface de l'échantillon et une grille d'analyse  $y$  est définie. La Figure 4.9 présente un exemple d'un échantillon de CPIR09, la zone d'analyse ABCD en jaune et la grille d'analyse en rouge. Nous utilisons l'image enregistrée au début de l'essai (l'image 1) comme l'image de référence et cherchons les nœuds de la grille d'analyse correspondants dans les autres images. Par la technique DIC, les déplacements de tous les nœuds de la grille sont extraits pour chaque couple d'images. Pour une image  $i$  correspondant à une charge  $F_i$ , les termes  $\bar{\delta}_{AB}^i$  et  $\bar{\delta}_{CD}^i$  sont respectivement le déplacement moyen suivant la direction verticale de l'extrémité AB et CD de l'échantillon. Ils sont obtenus en calculant la moyenne des déplacements verticaux, issus de l'analyse DIC entre l'image 1 et l'image  $i$ , des nœuds d'analyse situés sur la droite AB et CD. La composante verticale du déplacement global  $\delta_e^i$  de l'échantillon à l'instant  $i$  est ensuite donnée :

$$\delta_e^i = \bar{\delta}_{AB}^i - \bar{\delta}_{CD}^i \quad 4.1$$

La déformation moyenne globale de l'échantillon est calculée :

$$\epsilon_{axiale}^i = \delta_e^i / H_e \quad 4.2$$

ou  $H_e$  est la hauteur initiale de l'échantillon.

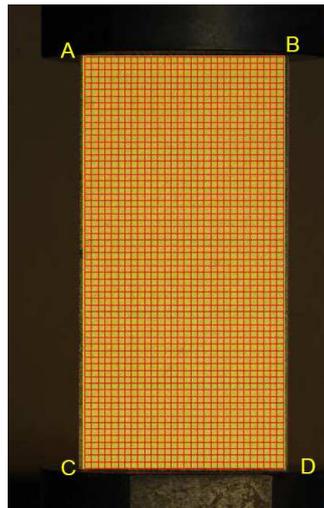


Figure 4.9. Essai de compression sur un échantillon parallélépipédique. La zone d'analyse ABCD couvre la quasi totalité de la surface d'un échantillon de CPIR09.

La Figure 4.10 (en haut) présente deux courbes contrainte axiale-déformation axiale mesurée par LVDT et par la technique DIC lors d'un essai de compression uniaxiale sur un échantillon parallélépipédique ( $35 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$ ) de CPIR 09. Ces courbes présentent de nombreuses ruptures fragiles lors des chutes de contrainte. La très forte différence entre les deux courbes est liée à la déformabilité de la machine de compression. Lors d'une chute de force, le capteur LVDT ne montre aucun changement de déformation parce que le déplacement appliqué est piloté continûment. Avec la mesure par corrélation d'images, on observe un changement important de déformation de l'échantillon (par exemple, entre l'image 101 et l'image 102). Ce phénomène est lié au retour élastique de la machine de compression. Ce fait est montré plus clairement dans La Figure 4.10 (en bas) qui présente les courbes du déplacement (mesuré par LVDT et par DIC) en fonction du temps. La courbe de déplacement traversée appliquée en fonction de temps est linéaire (la vitesse de déplacement pilotée est constante). La courbe de déplacement mesuré par la technique DIC présente des sauts liés à la présence des ruptures fragiles.

De plus, lors d'un essai de compression uniaxiale sur les roches, la courbe de contrainte axiale en fonction de déformation axiale commence toujours par une partie non-linéaire qui est liée principalement à trois facteurs : (i) la fermeture des fissures préexistantes, (ii) le comportement non-linéaire du matériau, (iii) les défauts de planéité des surfaces d'appui des échantillons. Une étude de compression sur un échantillon sans présence de fissure initiale détectée par tomographie, et dont le parallélisme des faces a été soigneusement respecté, a montré que cette première phase non linéaire était très limitée (voir Figure 6.5).

Les seules informations de déplacement utilisées désormais dans ce document seront celles issues des calculs par corrélation d'images, que ce soit à l'échelle locale ou, en observant les déplacements des extrémités des échantillons, à l'échelle globale. Les données fournies par le capteur LVDT ne seront par conséquent plus utilisées, excepté pour piloter les vitesses de chargement.

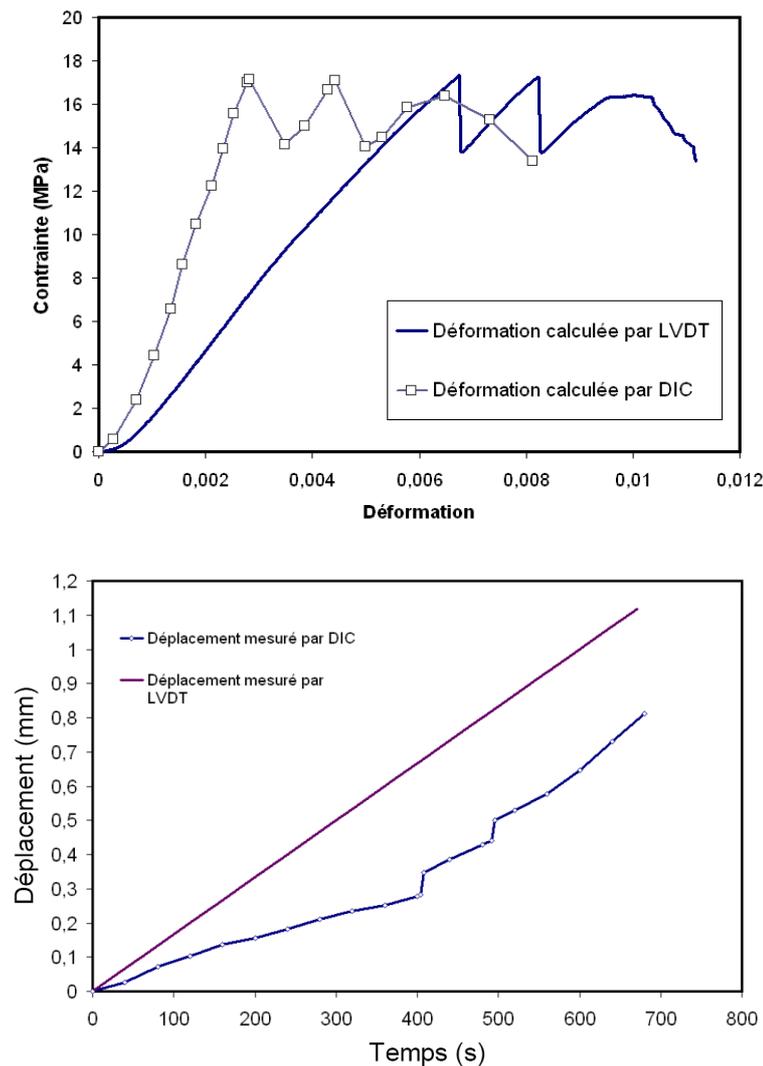


Figure 4.10. (En haut) courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale sur un échantillon parallélépipédique de CPIR09 mesurées par LVDT et par DIC. (En bas) courbes déplacement-temps d'un essai de compression uniaxiale sur un échantillon parallélépipédique de CPIR09 mesurées par LVDT et par DIC.

## **4.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux matériaux qui ont été étudiés plus particulièrement dans la thèse. Le premier est un Tuf, une roche volcanique tendre ayant une résistance à la rupture faible. La rupture de ce matériau lors des essais de compression est une rupture axiale fragile de mode I. Le deuxième matériau est une roche artificielle CPIR09. Le mode principal de rupture du CPIR09 est une rupture horizontale (bande de compaction). Bien que les porosités de ces matériaux soient comparables (autour de 40-50%), la taille des pores dans le CPIR09 est beaucoup plus importante que celle dans le Tuf.

Après avoir décrit les machines de compression utilisées, nous avons présenté la technique de mesure de déplacement globale de l'échantillon. Cette technique sera utilisée pour traiter des données dans nos expériences.



# Chapitre 5 : FISSURATION DANS LES ROCHES TENDRES

5.1. Introduction	96
5.2. Etude de la fissuration dans le Tuf	97
5.2.1. Configuration des échantillons entaillés de Tuf	97
5.2.2. Observations générales	98
5.2.3. Essai Tf-E-03	100
5.3. Etude de la fissuration dans le CPIR09	109
5.3.1. Configuration des échantillons	109
5.3.2. Echantillons comportant une seule entaille	110
5.3.3. Echantillons comportant deux entailles	125
5.4. Conclusion	136

## 5.1. Introduction

Le comportement d'un massif rocheux est déterminé non seulement par les propriétés de la matrice rocheuse, mais aussi par la présence et les propriétés des discontinuités de diverses origines au sein du massif (pores, inclusions, fissures préexistantes, *etc.*). Sous sollicitations mécaniques, ces discontinuités deviennent les zones affaiblies et privilégiées de l'apparition des nouvelles fissures. La propagation, l'interaction et la coalescence progressive ou brutale de ces fissures peuvent conduire à la rupture du massif.

Les études expérimentales de la propagation et de l'interaction de fissures dans les roches impliquent généralement la mise en œuvre d'essais sur des échantillons comportant des discontinuités préexistantes de différentes géométries (souvent une seule ou de multiples entailles fines). Dans ce contexte, les observations expérimentales ont été obtenues à la fois pour des roches naturelles et pour des matériaux artificiels. Un résumé des résultats issus de nombreuses recherches précédentes sur la fissuration dans les roches a été présenté dans le chapitre 1 de cette thèse. Dans ces recherches, l'évolution des fissures n'a été examinée qu'en surface d'échantillons en utilisant différentes techniques telles que des caméras numériques hautes résolutions ou bien des caméras à hautes vitesses d'enregistrement. Cependant, la simple observation à partir des images ne peut pas mettre en évidence le mécanisme des fissures ayant une ouverture ou un glissement de taille inférieure à un pixel. Par conséquent, l'initiation, la propagation et le mode de fissures sont difficiles à interpréter correctement. De plus, de telles observations ne peuvent pas refléter les phénomènes au cœur des échantillons. Pour cela, nous proposons d'utiliser différentes techniques de mesure de champs qui permettent de mieux caractériser le processus de la fissuration dans le matériau.

Le choix des entailles de faible largeur dans cette étude a pour l'objectif de modéliser les fissures préexistantes qui se présentent très communément dans les roches. Tous les échantillons que nous présentons dans ce chapitre sont initialement sans fissures préexistantes « naturelles » détectables par la tomographie RX. Dans le cadre de cette thèse, nous avons réalisé quelques essais sur les échantillons fortement pré-fissurés. Ces cas sont extrêmement fréquents dans les roches mais étant donnée la diversité des géométries de ces défauts, il nous a semblé extrêmement difficile d'utiliser les résultats de ces travaux pour réaliser une étude comparative intéressante. Les résultats de l'un de ces essais sont toutefois présentés dans l'annexe A2.

Ce chapitre a pour but de présenter une étude expérimentale sur l'initiation, la propagation et la coalescence de fissures dans des échantillons de Tuf et de CPIR09 présentant des entailles rectilignes préexistantes en utilisant une combinaison de diverses techniques de mesures de champs : (i) la corrélation d'images numériques en 2D (DIC) pour les mesures des champs cinématiques en surface des échantillons est essentiellement employée dans tous les essais ; (ii) l'évolution et les modes de propagation des fissures sont ensuite caractérisés par la technique DIC-F (*cf.* chapitre 3) ; (iii) les mesures des émissions acoustiques permettent de suivre le processus de l'endommagement au cœur des échantillons ; (iv) la tomographie à rayons X permet de caractériser dans le volume les défauts préexistants, et ainsi aide à comprendre leur influence sur la fissuration.

Dans l'ensemble des résultats issus des simulations en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis (logiciel **COMSOL**) et des analyses de corrélation d'images numériques (logiciel **7D**) présentés dans ce chapitre, nous utilisons la convention de signe de la mécanique des milieux continus : une contrainte négative et une déformation négative correspondent à une compression ; une contrainte positive et une déformation positive représentent une traction.

## 5.2. Etude de la fissuration dans le Tuf

### 5.2.1. Configuration des échantillons entaillés de Tuf

L'initiation, la propagation et la coalescence de fissures dans les échantillons de Tuf de Naples comportant d'entailles rectilignes ont été étudiés dans le travail de thèse de de Sanctis (2005). Dans ses travaux, de Sanctis a examiné à la fois la propagation des fissures dans les échantillons contenant une entaille inclinée à  $45^\circ$  mais aussi la coalescence des fissures dans les échantillons comportant deux entailles inclinées à  $45^\circ$  dans la zone centrale avec diverses inclinaisons du pont de roche. Les résultats principaux de ces travaux ont été résumés dans la section 1.3.2. D'après de Sanctis, la coalescence (à l'échelle de l'échantillon) est souvent observée en mode de cisaillement lorsque l'inclinaison du pont de roche est comprise entre  $45^\circ$  et  $60^\circ$ .

Dans notre travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés par les ruptures en mode II (mode de cisaillement). Trois configurations différentes des entailles (Figure 5.1) ont été choisies pour les échantillons parallélépipédiques ( $80 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ ). Pour les trois échantillons, l'inclinaison des entailles et des ponts de roche est égale à  $45^\circ$ . Les longueur et ouverture des entailles sont identiques à celles utilisées dans les travaux de de Sanctis, respectivement 12 mm et 0.4 mm. Le premier échantillon (**Tf-E-01**) présente deux entailles en zone centrale ; cette géométrie a été fréquemment étudiée dans les recherches précédentes [e.g., Wong et Einsteins, 2008a-b, 2009 ; de Sanctis, 2005]. Le second échantillon (**Tf-E-02**) a deux entailles situées aux bords de l'échantillon. Le dernier (**Tf-E-03**) est composé de trois entailles alignées, dont deux situées aux bords de l'échantillon et une au centre. Bien que les deux dernières géométries ne soient pas couramment utilisées dans la littérature, elles pourraient également fournir l'opportunité d'étudier à la fois l'initiation et la propagation des fissures de type wing cracks, ainsi que la coalescence des fissures dans les ponts de roche.

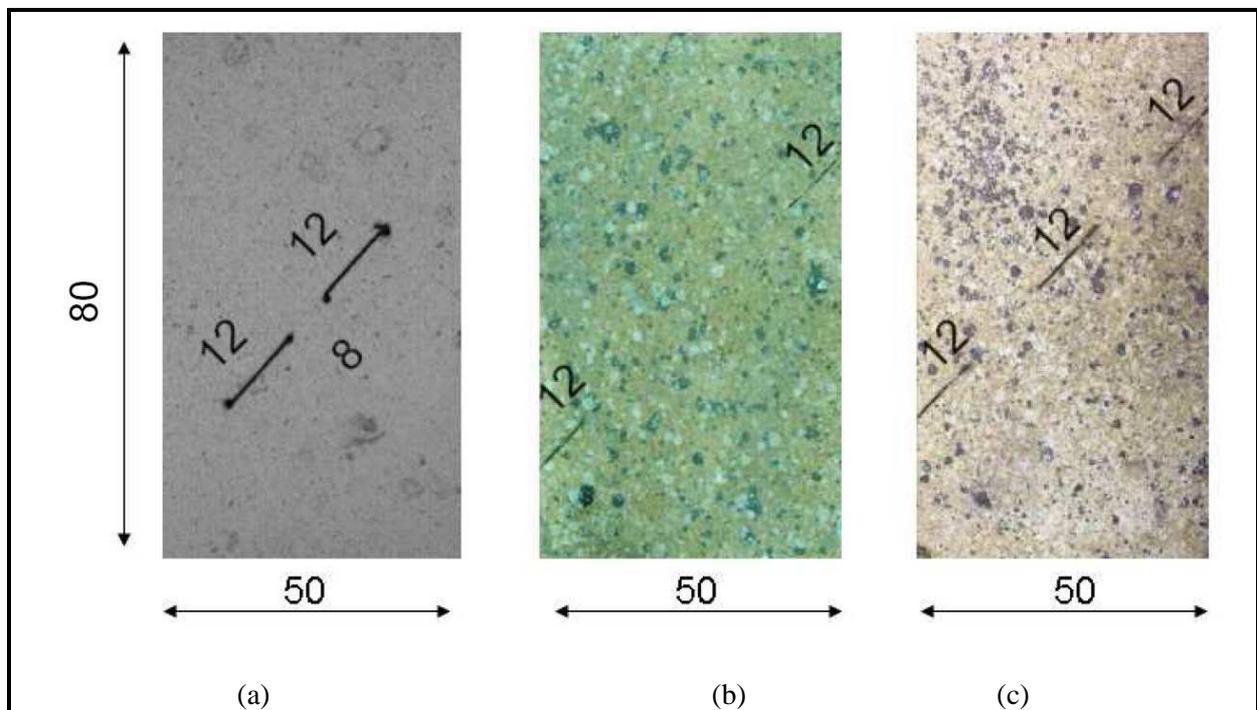


Figure 5.1. Configuration des échantillons de Tuf : (a) Tf-E-01, (b) Tf-E-02 et (c) Tf-E-03.

## 5.2.2. Observations générales

Les conditions d'essai sont résumées dans le Tableau 5.1. La contrainte axiale est calculée en divisant la force appliquée par la surface d'appui de l'échantillon sans prise en compte de la présence des entailles. Dans tous les essais, deux techniques de mesures ont été utilisées : la technique DIC-2D et la technique des EA.

Nom d'essai	Contrainte axiale au pic $\sigma_p$ (MPa)	Condition d'essai
Tf-E-01	7.6	Compression uniaxiale
Tf-E-02	9.5	Compression en déformation plane
Tf-E-03	5.7	Compression en déformation plane

Tableau 5.1. Référence des essais sur le Tuf.

La Figure 5.2 montre les images des échantillons après rupture. Dans l'essai Tf-E-01 (Figure 5.2a), les fissures ouvertes de type wing cracks apparaissent d'abord aux pointes extérieures des entailles et se propagent dans la direction verticale vers les extrémités de l'échantillon. La rupture finale est pilotée principalement par la coalescence du pont de roche. Dans l'essai Tf-E-02 (Figure 5.2b), la distance entre les entailles est très importante et aucune interaction entre les deux entailles n'est observée. Les fissures ont lieu dans deux zones autour des entailles. La contrainte au pic ( $\sigma_p$ ) obtenue dans cet essai est plus élevée que celle de l'essai Tf-E-01 mais bien évidemment plus faible que celle des échantillons sans entaille, qui est autour de 11 ( $\pm 1.5$ ) MPa [de Sanctis, 2005]. La rupture dans l'essai Tf-E-03 (Figure 5.2c) est principalement pilotée par les coalescences. Aucune trace de wing cracks n'est visible à l'œil nu dans la photo enregistrée à la fin de l'essai mais nous verrons ci-après que l'analyse DIC-F révèle en fait des fissures particulières.

Nous nous intéressons particulièrement à l'essai Tf-E-03 dans lequel les phénomènes (propagation, coalescence) paraissent plus complets. Les analyses d'un autre essai (Tf-E-01) qui éclairent sur l'évolution des fissures sont présentées dans l'annexe A3.

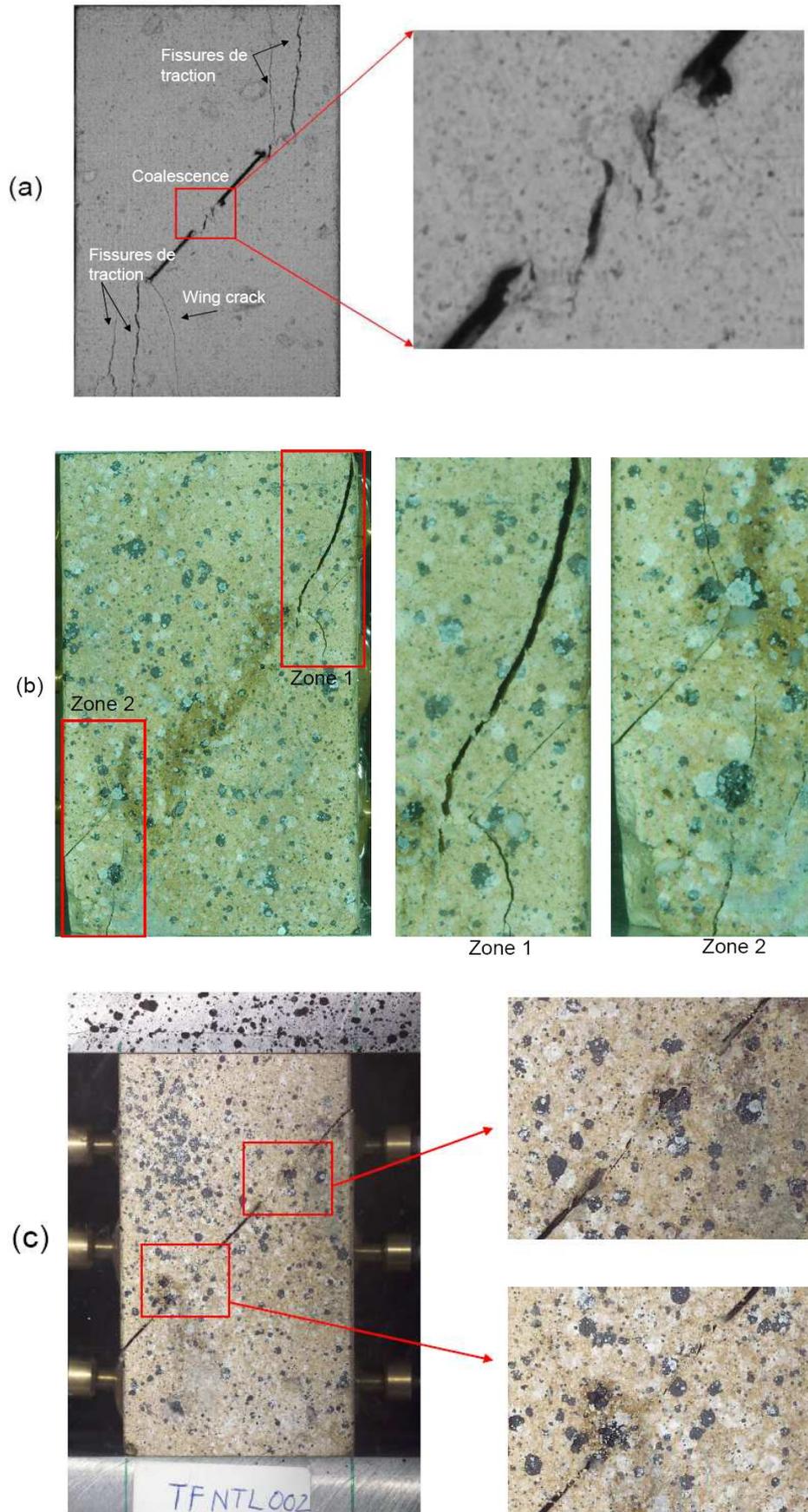


Figure 5.2. Rupture des échantillons : (a) Tf-E-01, (b) Tf-E-02 et (c) Tf-E-03.

### 5.2.3. Essai Tf-E-03

L'essai Tf-E-03 a été réalisé sur l'appareil de compression en déformation plane au laboratoire 3SR (cf. section 4.3.2) à vitesse de déplacement très lente de  $3 \mu\text{m}/\text{min}$  (soit une vitesse de déformation axiale moyenne de  $4.4 \times 10^{-5}/\text{min}$ ). La mesure des EA a été réalisée en utilisant six capteurs du laboratoire 3SR collés sur deux faces de l'échantillon (Figure 5.3). La Figure 5.4 présente la contrainte axiale, le nombre cumulé des coups des EA ( $N_C$ ) et l'énergie des EA ( $E_{abs}$ ) enregistrés par le capteur n°5 en fonction du temps (notons que les données enregistrées par les autres capteurs EA sont comparables).

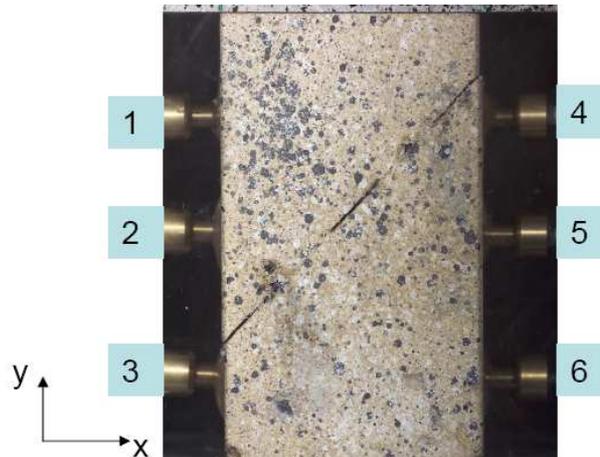


Figure 5.3. Essai Tf-E-03. Position des capteurs acoustiques.

Pendant le chargement, 300 photos de la surface de l'échantillon ont été enregistrées avec une taille de pixel de  $25 \mu\text{m}$ . La fréquence d'acquisition des photos était d'environ 1 photo/minute autour du pic de contrainte.

Sur les 300 images enregistrées, seule l'analyse de 7 photos (numérotées 1-7) correspondant aux moments clés de l'essai est présentée (Figure 5.4). La Photo n°1 est l'image en tout début d'essai, elle est utilisée comme image de référence à laquelle les photos suivantes (photos 2-7) sont corrélées. La photo 2 correspond au moment de l'apparition d'une première fissure. La photo 6 est enregistrée au pic de contrainte et la dernière photo 7 est acquise après la chute finale de la contrainte. Les autres photos correspondent à des moments clés identifiés à partir de la courbe de charge.

Les EA enregistrés dans la première phase de l'essai ( $\sigma_{axiale} < 1\text{MPa}$ ) sont relativement faibles (Figure 5.4). Lorsque  $\sigma_{axiale}$  atteint  $1\text{MPa}$ , l'activité des EA augmente plus fortement jusqu'à un saut significatif (photo 4). Bien qu'une augmentation considérable de l'énergie des EA soit remarquée avant la photo 2, l'analyse DIC ne montre aucune discontinuité de déplacement en surface dans cette phase. Cette augmentation est probablement liée à l'origine de la (micro)-fissuration au cœur du matériau. Notons que la photo 2 est la première photo parmi les 300 enregistrées sur laquelle nous observons les fissures en surface. De plus, aucune fissure n'a été détectée par l'analyse DIC lors de la première chute de contrainte observée au temps  $t = 200 \text{ min}$ . Une légère augmentation du nombre de coups des EA est constatée lors de cette chute de contrainte. Nous supposons qu'il s'agit d'une rupture d'inclusions au cœur du matériau non détectée en surface. La chute finale de la contrainte correspond aux sauts importants de  $N_C$  et de  $E_{abs}$ .

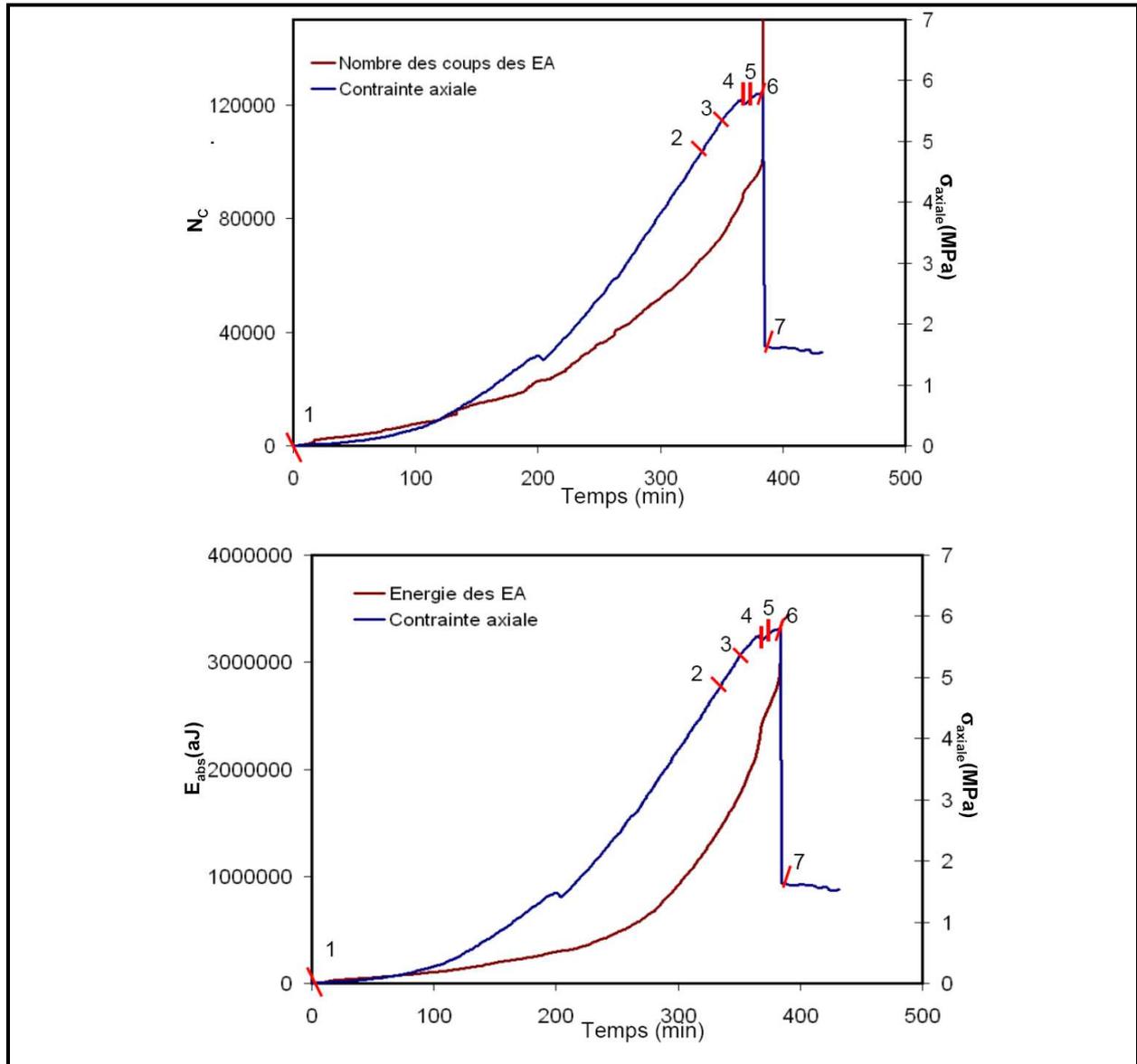
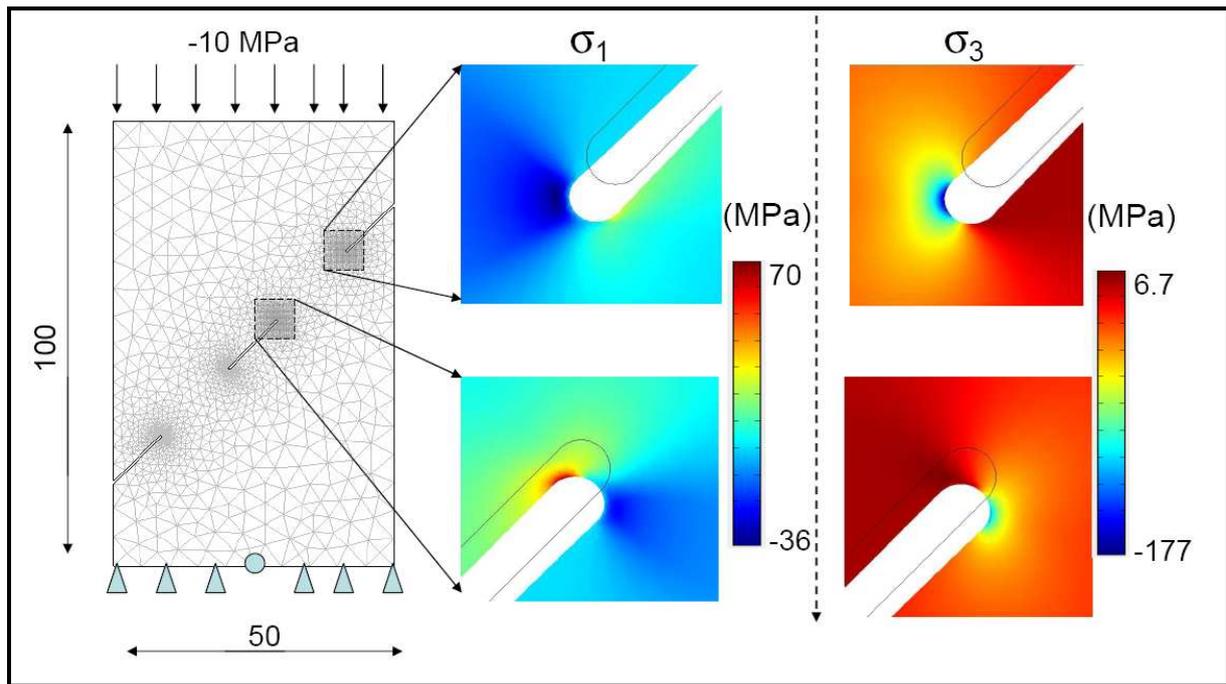


Figure 5.4. Essai Tf-E-03. Courbes de la contrainte axiale, du nombre cumulé  $N_c$  (en haut) et de l'énergie  $E_{abs}$  (en bas) des EA enregistrés par le capteur 5 en fonction du temps.

- **Simulation en élasticité**

Une simulation 2D en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis de l'essai Tf-E-03 a été effectuée. Les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé dans ce modèle correspondent à celles du Tuf fournies par de Sanctis (2005) :  $E=2.1$  GPa,  $\nu=0.25$ . Le chargement imposé correspond à une contrainte axiale moyenne de 10 MPa. Nous présentons dans la Figure 5.5 les contraintes principales majeures et mineures dans les deux zones intéressantes situées aux pointes de l'entaille supérieure et de l'entaille centrale. Nous observons sur le champ de la contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ ) des valeurs de traction localement élevée dans la zone de l'entaille centrale. La traction obtenue dans la zone de l'entaille supérieure est bien moins élevée que celles observée dans l'entaille centrale. De plus, deux zones de très fortes compressions sont observées sur le champ de la contrainte principale mineure ( $\sigma_3$ ).



Dimension	Contrainte appliquée	Condition	Nombre d'éléments	Type de maillage
80x50x35 mm	10 MPa	Déformation plane	4498	Triangle à 6 nœuds

Figure 5.5. Essai Tf-E-03. Contraintes principales autour des pointes des entailles ( $\sigma_1$ -contrainte principale majeure et  $\sigma_3$  – contrainte principale mineure) issues d'une simulation en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis.

- **Déplacement relatif des deux côtés des entailles:**

Avant de discuter de l'évolution des fissures et des coalescences qui conduisent à la rupture de l'échantillon, il est intéressant d'étudier d'un point de vue cinématique le comportement des entailles au cours de l'essai. Les entailles sont identifiées manuellement sur les photos comme étant des lignes droites centrées au milieu des entailles (Figure 5.6). Les sauts de déplacements sont ensuite quantifiés par la méthode DIC-F. La Figure 5.7 montre les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des entailles entre la photo 1 et la photo 6. Nous observons une ouverture de l'entaille centrale et des bords internes des entailles latérales. A contrario, les parties extérieures des deux entailles latérales se referment. Les déplacements relatifs tangentiels indiquent le même sens de mouvement pour toutes les entailles. La Figure 5.8 montre les composantes normales et tangentielles des déplacements relatifs des lèvres de l'entaille centrale en fonction du temps. Les valeurs positives des composantes normales correspondent à l'ouverture de l'entaille. Les déplacements relatifs entre deux lèvres de l'entaille sont estimés par les valeurs moyennes des composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement calculées le long de l'entaille. Cette entaille s'ouvre et glisse continûment au cours du chargement. Une forte augmentation de l'ouverture et du glissement sont naturellement observées lors de la rupture (photos 6-7).

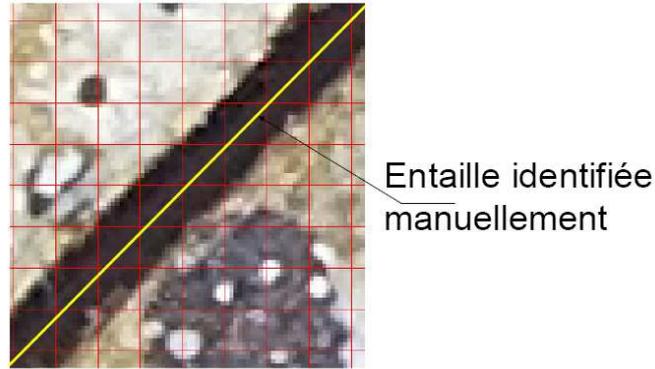


Figure 5.6. Essai Tf-E-03. Exemple du tracé manuel de l'entaille centrale.

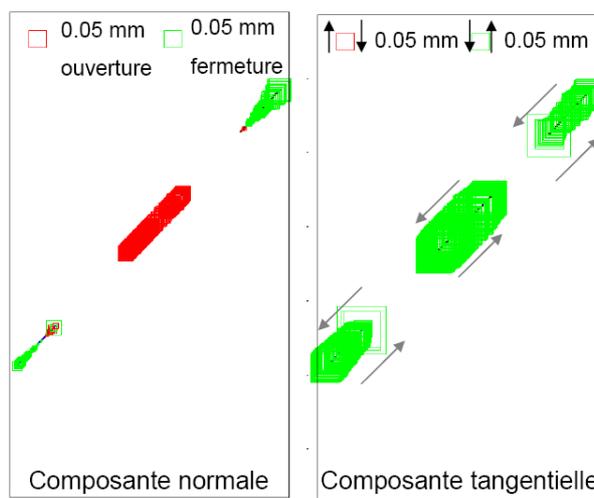


Figure 5.7. Essai Tf-E-03. Sauts de déplacement à travers les entailles entre les photos 1 et 6.

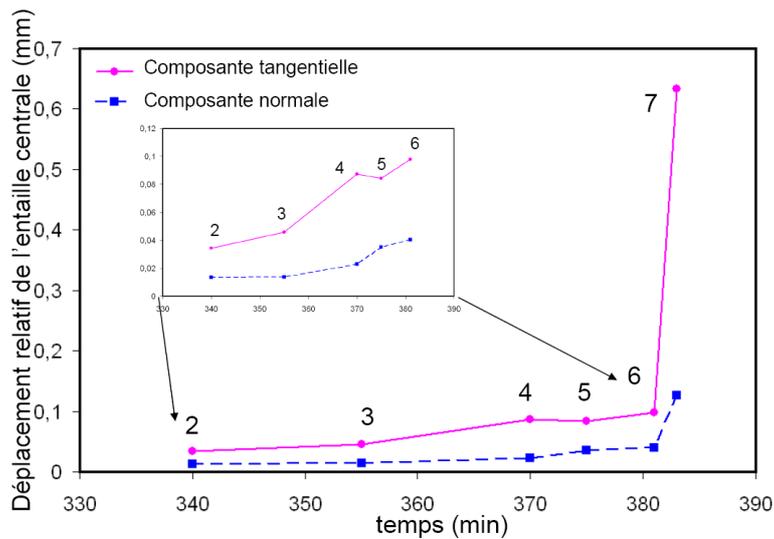


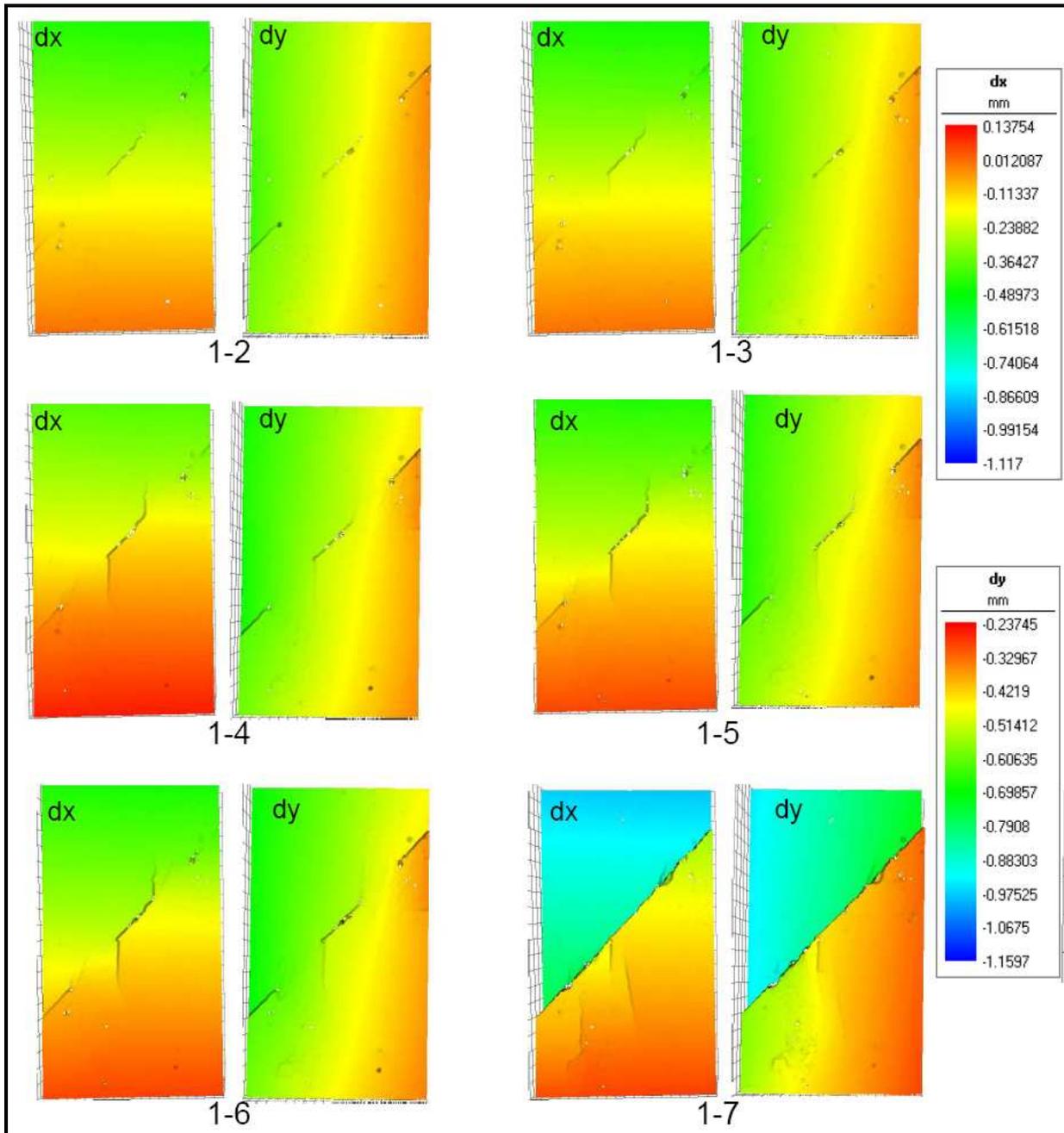
Figure 5.8. Essai Tf-E-03. Composantes normales et tangentielles des déplacements relatifs des lèvres de l'entaille centrale avec indication des numéros des photos (valeur moyenne sur toute la longueur de l'entaille). Composantes normales positives correspondent à l'ouverture de l'entaille au cours du chargement.

- **Evolution des fissures**

La Figure 5.9 montre les composantes du champ de déplacement suivant les axes  $x$  et  $y$ , respectivement horizontaux et verticaux. Les traces de l'évolution des fissures obtenues par la méthode DIC-F sont présentées dans la Figure 5.10. Dans l'étape de l'identification des fissures, le critère de discontinuité  $K_{min}$  est de  $7 \mu\text{m}$  (0.28 pixel). Les entailles préexistantes ont été surlignées sur les figures V.10. Les composantes normales et tangentiels des sauts de déplacement le long de chaque fissure sont calculées et présentées dans la Figure 5.11.

Deux fissures primaires qui présentent des formes de wing cracks ( $f_1$  et  $f_2$ ), apparaissent tout d'abord aux extrémités de l'entaille centrale, entre les photos 1 et 2. L'initiation de ces fissures a lieu dans les zones de fortes tractions prédites par la simulation EF (cf. Figure 5.5). Aucune autre fissure n'est détectée sur les entailles externes. Les composantes normales et tangentiels montrent les mêmes mouvements relatifs pour les deux fissures, ce qui peut être expliqué par la configuration symétrique de l'échantillon. Bien que les fissures de type wing cracks sont souvent identifiées comme étant des fissures de mode I, dans cet essai, nous montrons qu'il existe toujours un glissement important des lèvres des fissures wing cracks durant leur propagation. Les longueurs de ces fissures sont mesurées dans chaque photo et sont présentées dans la Figure 5.12 en fonction du temps. Cette quantification de la vitesse de propagation des fissures montre que ces fissures primaires symétriques se propagent d'une manière relativement stable avec un taux de croissance rapide d'environ  $0,24 \text{ mm/min}$  en comparaison à la vitesse de déplacement axiale appliqué de  $3 \mu\text{m/min}$ . La diminution des longueurs des parties « ouvertes » des fissures primaires  $f_1$  et  $f_2$  lorsque la coalescence a lieu à la chute de force (photo 6 et 7 dans la Figure 5.12) correspond à l'arrêt de la propagation et aux fermetures partielles de ces fissures.

Deux nouvelles fissures secondaires ( $f_3$  et  $f_4$ ) apparaissent entre les photos 3-4, suivies par la fissure secondaire  $f_5$  entre les photos 5 et 6. Les fissures  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_4$  apparaissent aux pointes des entailles, lieu de concentrations de contrainte de traction (cf. Figure 5.5). Au contraire, les fissures  $f_3$  et  $f_5$  apparaissent loin des entailles, dans les parties « intactes » du matériau. Ces fissures se propagent en mode d'ouverture (Mode I). Soulignons que, à cause de la faible ouverture et du faible glissement, la présence et l'évolution des fissures secondaires  $f_{3,4,5}$  ne peut être détectée directement sur les photos sans application de la technique DIC-F. Lors de la rupture, deux nouvelles fissures tertiaires en mode I ( $f_6$  et  $f_7$ ) apparaissent de manière brutale (photo 7). Dans le même temps, les fissures  $f_3$  et  $f_4$  se referment et ne sont plus détectées alors que la fissure  $f_5$  continue à s'ouvrir.



Taille de pixel	Pas de la grille (pixels)	Dimension du motif
25x25 $\mu\text{m}^2$	10 pixels (0.25 mm)	20x20 pixel <sup>2</sup> (0.5x0.5 mm <sup>2</sup> )

Figure 5.9. Essai Tf-E-03. Champs de déplacement horizontal (à gauche) et vertical (à droite) calculés entre l'image initiale et l'une des 6 images suivantes.

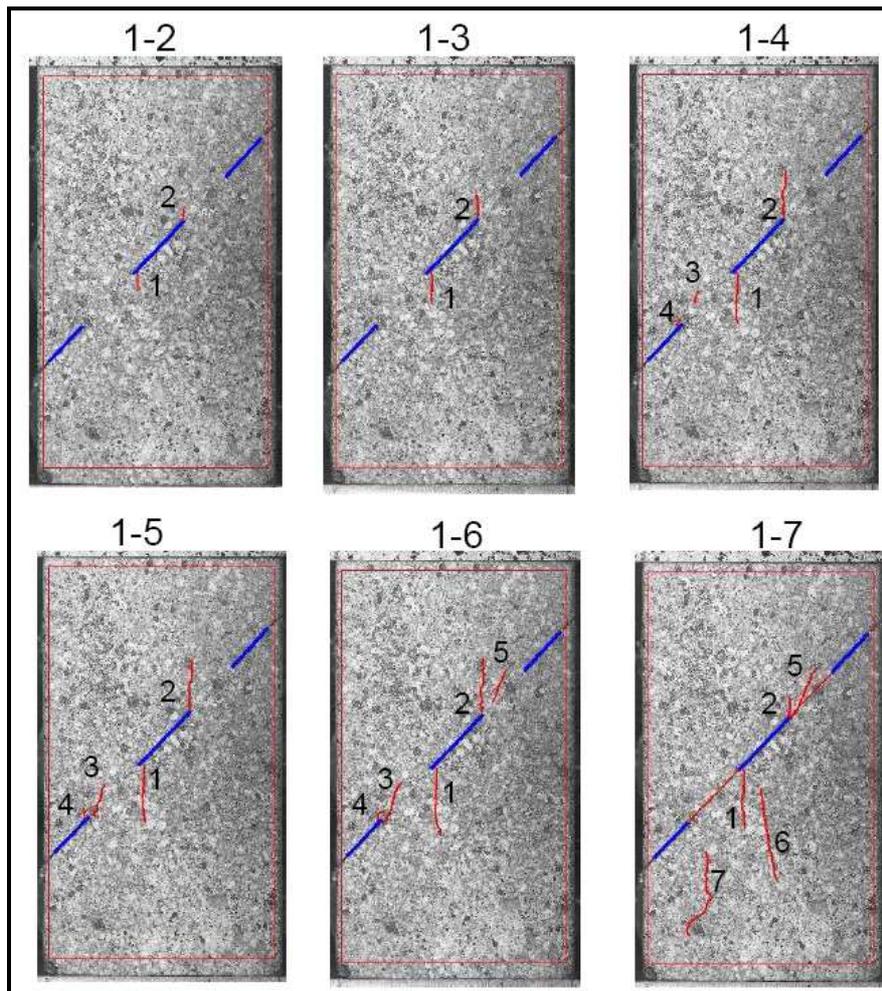


Figure 5.10. Essai Tf-E-03. Evolution des fissures identifiées pendant l'essai en utilisant la méthode DIC-F.  $K_{min}=7\mu m$ .

- **Rupture des ponts de roche**

La rupture finale de l'échantillon est pilotée principalement par la rupture des deux ponts de roche qui entraîne une chute importante de contrainte. Etant données les vitesses de ruptures, le processus complet de la coalescence n'a pas pu être étudié (dans d'autres travaux, Shen *et al.*, 1999 ont suggérés que la rupture se développe en moins de 0,1 s dans un gypse pour une vitesse de déplacement axial de 0,005 mm/s). L'utilisation d'une caméra à très haute vitesse d'acquisition serait nécessaire pour saisir le processus. Il est également difficile de localiser automatiquement ces fissures par la méthode DIC-F parce que les zones concernées sont très endommagées, mettant en échec les algorithmes de corrélation (voir Figure 5.13). Par conséquent, pour analyser les déplacements relatifs, les fissures ont été tracées manuellement en utilisant des lignes droites reliant les points des entailles. Les composantes des sauts de déplacement ont été quantifiées avec  $n_1=30$  pixels et  $n_2=10$  pixels. Les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement (Figure 5.14) sont, pour la majorité des points, respectivement d'environ 0,2 mm et 0,6 mm. Si, à l'échelle macroscopique (l'échelle de l'échantillon), les déplacements relatifs des deux blocs de chaque côté de cette rupture finale semblent indiquer que le mécanisme principal est un cisaillement, l'analyse de discontinuité de déplacement local permet de constater que la composante normale est aussi élevée. Par conséquent, il est possible que la rupture de cisaillement observée à l'échelle macroscopique soit, en fait, le résultat de nombreuses microfissures de traction. Le caractère rugueux des surfaces fissurées est une preuve de cette ouverture.

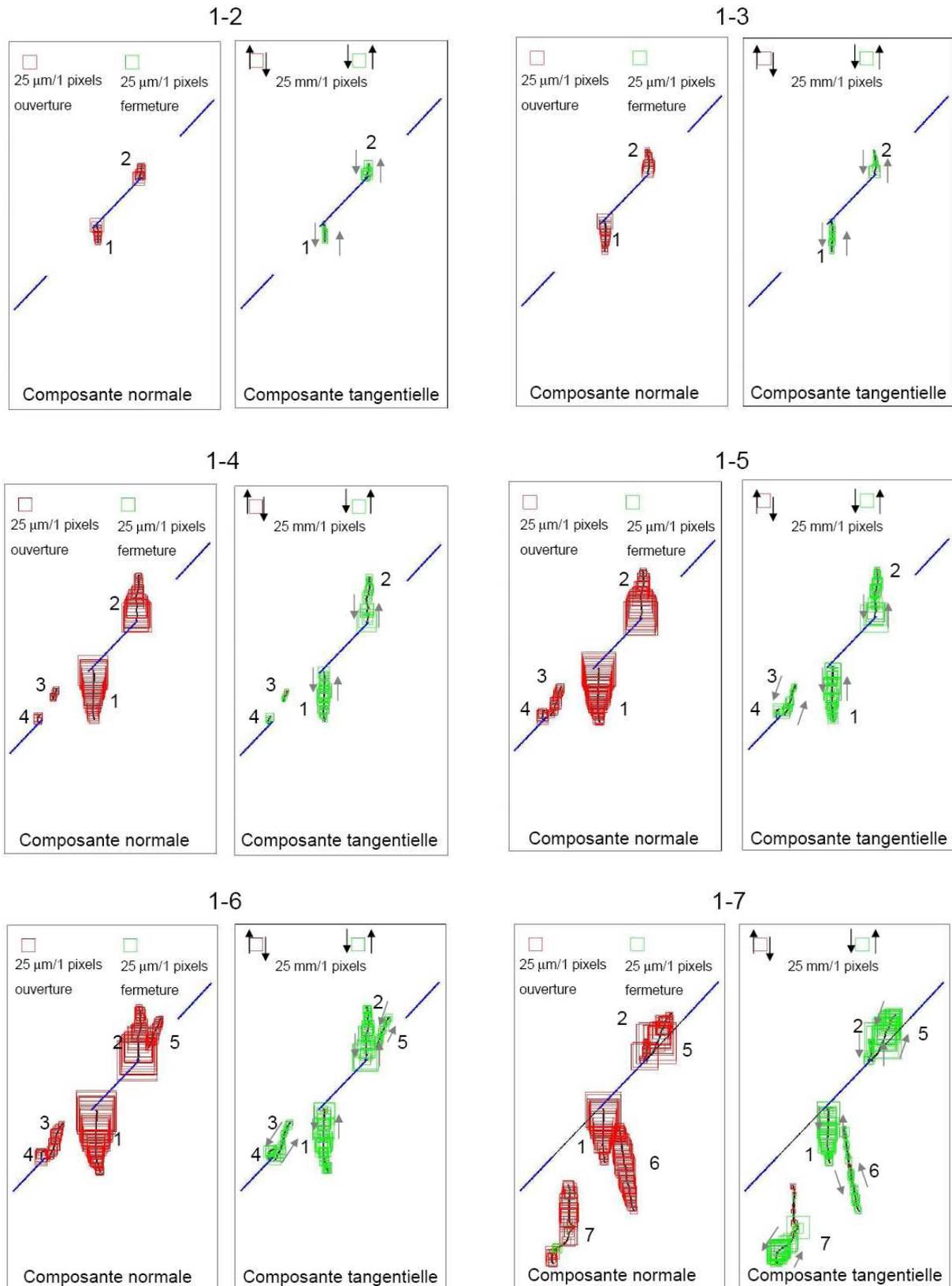


Figure 5.11. Essai Tf-E-03. Composantes normales et tangentielle des sauts de déplacement au travers de chaque fissure identifiée.

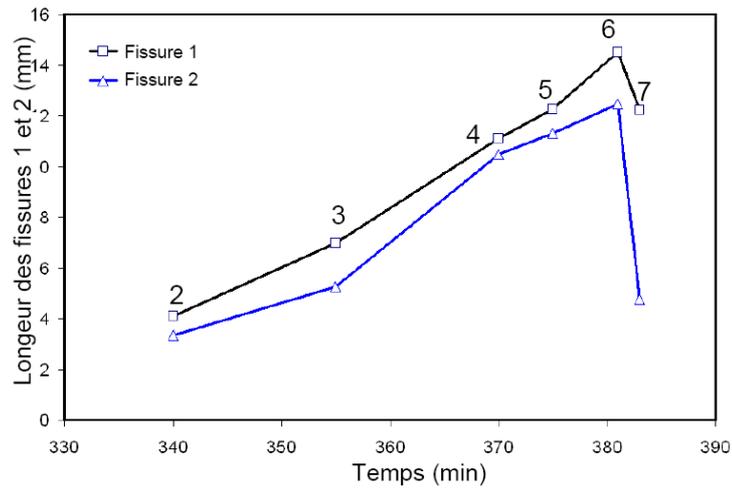


Figure 5.12. Essai Tf-E-03. Longueur des wing cracks ( $f_1$  et  $f_2$ ) en fonction du temps.

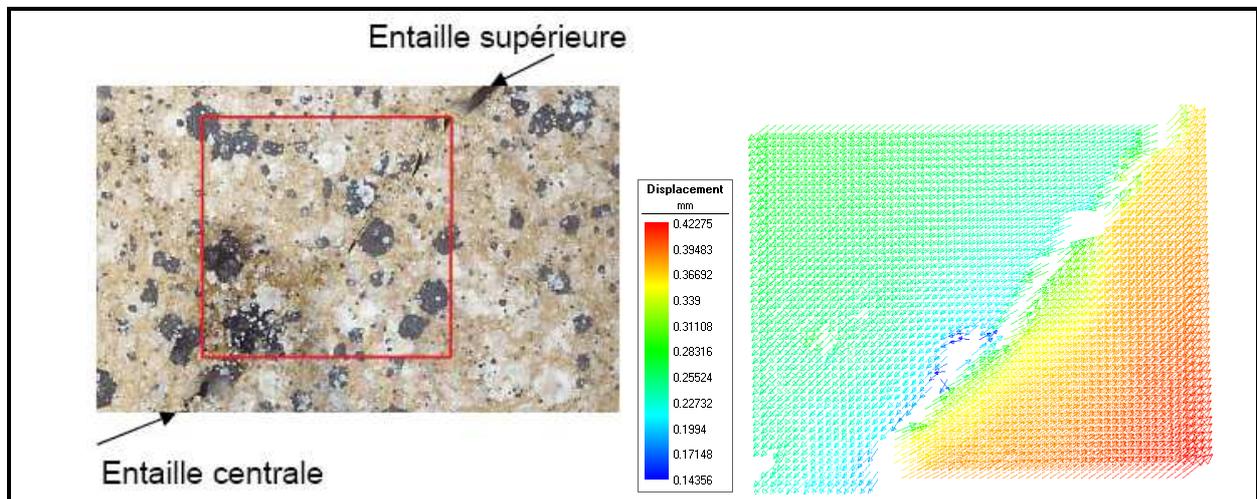


Figure 5.13 . Essai Tf-E-03. Vecteurs déplacement dans la zone de rupture du pont de roche entre deux entailles (analyse entre les photos 6 et 7). Pas de la grille de l'analyse 10 pixels (0.25 mm).

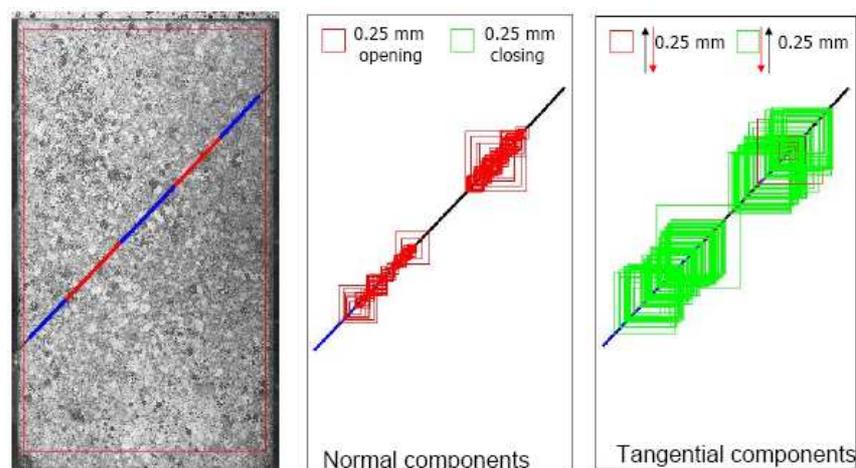


Figure 5.14. Essai Tf-E-03. Composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement lors de la rupture des deux ponts de roche (analyse entre les photographies 6 et 7).



Figure 5.15. Essai Tf-E-03. Images après rupture de l'échantillon.

## 5.3. Etude de la fissuration dans le CPIR09

### 5.3.1. Configuration des échantillons

Le CPIR09 est un matériau très poreux, dont le mode principal de rupture lors d'essais de compression uniaxiale est la compaction (cf. section 4.2.2). Nous nous attendons donc à observer des modes de rupture différents de ceux observés dans le Tuf. Dans le but d'étudier la fissuration dans ce matériau, une campagne d'essais de compression uniaxiale a été réalisée au laboratoire SYMME. Deux configurations relativement classiques des entailles ont été testés sur six échantillons parallélépipédiques de CPIR09 (dimensions  $100 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ ). Trois échantillons ont été réalisés avec une seule entaille (Figure 5.16.a), les trois autres comportent deux entailles (Figure 5.16.b). Toutes les entailles ont les mêmes caractéristiques que celles utilisées dans l'étude sur le Tuf (longueur 12 mm, ouverture 0.4 mm et inclinaison  $45^\circ$ ). La longueur du pont de roche dans le cas des échantillons comportant deux entailles, est de 12 mm. Pour chacune de ces deux configurations, nous avons répété trois essais afin d'examiner la reproductibilité des fissures.

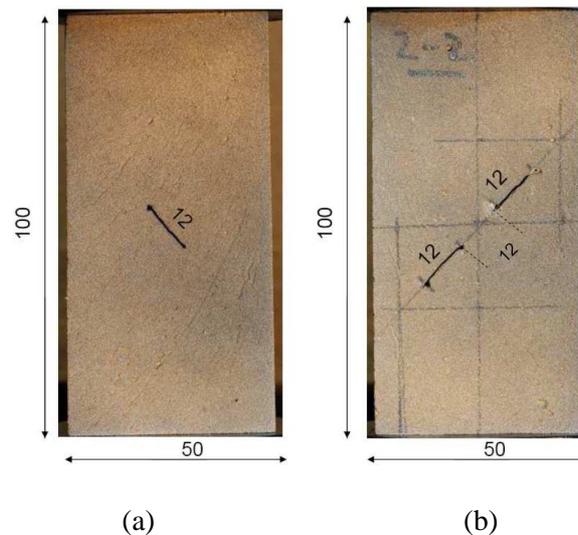


Figure 5.16. Configurations des échantillons de CPIR09 avec : (a) une entaille (essais Cpir1-E-45-01, Cpir1-E-45-02, Cpir1-E-45-03) et (b) deux entailles (essais Cpir2-E-45-01, Cpir2-E-45-02, Cpir2-E-45-03).

Tous les essais réalisés sont en compression uniaxiale (machine de compression INSTRON) ; les mesures des EA ont été effectuées en utilisant le système MISTRAS 2001 et les capteurs acoustiques du laboratoire 3SR. Les photos utilisées pour les analyses DIC ont été enregistrées par l'appareil photo numérique reflex Nikon D200 muni d'un objectif 105 mm.

## 5.3.2. Echantillons comportant une seule entaille

### 5.3.2.1. Observations générales

Le Tableau 5.2 présente les techniques de mesures utilisées, la vitesse de chargement et la contrainte axiale au premier pic dans les trois essais sur les échantillons de CPIR09 comportant une entaille inclinée.

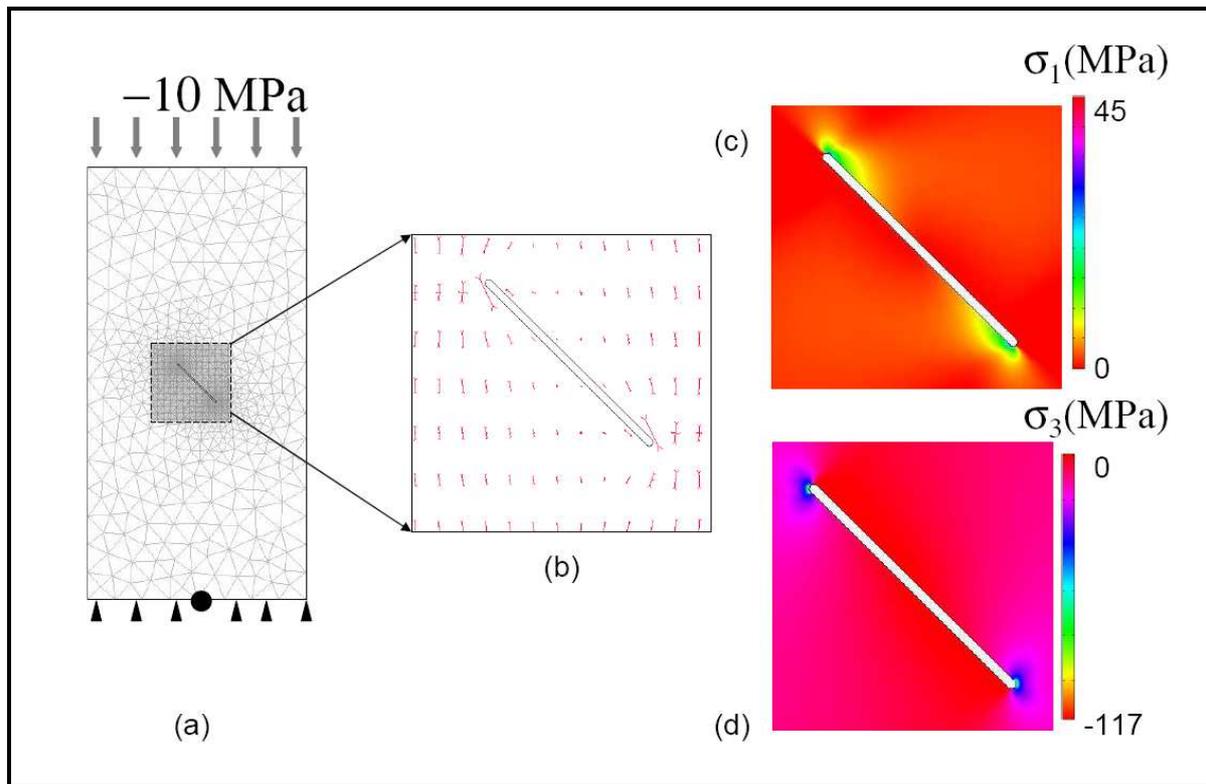
Nom	Techniques de mesures		Vitesse de chargement (mm/min)	Contrainte au premier pic $\sigma_p$ (MPa)
	EA	Tomographie RX		
Cpir1-E-45-01	-	Avant	0.01	10.5
Cpir1-E-45-02	Oui	Avant et après	0.05	9.7
Cpir1-E-45-03	Oui	Avant	0.05	9.7

Tableau 5.2. Récapitulatif des essais réalisés.

La Figure 5.17 présente les contraintes principales majeure et mineure obtenues à partir d'une simulation 2D en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis de la géométrie utilisée. Les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé dans le modèle correspondent à celles du CPIR09 données par Hosseini (2005) :  $E=8$  GPa,  $\nu=0.18$ . La contrainte de compression appliquée à l'extrémité haute de ce modèle est de 10 MPa, ce qui correspond à la valeur atteinte au premier pic dans les essais. Notons que les premières fissures apparaissent dans tous les essais lors de la première chute de force. Les concentrations de contrainte sont mises en évidence aux pointes de l'entaille. Des zones de fortes tractions (45 MPa) et des zones de fortes compressions (-117 MPa) sont observées au niveau de l'entaille.

Dans chaque essai, nous considérons la photo prise en début de chargement comme photo de référence. Les résultats des trois essais sont présentés dans les figures 5.18-20. Deux types de fracture sont observés : (i) les fissures dites wing cracks (notées « **W** » sur les images) et (ii) les bandes de compaction (notées « **C** » sur les images). Les wing cracks sont situés aux pointes des entailles, dans les zones de forte traction prédites par la simulation EF (*cf.* Figure 5.17). Elles se propagent suivant la direction de charge (orientation verticale). L'ouverture de ces fissures est aisément mise en évidence par les valeurs positives des déformations principales et par la dilatation (déformation volumique positive) observée dans les zones de fissure. Les bandes de compaction, correspondant aux zones de déformations volumiques négatives, sont toujours perpendiculaires à la direction de charge (horizontale). Elles apparaissent aux pointes des entailles aussi bien qu'entre les wing cracks et les bords des échantillons.

Comme les fissures principales observées sont assez reproductibles dans ces trois essais, nous avons choisi de ne présenter en détail que les analyses effectuées pour l'essai Cpir1-E-45-02. Les résultats des essais Cpir1-E-45-01 et Cpir1-E-45-03 sont mis en annexe A4.



Dimension	Contrainte appliquée	Condition	Nombre d'éléments	type de maillage
100x50x35 mm	10 MPa	Contrainte plane	2494	Triangle à 6 nœuds

Figure 5.17. Contraintes principales autour de l'entaille issues d'une simulation en élasticité linéaire isotrope : (a) géométrie de l'échantillon et conditions aux limites ; (b) directions des contraintes principales ; (c) contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ ) ; (d) contrainte principale mineure ( $\sigma_3$ ).

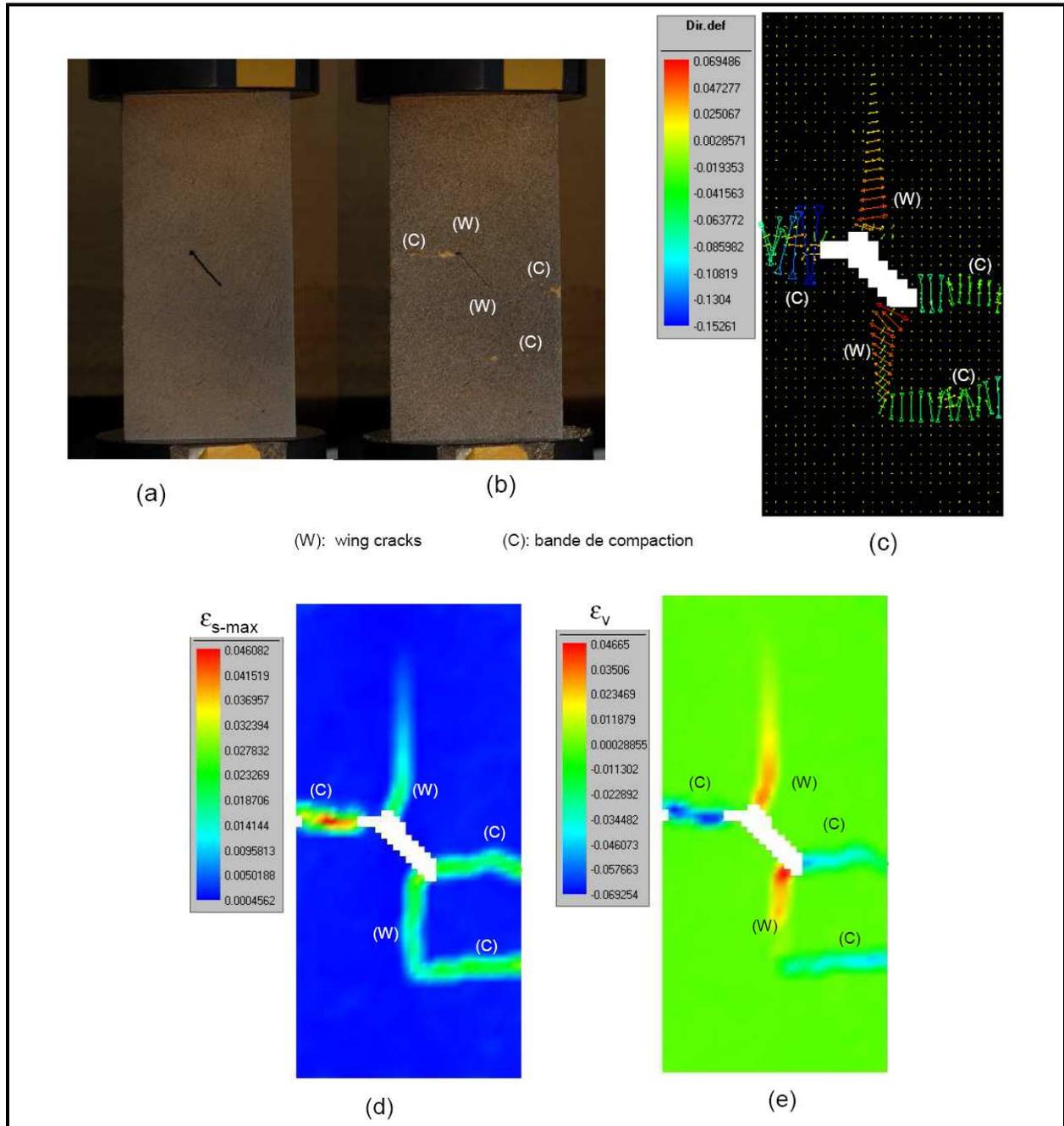


Figure 5.18. Essai Cpir1-E-45-01. (a) Photo acquise en début d'essai ; (b) photo acquise à la rupture ; (c) direction et intensité des déformations principales, pas de la grille: 60 pixels. (d) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), pas de la grille: 40 pixels ; (e) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), pas de la grille: 40 pixels.

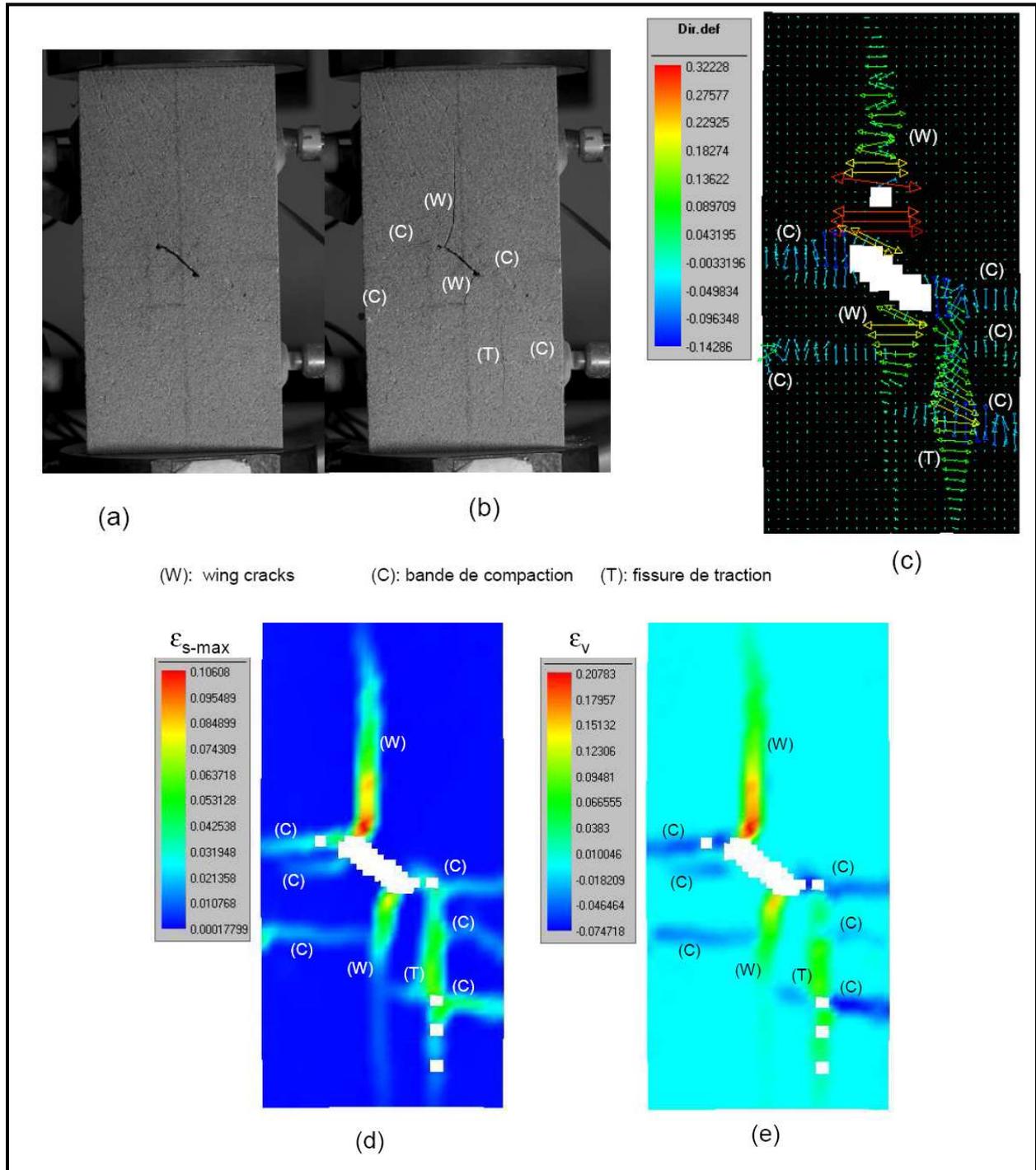


Figure 5.19. Essai Cpir1-E-45-02. (a) Photo acquise en début d'essai ; (b) photo acquise à la rupture ; (c) direction et intensité de déformation principale, pas de la grille: 60 pixels ; (d) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), pas de la grille: 40 pixels ; (e) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), pas de la grille: 40 pixels.

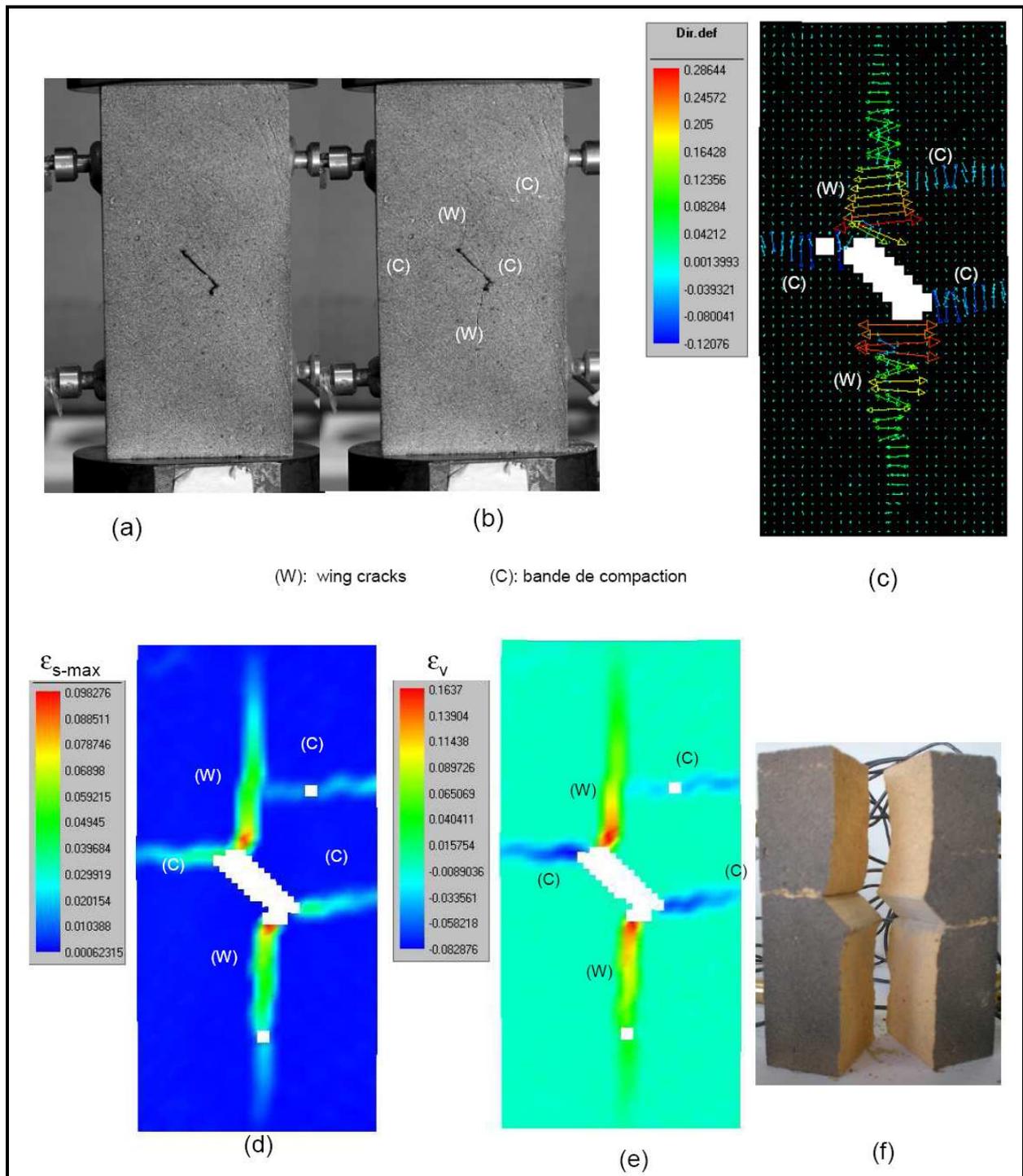


Figure 5.20. Essai Cpir1-E-45-03. (a) Photo acquise en début d'essai ; (b) photo acquise à la rupture ; (c) direction et intensité de déformation principale, pas de la grille: 60 pixels ; (d) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), pas de la grille: 40 pixels ; (e) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), pas de la grille: 40 pixels.

### 5.3.2.2. Essai Cpir1-E-45-02

Trois techniques de mesures sont utilisées dans l'essai Cpir1-E-45-02: l'EA, la technique DIC et l'analyse tomographique.

Pour l'acquisition des EA, 6 capteurs ont été collés sur trois faces de l'échantillon (Figure 5.21). De plus, l'échantillon a été scanné par RX avant et après essai pour caractériser les hétérogénéités du matériau et visualiser en 3D les fissures en fin de chargement. La Figure 5.22 montre la courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale. Le taux de coup des EA ( $dN_C$ ) et le taux de l'énergie des EA ( $dE_{abs}$ ) relevés par le capteur n°1 en cours d'essai sont montrés dans la Figure 5.23.

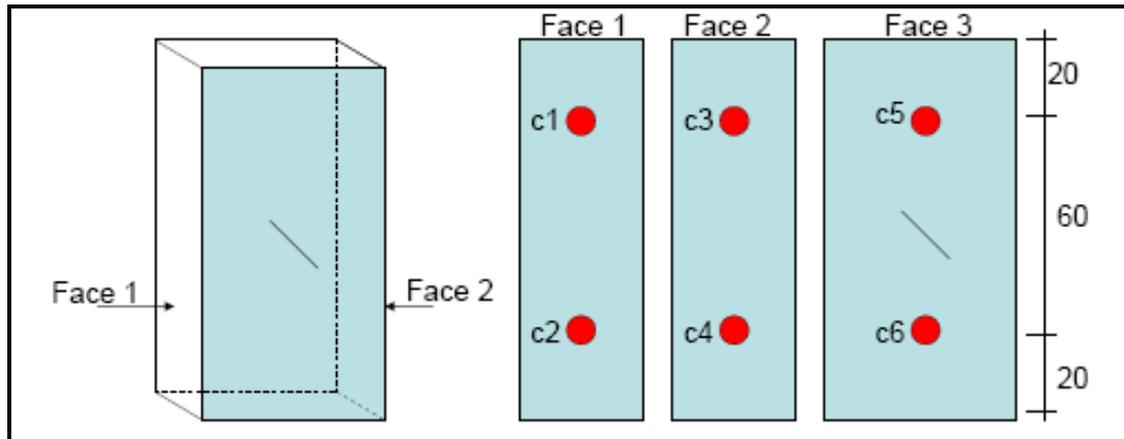


Figure 5.21. Essai Cpir1-E-45-02. Position des capteurs sur les trois faces de l'échantillon. La face n°3 est la face opposée à celle étudiée par DIC.

La première partie de la courbe contrainte-déformation dans la Figure 5.22 est linéaire, jusqu'à la première chute de  $\sigma_{axiale}$ . Après cette chute, la contrainte  $\sigma_{axiale}$  recommence à augmenter de manière quasi linéaire mais la rigidité de l'échantillon diminue. 13 photos ont été choisies pour les analyses DIC parmi les 206 photos enregistrées en cours de chargement. La photo n°1 correspond au début de l'essai. Les photos 2 et 3 ont été choisies lors de l'augmentation forte de  $dN_C$  et de  $dE_{abs}$ . Les photos 4 et 5 sont les photos qui encadrent la première chute de contrainte. Les photos 8 et 9 encadrent la deuxième chute de contrainte. Les autres photos sont choisies afin de suivre le développement des fissures en cours de chargement. Les déformations de cisaillement ( $\epsilon_{s-max}$ ) et volumique ( $\epsilon_v$ ) des analyses « incrémentales » des couples des images successives (1-2, 2-3, etc.) sont présentées dans la Figure 5.24. Les fissures identifiées avec une valeur du seuil de détection  $K_{min}$  de 2  $\mu\text{m}$  et les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures estimées par la méthode DIC-F dans chaque couple de photos sont présentées dans les figures 5.25 et 5.26, respectivement.

- **Evolution de fissures**

Dans l'incrément 1-2,  $dN_C$  et  $dE_{abs}$  expriment un accroissement continu mais assez faible. Aux pointes de l'entaille, dans la position correspondant à la concentration de traction obtenue par la simulation EF (Figure 5.17), deux petites zones de déformation localisée sont observées sur la carte de déformation volumique (photos 1-2 Figure 5.24). Les déformations volumiques locales maximales dans ces deux zones correspondent à environ 0.16 % de dilatation. Notons que toutes les analyses effectuées avec les photos enregistrées avant la photo n°2 ne montrent aucune discontinuité de déplacement. Les deux fissures de type wing cracks sont identifiées par la technique DIC-F et présentées dans la Figure 5.26 (W1 et W2). Les composantes normales des sauts des déplacements de ces deux fissures montrent une très faible ouverture (quelques  $\mu\text{m}$ ) par rapport à la taille des pixels (28  $\mu\text{m}$ ). Nous apercevons également la fermeture de l'entaille dans cette phase.

Dans l'incrément 2-3, une forte augmentation de  $dN_C$  et  $dE_{abs}$  correspond à la propagation des fissures  $W1$  et  $W2$  initiées dans la photo n°2. Ces deux wing cracks continuent à s'ouvrir et prennent une forme curviligne qui s'incline vers la direction verticale. Les composantes tangentielles sont presque nulles. L'entaille continue à se fermer.

Dans l'incrément 3-4, lorsque la contrainte atteint son premier pic (photo 4), des sauts de  $dN_C$  et  $dE_{abs}$  sont constatés. Les déformations issues de l'analyse des photos 3-4 montrent la première bande de compaction  $C1$  s'initiant à la pointe supérieure de l'entaille dans la zone de forte compression prédite dans la simulation EF (Figure 5.17). Une très faible fermeture de l'entaille est constatée dans cet incrément.

Une propagation significative des fissures  $W1$ - $W2$  et des bandes de compaction  $C1$  et  $C2$  a lieu lors de la chute de contrainte (photos 4-5). Les fissures  $W1$ - $W2$  se développent dans la direction verticale. La bande de compaction  $C2$  s'initie dans la zone de la concentration de compression à la pointe inférieure de l'entaille. Ces bandes de compaction se propagent dans la direction horizontale vers les bords de l'éprouvette. Une quantité très importante d'énergie mais aussi un nombre important de coups acoustiques, remarqués par le pic de  $dE_{abs}$  et de  $dN_C$ , sont mesurés. Les composantes normales de sauts de déplacement calculées par la technique DIC-F le long des fissures montrent que l'ouverture maximale des wing cracks est de l'ordre de  $60 \mu\text{m}$  (autour de 2 pixels), donc elles sont détectables en zoomant sur les photos à ce stade. La « fermeture » maximale des bandes de compaction dans cet incrément est autour d'un pixel ( $\sim 30 \mu\text{m}$ ) L'entaille s'ouvre à nouveau lors de cette chute de la contrainte axiale.

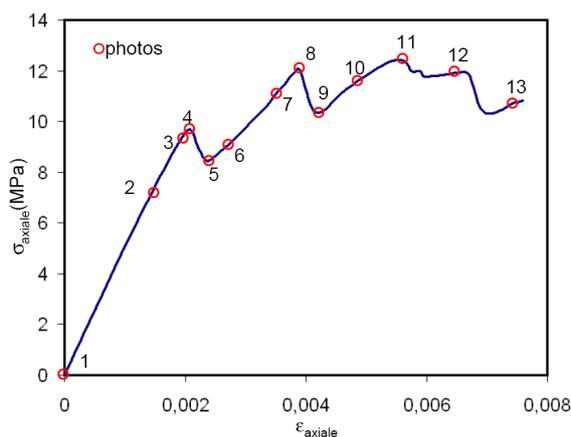


Figure 5.22. Essai Cpir1-E-45-02. Courbe contrainte axiale en fonction de déformation axiale.

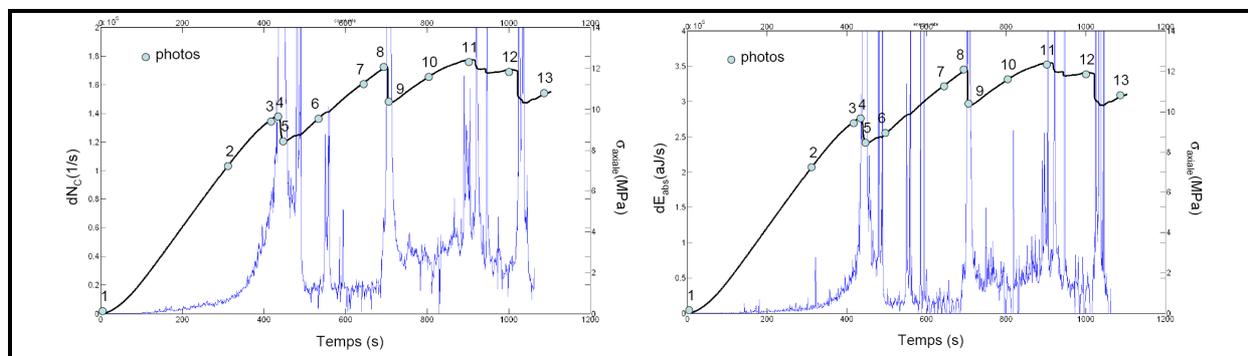


Figure 5.23. Essai Cpir1-E-45-02. Taux de coups acoustique et contrainte axiale en fonction du temps (à gauche) et taux d'énergie absolue et contrainte axiale en fonction du temps (à droite).

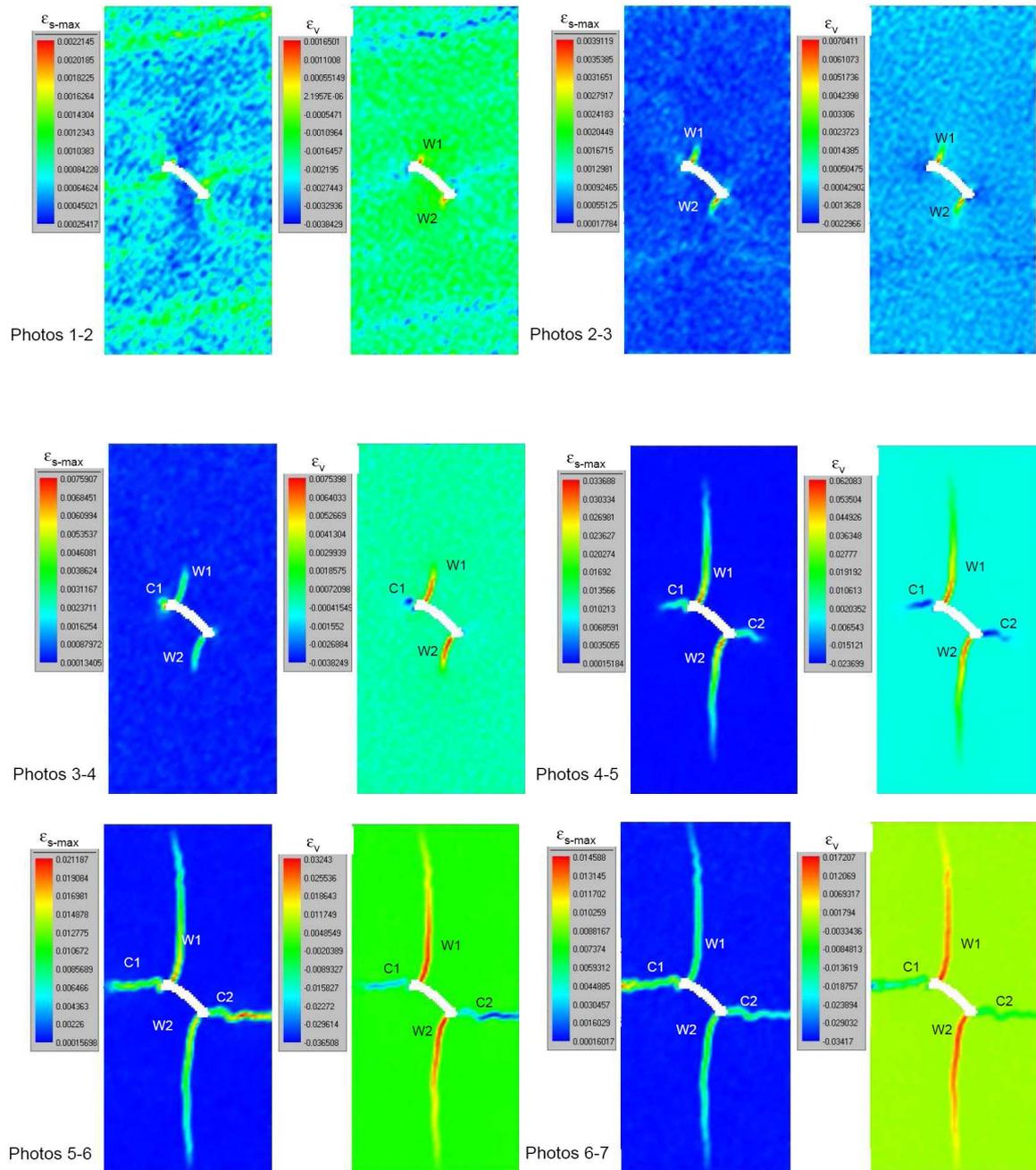
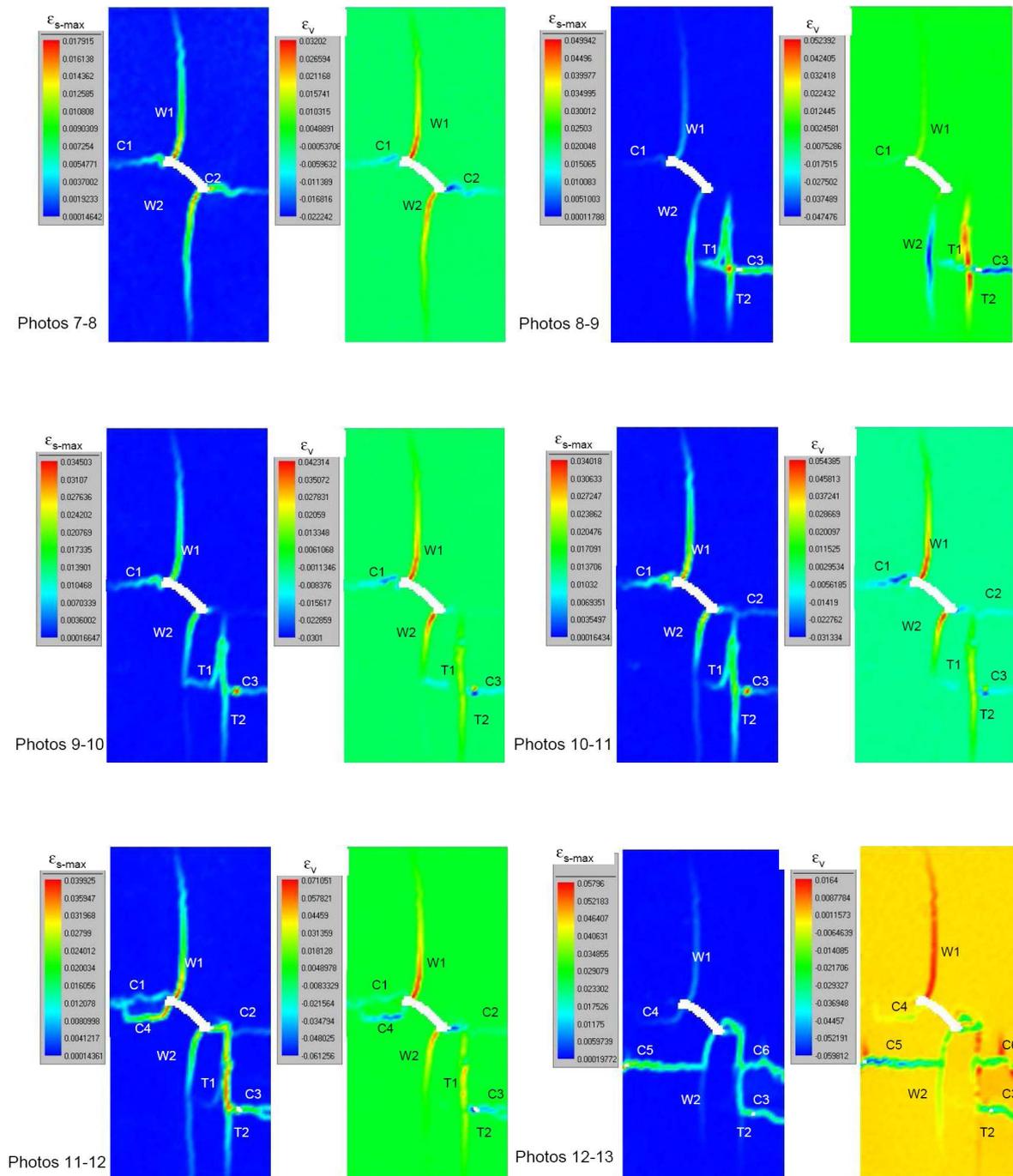


Figure 5.24. Essai Cpir1-E-45-02. Déformations issues des analyses de chaque couple de photos. Déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$  à gauche) et déformation volumique ( $\epsilon_v$  à droite).



Taille de pixel	Pas de la grille (pixels)	Dimension du motif
28 x 28 $\mu\text{m}^2$	10 pixels (0.28 mm)	20x20 pixel <sup>2</sup> (0.56 x 0.56 mm <sup>2</sup> )

Figure 5.24. Essai Cpir1-E-45-02. Déformations issues des analyses de chaque couple de photos. Déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$  à gauche) et déformation volumique ( $\epsilon_v$  à droite).(Suite)

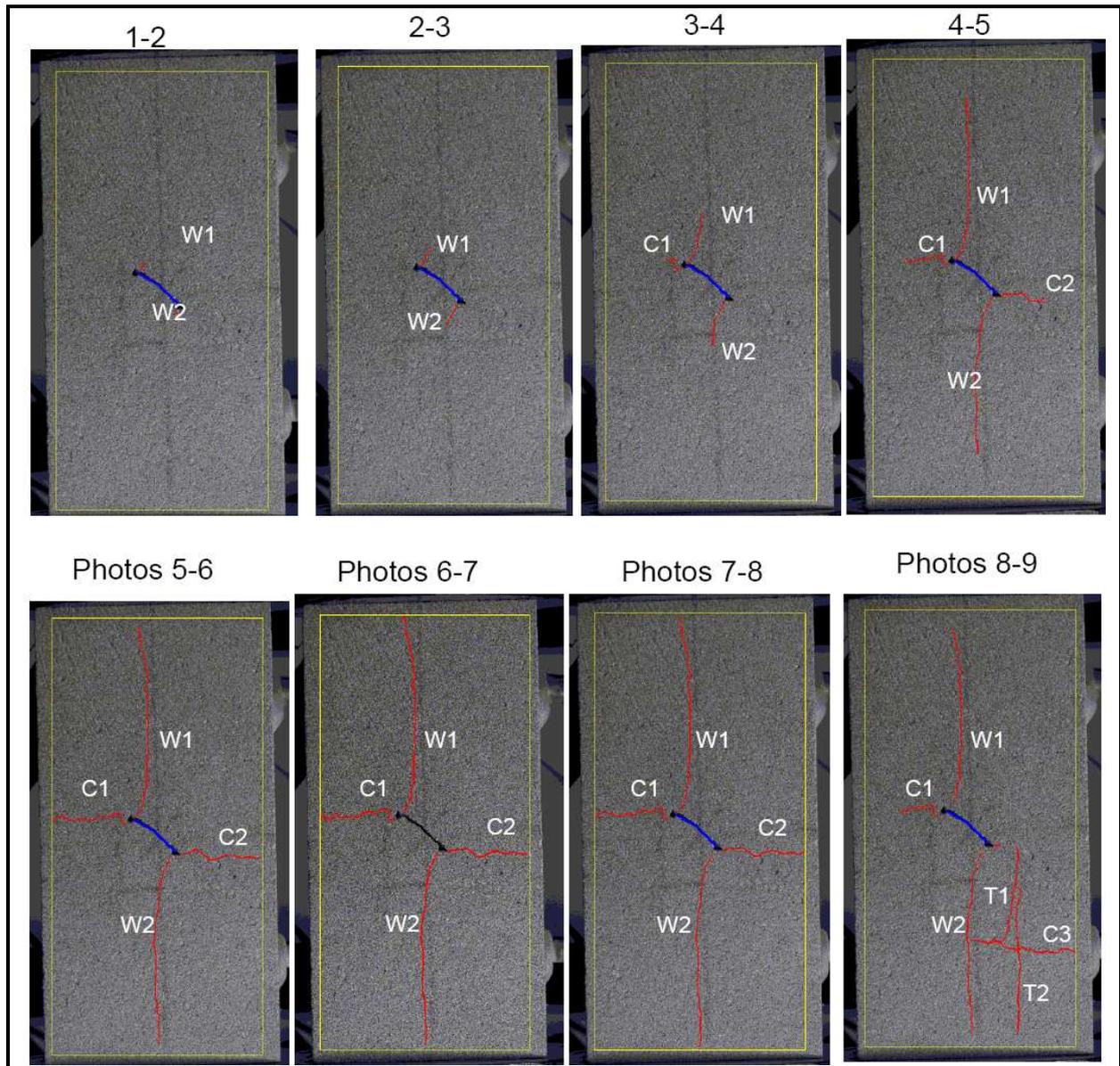


Figure 5.25. Essai Cpir1-E-45-02. Evolution des fissures identifiées par la technique DIC-F.  $K_{min} = 2 \mu\text{m}$ .

Après la première chute de contrainte, la courbe contrainte-déformation entre les photos 5 et 8 est quasi linéaire avec une pente de la courbe contrainte - déformation plus faible que celle observée dans la première partie (entre les photos 1-4). Cette phase correspond au développement des fissures et des bandes de compaction. L'accroissement stable des fissures  $W1-W2$  et des bandes  $C1-C2$  est observé lorsque nous réalisons des analyses des images enregistrées entre les photos 5 et 6. Nous constatons que les bandes  $C1$  et  $C2$  arrivent aux bords de l'échantillon lors de la prise de l'image n°6. Les analyses des photos 6-7 et 7-8 montrent des faibles progressions des wing cracks  $W1-W2$  vers les extrémités de l'échantillon et une compaction dans les zones des bandes  $C1$  et  $C2$ . L'activité acoustique ( $dN_C$  et  $dE_{abs}$ ) dans cette phase est généralement moins forte que celle enregistrée entre les photos 4 et 6. La Figure 5.27 montre les parties visibles des deux fissures  $W1-W2$  dans la photo 6 aux pointes de l'entaille. Il est, par contre, impossible de détecter, sans utiliser les techniques DIC, les bandes de compaction en regardant cette photo.

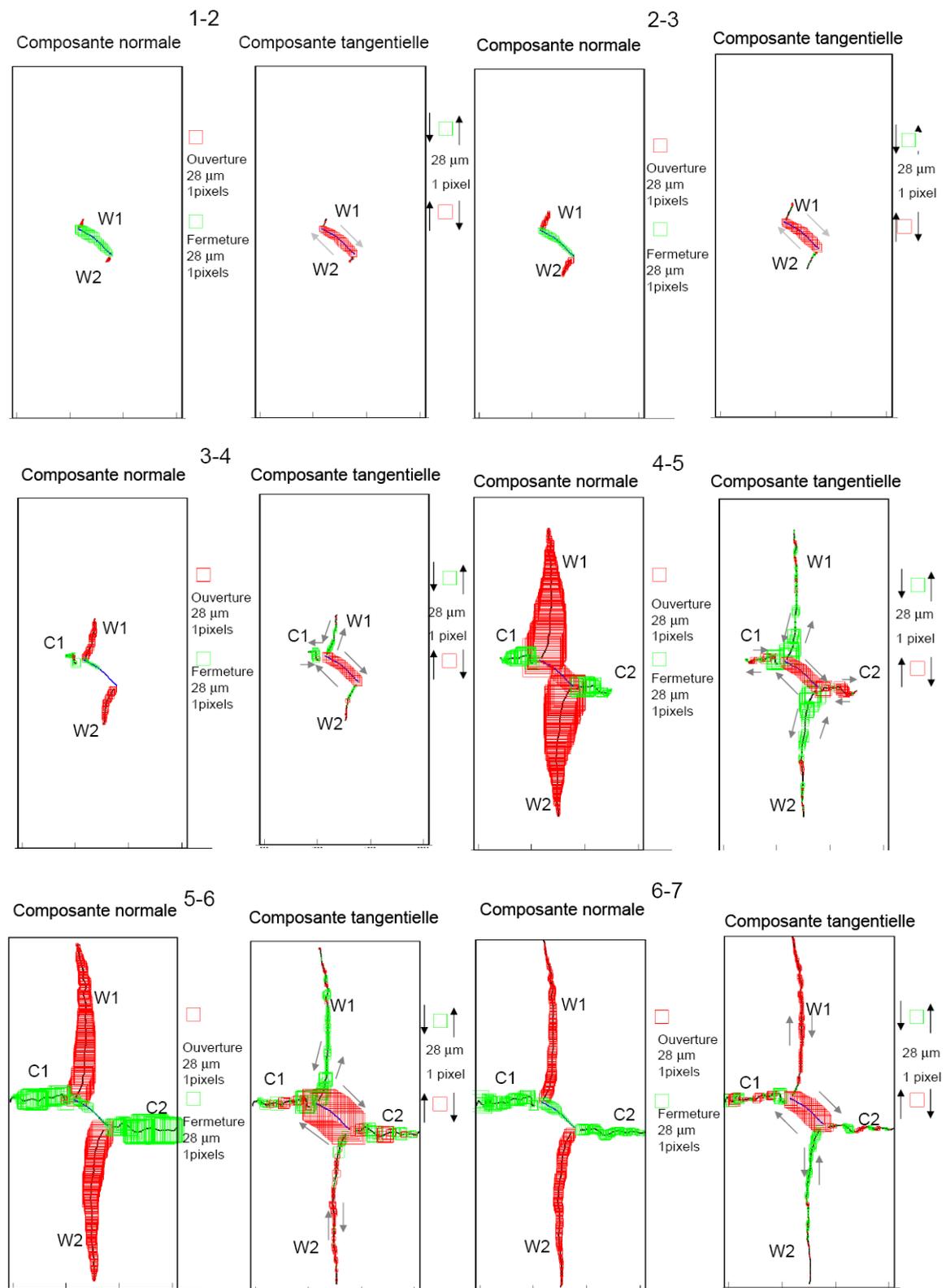


Figure 5.26. Essai Cpir1-E-45-02. Composantes des sauts de déplacement le long des fissures.

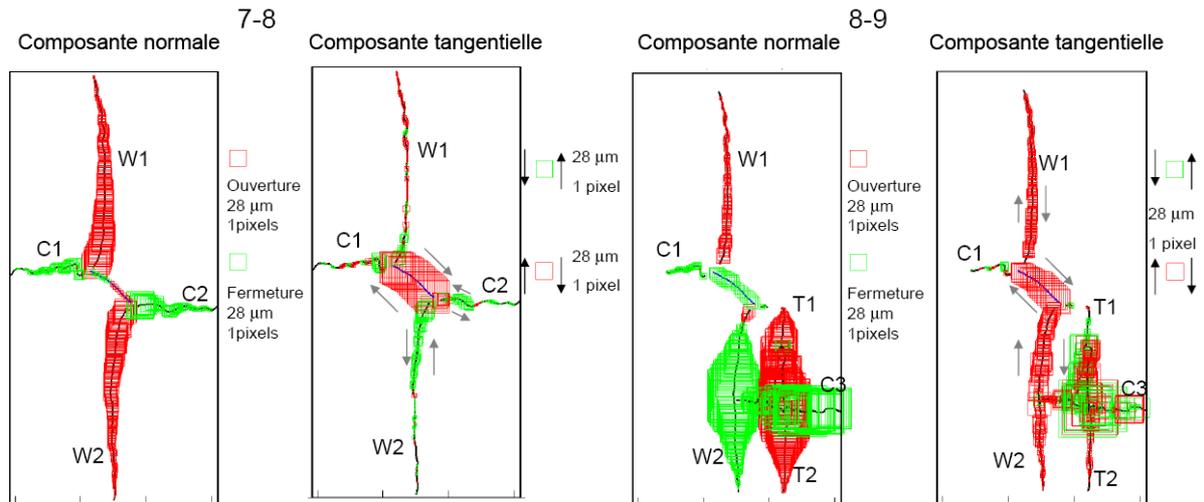


Figure 5.26. Essai Cpir1-E-45-02. Composantes des sauts de déplacement le long des fissures. (Suite).

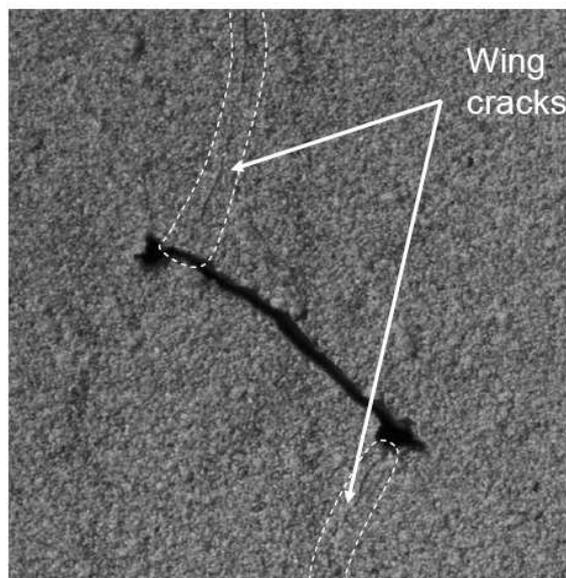


Figure 5.27. Essai Cpir1-E-45-02. Deux wing cracks à peine détectables à l'œil aux pointes de l'entaille et bandes de compaction invisibles dans la photographie 6.

Lors de la deuxième chute de contrainte entre les photos 8 et 9, deux fissures de  $T1$  et  $T2$  et une nouvelle bande de compaction  $C3$  se produisent soudainement dans la partie inférieure de l'échantillon. La fissure  $W1$  s'ouvre mais la fissure  $W2$  se ferme partiellement. Les bandes  $C1$  et  $C2$  sont très peu actives dans cette période.

Aucune nouvelle fissure n'apparaît dans les analyses des photos 9-11. En fin d'essai, de nouvelles bandes de compaction ( $C4$ ,  $C5$  et  $C6$ ) se forment lors des chutes de contrainte (Figure 5.22) et lors des sauts des activités des EA observées entre photos 11-12 et 12-13 (Figure 5.23).

Les composantes tangentielles des sauts de déplacement le long de chaque fissure montrent le glissement relatif des deux côtés d'une fissure. Nous constatons une complexité dans le sens de glissement des bandes de compaction qui est liée principalement à l'irrégularité de leur géométrie. La Figure 5.28 présente un exemple issu d'une analyse des photos 5 et 6. Nous observons, en regardant les vecteurs de déplacements dans cette zone, que la partie supérieure de la zone descend presque

verticalement. Une discontinuité est nettement visible sur le champ de déplacement vertical. La discontinuité observée dans le champ de déplacement horizontal est très faible, elle est liée probablement aux incertitudes de l'analyse DIC dans cette zone. Cependant, l'analyse DIC-F indique que le glissement n'est pas nul et qu'il dépend de l'orientation locale de la bande par rapport à l'axe verticale.

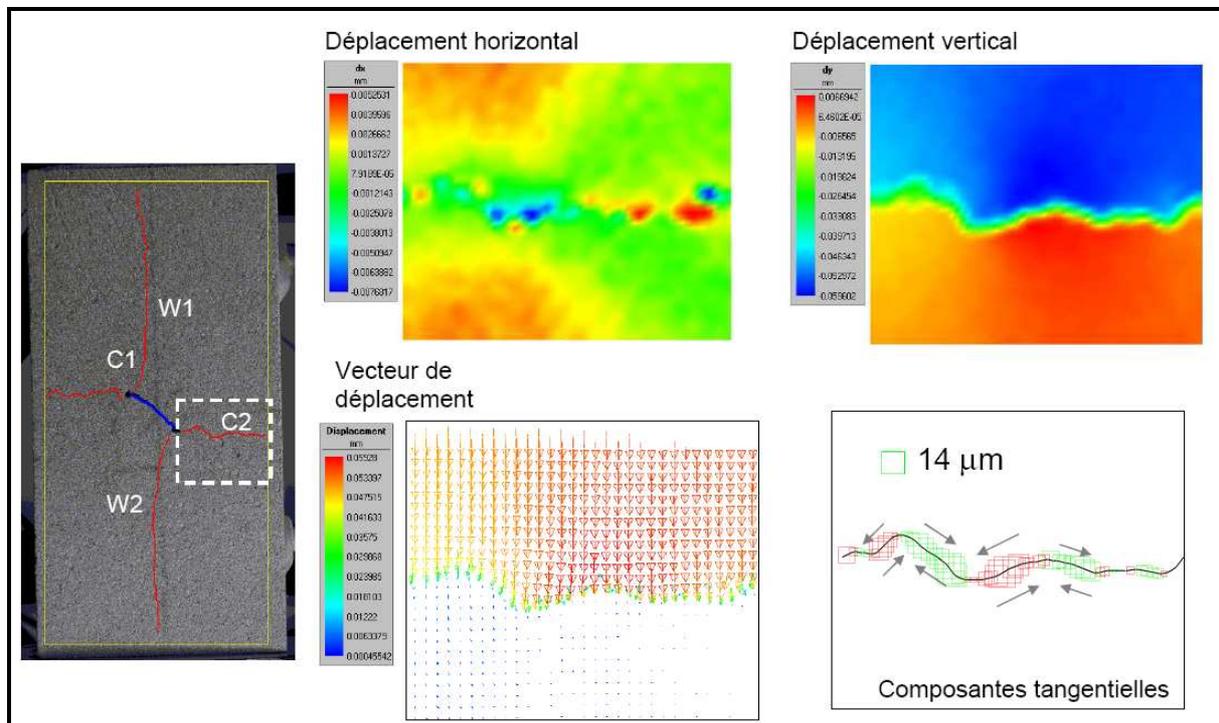


Figure 5.28. Essai Cpir1-E-45-02. Champs de déplacements autour de la bande C2 (zone encadrée par les tirets blancs) et sens de glissement relatif de deux côtés de cette bande entre les photos 5 et 6.

- **Etude par Tomographie RX**

Dans l'essai Cpir1-E-45-02, l'échantillon a été scanné par tomographie RX avant et après l'essai. La Figure 5.29 montre trois coupes tomographiques verticales puis horizontales de l'échantillon avant le chargement. La résolution spatiale (taille du voxel) est de  $63 \times 63 \times 63 \mu\text{m}^3$ . A cette résolution, le matériau est relativement homogène, à l'exception d'une grosse inclusion de forte densité (plus claire dans les images V2 et H2). La présence de cette inclusion est dans ce cas intéressante pour examiner l'influence d'une forte hétérogénéité sur la fissuration. La Figure 5.30 présente les mêmes coupes tomographiques de l'échantillon après l'essai. Nous constatons que cette inclusion est située au niveau des fissures T1, T2 et de la bande de compression C3. Une telle discontinuité de la matière engendre des zones de concentration de contrainte et peut donc provoquer l'initiation de fissures. Cependant, aucun effet de cette discontinuité sur l'évolution des fractures principales (W1-2 et C1-2) n'est remarqué.

Nous apercevons que les fissures de traction T1 et T2 ne traversent pas l'inclusion mais suivent sa frontière. Les fissures de traction sont très visibles dans les coupes tomographiques. Les bandes de compaction très fines indiquées par les flèches apparaissent légèrement plus claires, ce qui signifie que la densité est plus élevée. La réduction de la porosité dans ces zones est à l'origine de l'effondrement de pores et l'écrasement de grains. La Figure 5.31 représente en 3D la vue à  $0^\circ$  et la vue à  $30^\circ$  des fissures ouvertes après la rupture de l'échantillon. Ces images confirment que les fissures wing cracks ont bien un caractère bidimensionnel.

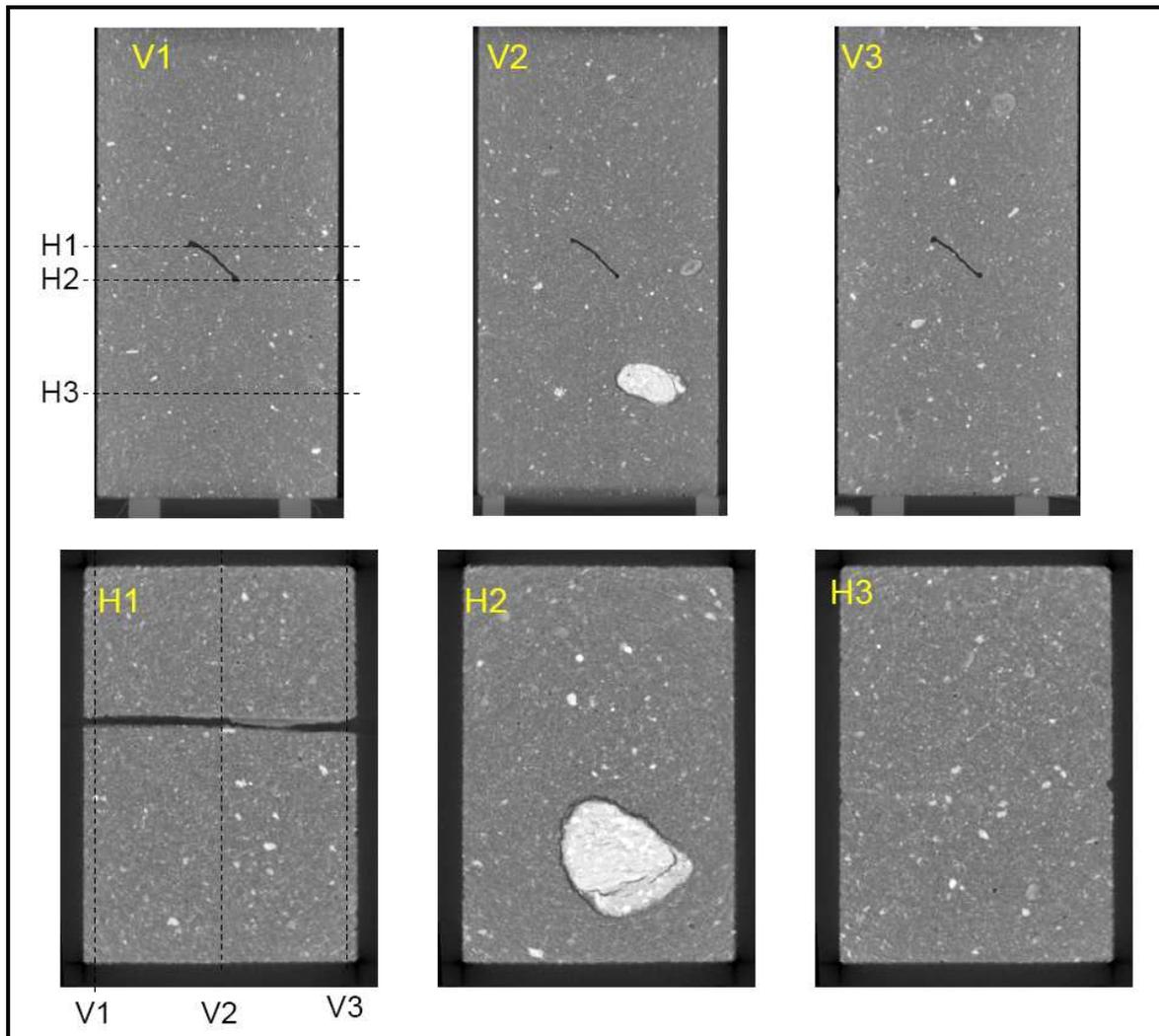


Figure 5.29. Essai Cpir1-E-45-02. Trois coupes tomographiques verticales (V1, V2, V3) et trois coupes tomographiques horizontales (H1, H2, H3) de l'échantillon avant l'essai (résolution spatiale de  $63 \times 63 \times 63 \mu\text{m}^3$ ).

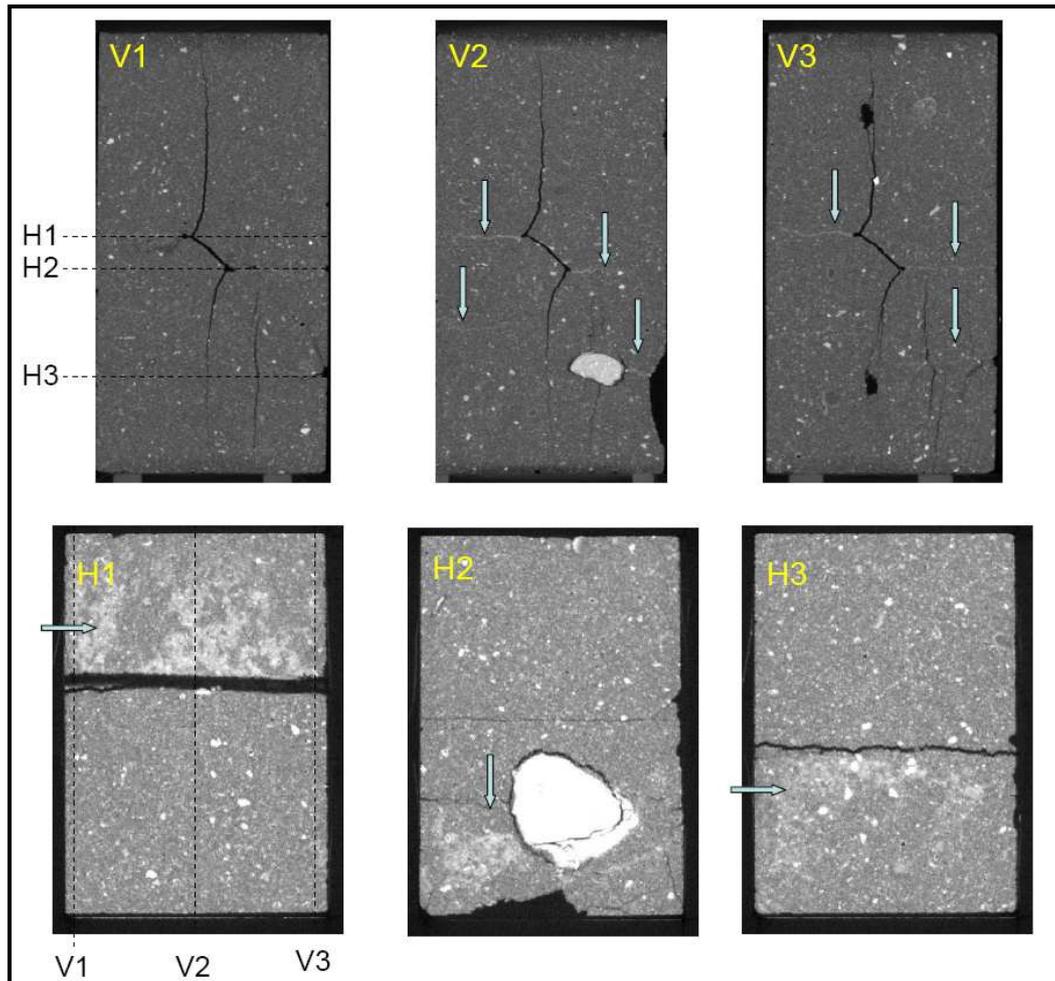


Figure 5.30. Essai Cpir1-E-45-02. Trois coupes tomographiques verticales (V1, V2, V3) et trois coupes tomographiques horizontales (H1, H2, H3) de l'échantillon après l'essai (résolution spatiale de  $63 \times 63 \times 63 \mu\text{m}^3$ ). Les zones plus claires indiquées par les flèches correspondent aux zones de compaction.

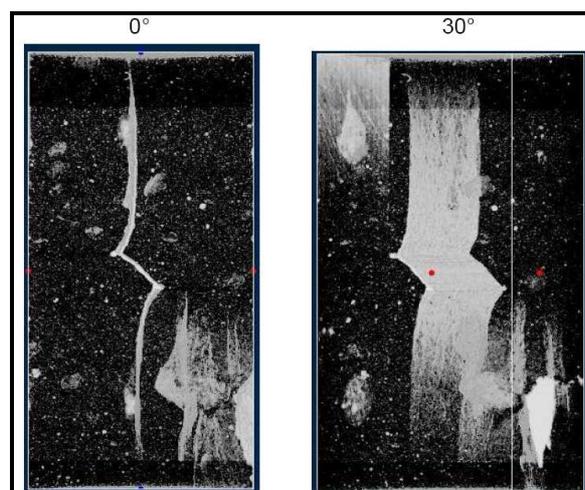


Figure 5.31. Essai Cpir1-E-45-02. Visualisation par tomographie RX de l'échantillon après rupture. Vue à 0° et à 30°.

### 5.3.3. Echantillons comportant deux entailles

Le Tableau 5.3 présente un récapitulatif des techniques expérimentales, la vitesse de chargement et la contrainte au premier pic dans trois essais sur les échantillons comportant deux entailles. Dans tous les essais, les analyses DIC confirment que l'apparition de premières fissures ou de premières bandes de compaction a lieu systématiquement lors de la première chute de contrainte.

Nom	Techniques de mesures		Vitesse de chargement (mm/min)	Contrainte au premier pic $\sigma_p$ (MPa)
	EA	Tomographie RX		
Cpir2-E-45-01	-	Avant	0.05	7.4
Cpir2-E-45-02	Oui	Avant et après	0.1	5.7
Cpir2-E-45-03	Oui	Avant	0.05	7.6

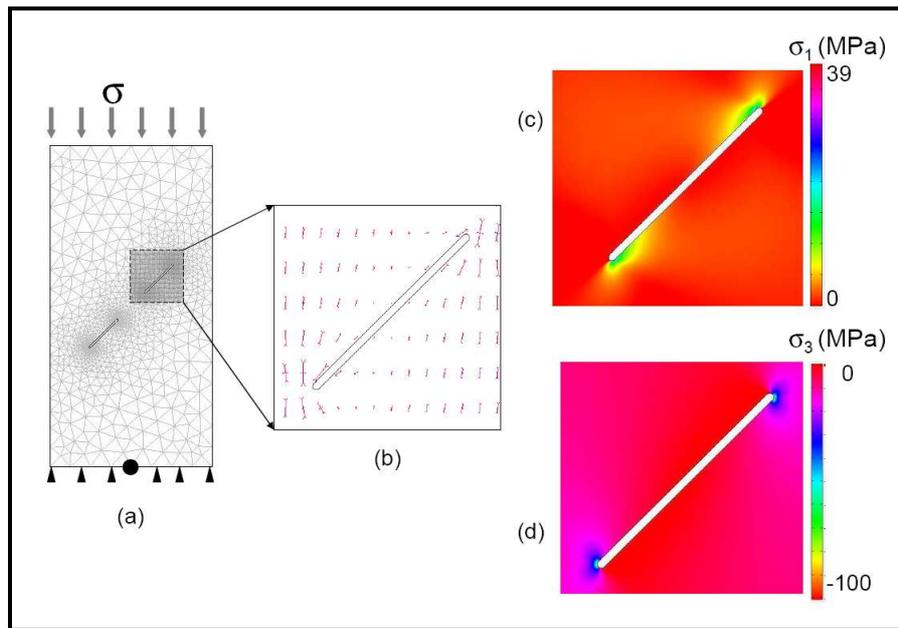
Tableau 5.3. Bilan des techniques expérimentales utilisées.

#### 5.3.3.1. Observations générales

Comme pour les essais discutés précédemment, avant d'aborder les observations sur les fissures, nous présentons les résultats obtenus à partir d'une simulation 2D en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis réalisée avec cette géométrie. La contrainte de compression utilisée dans ce modèle est de 8 MPa, ce qui est proche de la valeur du premier pic de contraintes dans les essais Cpir2-E-45-01 et Cpir2-E-45-03. Comme la géométrie de l'échantillon est symétrique, les contraintes autour des deux entailles sont identiques, nous présentons dans la Figure 5.32 les contraintes principales majeure et mineure de l'entaille supérieure. Les concentrations de contrainte sont mises en évidence aux pointes de cette entaille. Sur la carte de la contrainte majeure ( $\sigma_1$ ), deux zones de fortes tractions (39 MPa) sont observées. Nous remarquons sur la carte des contraintes mineures ( $\sigma_3$ ) la présence de deux zones de fortes compressions (-100 MPa).

Les figures 5.33-35 présentent pour chaque essai les résultats issus des analyses DIC entre les photos acquises au début de chargement et à la rupture. Le pas de la grille d'analyse est systématiquement de 40 pixels et la taille du motif est de 20x20 pixel<sup>2</sup>. Deux types de fissures sont à nouveau observés aux pointes des entailles: (i) les wing cracks s'initient dans les zones de forte traction prédites par la simulation EF et se propagent suivant la direction de charge (verticale) (marquées « W » sur les images) ; (ii) les bandes de compaction (marquées « C » sur les images) se trouvent dans les zones de forte compression aux pointes des entailles mais aussi entre les wing cracks et les bords de l'échantillon. Ces bandes se propagent dans la direction horizontale, *i.e.*, perpendiculairement à la direction de charge.

Dans les essais Cpir2-E-45-02 et Cpir2-E-45-03, une fissure verticale reliant les deux bandes C2 et C3 dans le pont de roche apparaît en toute fin d'essai. Les déformations principales dans la zone de cette fissure sont « positive » (ouverture) dans un sens et « négative » (compression) dans l'autre ce qui signifie que l'on est en présence d'un cisaillement. Dans la suite, nous présentons les analyses plus fines effectuées pour l'essai Cpir2-E-45-03. Ces analyses nous aideront à mieux comprendre l'évolution de l'endommagement en cours de l'essai. Pour les autres essais, les résultats se trouvent en annexe A4.



Dimension	Contrainte appliquée	Condition	Nombre d'éléments	type de maillage
100 x 50 x 35 mm	8 MPa	Contrainte plane	4340	Triangle à 6 nœuds

Figure 5.32. Contraintes principales autour de l'entaille supérieure issues d'un calcul élastique linéaire isotrope : (a) géométrie de l'échantillon et conditions aux limites ; (b) directions des contraintes principales ; (c) contraintes principales majeurs ( $\sigma_1$ ) ; (d) contraintes principales mineures ( $\sigma_3$ ).

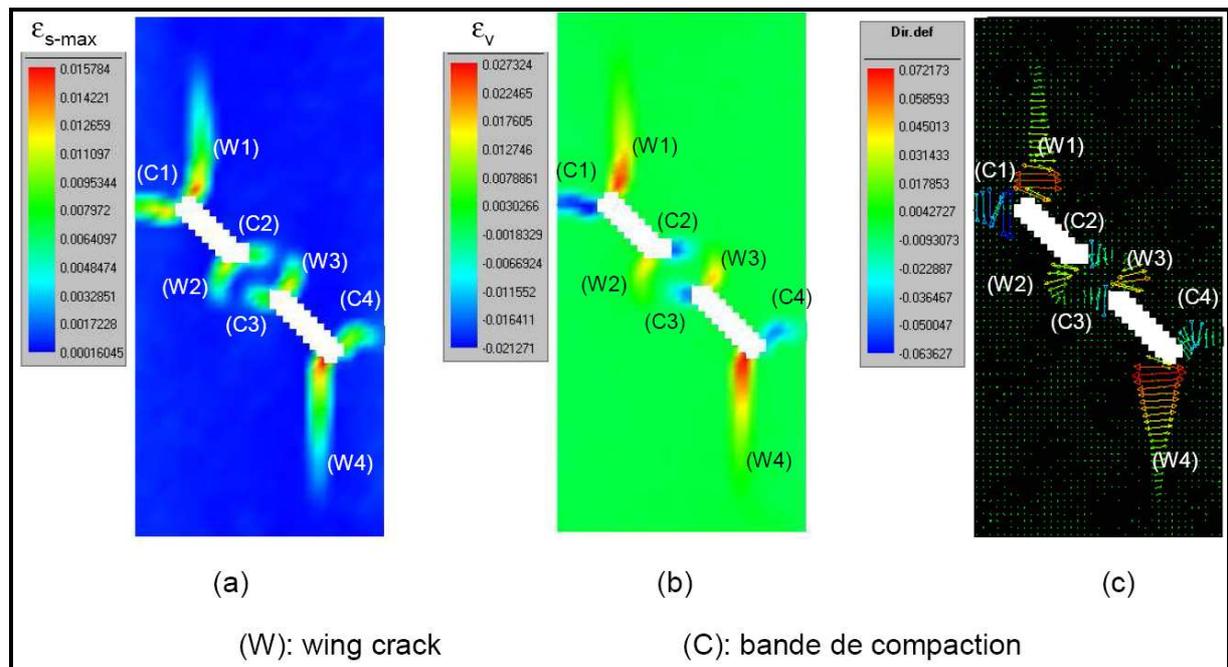


Figure 5.33. Essai Cpir2-E-45-01. (a) Déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), (b) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), (c) direction et intensité des déformations principales.

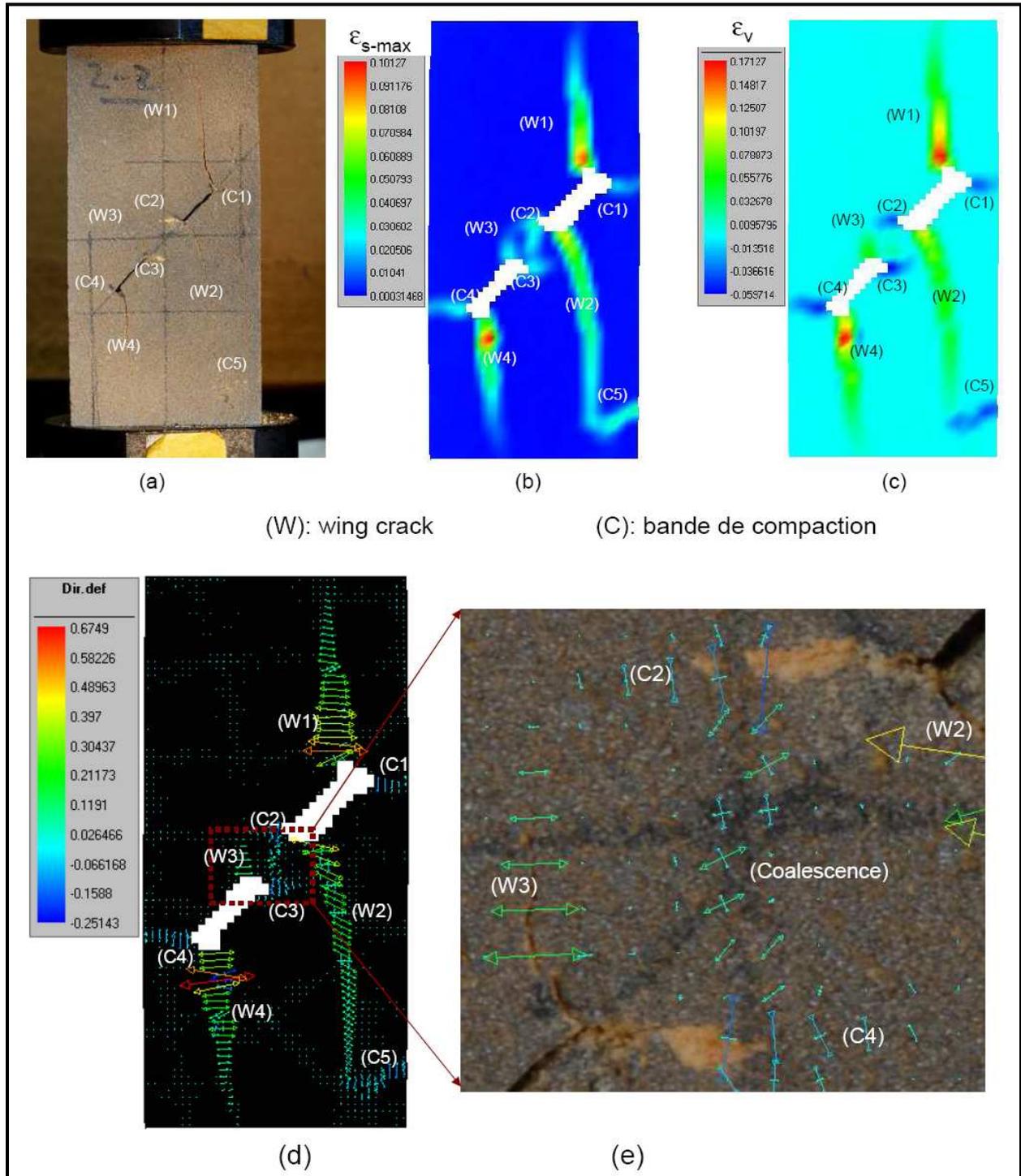


Figure 5.34. Essai Cpir2-E-45-02. (a) Photo de la rupture de l'échantillon, (b) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), (c) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), (d) direction et intensité des déformations principales, (e) zoom sur la zone à rupture dans le pont de roche.

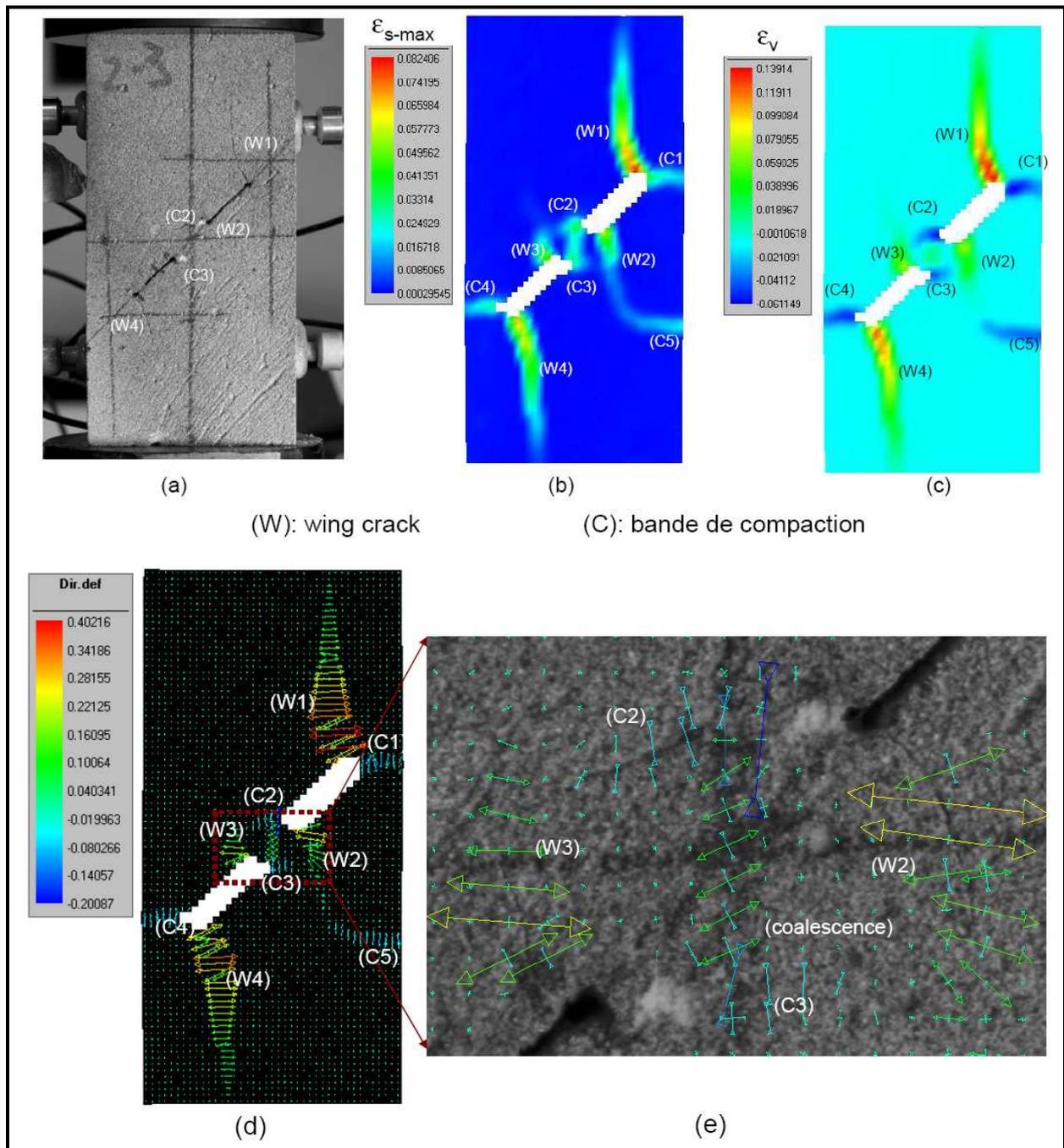


Figure 5.35. Essai Cpir2-E-45-03. (a) Photo de la rupture de l'échantillon, (b) déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), (c) déformation volumique ( $\epsilon_v$ ), (d) direction et intensité des déformations principales, (e) zoom sur la zone à rupture dans le pont de roche.

### 5.3.3.2. Essai Cpir2-E-45-03

Dans l'essai Cpir2-E-45-03, nous avons utilisé trois techniques de mesures : l'EA, la tomographie et la technique DIC. Six capteurs piézoélectriques ont été posés sur trois surfaces de l'échantillon (Figure 5.36). La Figure 5.37 présente trois coupes tomographiques verticales de l'échantillon (la taille de voxel est de  $63 \times 63 \times 63 \mu\text{m}^3$ ) qui indiquent que le matériau est relativement homogène. La Figure 5.38 présente la courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale avec l'indication des photos utilisées pour l'analyse DIC. Les taux de coups des EA ( $dN_c$ ) et de l'énergie ( $dE_{abs}$ ) enregistrés par le capteur 5 sont présentés dans la Figure 5.39 .

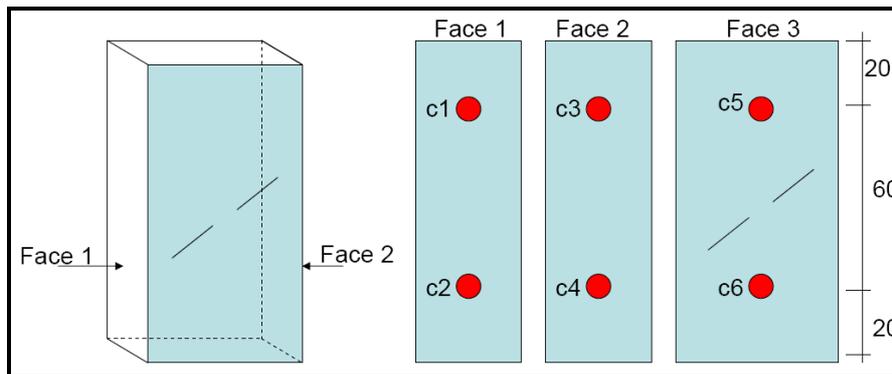


Figure 5.36. Essai Cpir2-E-45-03. Position des capteurs acoustiques sur trois faces de l'échantillon (la face 3 est opposée à celle étudiée par corrélation d'images).

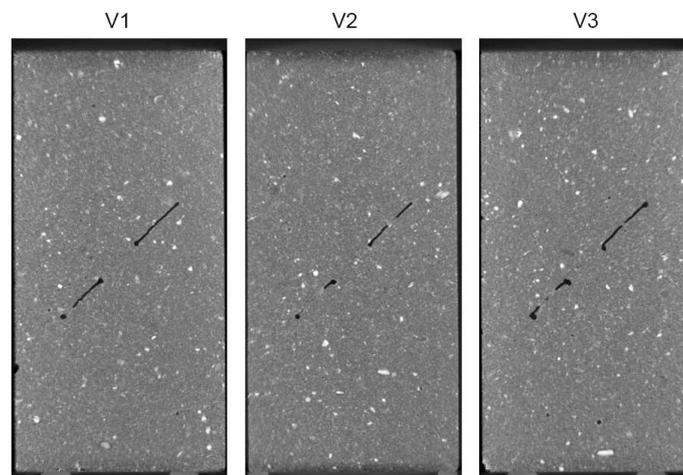


Figure 5.37. Essai Cpir2-E-45-03. Trois coupes tomographiques verticales à différentes profondeurs de l'échantillon (la taille de voxel est de  $63 \times 63 \times 63 \mu\text{m}^3$ ).

165 photos ont été enregistrées en cours de l'essai dont 13 ont été choisies pour les analyses DIC. La photo n°1 correspond au début de l'essai et la photo n°2 a été enregistrée au moment de l'augmentation importante de l'activité acoustique. Les photos 4 et 5 correspondent au premier pic et après la première chute de la contrainte axiale. Les photos 8 - 9 et 9 -10 sont enregistrées lors de la deuxième et la troisième chute de la contrainte. Les déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et volumique ( $\epsilon_v$ ) des analyses DIC des couples des images successives (1-2, 2-3, etc.) sont montrées dans la Figure 5.40. Les fissures identifiées et les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures calculées par la méthode DIC-F avec  $K_{min}=2 \mu\text{m}$  dans chaque couple de photos sont présentées dans les figures 5.41 et 5.42

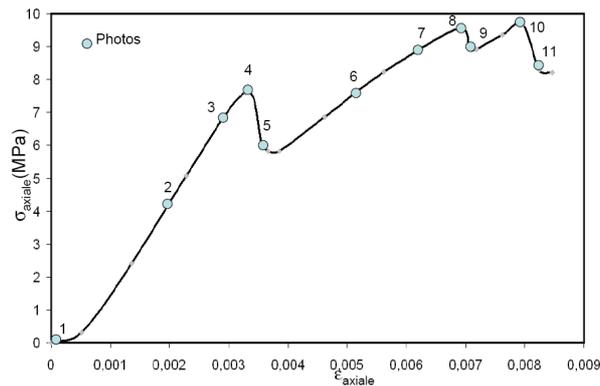


Figure 5.38. Essai Cpir2-E-45-03. Réponse mécanique : courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale mesurée par DIC.

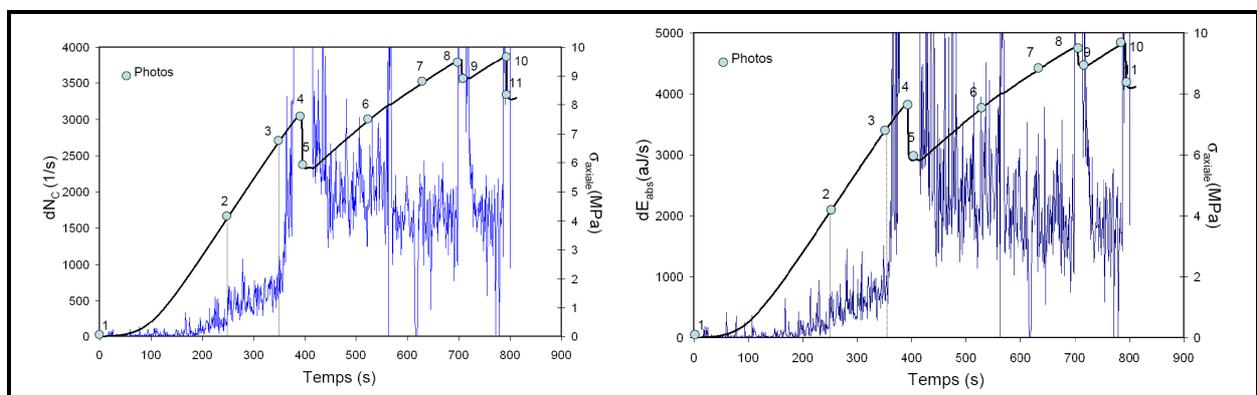


Figure 5.39. Essai Cpir2-E-45-03. Taux de coups acoustiques et contrainte axiale en fonction du temps (à gauche) ; taux d'énergie absolue et contrainte axiale en fonction du temps (à droite).

• **Evolution des fissures**

Dans l'incrément 1-2, aucune localisation de la déformation n'est visible en surface dans l'analyse DIC entre les photos 1 et 2. L'activité acoustique enregistrée dans cette phase est très faible, puis elle s'intensifie à partir de la photo 2.

Les premières discontinuités sont observées sur les champs des déformations aux pointes des entailles dans l'incrément 2-3, dans les zones où de fortes contraintes en traction sont prévues par la simulation EF (cf. Figure 5.32). Les déformations volumiques en ces zones montrent une dilatation. Dans cet incrément, l'activité acoustique augmente significativement. En utilisant la technique DIC-F, trois wing cracks  $W1$ ,  $W2$  et  $W3$ , correspondant aux discontinuités sur les champs de déformations, sont identifiées. Les deux entailles se ferment dans cet incrément.

Lors de l'incrément 3-4, la photo 3 marque les sauts de  $dN_C$ , et  $dE_{abs}$  jusqu'au pic de contrainte correspondant à la photo 4. Une nouvelle fissure de type wing crack  $W4$  est aperçue dans cette analyse. Les quatre fissures ( $W1-4$ ) se propagent dans la direction de la charge. L'ouverture de ces fissures est inférieure  $27 \mu m$  (soit 1 pixel) et les composantes tangentielles sont très faibles. Elles sont à ce stade indétectable à l'œil.

Lors de la première chute de contrainte (l'incrément 4-5), les valeurs de  $dN_C$  et  $dE_{abs}$  restent très élevées. Quatre bandes de compaction ( $CI-4$ ) sont détectées dans les zones de fortes compressions aux pointes des entailles, comme prévues par simulation EF (cf. Figure 5.32). Ces bandes se propagent dans la direction horizontale. Les deux wing cracks externes  $W1$  et  $W3$  s'ouvrent et s'accroissent

rapidement vers les extrémités de l'échantillon. Le sens de glissement entre les deux lèvres de chacun des wing cracks apparait dans un sens opposé à celui des entailles. Au contraire, le sens de glissement des bandes de compaction est généralement identique à celui des entailles. Rappelons que le glissement local des bandes de compaction dépend fortement de la complexité de leurs trajectoires (voir la Figure 5.28 dans la section 5.3.2.2. ).

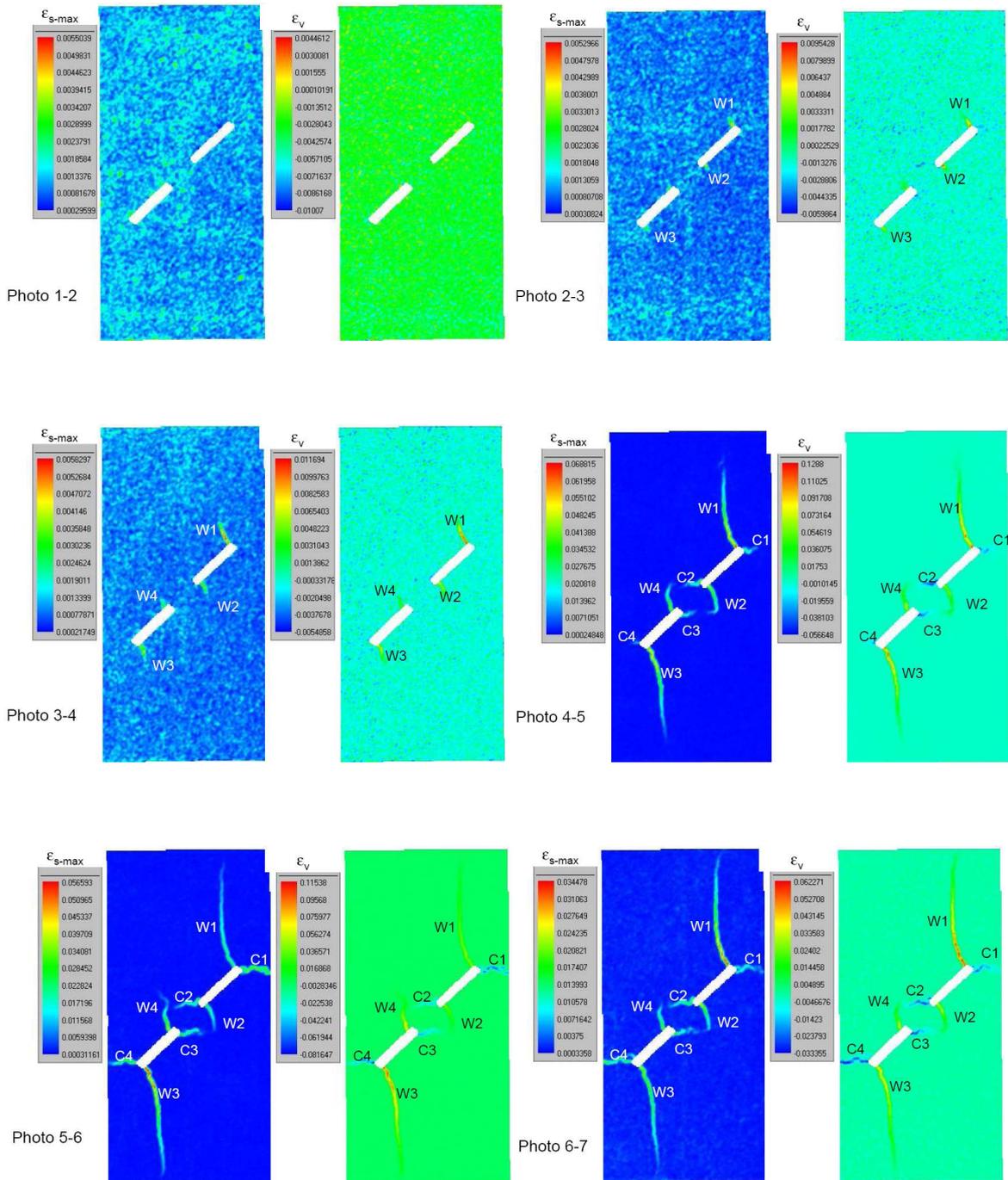


Figure 5.40. Essai Cpir2-E-45-03. Incréments de déformations issus des analyses de chaque couple de photos. Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{s-max}$  à gauche) et déformation volumique ( $\epsilon_v$  à droite).

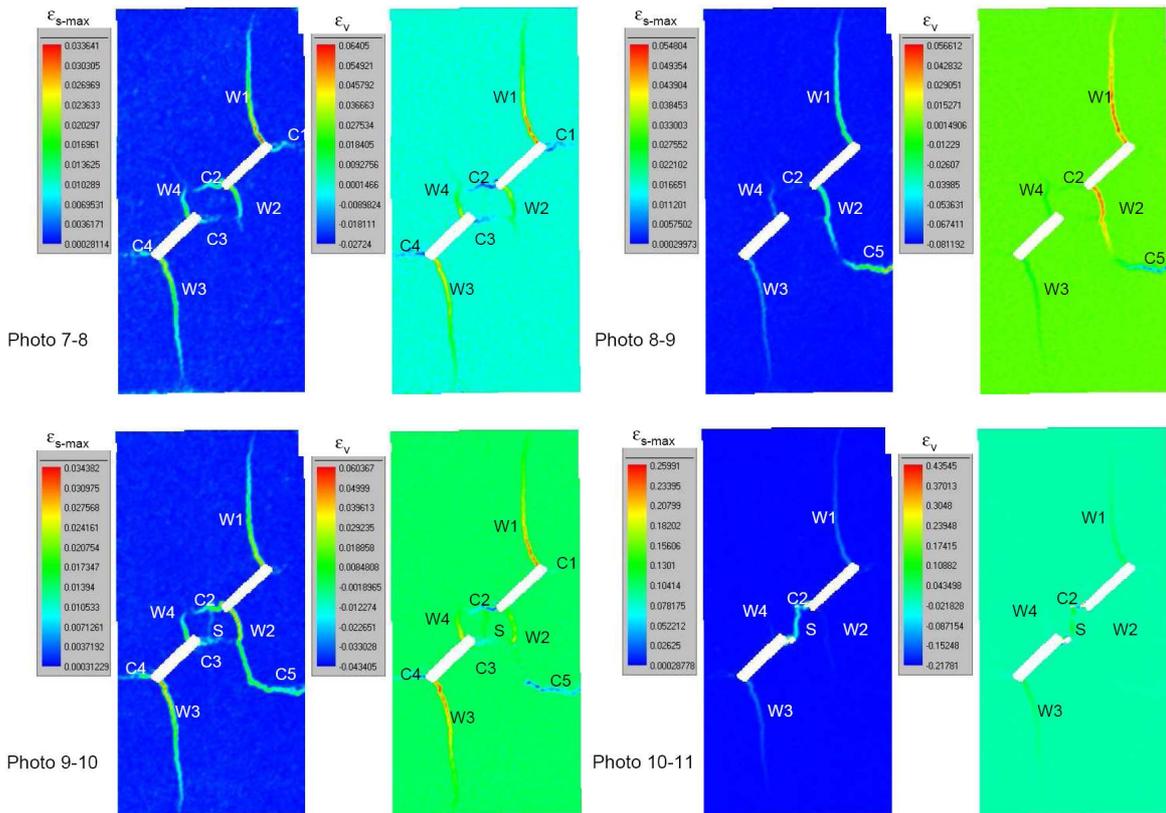


Figure 5.40. Essai Cpir2-E-45-03. Incrément de déformations issus des analyses de chaque couple de photos. Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{s-max}$  à gauche) et déformation volumique ( $\epsilon_v$  à droite). (Suite)

Dans les incréments 5-6, 6-7 et 7-8, nous remarquons le développement des fissures. Les wing cracks externes  $W1$  et  $W3$  se propagent jusqu'aux extrémités supérieure et inférieure de l'échantillon. Cependant, les wing cracks internes  $W2$  et  $W4$  s'arrêtent quant à eux à la hauteur des bandes de compaction  $C2$  et  $C3$ . Les bandes  $C1$  et  $C4$  se développent jusqu'aux bords de l'échantillon. Les bandes  $C2$  et  $C3$  s'arrêtent de croître lorsqu'elles croisent les wing cracks  $W3$  et  $W4$ .

L'incrément 8-9 correspond à la deuxième chute de contrainte, accompagnée d'une intensification de  $dN_C$  et  $dE_{abs}$ . Une nouvelle bande de compaction  $C5$  apparaît et relie le wing cracks  $W2$ . Les fissures  $W1$  et  $W2$  continuent à s'ouvrir alors que les fissures  $W3$  et  $W4$  se referment partiellement.

L'incrément 9-10 marque l'apparition de la fissure nommée «  $S$  » reliant les deux bandes  $C2$  et  $C3$  dans la zone encadrée par les wing cracks  $W2$ - $W4$  et par les bandes  $C2$ - $C3$ . Toutefois, les sauts de déplacement le long de cette fissure sont comparables et encore très faibles. La propagation de cette fissure dans cet incrément est en mode mixte (mode I et mode II).

L'incrément 10-11 correspond à la dernière chute de contrainte et aux sauts des activités acoustiques ( $dN_C$  et  $dE_{abs}$ ). Les composantes tangentielles de la fissure «  $S$  » sont presque deux fois plus importantes que les composantes normales, ce qui indique que cette fissure se propage dans cette phase plutôt en mode de cisaillement (mode II). Dans les deux images de l'échantillon après l'essai (Figure 5.43), les fissures sont bien bidimensionnelles.

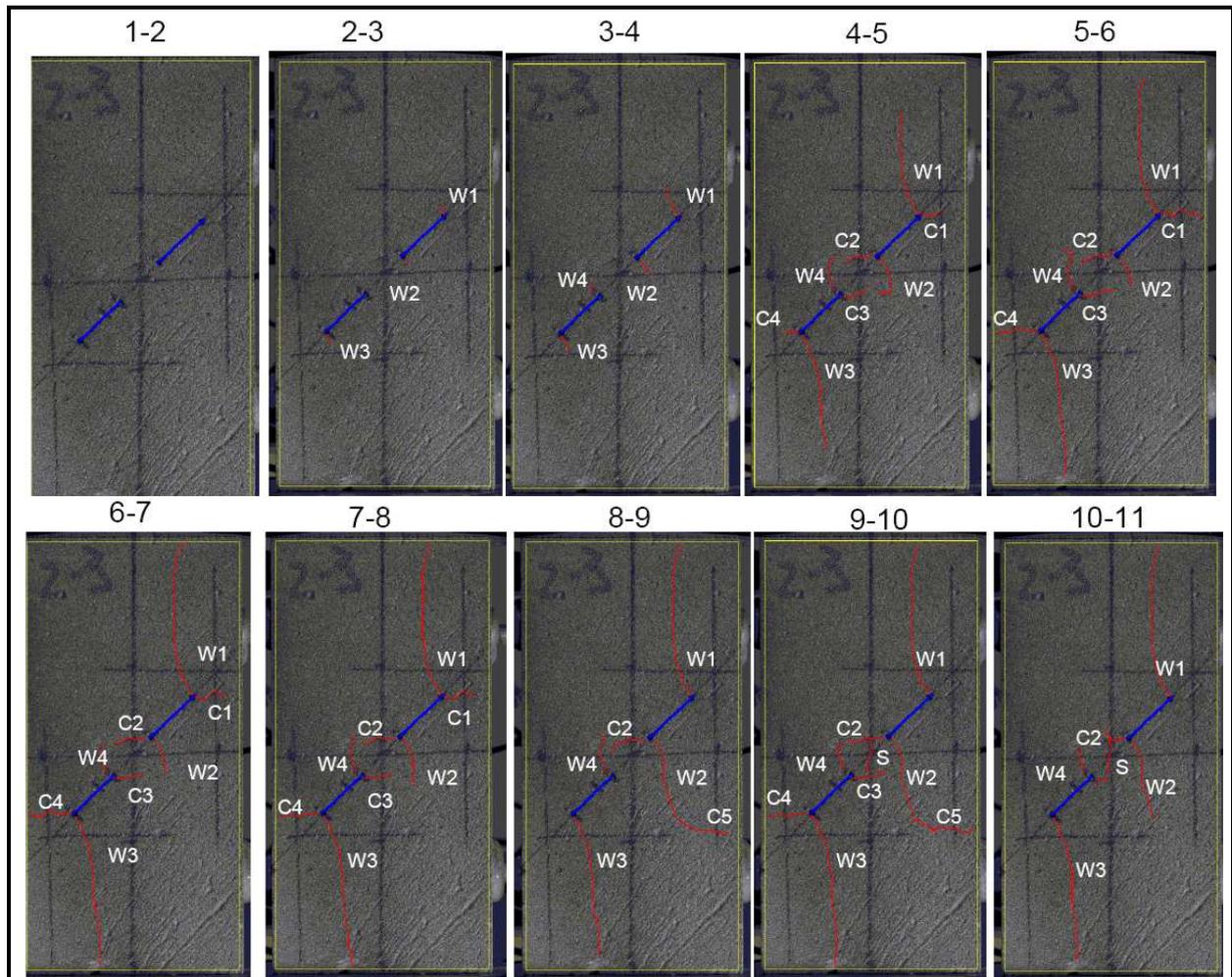


Figure 5.41. Essai Cpir2-E-45-03. Evolution des fissures identifiées par DIC-F.  $K_{min}=2\mu m$ .

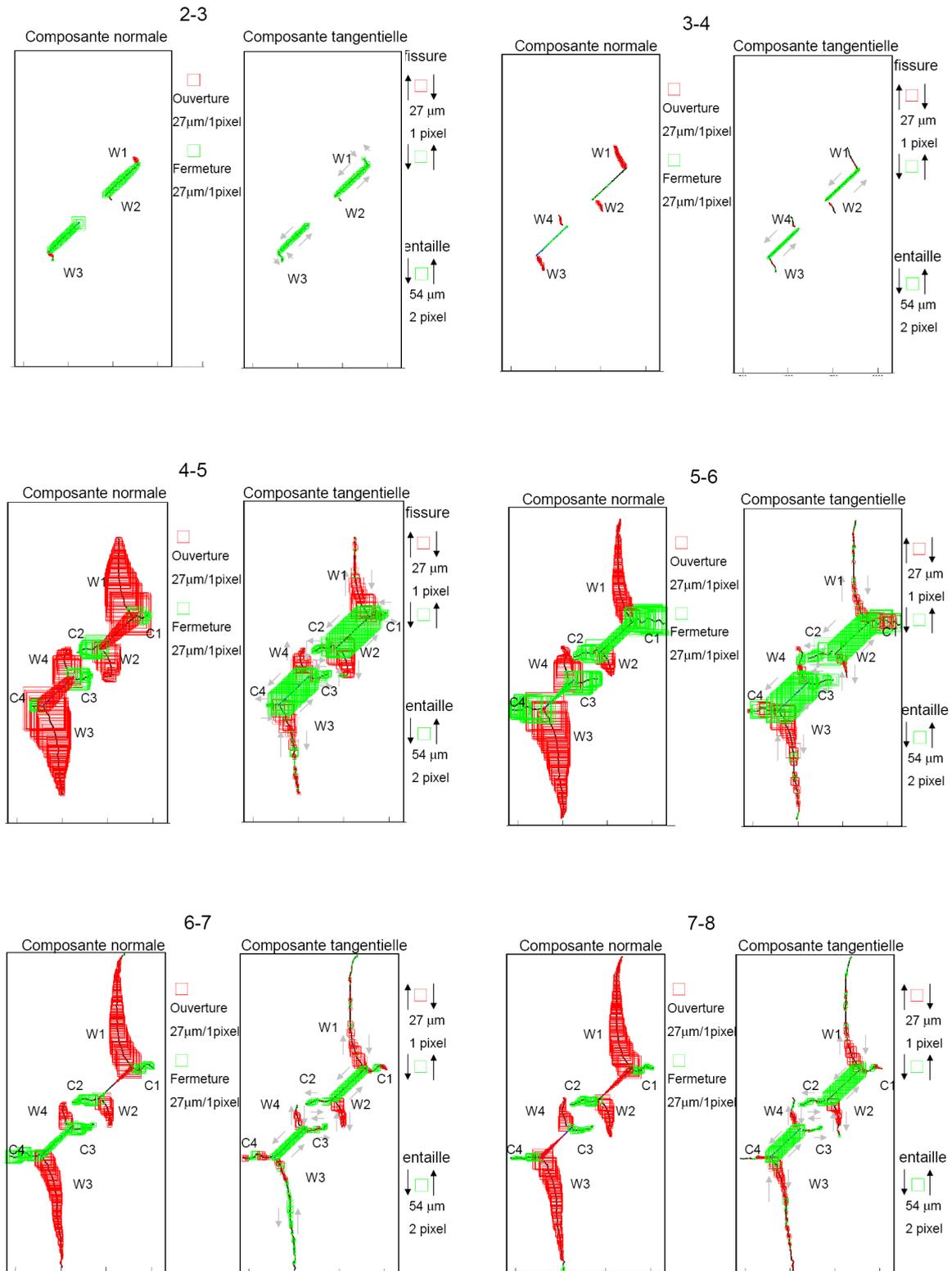


Figure 5.42. Essai Cpir2-E-45-03. Composantes de saut de déplacement le long des fissures.

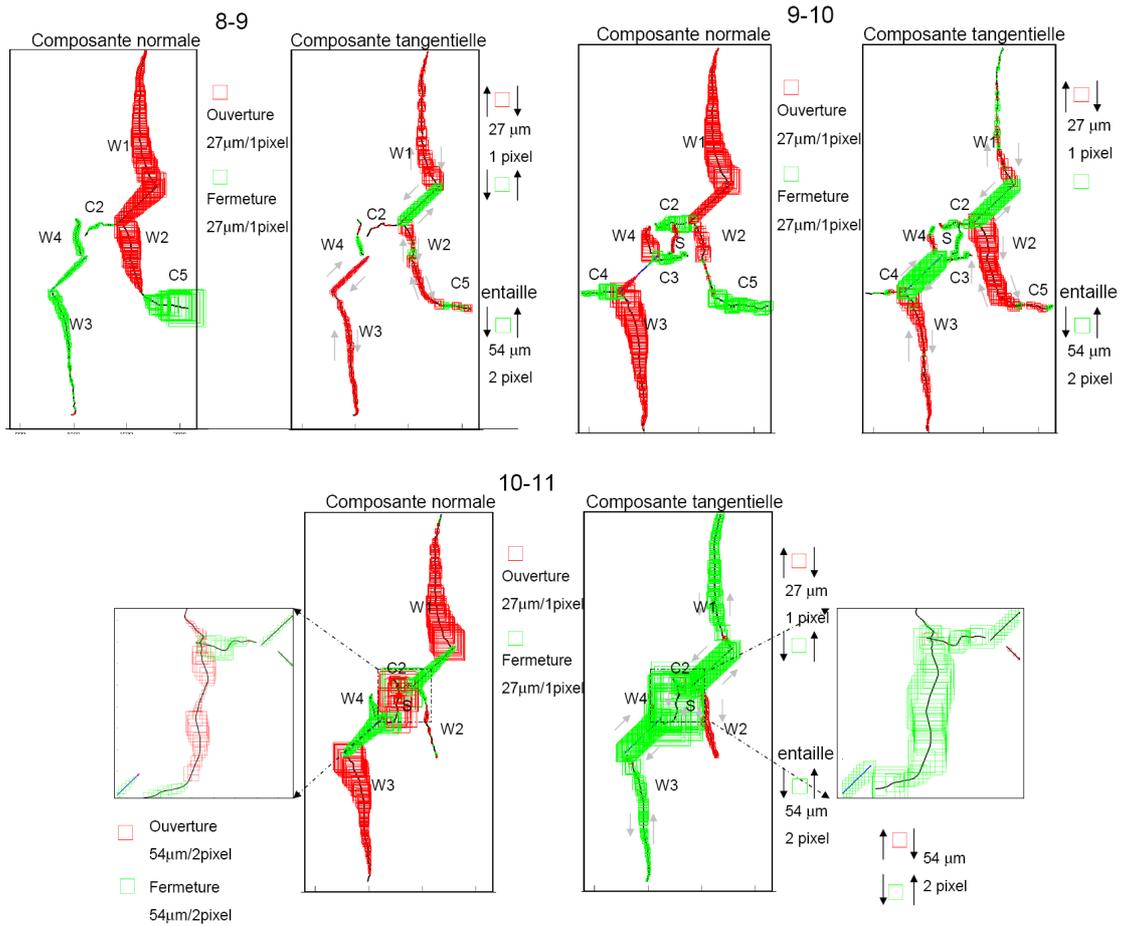


Figure 5.42. Essai Cpir2-E-45-03. Composantes de saut de déplacement le long des fissures.(Suite).



Figure 5.43. Essai Cpir2-E-45-03. Photos de l'échantillon après essai.

## 5.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques résultats d'une étude expérimentale de la fissuration dans le Tuf et dans le CPIR09. Trois échantillons du Tuf et six de CPIR09 qui présentent des entailles rectilignes inclinées à 45° ont été testés soit en compression en déformation plane (pour les essais sur le Tuf) soit en compression uniaxiale (pour les essais sur le CPIR09). En cours de chargement, les mesures des EA et des champs cinématiques en 2D ont été effectuées. Les fissures, représentées par des discontinuités sur les champs cinématiques, sont identifiées et les sauts de déplacements le long de ces discontinuités sont quantifiés par la technique DIC-F. L'analyse spatio-temporelle des composantes normale et tangentielle des sauts de déplacement permet de mieux comprendre l'évolution de fissures.

Dans l'exemple présenté sur **le Tuf**, les fissures primaires de type wing crack apparaissent bien avant la chute de contrainte aux pointes de l'entaille centrale où se trouvent les fortes sollicitations en traction prédites par la simulation EF. L'apparition et la propagation des wing cracks peuvent être détectées par un accroissement remarquable de l'activité des EA. Les composantes du saut de déplacement mettent en évidence le mode d'ouverture des fissures wing cracks, et également le glissement relatif de ces fissures. Ces fissures se propagent de manière stable avec une vitesse relativement constante avant de se fermer partiellement lors de la chute de contrainte. Au cours du chargement, l'entaille centrale s'ouvre et est cisailée. De plus, l'utilisation de la technique DIC et son post-traitement DIC-F rend possible la caractérisation des fissures secondaires qui apparaissent après les wing cracks mais avant la coalescence. Ces fissures sont généralement invisibles dans les photos. Les fissures secondaires sont notées dans les ponts de roche, fissure dont l'initiation n'est pas localisée aux pointes des entailles. La rupture de l'échantillon, remarquée par les sauts de l'activité des EA, est gouvernée principalement par la jonction des entailles grâce à des fissures nouvellement créées dans les ponts de roche. La coalescence des deux ponts de roche conduit très vite à la rupture. Bien qu'à l'échelle macroscopique (l'échelle de l'échantillon), la coalescence soit causée par le cisaillement, des ouvertures sont également observées à l'échelle locale. Cela signifie que la coalescence peut consister en nombreuses microfissures de traction ou en un cisaillement le long d'une surface rugueuse. Pour étudier ce phénomène, il sera nécessaire d'utiliser une meilleure résolution spatiale et temporelle.

Dans l'étude sur **le CPIR09**, deux types de configuration d'entailles ont été examinés (une entaille centrale ou deux entailles). Dans le cas des échantillons qui comportent une entaille, il est très clair que les fissures primaires qui apparaissent sont systématiquement les wing cracks. Elles apparaissent dans les zones de fortes sollicitations en traction. Leur apparition est souvent détectée près du premier pic de contrainte, et elle est accompagnée d'une augmentation importante de l'activité des EA. Les wing cracks se propagent sous forme légèrement curviligne dans la direction de charge. Dans un second temps, avant que les wing cracks atteignent les extrémités de l'échantillon, des fissures secondaires, qui sont des bandes de compaction, se mettent en place dans les zones de concentration de contrainte en compression au niveau des pointes de l'entaille. Ces bandes sont à l'origine de la première chute de contrainte significative et des sauts des EA. Elles se développent perpendiculairement à la direction de charge. Lors de l'apparition des bandes de compaction, la propagation des wing cracks est progressive vers les deux extrémités de l'échantillon. Ensuite, les phénomènes sont moins reproductibles. Les fissures tertiaires sont souvent des nouvelles bandes de compaction. Dans l'essai Cpir1-E-45-02, les fissures tertiaires de traction sont remarquées à proximité d'une grosse inclusion. Les composantes tangentielles calculées pour les bandes de compaction montrent clairement le glissement à l'échelle locale. Le sens et l'amplitude du glissement dépendent forcément de la trajectoire locale des bandes de compaction. L'évolution des fissures principales (primaires et secondaires) obtenues dans les échantillons composés d'une entaille inclinée à 45° sont illustrées dans la Figure 5.44 (haut).

Dans le cas des échantillons ayant de deux entailles, les fissures primaires sont à nouveau des wing cracks externes et internes qui apparaissent bien avant la chute de contrainte. Les fissures secondaires sont des bandes de compaction externes et internes (Figure 5.44-bas). L'apparition des bandes de

compaction correspond à la première chute de contrainte et aux sauts de l'activité des EA. Tous les wing cracks externes et les bandes de compaction externes se propagent jusqu'aux extrémités des échantillons. Les bandes de compaction internes s'arrêtent lors qu'elles croisent les wing cracks internes. De nouvelles fissures en mode mixte (mode I et mode II) peuvent alors apparaître dans la zone centrale encadrée par les wing cracks internes et les bandes de compaction internes et sont à l'origine de nouvelles chutes de contrainte. Ces fissures relient les bandes de compaction internes et amènent à la rupture macroscopique des échantillons.

Les deux matériaux étudiés dans notre étude sont tous les deux très poreux. De plus, leurs porosités sont comparables (40% - 50%). Pourtant, les analyses DIC et les images tomographiques ont confirmées la présence de bandes de compaction uniquement dans les essais sur CPIR. Ce mode de rupture n'est, à notre connaissance, jamais reporté dans les travaux similaires antérieurs sur les différentes roches.

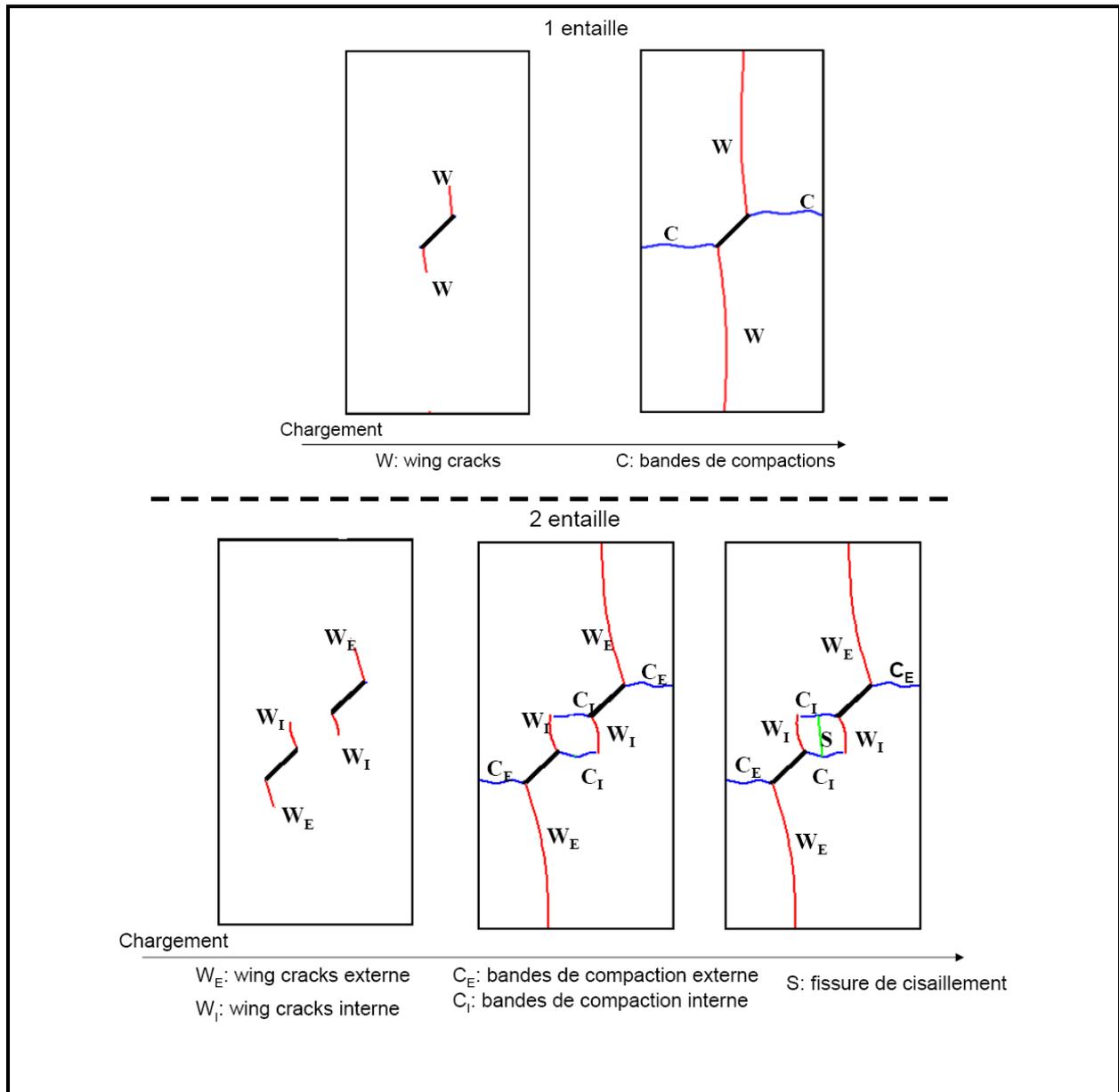


Figure 5.44. Evolution des fractures principales observées sur les échantillons de CPIR09 contenant (a) une entaille et (b) deux entailles.



# **Chapitre 6 : DE LA LOCALISATION DES DEFORMATIONS VERS LA FISSURATION**

6.1. Introduction	140
6.2. Configuration des échantillons de type Meuwissen	140
6.3. Etude sur le Tuf	143
6.3.1. Observations générales	143
6.3.2. Essai Tf-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ )	150
6.3.3. Essai Tf-tm-45-03 ( $\beta=45^\circ$ )	157
6.3.4. Essai Tf-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ )	166
6.4. Etude sur le CPIR09	178
6.4.1. Observations générales	178
6.4.2. Essai Cpir-tm-35-01	182
6.5. Conclusion	188

## 6.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale qui consiste à identifier les localisations de la déformation et leurs évolutions vers la rupture (fissures) sur des échantillons ayant une forme particulière. Cette forme des échantillons appelée « type-Meuwissen » a permis de favoriser la localisation de la déformation de cisaillement en compression uniaxiale. Ce chapitre commence par une présentation de la géométrie initialement proposée par Meuwissen et *al.*, (1998) pour les métaux, et les géométries retenues dans notre étude. Ensuite, nous discutons en détail trois essais réalisés sur le Tuf et un essai sur le CPIR qui présentent les figures typiques de la localisation de déformation et de la fissuration dans ces deux matériaux avec cette forme spécifique. L'apparition et la propagation de discontinuités sur les champs cinématiques (déplacement, déformation) en surface des échantillons sont à nouveau caractérisées en utilisant la technique DIC-2D et son extension DIC-F (*cf.* chapitre 3). La tomographie à rayons X a été également utilisée pour caractériser (dans le volume) les défauts préexistants dans les échantillons et comprendre leur influence sur la rupture finale.

Quelques analyses de stéréo-corrélation d'images d'un essai (l'essai Tf-tm-55-01) qui permettent d'acquérir les déplacements hors plan sont présentées. Dans le même essai, une petite zone située à l'extrémité d'une encoche est observée à une résolution spatiale beaucoup plus fine par un microscope qui permet de mettre en évidence la présence de compaction à l'échelle locale.

Des mesures d'EA ont été réalisées pour suivre l'endommagement au cœur de l'échantillon en cours de chargement. Dans cette campagne expérimentale, nous avons eu l'opportunité de réaliser quelques essais au *GeoForschungsZentrum* (GFZ) de Potsdam en Allemagne. Le système de mesure présent à GFZ Potsdam est constitué un grand nombre de capteurs de très bonne sensibilité. Ce système a permis à la fois de localiser des sources des EA et d'étudier l'évolution de la vitesse de propagation des ondes élastiques lors de la localisation de déformation.

La convention de signe utilisée dans les simulations en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis (logiciel **COMSOL**) et dans mes analyses de corrélation d'images numériques (logiciel **7D**) présentés dans ce chapitre est celle de la mécanique des milieux continus : une contrainte négative et une déformation négative correspondent à une compression ; une contrainte positive et une déformation positive représentent une traction.

## 6.2. Configuration des échantillons de type Meuwissen

Meuwissen et *al.* (1998) ont proposé d'étudier le comportement d'un aluminium à partir d'un essai de traction sur une éprouvette plane comportant deux encoches décalées (Figure 6.1). La Figure VI.2 montre le champ de déformation obtenu lors d'un essai de traction sur une éprouvette de titane T40 réalisé avec cette géométrie [Pottier, 2010]. Deux images 1 et 2 de l'échantillon ont été enregistrées avant et après déformation. La carte des déformations principales de Green Lagrange issue de l'analyse DIC indique une zone de fort cisaillement entre les deux encoches. Nous proposons d'utiliser une géométrie similaire dans cette thèse pour étudier l'évolution de la localisation de la déformation dans les roches lors des essais de compression uniaxiale.

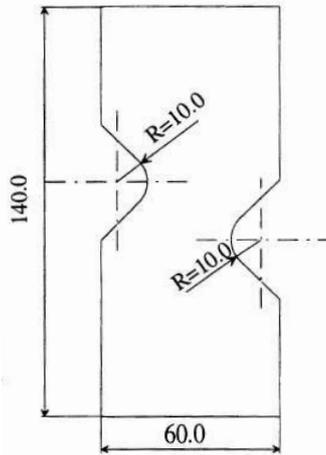


Figure 6.1. Géométrie proposée par [Meuwissen et al., 1998].

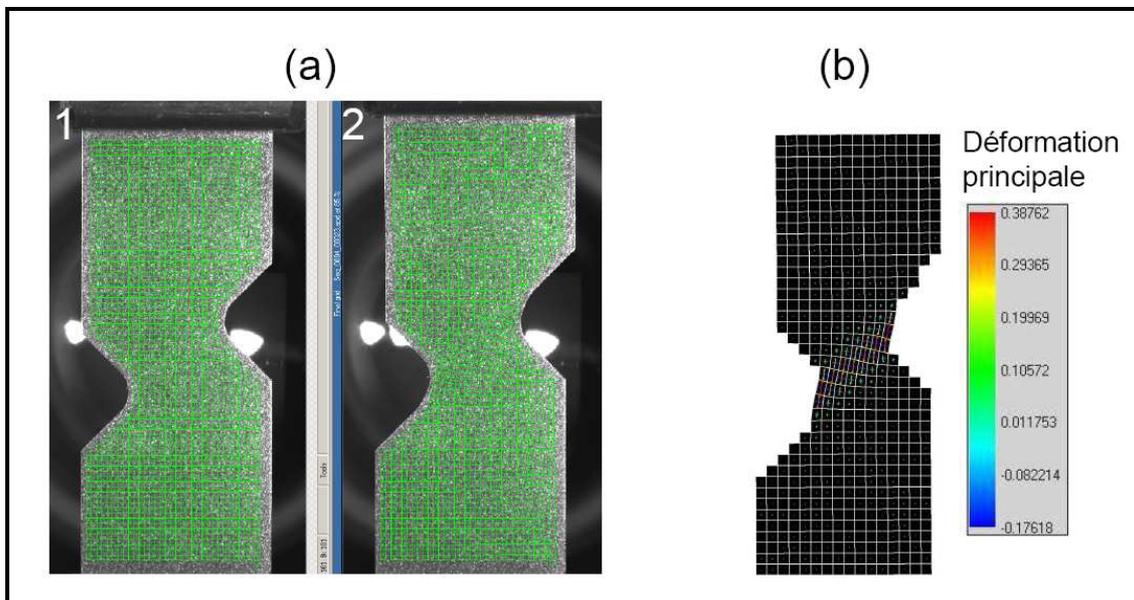


Figure 6.2. Essai de traction sur un titane T40 à partir de la géométrie proposée par [Meuwissen et al., 1998] : (a) 2 images enregistrées avant et en cours d'essai ; (b) champ des déformations principales obtenu par l'analyse DIC à partir de ces 2 images. La localisation de la déformation de cisaillement est mise en évidence dans la zone entre les encoches [Pottier, 2010].

La géométrie proposée par les travaux de Meuwissen est relativement compliquée à usiner sur les roches naturelles. Pour ce fait, diverses formes d'échantillon inspirées par cette géométrie ont été considérées. Pour chacune, une simulation 2D en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis a été réalisée. A titre d'exemple, la Figure 6.3 présente les cartes des déformations suivant  $x$  ( $\epsilon_x$ ),  $y$  ( $\epsilon_y$ ) et des déformations de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$ ) obtenues dans deux configurations différentes: (a) celle originalement proposée par Meuwissen et al. (1998) et (b) celle finalement retenue pour notre étude. Un résumé des paramètres utilisés dans les simulations est donné dans le Tableau 6.1 ; ces paramètres correspondent aux caractéristiques de CPIR09, et au déplacement atteint lors de l'apparition des premières fissures sur les échantillons de CPIR09.

Nous constatons qu'avec deux formes différentes des encoches, les déformations obtenues dans l'échantillon restent comparables. En outre, la réalisation des encoches circulaires de la géométrie retenue est plus simple à mettre en œuvre avec l'aide d'une carotteuse à l'eau (voir détail de la

rectification dans l'annexe A1). Nous l'appellerons la géométrie de « *type Meuwissen* » et nommerons « *pont de roche* » la zone qui joint les deux encoches. Trois valeurs de l'angle d'inclinaison  $\beta$  du pont (35°, 45° et 55°) seront examinées pour les deux matériaux.

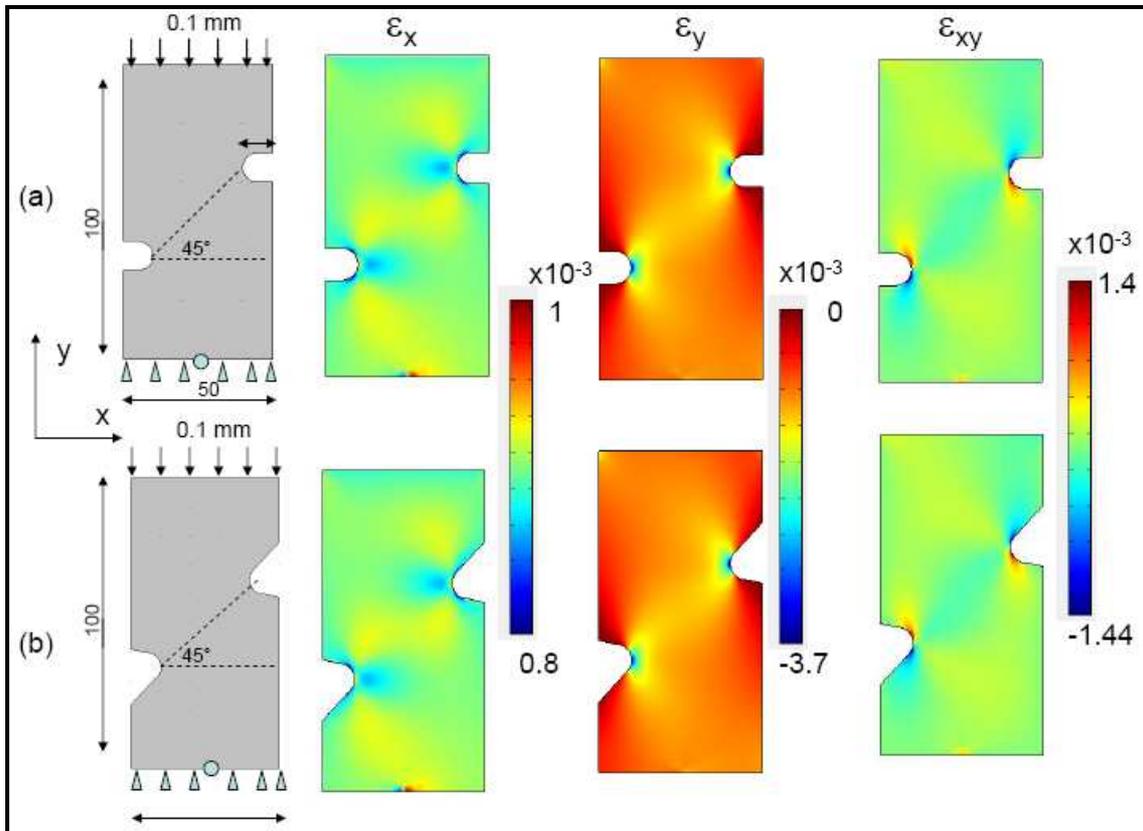


Figure 6.3 Cartes des déformations suivant  $x$  et  $y$  et des déformations de cisaillement obtenues par simulations en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis 2D pour : (a) la configuration retenue dans notre étude et (b) la configuration originalement proposée par [Meuwissen et al., 1998].

Dimensions	100x50x35 mm <sup>3</sup>
Module d'élasticité E (GPa)	8
Coefficient de Poisson	0.18
Déplacement vertical appliqué (mm)	0.1
Type de maillage	Triangle à 6 nœuds (élément quadratique)

Tableau 6.1. Paramètres correspondant au CPIR09 utilisés dans les simulations en élasticité linéaire isotrope par la méthode des éléments finis.

Les échantillons de type Meuwissen de Tuf et de CPIR09 ont 100 mm de hauteur, 50 mm de largeur et 35 mm d'épaisseur. La liste des essais réalisés et les configurations des échantillons sont présentées dans le Tableau 6.2 et la Figure 6.4.

Matériau	$\beta = 35^\circ$	$\beta = 45^\circ$	$\beta = 55^\circ$
Tuf	Tf-tm-35-01 <b>Tf-tm-35-02</b>	Tf-tm-45-01 Tf-tm-45-02 <b>Tf-tm-45-03</b> Tf-tm-45-04	<b>Tf-tm-55-01</b> Tf-tm-55-02 Tf-tm-55-03
CPIR09	<b>Cpir-tm-35-01</b> Cpir-tm-35-02	Cpir-tm-45-01 Cpir-tm-45-02	Cpir-tm-55-01 Cpir-tm-55-02

Tableau 6.2. Référence des échantillons de type Meuwissen de Tuf et de CPIR09. Les essais encadrés seront discutés plus en détail dans la suite.

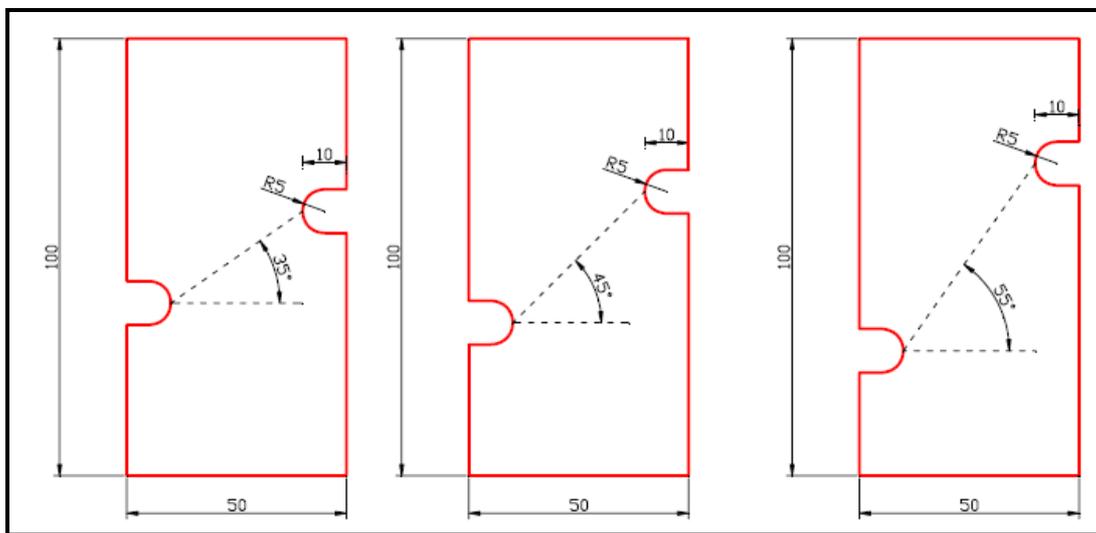


Figure 6.4. Configurations des échantillons de « type Meuwissen » de Tuf et de CPIR09.

## 6.3. Etude sur le Tuf

### 6.3.1. Observations générales

Onze essais de compression uniaxiale ont été menés sur les échantillons de Tuf de Naples ayant la géométrie de type Meuwissen au laboratoire SYMME (machine Instron) et au GeoForschungsZentrum (GFZ) (machine MTS) de Potsdam. L'ensemble des échantillons que nous présentons ici ne comportent pas de fissures préexistantes détectables par la tomographie RX. La Figure 6.5 montre les réponses typiques de ces essais : trois courbes contrainte axiale / déformation axiale issues des trois essais qui seront analysés en détail dans la suite. Les déformations axiales présentées dans ces courbes sont calculées par DIC. Le Tableau 6.3 présente un résumé des techniques expérimentales utilisées, les contraintes au pic, et les cartes de la déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) obtenues par les analyses DIC. Nous constatons tout d'abord que les contraintes au pic obtenues sur les échantillons ayant  $\beta = 35^\circ$  (autour de 16.5 MPa) sont généralement les plus élevées que celles obtenues sur les échantillons ayant  $\beta = 45^\circ$  (entre 10.4 MPa et 14.2 MPa). Les contraintes au pic obtenues sur les échantillons ayant  $\beta = 55^\circ$  sont les plus faibles (entre 9.9 MPa et 11.8 MPa).

Pour chaque essai, nous présentons dans le Tableau 6.3 les cartes de la déformation  $\varepsilon_{s-max}$  issues des analyses DIC deux stades de déformation : l'un tout juste avant l'apparition de fortes discontinuité de déplacement (fissures) et l'autre à la fin de chargement (après la chute de la contrainte). Dans ces analyses, la photo enregistrée avant l'application de la charge est utilisée comme l'image de référence à laquelle les deux autres photos (avant et après la chute de contrainte) sont corrélées. Sur les cartes de déformation  $\varepsilon_{s-max}$ , nous constatons systématiquement, avant la présence des fissures, des zones de déformations localisées qui ont lieu au niveau des encoches et aux ponts de roches. Ensuite, deux types de fissures sont répertoriés à la rupture des échantillons :

- les wing cracks (marquées  $W$ ) qui se propagent depuis les extrémités des encoches vers les limites hautes et basses des échantillons ;
- les fissures (marquées  $P$ ) qui se développent dans le pont de roche et relient deux encoches.

Nous remarquons que dans les deux essais avec  $\beta=35^\circ$ , les fissures sont systématiquement des wing cracks  $W$ . Pour les essais sur les échantillons avec  $\beta=45^\circ$ , les deux types de fissures sont reportés. Avec  $\beta=55^\circ$ , les ruptures correspondent à des fissures  $P$  localisées sur le pont de roche.

Dans la suite, nous faisons le choix de présenter en détail les résultats obtenus sur trois essais :

- essai Tf-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ ),
- essai Tf-tm-45-03 ( $\beta=45^\circ$ ),
- essai Tf-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ ).

Les analyses DIC-2D des autres essais sont présentées dans l'annexe A5.

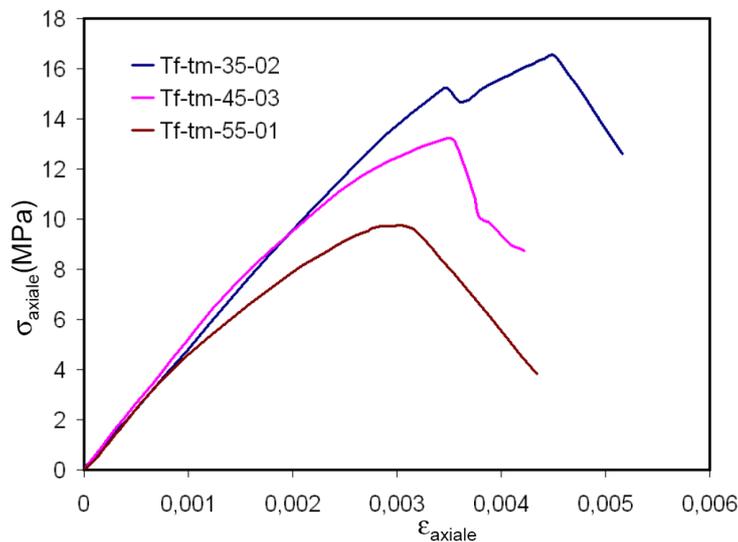


Figure 6.5. Courbes contrainte axiale-déformation axiale des trois essais : Tf-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ ), Tf-tm-45-03 ( $\beta=45^\circ$ ) et Tf-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ ).

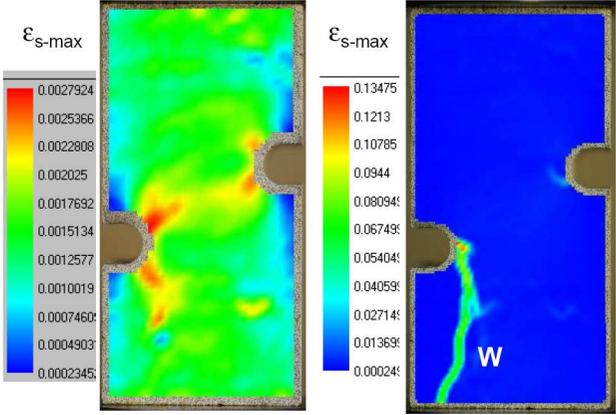
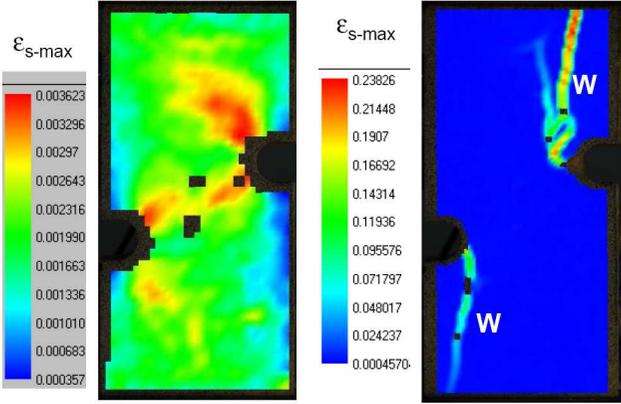
<p>Nom d'essai/ vitesse de chargement (mm/min) Machine de compression</p>	<p>Tf-tm-35-01 (<math>\beta=35^\circ</math>) 0.1 INSTRON</p>	<p><b>Tf-tm-35-02 (<math>\beta=35^\circ</math>)</b> 0.1 INSTRON</p>
<p>Techniques de mesures</p>	<p>DIC-2D ; tomographie RX avant essai.</p>	<p>DIC-2D ; tomographie RX avant essai ; EA.</p>
<p>Contrainte au pic (MPa)</p>	<p>16.9</p>	<p>16.5</p>
<p>Déformations de cisaillement maximum <math>\epsilon_{s-max}</math> : avant l'apparition de fortes discontinuités (à gauche) et après l'apparition des fissures (à droite)</p>		

Tableau 6.3. Présentation des techniques expérimentales, contrainte axiale au pic et déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures et lors de la rupture des échantillons de Tuf de type Meuwissen.

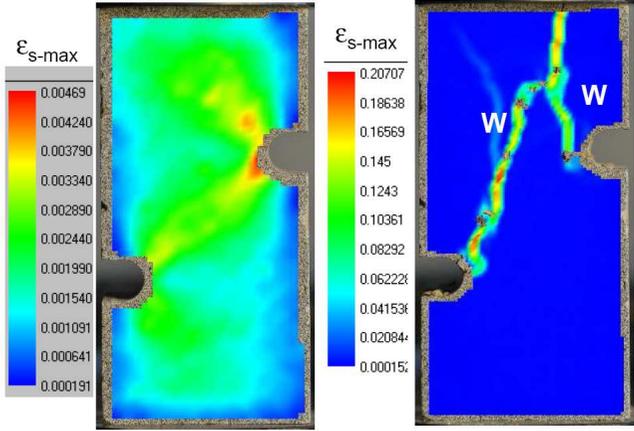
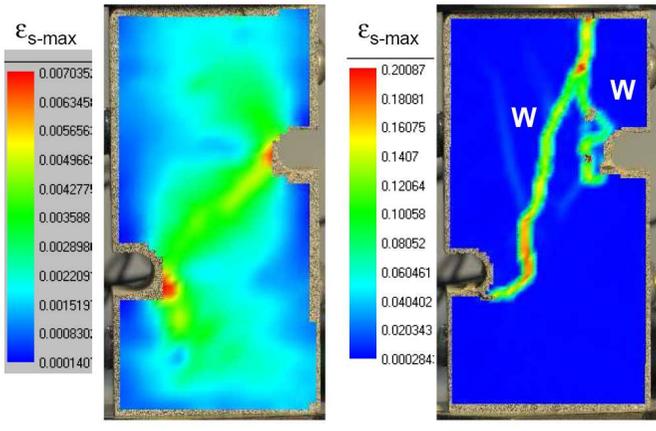
<p>Nom d'essai/ vitesse de chargement (mm/min) Machine de compression</p>	<p>Tf-tm-45-01 (<math>\beta=45^\circ</math>)  0.1  INSTRON</p>	<p>Tf-tm-45-02 (<math>\beta=45^\circ</math>)  0.1  INSTRON</p>
<p>Techniques de mesures</p>	<p>DIC-2D ; SIC; tomographie RX avant essai.</p>	<p>DIC-2D ; tomographie RX avant essai ; EA.</p>
<p>Contrainte au pic (MPa)</p>	<p>10.4</p>	<p>12</p>
<p>Déformations de cisaillement maximum <math>\epsilon_{s-max}</math> : avant l'apparition de fortes discontinuités (à gauche) et après l'apparition des fissures (à droite)</p>		

Tableau 6.3. Présentation des techniques expérimentales, contrainte axiale au pic et déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures et lors de la rupture des échantillons de Tuf de type Meuwissen. (Suite).

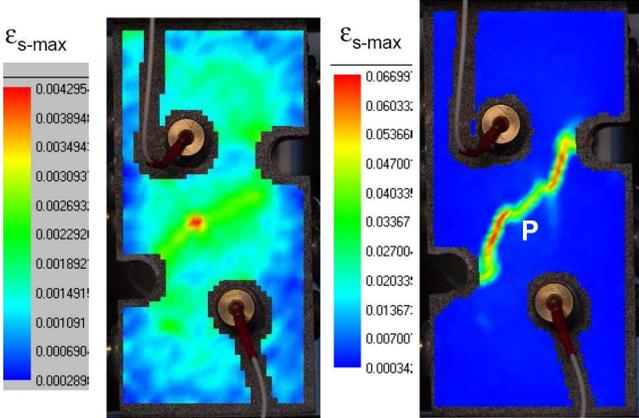
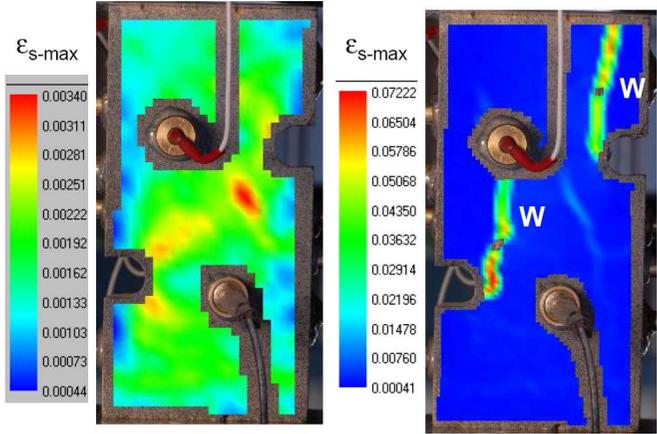
<p>Nom d'essai/ vitesse de chargement (mm/min) Machine de compression</p>	<p>Tf-tm-45-03 (<math>\beta=45^\circ</math>)  0.05  MTS</p>	<p>Tf-tm-45-04 (<math>\beta=45^\circ</math>)  0.05  MTS</p>
<p>Techniques de mesures</p>	<p>DIC-2D ; tomographie RX avant + après essai ; EA (GFZ).</p>	<p>DIC-2D ; tomographie RX avant essai; EA (GFZ).</p>
<p>Contrainte au pic (MPa)</p>	<p>13.2</p>	<p>14.2</p>
<p>Déformations de cisaillement maximum <math>\epsilon_{s-max}</math> : avant l'apparition de fortes discontinuités (à gauche) et après l'apparition des fissures (à droite)</p>		

Tableau 6.3. Présentation des techniques expérimentales, contrainte axiale au pic et déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures et lors de la rupture des échantillons de Tuf de type Meuwissen. (Suite). Les essais présentés ci-dessus ont été réalisés à GFZ en utilisant 12 capteurs collés sur quatre surfaces libres des échantillons (dont deux sont vues dans les figures) qui permettent de mieux localiser en 3D d'événements.

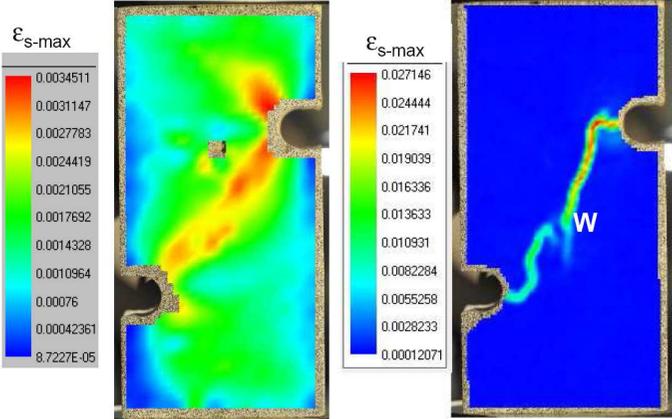
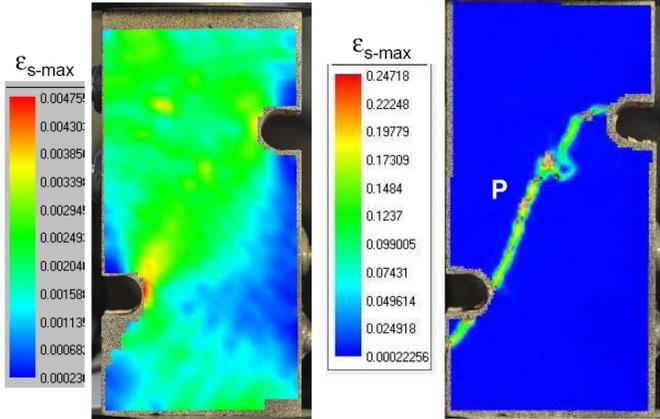
<p>Nom d'essai/ vitesse de chargement (mm/min) Machine de compression</p>	<p><b>Tf-tm-55-01 (<math>\beta=55^\circ</math>)</b>  0.1  INSTRON</p>	<p>Tf-tm-55-02 (<math>\beta=55^\circ</math>)  0.1  INSTRON</p>
<p>Techniques de mesures</p>	<p>DIC-2D ; SIC ; tomographie RX avant + après essai ; microscope.</p>	<p>DIC-2D ; SIC ; tomographie RX avant + après essai ; EA ; microscope.</p>
<p>Contrainte au pic (MPa)</p>	<p>11.8</p>	<p>10.4</p>
<p>Déformations de cisaillement maximum <math>\epsilon_{s-max}</math> : avant l'apparition de fortes discontinuités (à gauche) et après l'apparition des fissures (à droite)</p>		

Tableau 6.3. Présentation des techniques expérimentales, contrainte axiale au pic et déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures et lors de la rupture des échantillons de Tuf de type Meuwissen. (Suite).

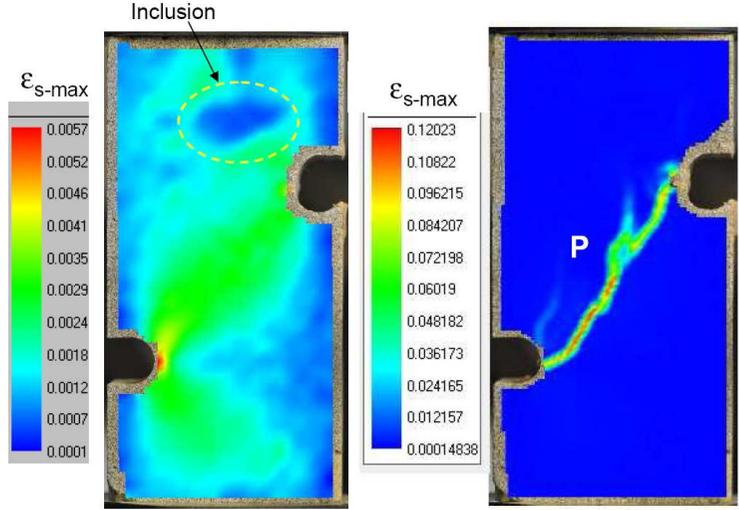
Nom d'essai/ vitesse de chargement (mm/min) Machine de compression	Tf-tm-55-03 ( $\beta=55^\circ$ ) 0.1 INSTRON
Techniques de mesures	DIC-2D ; SIC; tomographie RX avant + après l'essai ; microscope.
Contrainte au pic (MPa)	9.9
Déformations de cisaillement maximum $\epsilon_{s-max}$ : avant l'apparition de fortes discontinuités (à gauche) et après l'apparition des fissures (à droite)	

Tableau 6.3. Présentation des techniques expérimentales, contrainte axiale au pic et déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures et lors de la rupture des échantillons de Tuf de type Meuwissen. (Suite).

### 6.3.2. Essai Tf-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ )

L'essai Tf-tm-35-02 est l'un des essais de type Meuwissen qui présentent une rupture de type wing crack en mode I (traction). Cet essai de compression uniaxiale a été réalisé en utilisant deux techniques de mesures : la DIC et l'EA. Le système d'acquisition des EA utilisé est le système Mistras avec 6 capteurs. L'échantillon a été scanné par RX avant essai pour caractériser les hétérogénéités naturelles du matériau. La Figure 6.6 présente quelques coupes (trois horizontales et quatre verticales) dans le volume 3D obtenu par tomographie RX ; la résolution spatiale (taille du voxel) est ici de  $108 \times 108 \times 108 \mu\text{m}^3$ . Nous voyons dans ces images que cette roche est formée de couches successives déposées au rythme des éruptions volcaniques. Il apparaît dans les zones supérieure (en dessus de H3) et inférieure (en dessous de H2) de très fortes hétérogénéités, tandis que ce matériau présente une plus faible hétérogénéité dans la région centrale de l'échantillon (entre H2 et H3). Dans la zone inférieure, nous pouvons remarquer des inclusions de taille importante (jusqu'à environ 4 mm). Ces inclusions sont des fragments de pierre soit plus denses (plus claires dans les images RX), soit moins denses (probablement des pierre ponce - plus sombres dans les images RX) que la matrice du Tuf. Dans la zone supérieure, les inclusions sont généralement plus petites que celles de la zone inférieure ( $< 1 \text{ mm}$  pour la plupart) et plus denses que la matrice du Tuf.

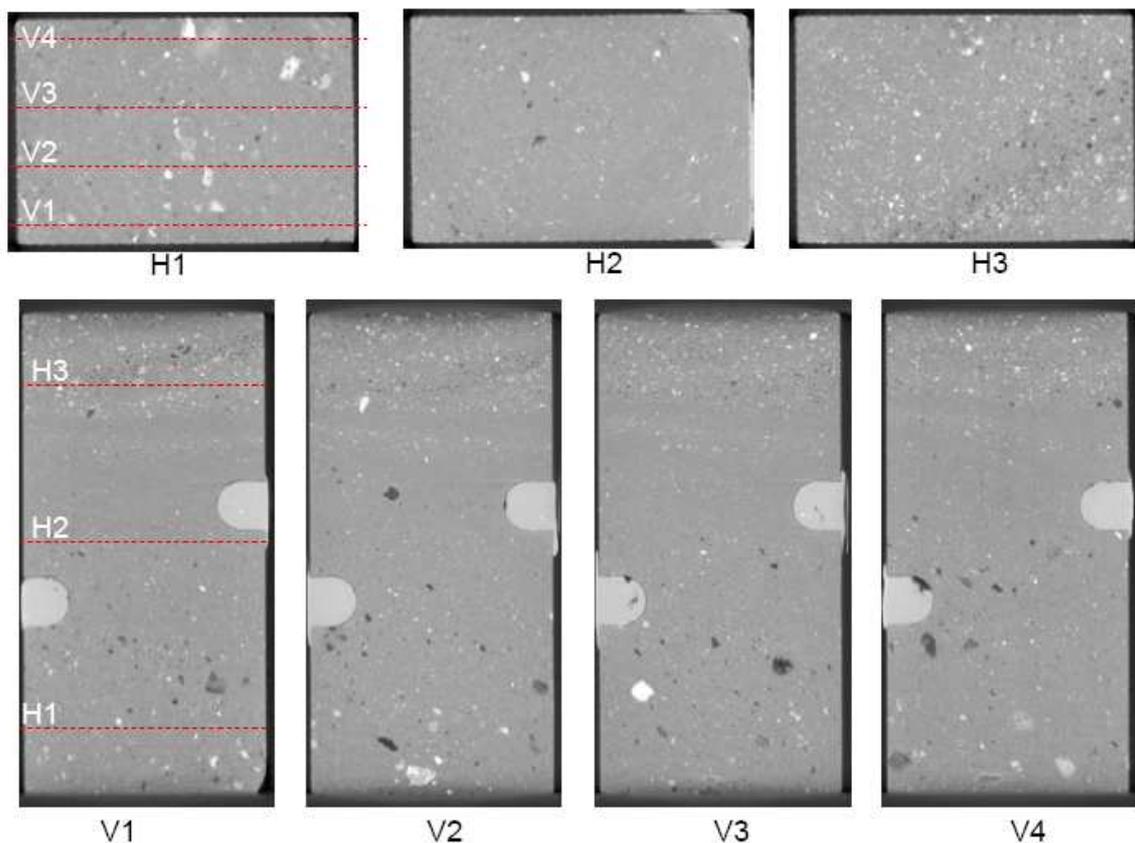


Figure 6.6. Essai Tf-tm-35-02. Trois coupes horizontales (H1-3) et quatre coupes verticales de l'échantillon avant le chargement. Le matériau dans les zones supérieure (en dessus de H3) et inférieure (en dessous de H2) est très hétérogène, tandis que la région centrale de l'échantillon (entre H2 et H3) présente une plus faible hétérogénéité. Taille du voxel :  $108 \mu\text{m}$ .

L'essai Tf-tm-35-02 a été réalisé en déplacement contrôlé, avec une vitesse de déplacement axial constante de 0.1 mm/min (soit une vitesse de déformation axiale nominale de  $10^{-3}$ /min). La courbe de la contrainte axiale ( $\sigma_{axiale}$ ) en fonction de la déformation axiale ( $\epsilon_{axiale}$ - calculée par DIC) est présentée dans la Figure 6.7. La courbe contrainte-déformation est composée d'une partie linéaire, une partie non-linéaire avec deux chutes de contraintes axiales, pour des valeurs de contraintes de 15.2 MPa et 16.5 MPa. 131 photos ont été enregistrées au cours du chargement (1 photo/4 secondes) et la taille du pixel est égale à  $35.6 \times 35.6 \mu\text{m}^2$ . Pour l'analyse DIC, 10 des 131 photos ont été choisies, elles sont indiquées sur la courbe de contrainte-déformation. La photo 1 correspond au début du chargement, et la photo 3 correspond au moment où la courbe contrainte-déformation commence à s'écarter de la partie linéaire. Les photos 7 et 8 sont les deux photos qui encadrent la première chute de contrainte. De même, les photos 9 et 10 encadrent la deuxième chute de contrainte.

Le placement des six capteurs piézoélectriques utilisés dans cet essai pour les mesures des EA sont montré dans la Figure 6.8. Les Figures 6.9-10 présentent l'évolution, en fonction du temps, de la contrainte axiale, du nombre cumulé de coups des EA ( $N_C$ ) enregistrés par l'un des capteurs (le numéro 5) et de l'énergie absolue cumulative de ces émissions ( $E_{abs}$ ). Notons que les données enregistrées par les cinq autres capteurs sont comparables à celles du capteur 5 ; nous avons donc fait le choix de ne reporter que les EA d'un capteur pour en faciliter la lecture. Sur la courbe contrainte-temps (Figure 6.9 et Figure 6.10), on remarque que la toute première phase du chargement est caractérisée par des augmentations significatives du nombre de coups ainsi que de l'énergie des EA. Cela est probablement lié à la mise en contact du système de chargement avec l'échantillon, ce qui est suggéré aussi par la non-linéarité observée sur la courbe contrainte-temps au cours de cette phase. Pourtant, la courbe contrainte-déformation (Figure 6.7) paraît linéaire dans cette phase. Ensuite, l'activité acoustique reste très faible jusqu'à la photo 2. De la photo 2 à la photo 7, les EA ( $N_E$  et  $E_{abs}$ ) augmentent légèrement, puis deviennent très significatives en correspondance des deux chutes de la contrainte axiale.

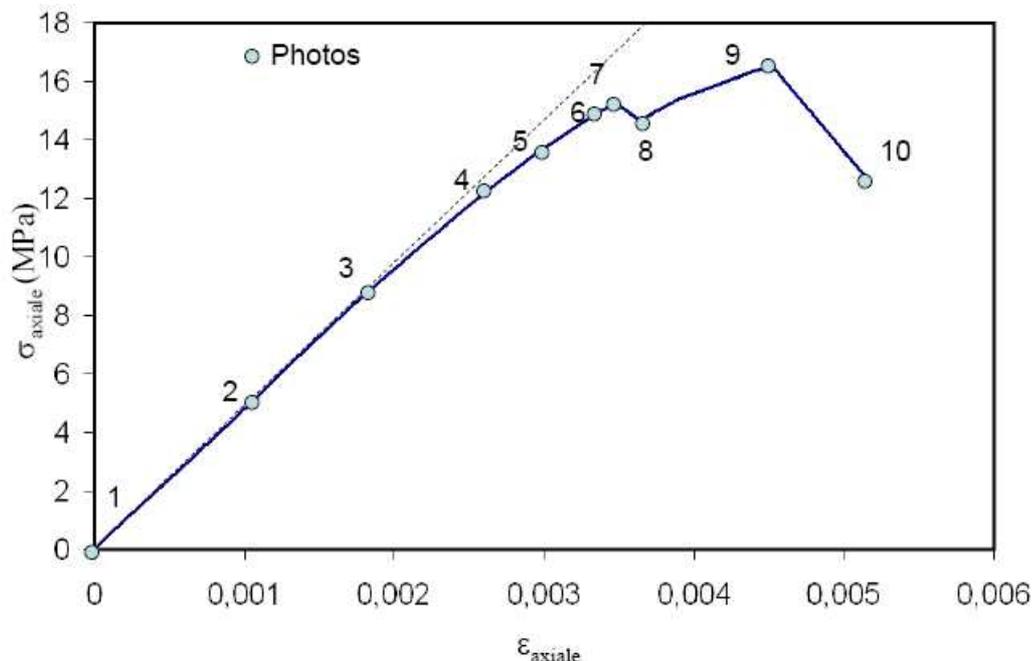


Figure 6.7. Essai Tf-tm-35-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.

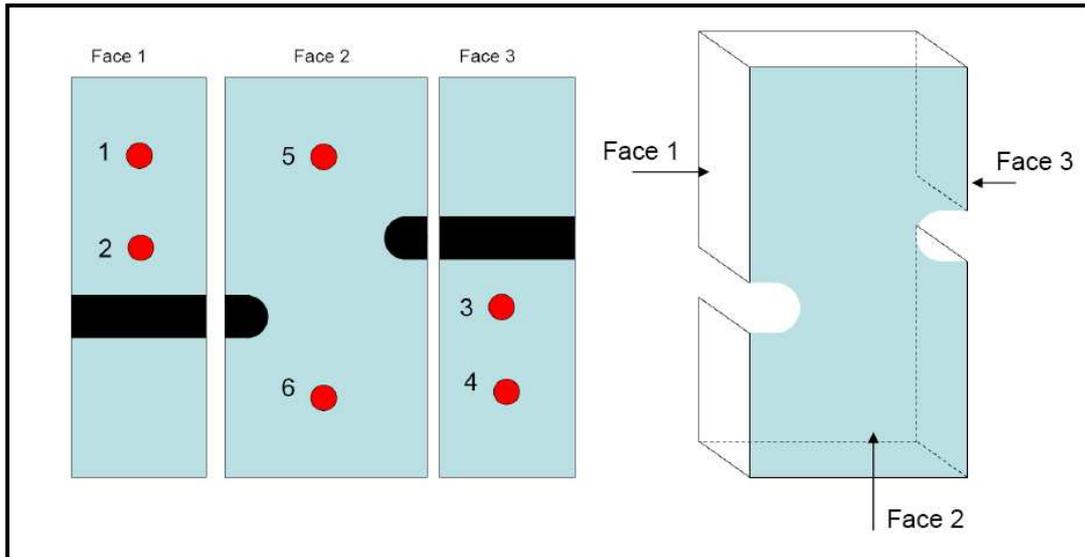


Figure 6.8. Essai Tf-tm-35-02. Positionnement des six capteurs acoustiques. L'analyse DIC-2D est effectuée sur la face 4.

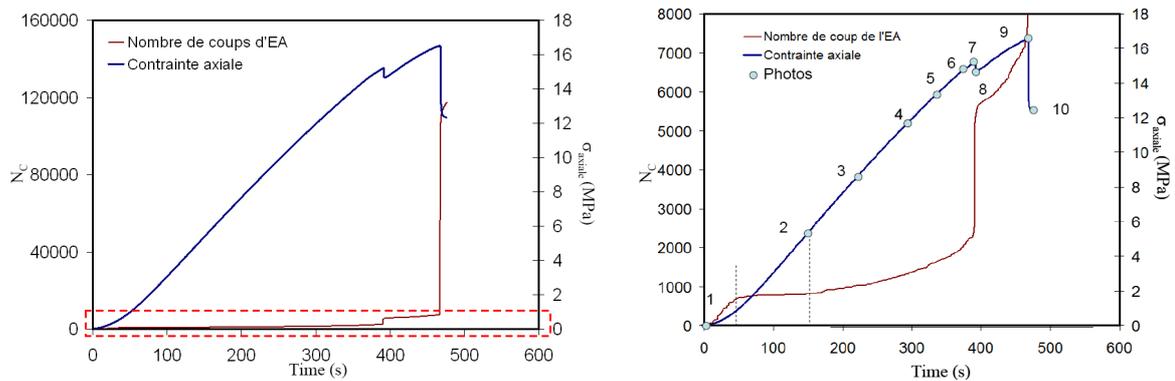


Figure 6.9. Essai Tf-tm-35-02. Courbes contrainte axiale ( $\sigma_{axiale}$ ) et nombre cumulatif ( $N_C$ ) de coups des EA enregistrés par le capteur 5 en fonction du temps : vue complète à gauche et un zoom sur  $N_C$  à droite.

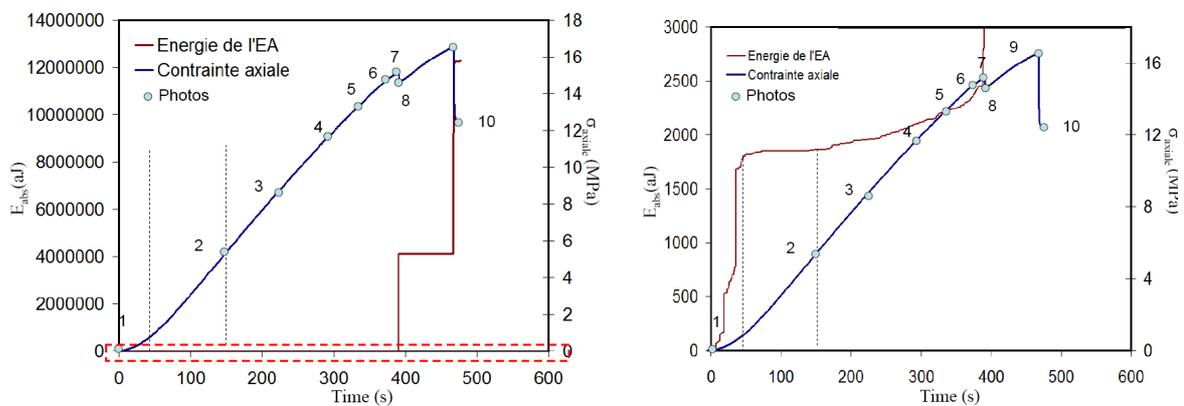


Figure 6.10. Essai Tf-tm-35-02. Courbes contrainte axiale ( $\sigma_{axiale}$ ) et nombre cumulatif de l'énergie absolue des EA ( $E_{abs}$ ) enregistrée par le capteur 5 en fonction du temps : vue complète à gauche et un zoom sur  $E_{abs}$  à droite.

- **Evolution de la déformation**

La photo 1 est utilisée comme l'image de référence à laquelle les autres photos (photos 2-7) sont corrélées. Ces analyses nous permettent, dans ce cas, de mieux suivre l'évolution de la localisation de déformation car les déformations obtenues à partir des analyses incrémentales (*i.e.*, analyses des couples des photos successives 7-8 ; 8-9 ; 9-10) sont généralement très petites. La Figure 6.11 montre les champs des vecteurs déplacements  $d_r$  après la soustraction du déplacement moyen sur l'ensemble des points de calcul issus des analyses DIC de trois couples des photos 1-2, 1-4 et 1-7. L'analyse de ces vecteurs de déplacement permet de mettre en évidence la présence d'une forte déformation de cisaillement dans le pont entre les deux encoches.

Les cartes de la déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) sont présentées dans la Figure 6.12. La déformation  $\epsilon_{s-max}$  entre les photos 1 et 2 est relativement homogène. A partir de la carte de déformation  $\epsilon_{s-max}$  obtenue entre les photos 1 et 3, nous remarquons quatre zones inclinées ( $Z_{1-4}$ ) de déformation  $\epsilon_{s-max}$  localisée (analyse 1-7 dans la Figure 6.12). Les déformations  $\epsilon_{s-max}$  mesurées dans ces zones s'intensifient avec l'augmentation de la charge et de l'activité des EA (cartes de 1-4 à 1-7). Ces zones seront des lieux privilégiés de l'apparition des fissures.

La Figure 6.13 présente les cartes de la déformation volumique ( $\epsilon_v$ ) issues des analyses de trois couples des photos 1-2, 1-4 et 1-7. Nous observons qu'avant la première chute de contrainte (entre les photos 1 et 7), deux zones de compaction sont visibles aux extrémités des encoches.

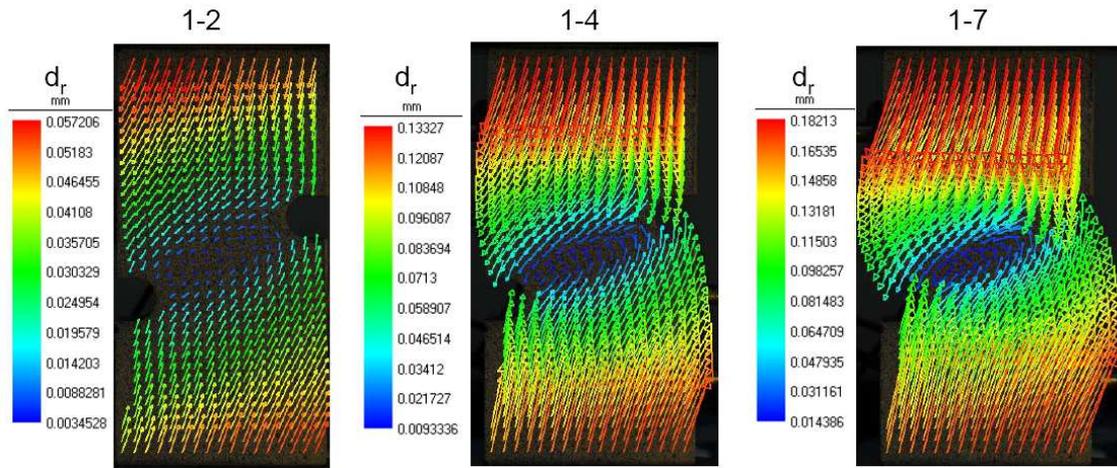
- **Evolution des fissures**

Pour examiner l'évolution des fissures, nous effectuons ensuite des analyses incrémentales (*i.e.*, analyses des couples des photos successives 7-8 ; 8-9 ; 9-10) qui aident à suivre la fissuration dans les différents intervalles de temps.

**Incrément 7-8 :** la Figure 6.14 présente les résultats (déformation de cisaillement maximum  $\epsilon_{s-max}$ , déformation volumique  $\epsilon_v$  et les vecteurs de déplacement dans la zone de la fissure  $f_1$ ) qui mettent en évidence la présence de la première fissure de type wing crack (appelée  $f_1$ ) dans la zone  $Z_1$  (*cf.* Figure 6.12). L'apparition de cette fissure est marquée par les sauts de  $N_C$  et de  $E_{abs}$  correspondant à la première chute de contrainte (entre les photos 7 et 8). La fréquence d'acquisition des photos (1 photo/4 s) ne permet pas de suivre la propagation de  $f_1$ . La fissure  $f_1$  se propage dans la direction verticale. La trace de  $f_1$  est ensuite identifiée et les sauts de déplacement sont calculés par la technique DIC-F (pas de la grille d'analyse de 10 pixels et  $K_{min}=7 \mu m$ ) (Figure 6.15). Les composantes normales et tangentiels sont comparables ce qui indique clairement un mode mixte de propagation de cette fissure. La composante normale sur la partie haute de  $f_1$  (dans le voisinage immédiat de la pointe de l'entaille inférieure) apparaît en vert, ce qui confirme la présence d'une zone de compaction à l'extrémité de l'encoche inférieure. Cette zone correspond à la zone de forte compaction déterminée sur les cartes de la déformation volumique dans les étapes précédentes (*cf.* Figure 6.13),

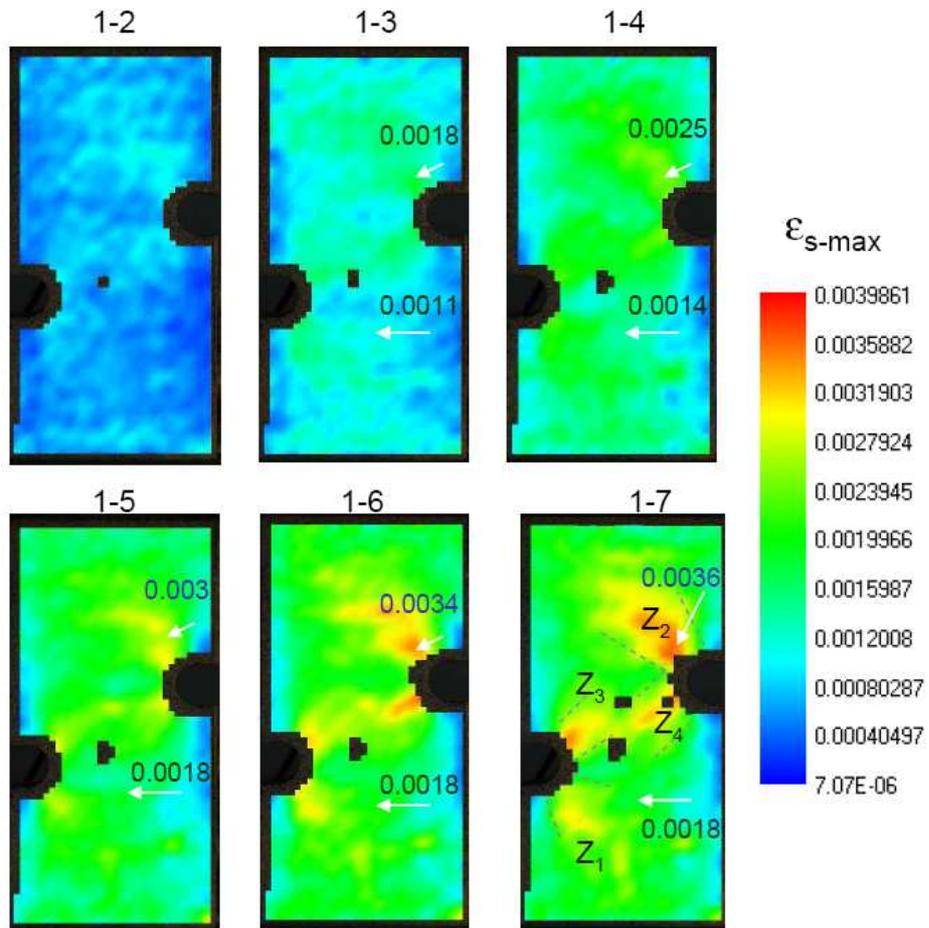
**Incrément 8-9 :** dans la Figure 6.16 nous observons la présence de deux nouvelles discontinuités appelées  $f_2$  et  $f_3$  dans la zone  $Z_2$ . Aucune chute de la contrainte n'est observée entre ces deux instants. La fissure  $f_1$  reste active dans cet incrément. La composante normale de  $f_2$  située à côté de l'extrémité de l'encoche supérieure indique une forte compaction tandis que la fissure  $f_3$  s'ouvre. Les composantes tangentiels de  $f_3$  sont bien plus faibles que les composantes normales, ce qui confirme la présence d'un mode I majoritaire pour cette fissure.

**Incrément 9-10 :** lors de la chute finale de la force accompagnée des sauts importants des EA, la coalescence et la propagation des fissures  $f_2$  et  $f_3$  forment une fissure macroscopique (Figure 6.17).



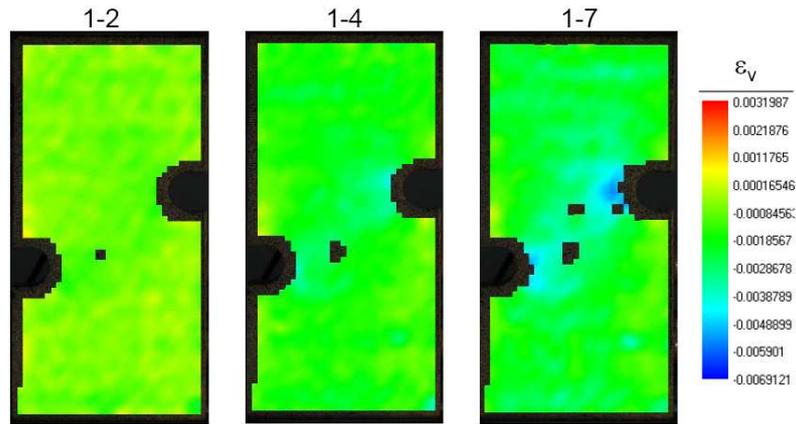
Taille du pixel :  $35.6 \mu\text{m}$  ; dimension des motifs :  $20 \times 20 \text{ pixel}^2$  ; pas de la grille : 80 pixels

Figure 6.11. Essai Tf-tm-35-02. Cartes de vecteurs de déplacement relatifs  $d_r$ .



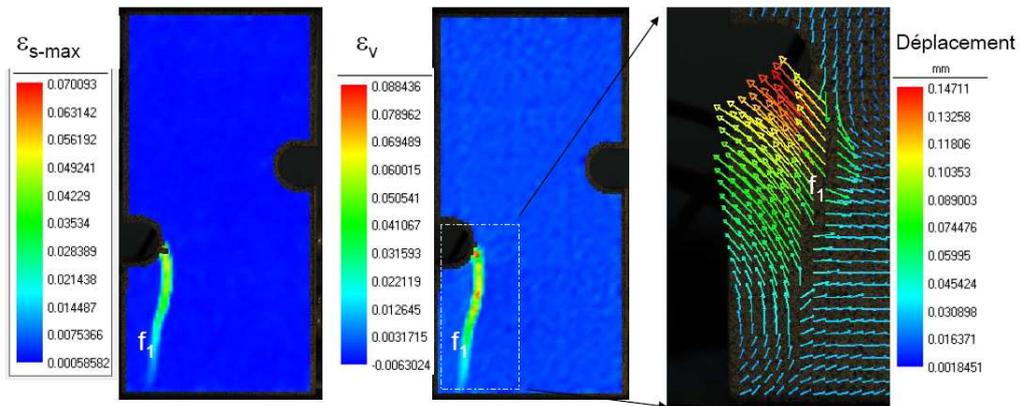
Taille du pixel :  $35.6 \mu\text{m}$  ; dimension des motifs :  $20 \times 20 \text{ pixel}^2$  ; pas de la grille : 40 pixels

Figure 6.12. Essai Tf-tm-35-02. Cartes des déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ). Quatre zones de déformation localisée  $Z_{1-4}$  sont indiquées dans l'analyse 1-7.



Taille du pixel : 35.6  $\mu\text{m}$  ; dimension des motifs : 20x20  $\text{pixel}^2$  ; pas de la grille : 40 pixels

Figure 6.13. Essai Tf-tm-35-02. Cartes des déformations volumiques ( $\epsilon_v$ ).



Taille du pixel : 35.6  $\mu\text{m}$  ; dimension du motif : 20x20  $\text{pixel}^2$  ; pas de la grille : 20 pixels

Figure 6.14. Essai Tf-tm-35-02. Photos 7 et 8 : déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ), déformations volumiques ( $\epsilon_v$ ) et vecteurs déplacement dans la zone de la fissure  $f_1$ .

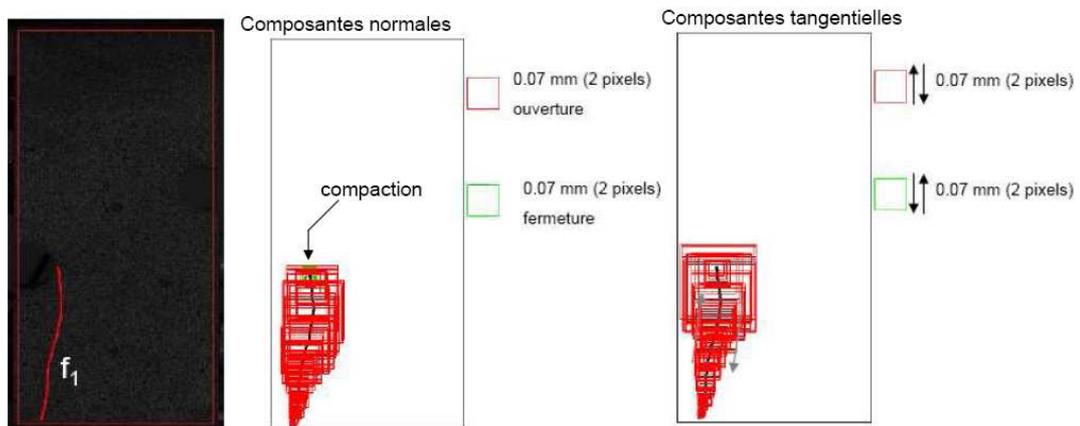
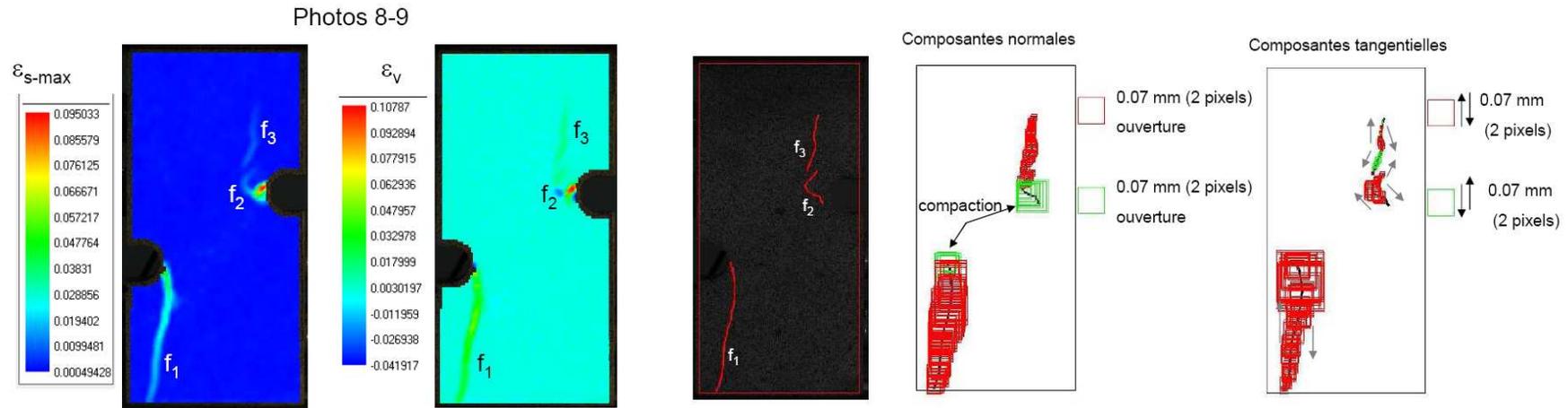
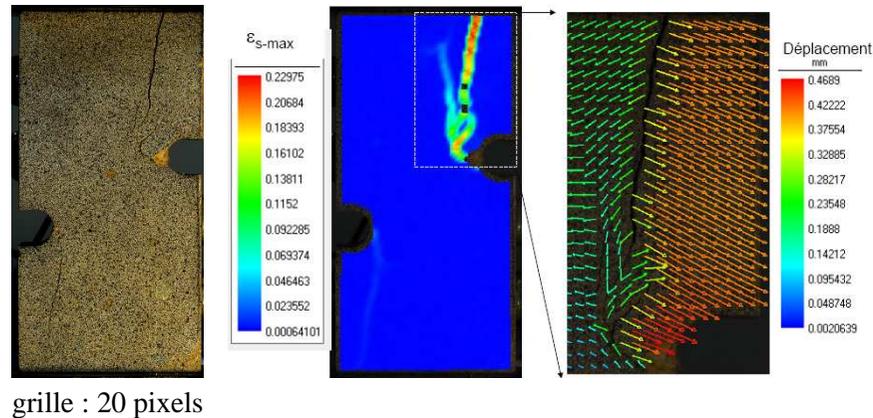


Figure 6.15. Essai Tf-tm-35-02. Photos 7-8 : Composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long de la fissure  $f_1$ .



Taille du pixel : 35.6  $\mu\text{m}$  ; dimension du motif : 20x20 pixel<sup>2</sup> ; pas de la grille : 20 pixels

Figure 6.16. Essai Tf-tm-35-02. Photos 8-9 : (à gauche) déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et déformation volumiques ( $\epsilon_v$ ) ; (à droite) tracé des trois fissures identifiées  $f_{1-3}$  et composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures  $f_{1-3}$ .



Taille du pixel : 35.6  $\mu\text{m}$  ; dimension du motif : 20x20 pixel<sup>2</sup> ; pas de la

Figure 6.17. Essai Tf-tm-35-02. Photos 9-10 : photo 10 où les fissures sont visibles à l'œil, la carte de la déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et vecteurs déplacement en zone fracturée.

### 6.3.3. Essai Tf-tm-45-03 ( $\beta=45^\circ$ )

L'essai Tf-tm-45-03 est le plus complet d'un point de vue des mesures des EA et les mesures de la vitesse d'ondes élastiques. Cet essai a été réalisé sur l'appareil MTS au GFZ Potsdam en utilisant 12 capteurs piézoélectriques qui permettent à la fois la localisation des événements et la mesure des vitesses de propagation des ondes élastiques de compression (ondes P) suivant plusieurs trajectoires intéressantes. La vitesse de déplacement axial appliquée est de 0.5 mm/min (soit une vitesse de déformation nominale de  $5 \times 10^{-4}$ /min). L'essai Tf-tm-45-03 est l'un des essais qui présentent la rupture localisée dans le pont de roche entre les encoches. Cet échantillon a été scanné par tomographie RX avant et après chargement. La Figure 6.18 montre une photo de la surface étudiée par la technique DIC, une inclusion est visible sur cette surface. Nous allons voir, dans les analyses présentées dans la suite, que cette inclusion (peu profonde – voir images tomographiques dans la Figure 6.28) correspond à l'initiation d'une fissure.

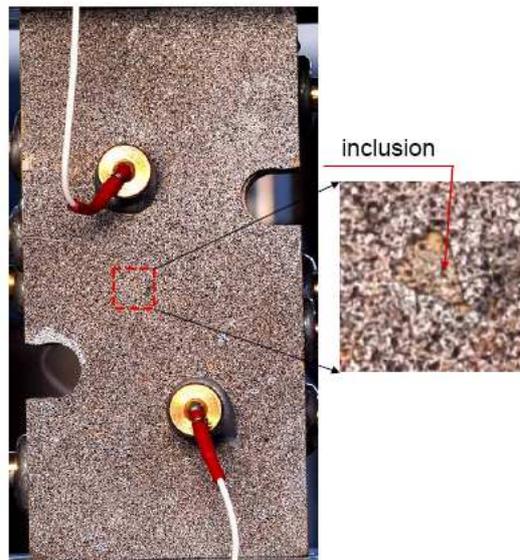


Figure 6.18. Essai Tf-tm-45-03. Inclusion visible sur la surface étudiée de l'échantillon.

- **Evolution de la déformation localisée et des fissures**

161 photos sont enregistrées (1 photo/4s et taille du pixel de  $45 \times 45 \mu\text{m}^2$ ) et 7 photos sont choisies pour l'analyse DIC. La Figure 6.19 montre la courbe contrainte axiale en fonction de la déformation axiale (calculée par DIC) avec l'indication des numéros des photos choisies. Cette courbe présente une première partie linéaire et une seconde partie non-linéaire suivie par une chute de la contrainte. La photo 1 est enregistrée en début du chargement, la photo 2 est choisie lors que la courbe s'écarte de la linéarité. Les photos 6 et 7 sont les deux photos successives qui encadrent la chute de contrainte. Nous effectuons maintenant les analyses incrémentales pour les couples des images successives (1-2, 2-3, 3-4, etc.). Les fissures sont identifiées par la technique DIC-F (avec une valeur du seuil de détection  $K_{\min}$  de 5  $\mu\text{m}$ ) puis les sauts de déplacement le long des fissures sont quantifiés.

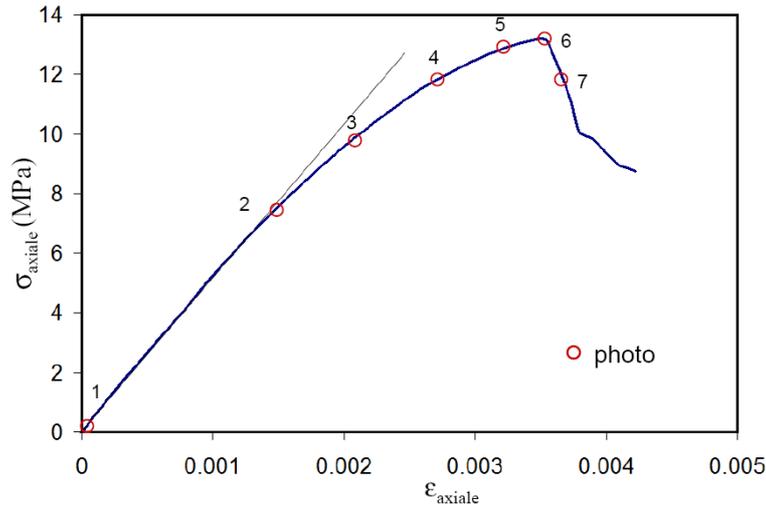


Figure 6.19. Essai Tf-tm-45-03. Contrainte axiale en fonction de la déformation mesurée par DIC avec les numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.

La Figure 6.20 présente les champs de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) issus des analyses des incréments 1-2 et 2-3 sur lesquelles se présentent trois zones de déformations localisées  $Z_{1-3}$ . Dans la zone  $Z_1$ , une forte localisation de la déformation  $\epsilon_{s-max}$  est détectée au niveau de l'inclusion visible sur les photos. Entre les images 3 et 4 nous remarquons la présence de la première fissure  $f_1$  (Figure 6.21). Cette fissure s'initie au niveau de la zone de l'inclusion et de la forte déformation  $\epsilon_{s-max}$  détectée lors des incréments précédents. La fissure  $f_1$  se propage vers l'entaille inférieure. Dans cet incrément (3-4), les composantes normales des sauts de déplacements de  $f_1$  sont généralement plus faibles que les composantes tangentielles. La propagation de cette fissure dans ce stade apparaît en mode mixte (mode I et mode II). Dans l'incrément 4-5 (Figure 6.22), la fissure  $f_1$  arrive à l'extrémité de l'encoche inférieure. Dans le voisinage de l'encoche, la fissure  $f_1$  présente un mode de compaction. A l'extrémité de l'encoche supérieure, une nouvelle fissure  $f_2$  présente également un mode de compaction.

Lors de l'incrément 5-6 (Figure 6.23) une nouvelle fissure  $f_3$  est observée dans le pont de roche (entre  $f_1$  et  $f_2$ ). La fissure  $f_1$  se propage vers le haut de l'échantillon et suit l'interface de l'inclusion. La fermeture de  $f_2$  et de la partie inférieure de  $f_1$  signifie que matériau, aux extrémités des encoches, continue à se compacter. Un glissement significatif de  $f_1$  est observé dans cet incrément. Les fissures  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  se rejoignent dans l'incrément 6-7 (Figure 6.24) qui correspond à la chute de l'effort. La jonction des fissures forme une fissure macroscopique traversant le pont et conduit à la rupture de mode II majoritaire de l'échantillon.

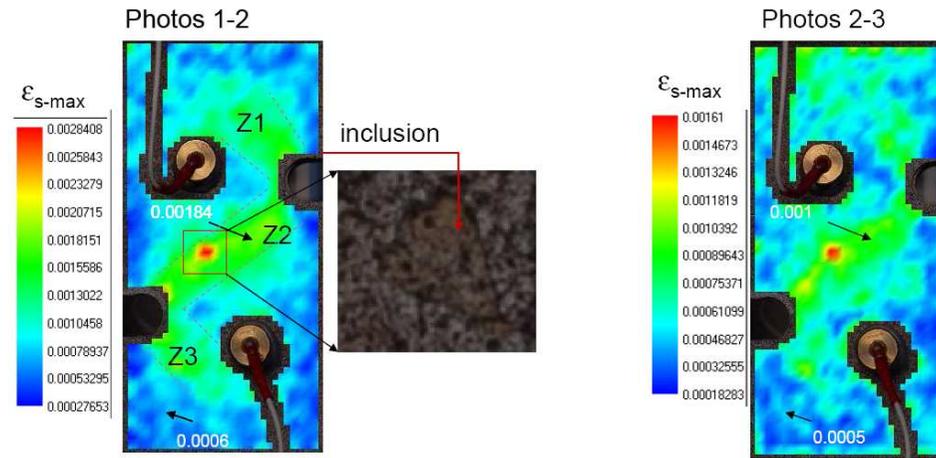


Figure 6.20. Essai Tf-tm-45-03. Déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) issues des analyses des photos 1-2 (à gauche) et 2-3 (à droite). Pas de la grille d'analyse 30 pixels, taille du motif 20x20 pixels<sup>2</sup>.

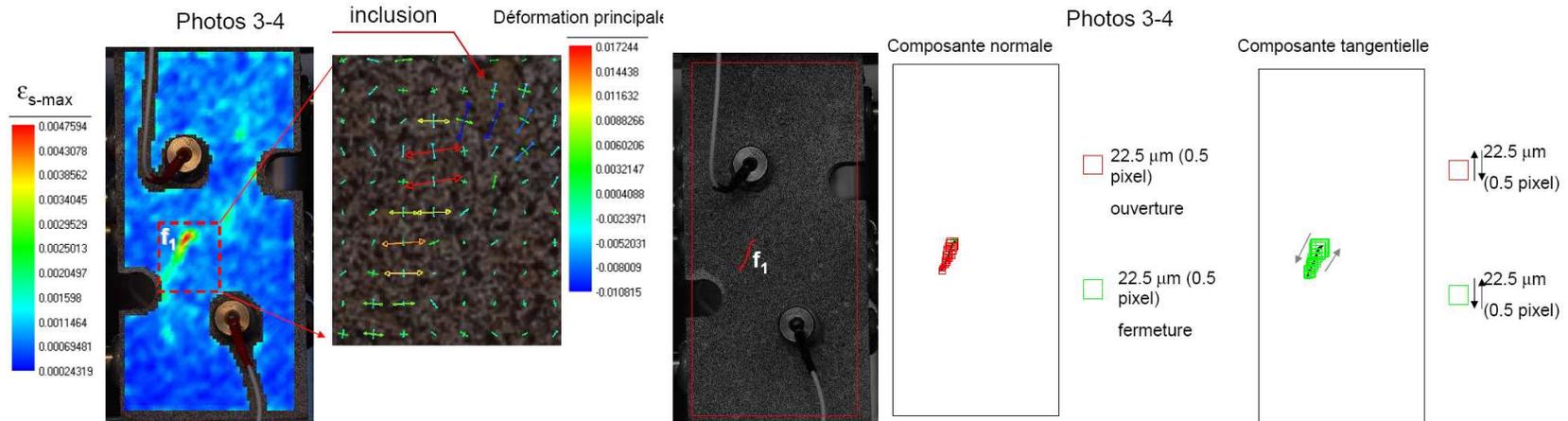


Figure 6.21. Essai Tf-tm-45-03. Photos 3-4 : (à gauche) carte de déformation de cisaillement maximum et déformations principales dans la zone de la fissure  $f_1$  avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif 20x20 pixels<sup>2</sup>; (à droite) composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long de la fissure  $f_1$ .

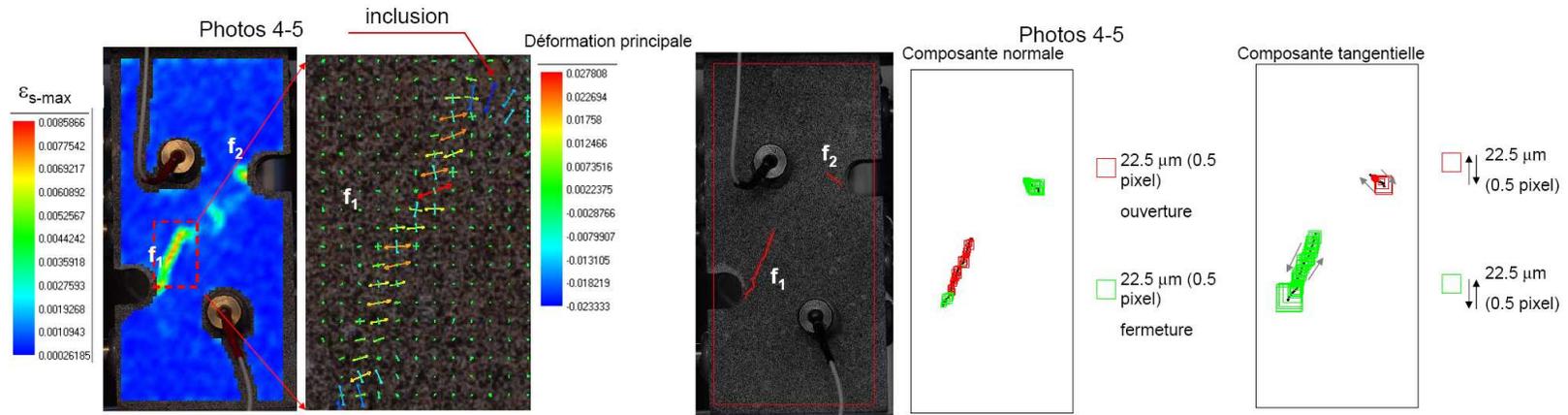


Figure 6.22. Essai Tf-tm-45-03. Photos 4-5 : (à gauche) carte de déformation de cisaillement maximum et les déformations principales dans la zone de la fissure  $f_1$  avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif de 20x20 pixels<sup>2</sup>; (à droite) composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures.

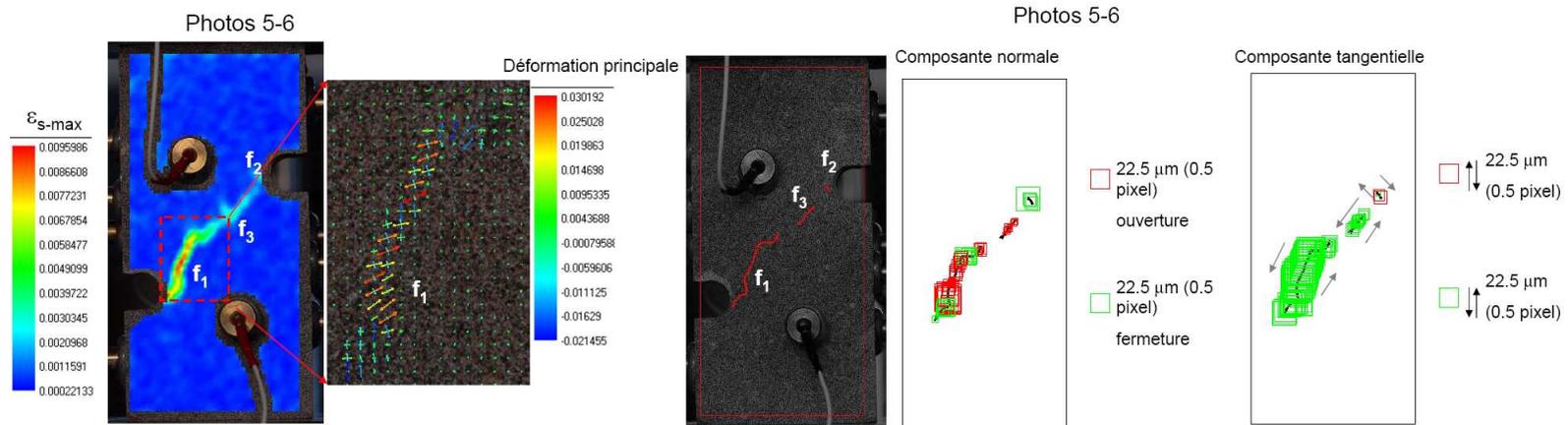


Figure 6.23. Essai Tf-tm-45-03. Photos 5-6 : (à gauche) carte de déformation de cisaillement maximum et les déformations principales dans la zone de la fissure  $f_1$  avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif de 20x20 pixels<sup>2</sup>; (à droite) composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures.

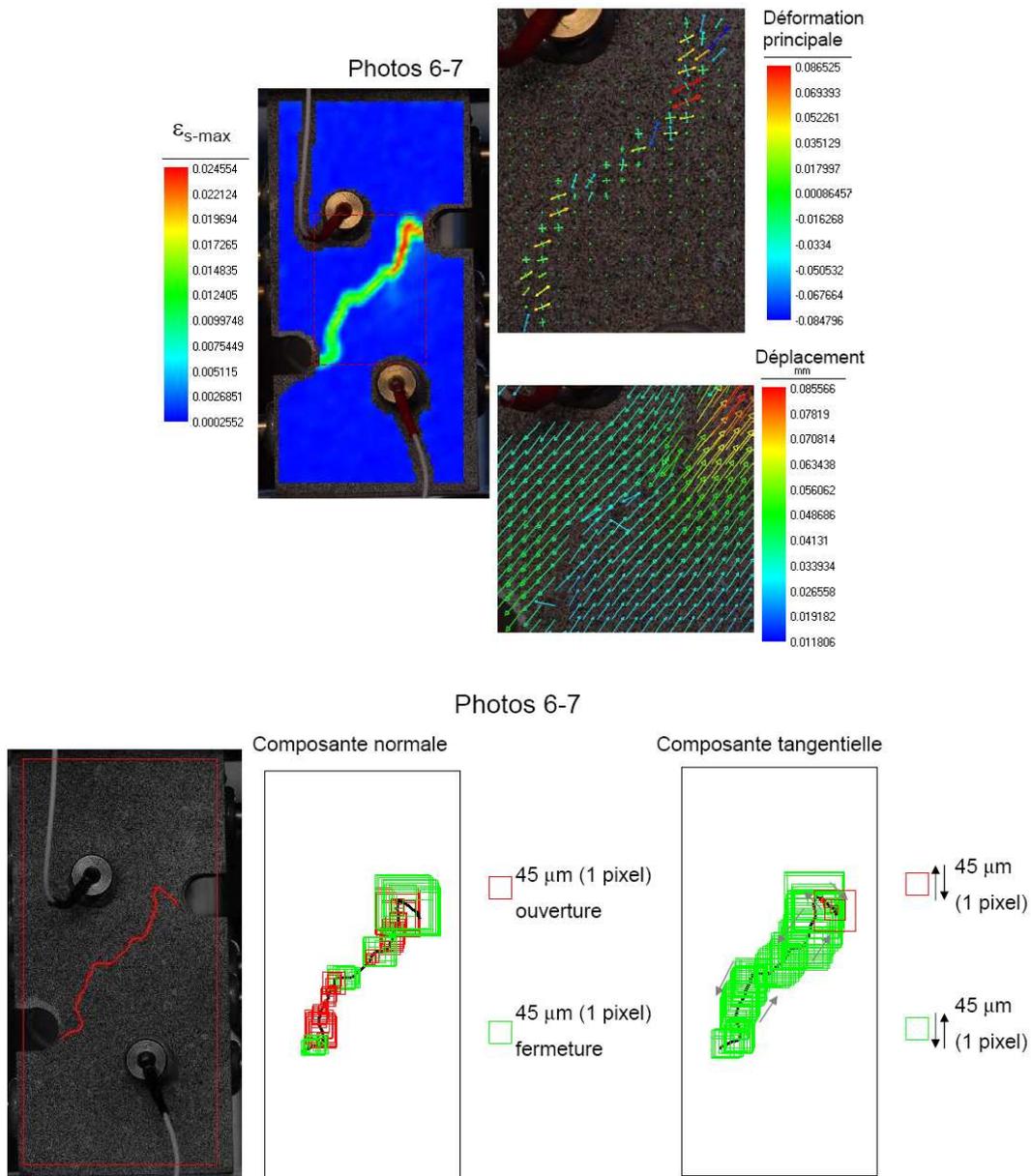


Figure 6.24. Essai Tf-tm-45-03. Photos 6-7 : (en haut) carte de déformations de cisaillement maximum, déformations principales et vecteurs de déplacement mesurés dans la zone entre les encoches avec un pas de la grille d'analyse de 30 pixels et une taille du motif 20x20 pixels<sup>2</sup>); (en bas) les composantes normales et tangentielles des sauts de déplacement le long des fissures.

- **Analyse de l'évolution des vitesses d'ondes élastiques (ondes P)**

Douze capteurs piézoélectriques présents au GFZ Potsdam, permettant la mesure de la vitesse des ondes P, sont répartis sur quatre surfaces libres de l'échantillon ; leurs positions sur les quatre surfaces libres de l'échantillon sont indiquées dans la Figure VI-30. La face 4 est la face étudiée par DIC. Cet emplacement (couvre quatre surfaces de l'échantillon) permet de mieux localiser en 3D les sources d'EA que dans les autres essais. La mesure de la vitesse de propagation des ondes dans l'échantillon est effectuée toutes les 10 secondes au cours du chargement. Les capteurs situés sur les faces 1 et 4 (capteurs 1, 4, 5, 8, 9, 11) sont les émetteurs et envoient des ondes. Les capteurs situés sur les faces 2 et 3 jouent le rôle de récepteurs. Les vitesses des ondes mesurées en début de chargement pour tous les couples émetteur-récepteur sont comprises entre  $2.38 \times 10^3$  et  $2.5 \times 10^3$  (m/s). Cette petite variation des vitesses est liée à la fois à l'hétérogénéité du matériau et à l'incertitude de la mesure de la distance des

couples récepteur-émetteur. La Figure 6.26 montre l'évolution des vitesses normalisées pour six trajectoires au cours du chargement dont trois (9-12, 9-10, 11-10) traversent le pont (groupe 1) et trois autres (5-7 ; 8-6 ; 9-6) ne traversent pas cette zone (groupe 2).

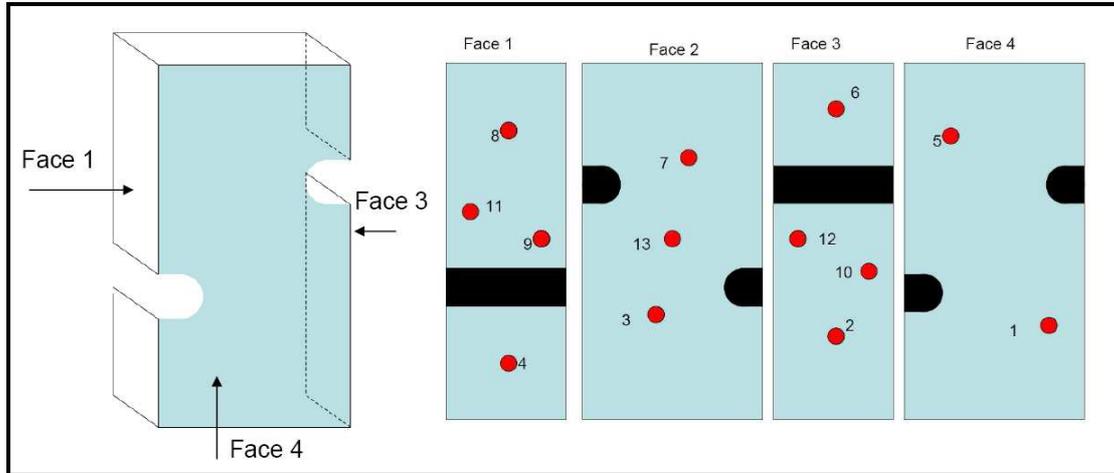


Figure 6.25. Essai Tf-tm-45-03. Positions des capteurs piézoélectriques.

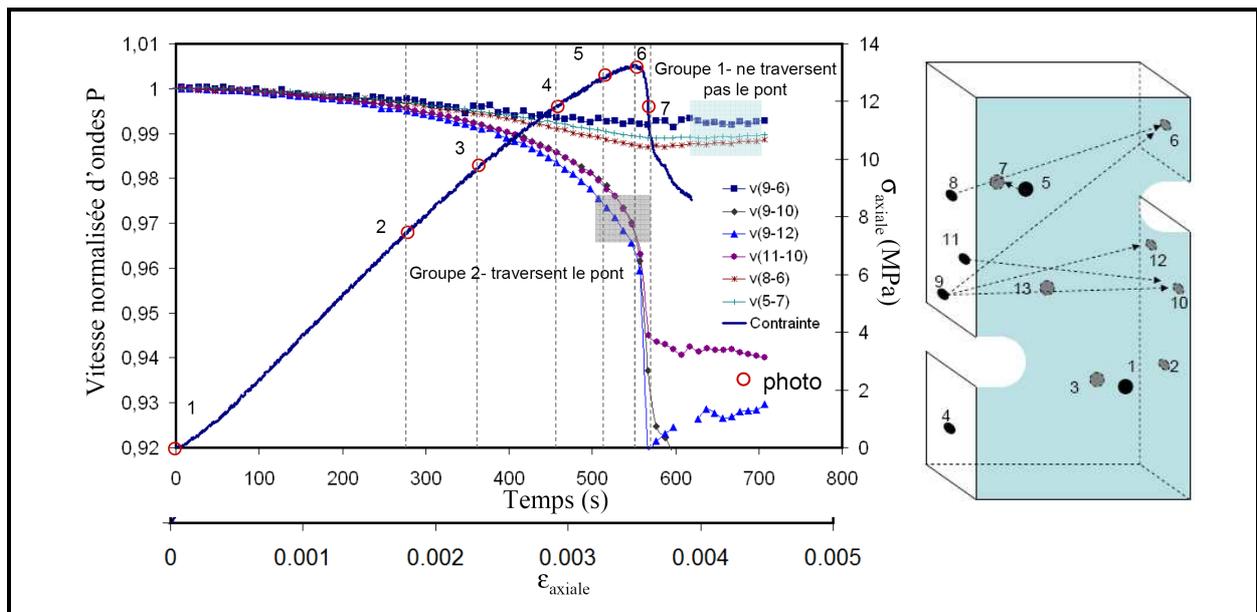


Figure 6.26. Essai Tf-tm-45-03. Evolution de la vitesse de propagation des ondes P dans l'échantillon. (A gauche) Les courbes de la contrainte axiale et des vitesses normalisées d'ondes P mesurées pour différents couples émetteur-récepteur. Les indications sur la courbe de la contrainte axiale correspondent aux numéros des photos utilisées dans l'analyse DIC. (A droite) Position des capteurs et trajectoires des ondes utilisées pour la mesure des vitesses.

Plusieurs recherches dans la littérature (e.g., Fortin et al., 2006 ; Stanchits et al., 2009) ont confirmé que la variation de vitesse des ondes élastiques était liée notamment à la présence de discontinuités dans la roche (interfaces de grains, des microfissures, des pores). Nous observons que ces vitesses diminuent très légèrement en début de l'essai (l'incrément 1-2). A partir de l'instant 2, bien avant l'apparition de la fissure  $f_1$  qui n'est détectable en surface par technique DIC qu'à partir de l'incrément 3-4 (Figure 6.21), les courbes se séparent en deux groupe : les vitesses d'ondes mesurées pour les trajectoires de groupe 1 décroissent rapidement tandis que celles de groupe 2 diminuent bien plus faiblement. La diminution de vitesse d'onde des trajectoires traversant le pont de roche (groupe 2)

indique clairement une augmentation de la densité des microfissures dans cette zone, autrement dit, l'endommagement localisé est présent dans cette zone bien avant que les fissures apparaissent en surface.

Dans le dernier incrément, correspondant à la chute de contrainte et à la macro fissure dans le pont, nous remarquons des chutes importantes des vitesses d'ondes mesurées pour les trajectoires du groupe 1 tandis que celles du groupe 2 restent presque constantes.

- **Analyse des hypocentres des EA**

La localisation des hypocentres (sources des EA) dans cet essai a été effectuée par S. Stanchits suivant la procédure décrite dans [Stanchits et al., 2009]. La première étape implique le temps d'arrivée des ondes P est identifié automatiquement par différents critères, y compris le critère d'information d'Akaike (Akaike's information criterion –AIC (cf. section 2.3.4). La deuxième étape concerne une procédure de minimisation automatique des résidus des temps de propagation d'ondes P qui a pour but d'exclure des canaux bruités [Stanchits et al., 2006]. Ensuite, la localisation des hypocentres a été réalisée en utilisant l'algorithme de « downhill simplex » [Nelder et Mead, 1965] prenant en compte des changements de vitesses d'ondes en cours du chargement [Stanchits et al., 2006]. L'incertitude de la localisation utilisant cette procédure a été estimée à environ de 2.5 mm dans les différentes roches [Stanchits et al., 2006]. De plus, l'amplitude des premiers mouvements a été automatiquement sélectionnée et les polarités ont été utilisés pour discriminer les types de sources : *traction* (type T), *cisaillement* (type S) et *compaction* (type C) [Zang et al., 1998] (cf. section 2.3.4).

Les amplitudes des EA mesurées dans le Tuf sont généralement faibles par rapport à celle des bruits liés aux conditions environnementales. Il est donc difficile d'identifier correctement le temps d'arrivée des événements d'amplitude modérée. Pour cette raison, seuls 230 événements d'amplitude importante sont localisés dans cet essai. La Figure 6.27 présente la localisation des hypocentres des EA pour différents incréments.

Nous remarquons tout d'abord que pratiquement tous les événements d'amplitude importante se localisent dans la zone centrale de l'échantillon - la zone de la déformation localisée et de la fissuration montrée par les analyse DIC. Les événements de type S sont majoritaires. Au contraire, peu d'événements de type T sont mis en évidence. Le nombre d'événements localisés augmente de manière non-linéaire à partir de l'instant 3 et un saut important est remarqué lors de la chute de la contrainte.

Très peu d'événements sont localisés dans les deux premiers incréments (1-2 et 2-3). Au cours de l'incrément 3-4, 23 événements (56% de type S, 27 % de type C, 4 % de type T) sont localisés. Dans la zone d'apparition de la fissure  $f_1$ , les événements de type S et de type C sont les majoritaires, très peu d'événements de type T sont identifiés. Cela signifie que la propagation de la fissure  $f_1$  est notamment en mode II. Ensuite, 30 événements (56% de type S, 14 % de type C, 30 % de type T) sont observés au cours de l'incrément 4-5. La plupart de ces événements se trouvent dans la zone de la propagation de la fissure  $f_1$  et quelques événements de type S sont localisés dans la zone de l'apparition de  $f_2$ . Dans l'incrément 5-6, 17 événements (69% de type S, 19 % de type C, 2 % de type T) sont localisés au centre de l'échantillon – zone d'apparition de la fissure  $f_3$ . Un nombre très important d'événements (105 événement, 46% de type S, 38 % de type C, 16 % de type T) sont localisés dans dernier incrément lors de la chute de la contrainte et de la jonction des fissures  $f_1, f_2, f_3$ . La rupture finale de l'échantillon est clairement de mode mixte (mode II et compaction). Bien que l'ouverture des fissures soit identifiée par DIC-F, les informations des EA posent une hypothèse que la propagation des fissures dans cet essai est plutôt en mode de cisaillement et par mode de compaction et l'ouverture observée en surface n'est qu'une conséquence d'un glissement dans une surface rugueuse des fissures.

En conclusion, le travail présenté ici a prouvé l'intérêt de l'utilisation de techniques des EA dans l'étude de l'endommagement localisé et de la fissuration dans les roches. Elle permet de localiser de

manière relativement précise les lieux d'apparition des fissures et de suivre leur évolution au cours du chargement.

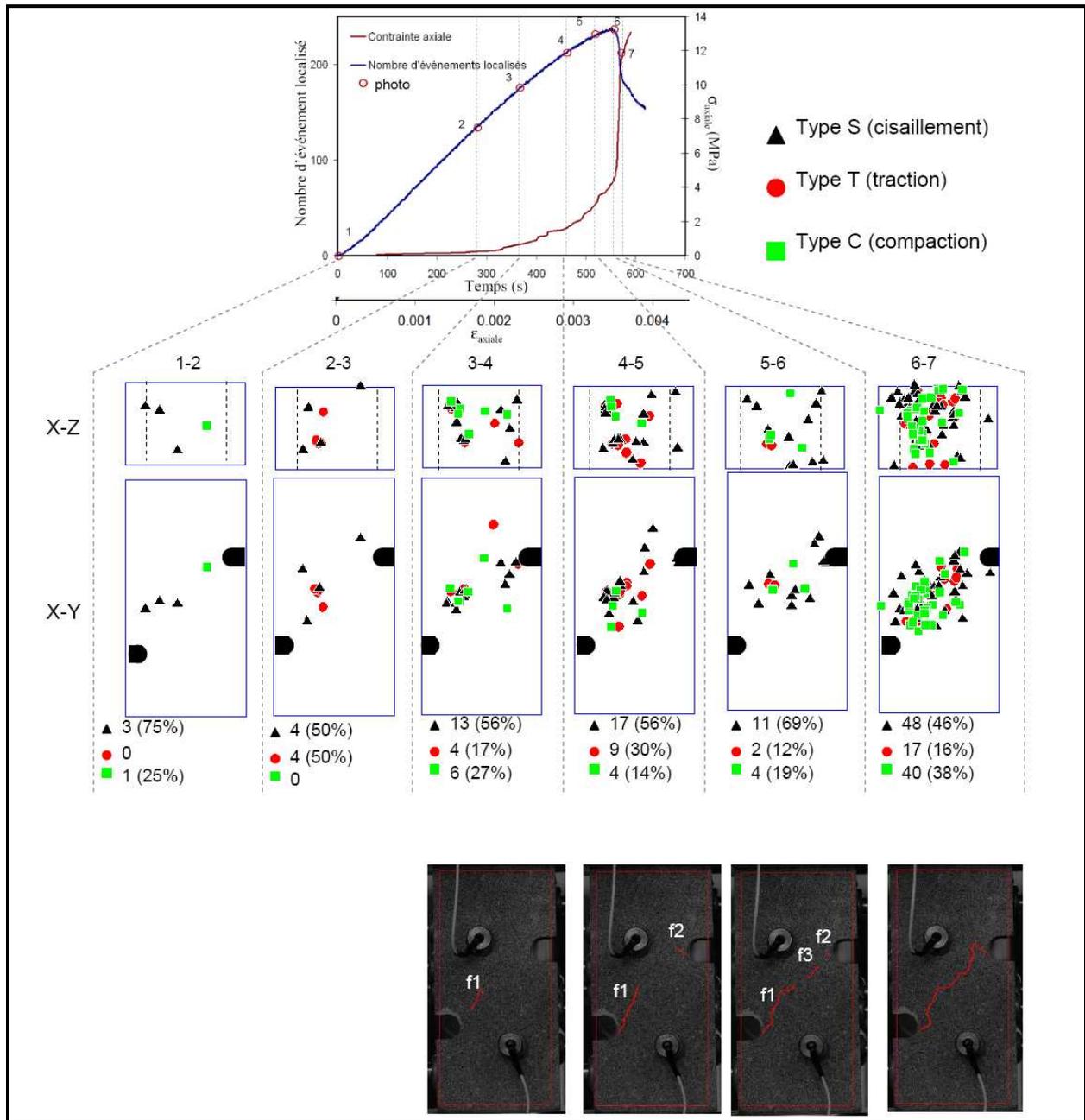


Figure 6.27. Essai Tf-tm-45-03. Distribution des hypocentres des EA en cours de chargement. La figure du haut présente les courbes de la contrainte axiale et du nombre cumulé des événements localisés en fonction du temps et de la déformation axiale. Les figures centrales présentent les positions spatiales des événements et le nombre d'événement de différents types dans les différents incréments. Les figures du bas montrent les fissures identifiées par la technique DIC-F dans les quatre derniers incréments.

- **Etude par tomographie à RX**

Nous présentons dans la Figure 6.28 quelques coupes tomographiques (trois horizontales et quatre verticales) de l'échantillon avant le chargement où la présence des hétérogénéités est très visible (pierres ponces de faible densité et fragments de pierres de haute densité). La coupe V1, proche à la

surface photographiée pour les analyses DIC, présente une pierre ponce indiquée par une flèche. Cette inclusion peu profonde (voir la coupe H2) correspond au lieu de l'initiation de la fissure  $f_1$  en surface.

Après la chute de contrainte, l'échantillon a été à nouveau scanné. La Figure 6.29 montre les coupes tomographiques situées approximativement aux mêmes positions que celles présentées dans la Figure 6.28. Les fissures sont nettement visibles dans les mesures tomographiques ; elles se trouvent toutes dans la zone centrale (pont de roche) de l'échantillon.

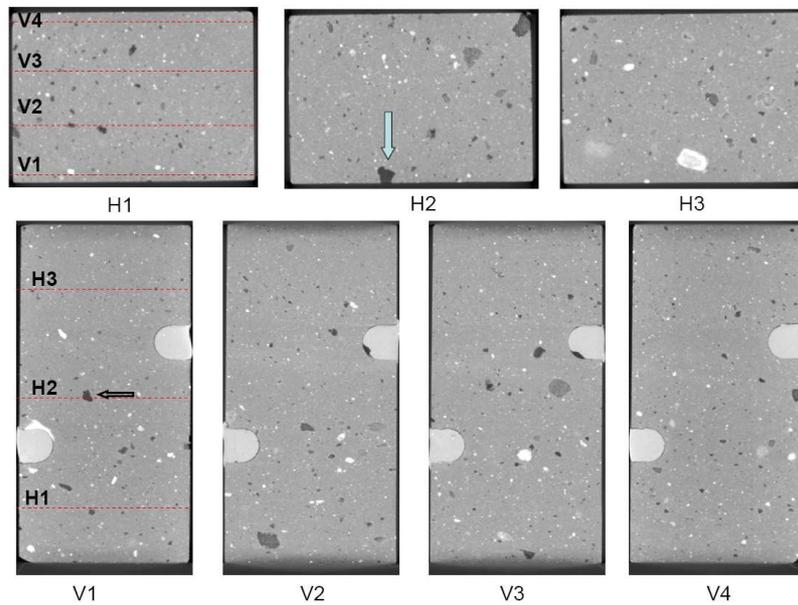


Figure 6.28. Essai Tf-tm-45-03. Trois coupes horizontales (H1-3) et quatre coupes verticales de l'échantillon avant le chargement. Taille du voxel :  $128 \times 128 \times 128 \mu\text{m}^3$ .

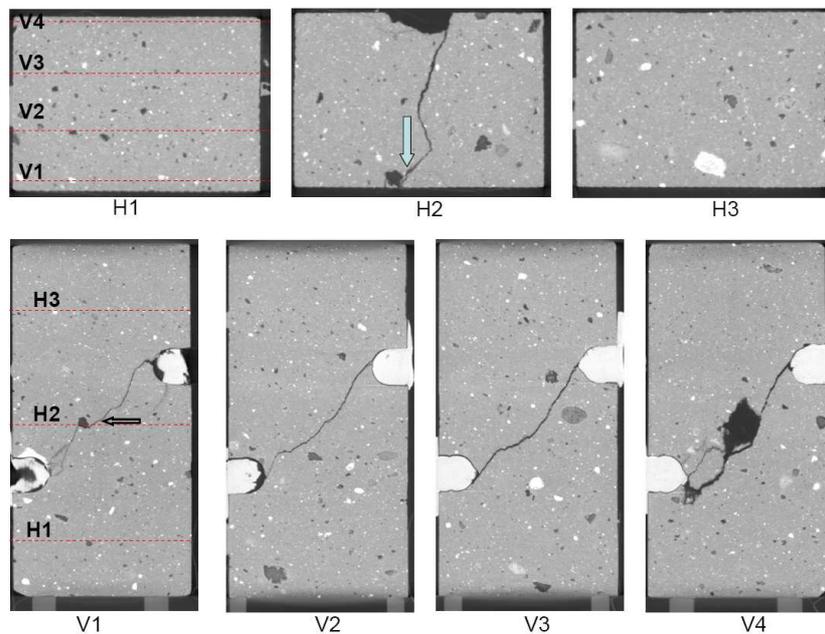


Figure 6.29. Essai Tf-tm-45-03. Trois coupes horizontales (H1-3) et quatre coupes verticales de l'échantillon après la rupture. Largeur du voxel :  $128 \times 128 \times 128 \mu\text{m}^3$ .

### 6.3.4. Essai Tf-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ )

L'essai de compression uniaxiale Tf-tm-55-01 a été réalisé sur la machine Instron avec une vitesse de déplacement axiale de 0.1 mm/min (soit une vitesse de déformation axiale nominale de  $10^{-3}$ /min). Cet essai présente une rupture dans le pont de roche. Dans cet essai, nous avons utilisé quatre systèmes optiques. Le montage des systèmes optiques dans cet essai est présenté dans la Figure 2.7. Ce montage permet la mesure simultanée :

- (i) des champs cinématiques 2D à partir de l'analyse DIC (appareil photo Nikon D3),
- (ii) des champs cinématiques hors plan par la technique de stéréo-corrélation d'images (Stereo Images Correlation –SIC) (la stéréo-vision est fournie par deux appareils photographiques Nikon D200 posés sur un banc rigide),
- (iii) des champs de déplacement locaux ( $\approx 2 \times 2.5 \text{ mm}^2$ ) par l'utilisation d'un microscope longue distance Questar associé à une camera Hamamatsu 1.3 Mpixels.

La Figure 6.30 montre la visualisation de l'échantillon avant le chargement par des coupes tomographiques horizontales et verticales. Nous observons à nouveau la présence des inclusions de différentes densités.

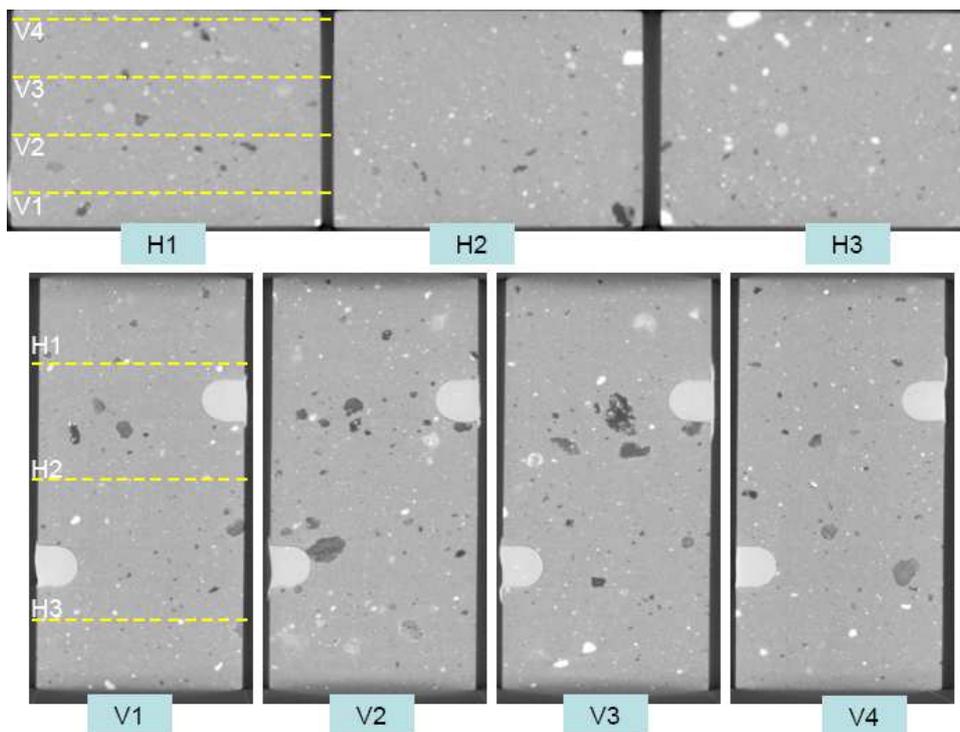


Figure 6.30. Essai Tf-tm-55-01. Trois coupes tomographiques horizontales et quatre coupes tomographiques verticales de l'échantillon avant le chargement.

- **Evolution de la déformation**

En cours de chargement, 105 photos ont été enregistrées (1 photos/ 4s) avec une taille de pixel de  $36.2 \times 36.2 \mu\text{m}^2$ . La Figure 6.31 présente la courbe contrainte-déformation avec l'indication des 11 photos choisies pour l'analyse DIC. La photo numéro 1 enregistrée en début du chargement est choisie comme l'image de référence à laquelle les photos 2–6 sont corrélées. Les déplacements relatifs (Figure

6.32) issus des analyses des couples des photos 1-4, 1-5 et 1-6 mettent à nouveau en évidence la présence de la zone de fort cisaillement dans le pont de roche.

Les cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) issues des analyses sont présentées dans la Figure 6.33. Les déformations  $\epsilon_{s-max}$  au début de l'essai entre les photos 1-2 sont relativement homogènes. A partir de la carte de déformation obtenue entre les photos 1 et 3, trois zones inclinées de déformation localisée  $Z_{1-3}$  (indiquées sur la carte de déformation 1-6 dans la Figure 6.33) sont observées. Les déformations mesurées dans ces zones s'intensifient avec l'augmentation de la charge appliquée. La concentration de la compaction aux pointes des encoches est mise en évidence sur la carte des déformations volumiques mesurées entre les photos 1 et 6 (Figure 6.34).

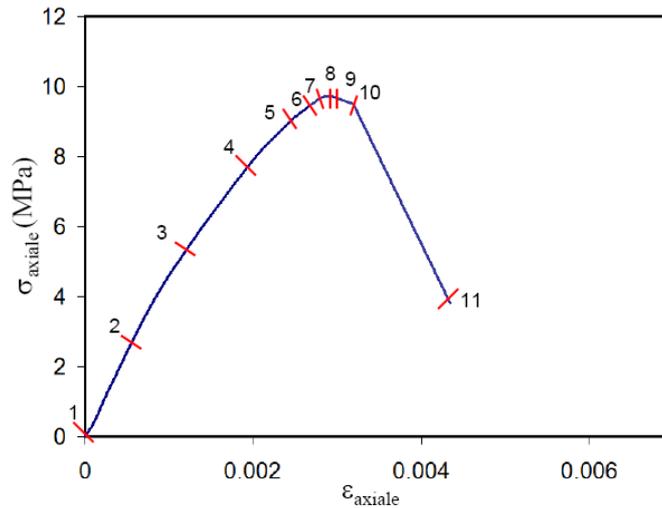
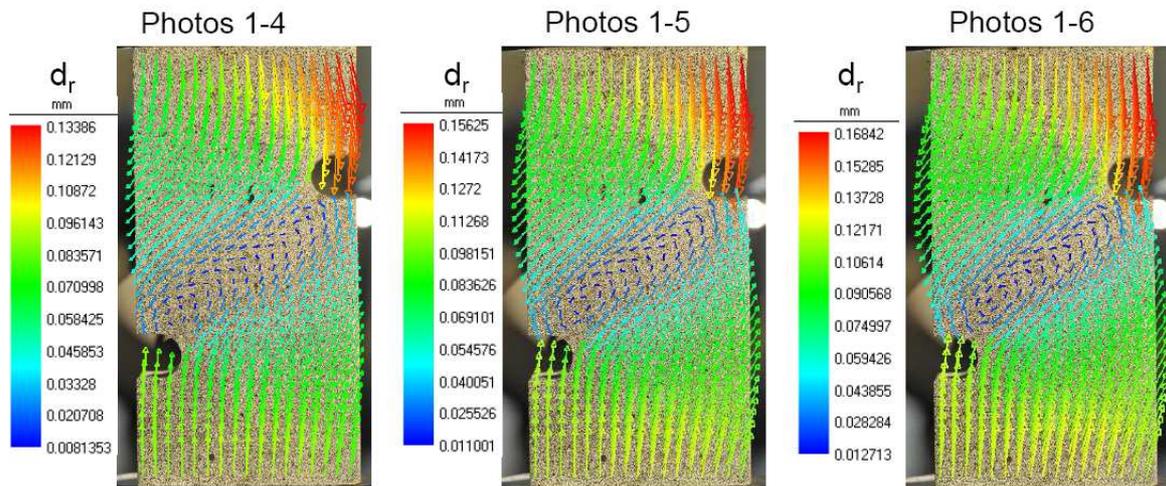
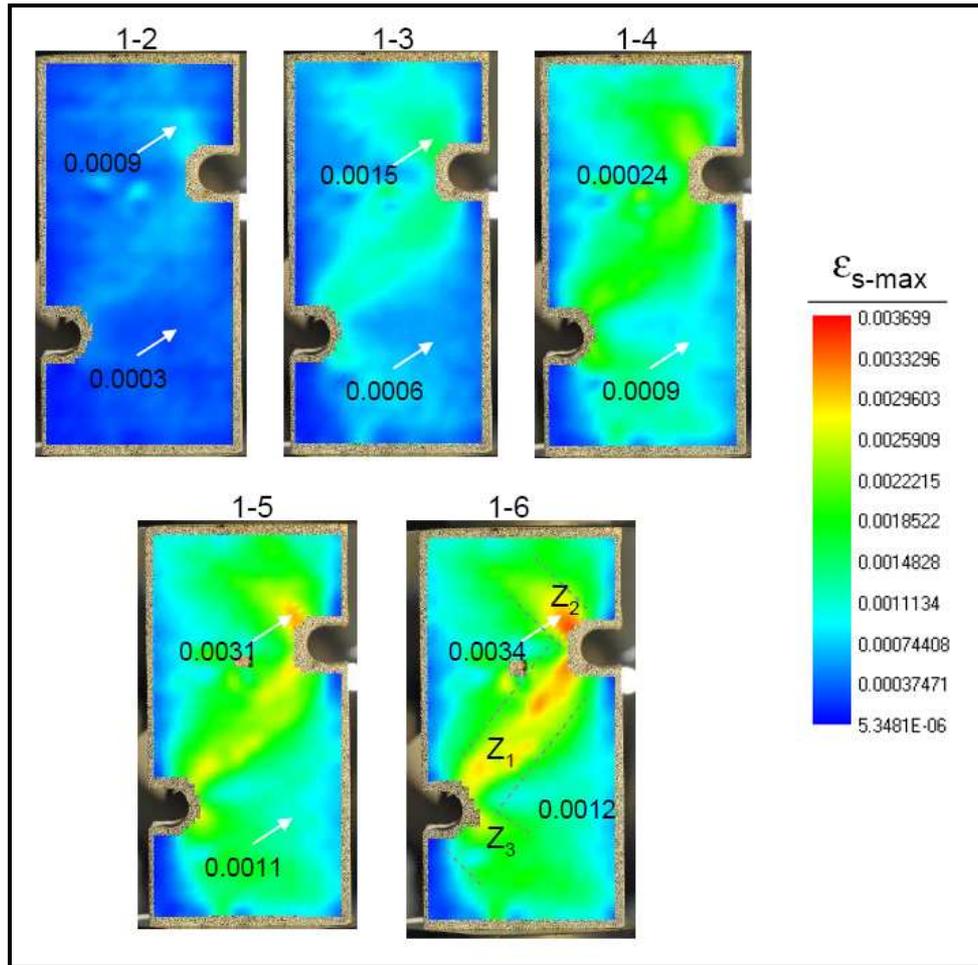


Figure 6.31. Essai Tf-tm-55-01. Courbe contrainte-déformation avec l'indication des numéros des photos analysées.



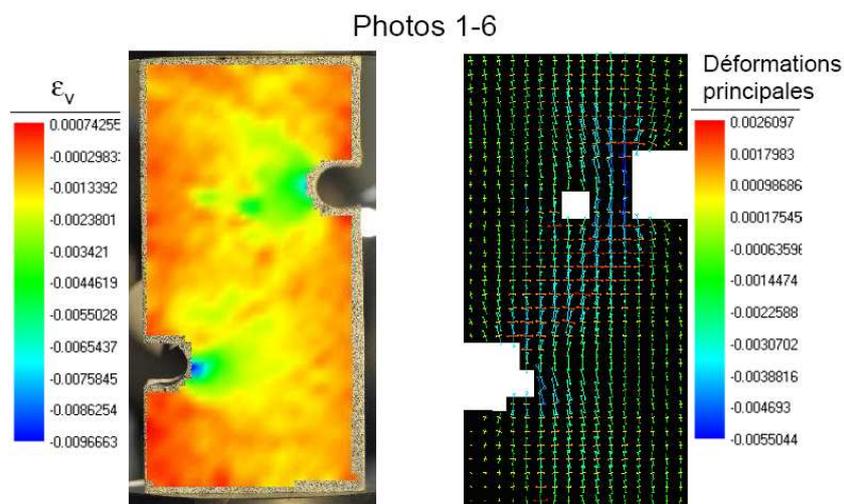
Dimension des motifs : 20x20 pixel<sup>2</sup> ; pas de la grille : 80 pixels

Figure 6.32. Essai Tf-tm-55-01. Cartes des déplacements après la soustraction du déplacement moyen de l'ensemble des points d'analyse issues des analyses des photos 1-4, 1-5 et 1-6 avant l'apparition des fissures.



Dimension des motifs : 20x20 pixel<sup>2</sup> ; pas de la grille : 40 pixels

Figure 6.33. Essai Tf-tm-55-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum avant l'apparition des fissures.



Dimension du motif : 20x20 pixel<sup>2</sup> ; pas de la grille : 40 pixels

Figure 6.34. Essai Tf-tm-55-01. Cartes de la déformation volumique et des déformations principales issues de l'analyse de l'incrément 1- 6.

- **Evolution des fissures**

Nous nous intéressons maintenant à l'évolution des fissures. La Figure 6.35 présente l'analyse de l'incrément 6-7. Dans cet incrément, nous remarquons l'apparition des premières discontinuités  $f_1$  et  $f_2$ . Ces discontinuités sont identifiées et les sauts de déplacements le long de ces discontinuités sont ensuite quantifiés par la méthode DIC-F. La fissure  $f_1$  est inclinée et se propage dans la zone de fort cisaillement  $Z_I$  (voir les cartes des déformations  $\varepsilon_s$  dans la Figure 6.33). Les composantes normales et les composantes tangentielles montrent un mode mixte (mode I et mode II) de la fissure  $f_1$ . La discontinuité  $f_2$  s'initie dans la zone de forte compaction à l'extrémité de l'encoche inférieure (voir la carte de déformation volumique dans la Figure 6.34). Les composantes normales de  $f_2$  indiquent clairement le mode de compaction de cette discontinuité.

Dans les incréments suivants (7-8 (Figure 6.36) et 8-9 (Figure 6.37)), la fissure  $f_1$  continue à se propager dans la direction verticale. Les composantes normales et tangentielles sont comparables dans ces incréments. La fissure  $f_2$  commence à s'écarter de la direction horizontale (dans l'incrément 7-8 (Figure 6.36)) et se développe vers le haut de l'échantillon (dans l'incrément 8-9 (Figure 6.37)). Nous remarquons que la partie inférieure de  $f_2$  est toujours en mode de compaction tandis que la partie supérieure est en mode mixte (mode I et mode II).

Les incréments 9-10 (Figure 6.38) et 10-11 (Figure 6.39) correspondent à la jonction des fissures  $f_1$  et  $f_2$ . La coalescence de ces fissures forme une macro-fissure qui relie les deux encoches et conduit à la rupture de l'échantillon. Nous constatons que la rupture de l'échantillon est dominée par le mode de cisaillement.

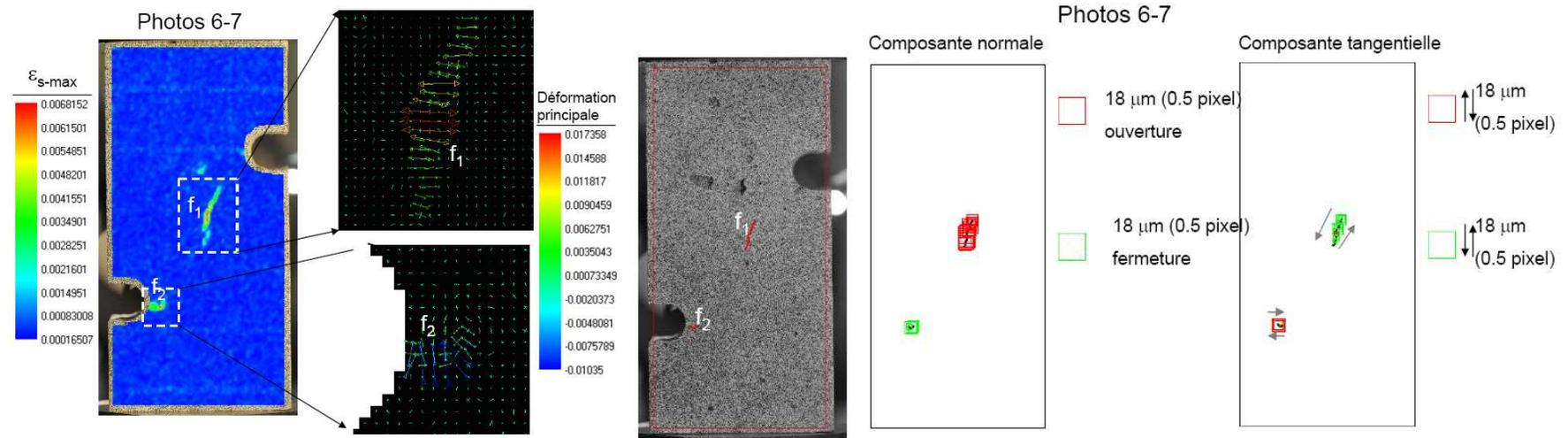


Figure 6.35. Essai Tf-tm-55-01. Photos 6-7 : apparition des fissures  $f_1$  et  $f_2$  dans l'Incrément 6-7.

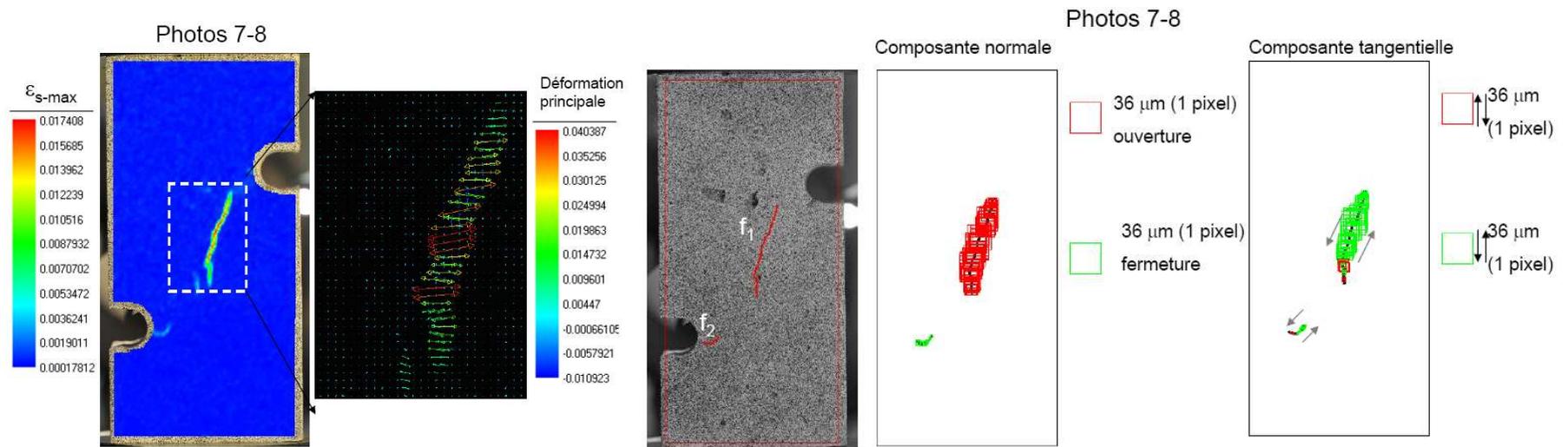


Figure 6.36. Essai Tf-tm-55-01. Photos 7-8 : évolution des fissures  $f_1$  et  $f_2$ .

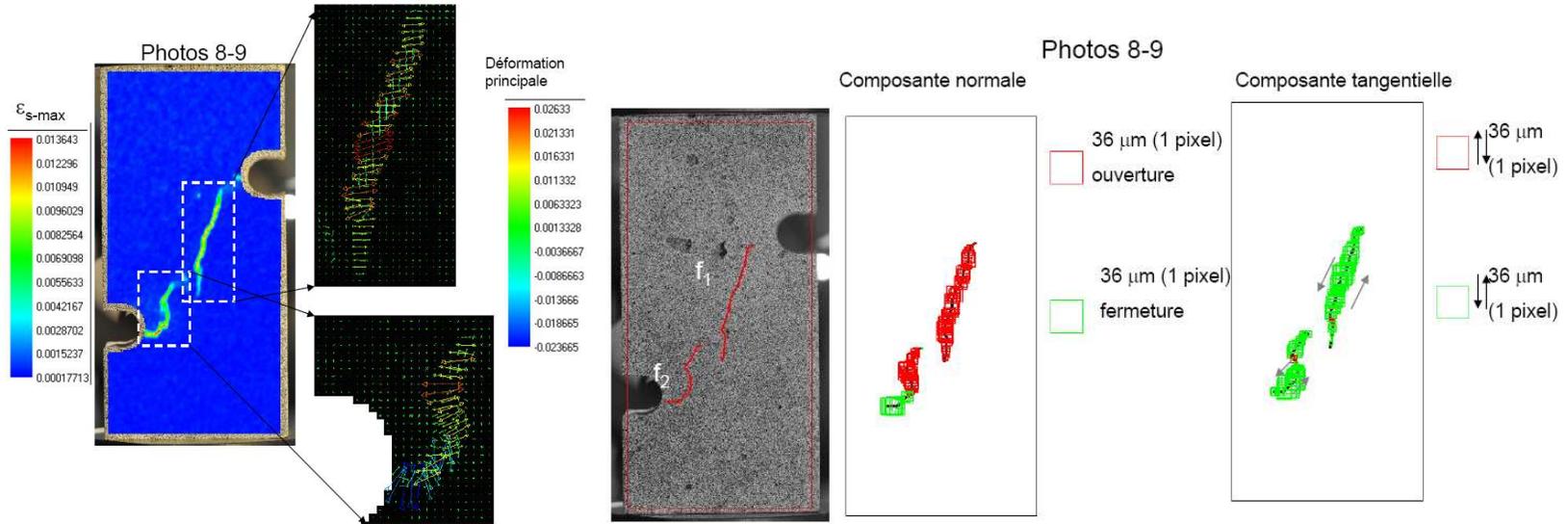


Figure 6.37. Essai Tf-tm-55-01. Photos 8-9 : évolution des fissures  $f_1$  et  $f_2$ .

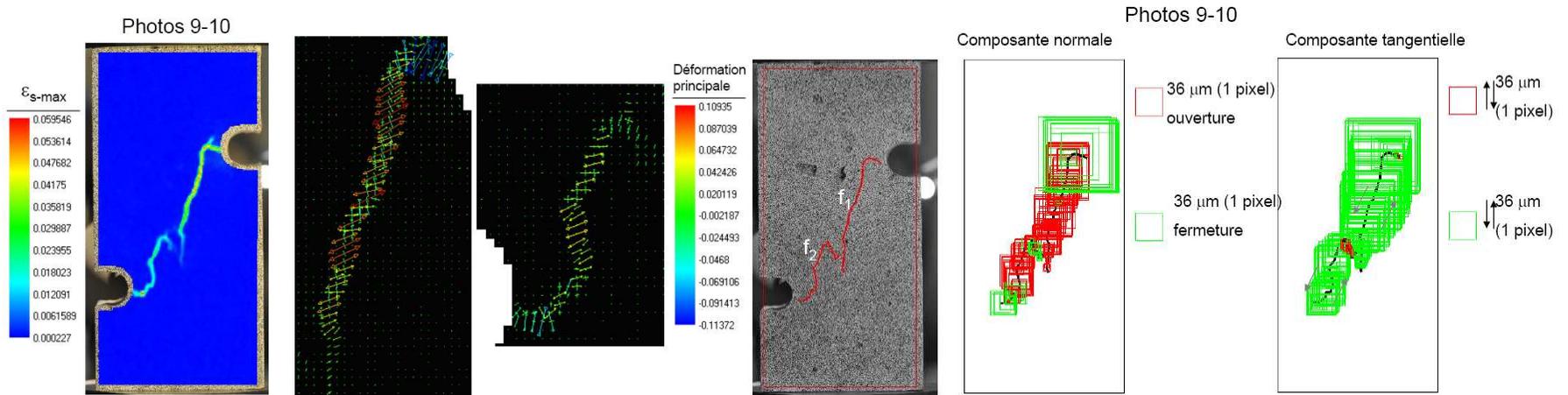


Figure 6.38. Essai Tf-tm-55-01. Photos 9-10 : évolution des fissures  $f_1$  et  $f_2$ .

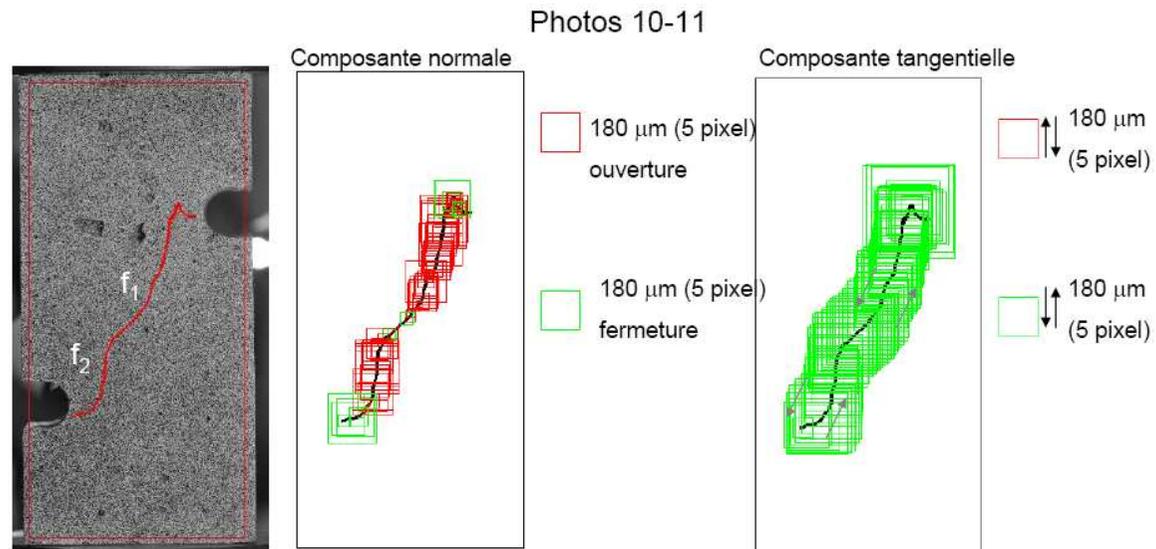
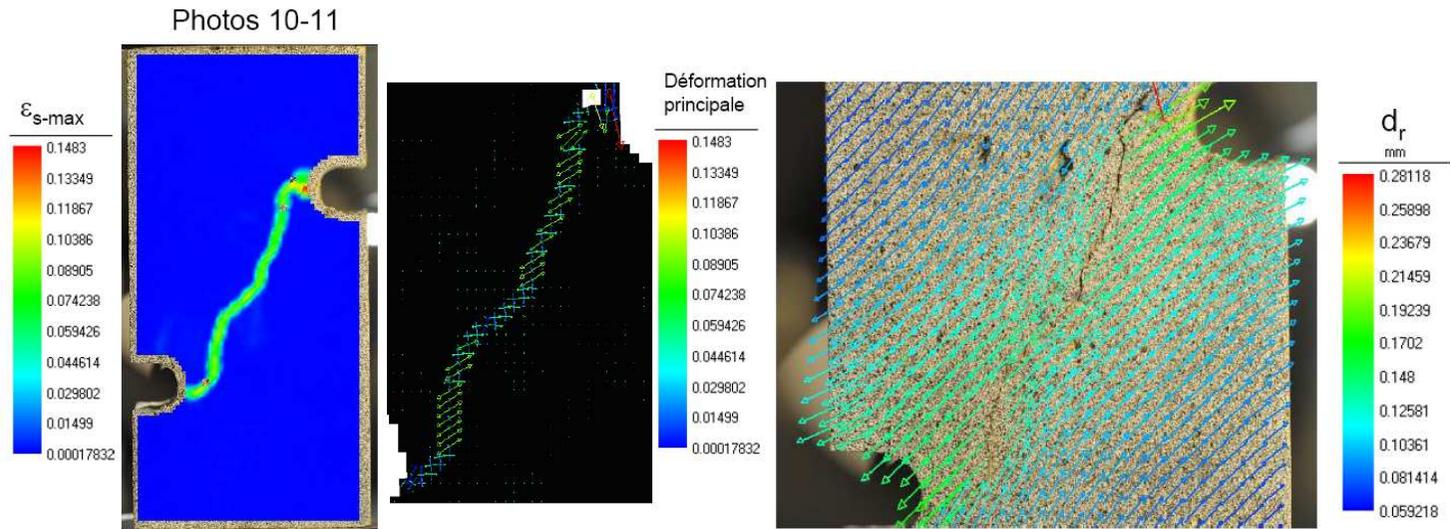


Figure 6.39. Essai Tf-tm-55-01. Photos 10-11 : coalescence des fissure f1 et f2.

- **Mesure de déplacement hors-plan**

Dans les essais de compression, les déplacements hors plan se produisent inévitablement en raison de différents facteurs tels que l'effet de Poisson, les défauts de la planéité des surfaces d'appui, la flexion d'échantillons, *etc.* Un tel déplacement hors plan joue aussi un rôle qui influence l'incertitude de mesure de déplacement par DIC-2D. Les mesures de déplacements hors plans d'une surface est réalisable par la technique de la *Stéréo-corrélation d'images* (logiciel **7D**) (Stereo Image Correlation-SIC) qui nécessite deux appareils photographiques. Ces mesures nous permettent à la fois d'évaluer l'incertitude des mesures par DIC-2D et d'identifier la présence éventuelle d'un cisaillement en mode III.

Des mesures de déplacement hors-plan ont été réalisées lors des essais de type Meuwissen sur le Tuf par la technique SIC. A titre d'exemple, nous présentons ci-dessous le résultat obtenu dans l'essai Tf-tm-55-01. Deux vues différentes, l'une de gauche et l'autre de droite, d'une surface de l'échantillon sont enregistrées simultanément par deux appareils photographiques Nikon 200D (Figure 6.40). 105 paires d'images sont acquises au cours du chargement à la fréquence d'acquisition d'une paire d'images toute les 4 secondes. Les paires correspondant aux instants 1, 2, 6, 10, 11 indiqués sur la courbe contrainte axiale - déformation axiale (Figure 6.31) sont choisies pour l'analyse SIC. Une grille d'analyse couvre la surface de l'échantillon. Pour rendre lisible la présentation des vecteurs de déplacement, les résultats seront représentés avec une pas de la grille d'analyse de 80 pixels (Figure 6.40).

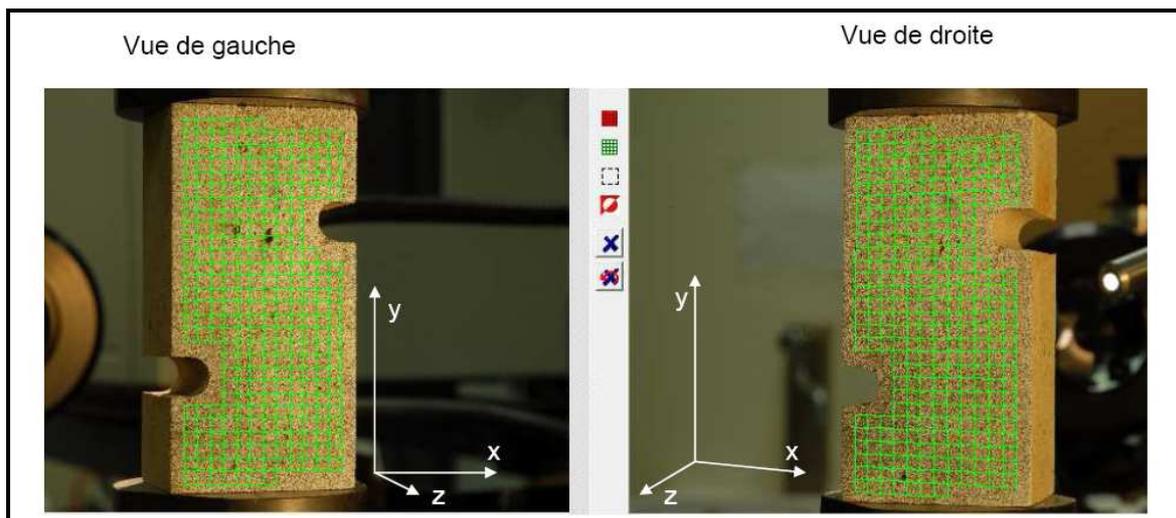


Figure 6.40. Essai Tf-tm-55-01. Deux vues différentes de la surface de l'échantillon. La grille verte est la grille d'analyse (pas de la grille : 80 pixels) ; le déplacement de chaque nœud sera calculé par SIC. La surface étudiée est dans le plan x-y ; l'axe z est perpendiculaire à cette surface.

La Figure 6.41 présente différentes vues des vecteurs de déplacements issus des analyses SIC dans le plan y-z (plan perpendiculaire à la surface de l'échantillon) et dans le plan x-y (plan de la surface de l'échantillon). Les déplacements hors-plan, visibles sur le plan y-z correspondent à une rotation suivant l'axe horizontal (l'axe x). Cette rotation apparait dès début de l'essai. Elle est liée probablement à la non planéité des surfaces d'appui. Nous pouvons estimer le déplacement suivant z de l'extrémité haute de l'échantillon à environ 0.3 mm lors de l'analyse entre les images n°1 et n°11. Si nous considérons que le déplacement de l'extrémité basse est négligeable, l'angle de rotation maximum de l'échantillon à la fin de l'essai est estimé à 0.17°.

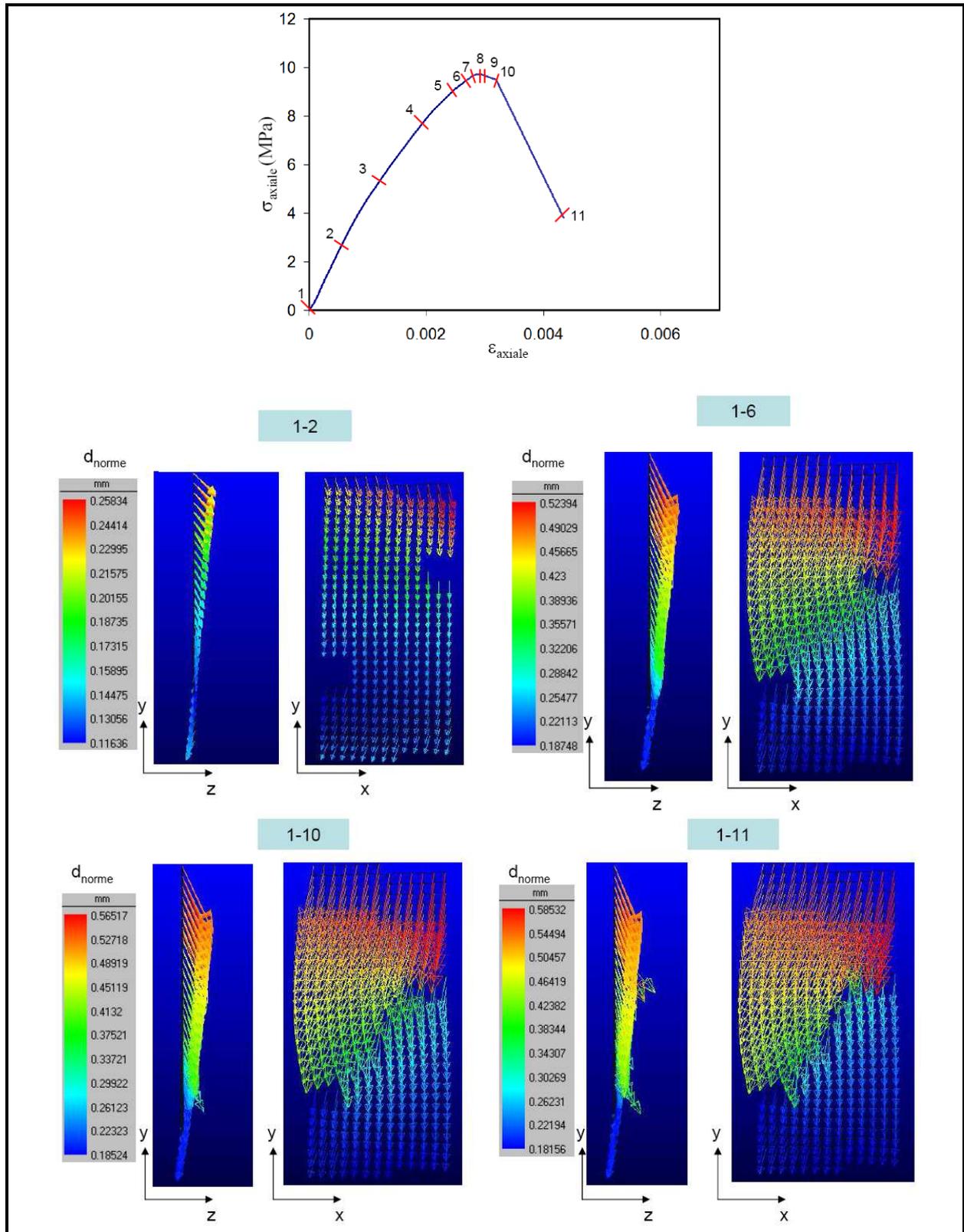


Figure 6.41. Essai Tf-tm-55-01. Vues dans les plan yz et xy des vecteurs déplacement 3D issus des analyses SIC. Une rotation suivant l'axe horizontal (l'axe x) apparaît dès le début de l'essai (cf., analyse 1-2).

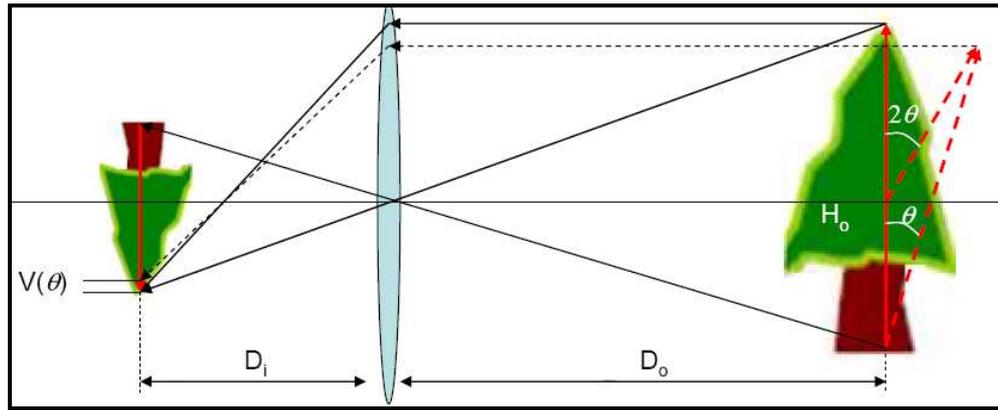


Figure 6.42. Effet d'une rotation hors plan de l'objet sur les mesures de déplacements par DIC-2D.

L'incertitude dans la mesure des déplacements par DIC-2D liée à la rotation de l'objet peut être calculée d'après Sutton et al. (2008) :

$$U(\theta) = -\frac{D_i}{D_o} L \left( -\frac{H_o \sin 2\theta}{2D_o} \right), \quad 6.1$$

$$V(\theta) = -\frac{D_i}{2D_o} H_o \left( \cos 2\theta - 1 - \frac{H_o \sin 2\theta \cos 2\theta}{2D_o} \right), \quad 6.2$$

où  $U(\theta)$  et  $V(\theta)$  sont les valeurs mesurées des déplacements horizontaux et verticaux liés à la rotation de l'objet.  $D_i$  et  $D_o$  sont respectivement la distance image et la distance objet.  $\theta$  est l'angle de rotation de l'objet suivant l'axe horizontal.  $H_o$  et  $L_o$  sont la hauteur et la longueur de l'objet. Les valeurs utilisées dans cet essai (Nikon D3, l'objectif sigma 180 mm f/3.5) sont :

$D_i$ (mm)	$D_o$ (mm)	$H_o$ (mm)	$L_o$ (mm)	$\theta^\circ$
240	720	100	50	-0.17

Nous pouvons donc estimer l'erreur maximale liée à la rotation de l'échantillon dans les mesures par la DIC (2D). Elle est de l'ordre de  $7\mu\text{m}$  pour les déplacements horizontaux et  $-7\mu\text{m}$  pour les déplacements verticaux. Ces valeurs sont très faibles par rapport aux déplacements réels (qui sont mesurés de l'ordre de quelques centaines de  $\mu\text{m}$  avant la rupture), et peuvent être négligées.

Nous présentons dans la Figure 6.43 les déplacements 3D issus d'une analyse SIC de la zone centrale de l'échantillon entre deux paires d'images enregistrées aux instants 9 et 10. Les discontinuités de déplacements suivant x et y sont aisément détectées dans cette analyse. Ces discontinuités correspondent à la propagation des fissures  $f_1$  et  $f_2$  qui sont identifiées dans les analyses DIC. Nous observons une petite composante de déplacement hors plan (de l'ordre de 0,02 mm) mais aucune discontinuité de déplacement suivant z n'est visible de part et d'autre de la fissure. Cette remarque reste valable pour l'ensemble des analyses incrémentales. Ces mesures démontrent que les fissures ne fonctionnent pas en mode III dans cet essai.

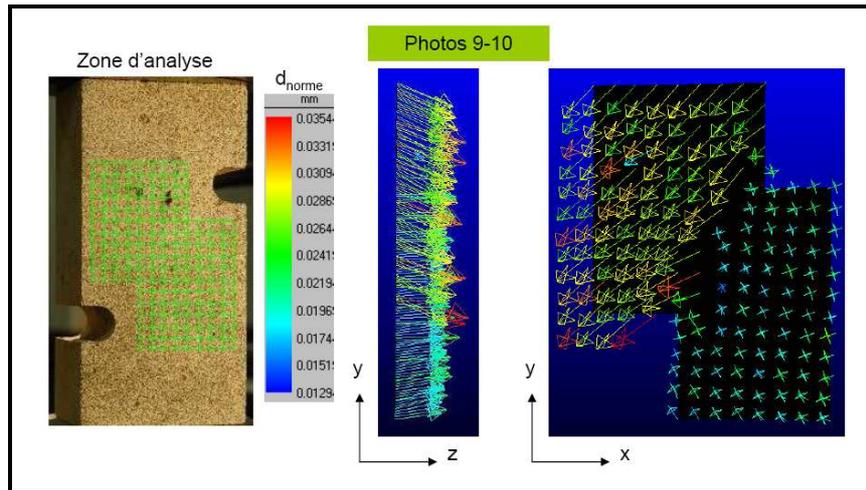


Figure 6.43. Essai Tf-tm-55-01. Déplacements 3D dans la zone de pont de roche issus de l'analyse SIC entre les photos 9 et 10.

- **Etude par le microscope à long distance**

Les analyses DIC ont montré la présence de zones de compaction suivie par la formation des bandes de compactions aux extrémités des encoches dans tous les essais de type Meuwissen sur le Tuf analysés. Dans l'essai Tf-tm-55-01, ce phénomène est observé plus localement par un système optique composé d'un microscope à long distance Questar associé à une camera. Le microscope focalise sur une zone réduite ( $2.5 \times 2 \text{ mm}^2$ ) localisée à l'extrémité de l'encoche inférieure de l'échantillon. La zone examinée se situe sur la face opposée à celle étudiée par DIC-2D.

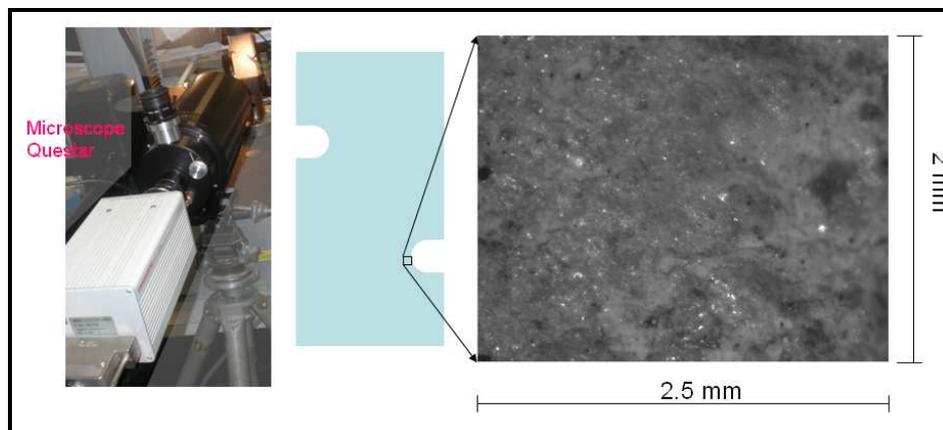


Figure 6.44. Essai Tf-tm-55-01. Mise en place du microscope Questar. La zone observée est située en pointe de l'entaille inférieure, sur la face opposée à celle étudiée par la DIC.

Le microscope est associé à une camera Hamamatsu ( $1280 \times 1024 \text{ pixel}^2$ , 1 image/4s). La taille d'un pixel dans les images est d'environ  $2 \mu\text{m}$ . Aucun mouchetis n'est ajouté à la surface étudiée.

La Figure 6.45 présente deux images enregistrées dans des instants 1, et 10 indiqués sur la courbe contrainte-déformation. Bien que l'image 10 ait été enregistrée au pic de contrainte, il est assez difficile de détecter les discontinuités sur cette image à l'œil nu. La Figure 6.46 présente les déformations de cisaillement maximum et volumiques issues des analyses 1-2, 1-3 et 1-4. Nous détectons à cette échelle aisément la présence une compaction précoce dès l'instant 2. Cette compaction s'élargit dans les photos suivantes (photos 3 et 4). La « fermeture » maximale de cette compaction peuvent être estimées de l'ordre de **1pixel (2  $\mu\text{m}$ )** dans l'analyse 1-2 ; 3 pixels (6  $\mu\text{m}$ )

dans l'analyse 1-3 et 5 pixel (10  $\mu\text{m}$ ) dans l'analyse 1-4. Les analyses présentées ici ne sont qu'un exemple mais elles ont prouvé l'intérêt de l'utilisation d'un microscope à long distance dans l'étude de la fissuration pour les observations à l'échelle très locale qui serait impossible avec les caméras usuelles.

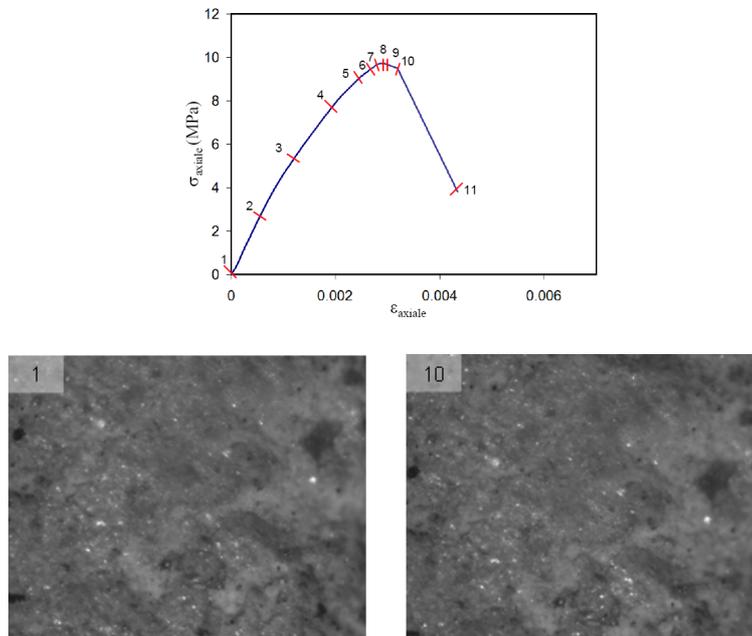


Figure 6.45. Essai Tf-tm-55-01. Les deux images enregistrées correspondant aux instants 1 et 10 indiqués sur la courbe contrainte-déformation. Il est très difficile de détecter à l'œil nu la présence de la compaction sur l'image 10.

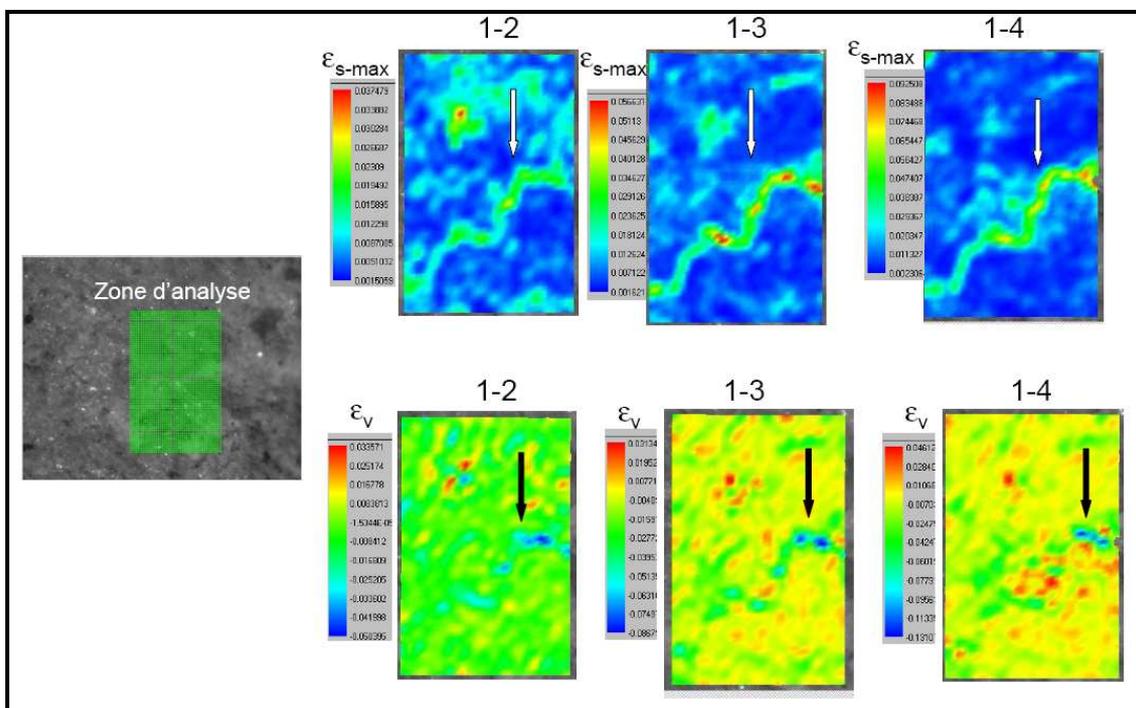


Figure 6.46. Essai Tf-tm-55-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) (en haut) et cartes des déformations volumiques (en bas) issues des analyse entre la photo 1 avec les photos 2,3, et 4 de la zone d'analyse indiquée par la grille verte dans la photo à gauche.

## 6.4. Etude sur le CPIR09

### 6.4.1. Observations générales

Six essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur les échantillons de géométrie de type Meuwissen de CPIR09 en utilisant la machine Instron. Le chargement a été contrôlé en déplacement avec une vitesse constante de 0.1 mm/min (soit une vitesse de déformation moyenne de  $10^{-3}$ /min). Tous les échantillons ont été scannés par tomographie RX avant et après essai.

Les réponses mécaniques de l'ensemble des essais sont présentées dans la Figure 6.47. Les pentes des premières parties quasi-linéaires de toutes les courbes sont comparables. Les premiers pics de contrainte sont relativement identiques dans tous les essais (autour de 7MPa). Ensuite, les pentes de ces courbes diminuent après la première chute de contrainte.

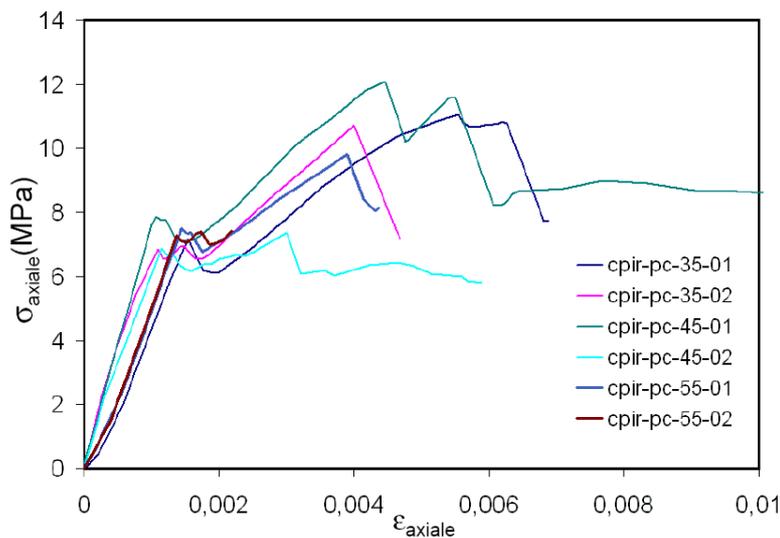


Figure 6.47. Courbes des contraintes axiales en fonction des déformations axiales mesurées par DIC pour l'ensemble des essais de type Meuwissen sur le Cpir09.

Le Tableau 6.4 présente un récapitulatif des techniques expérimentales utilisées, la contrainte axiale au premier pic correspond à l'apparition des premières discontinuités de déplacement et les cartes des déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et volumique ( $\epsilon_v$ ) issues des analyses DIC entre les deux photos acquises avant et après le chargement (notons que l'essai Cpir-tm-55-02 a été arrêté juste après la première chute de contrainte).

L'évolution de la rupture est reproductible dans l'ensemble des essais. Lors de la première chute de contrainte axiale, les bandes horizontales de compaction sont toujours les premières qui apparaissent au niveau des encoches dans les zones de fortes compressions prédites par la simulation numérique en élasticité. Avec l'augmentation de la charge appliquée, ces bandes se propagent dans la direction horizontale à partir des extrémités des encoches vers les bords des échantillons. La propagation de ces bandes s'arrête lors qu'elles atteignent le niveau de l'encoche opposées. Les nouvelles chutes de l'effort correspondent à l'apparition des nouvelles fissures. Les modes de ces nouvelles fissures sont divers ; elles sont les fissures verticales de traction et aussi bien les bandes horizontales de compaction.

Nous présentons dans la suite en détail l'analyse effectuée pour l'essai Cpir-tm-35-01 où la mesure des EA a été effectuée. Les résultats des autres essais se trouvent en annexe A6.

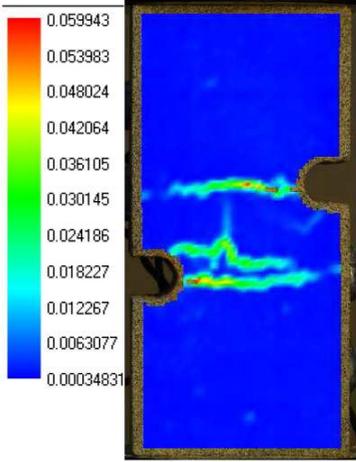
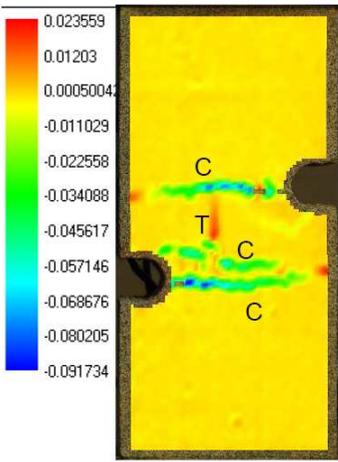
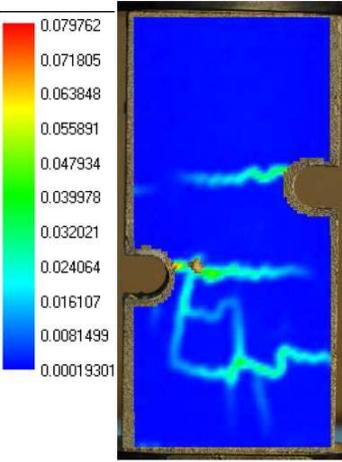
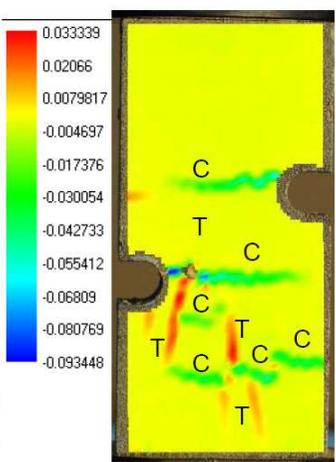
Nom d'essai	Cpir-tm-35-01 ( $\beta=35^\circ$ )	Cpir-tm-35-02 ( $\beta=35^\circ$ )
Techniques de mesures	DIC-2D ; Tomographie RX avant et après l'essai ; EA	DIC-2D ; Tomographie RX avant et après l'essai
Contrainte au premier pic (MPa)	7.2	6.8
Déformation de cisaillement issue de l'analyse DIC (analyse des photos acquises en début et en fin de chargement)	<p>Déformation de cisaillement maximum</p>  <p>Déformation volumique</p> 	<p>Déformation de cisaillement maximum</p>  <p>Déformation volumique</p> 

Tableau 6.4. Présentation des techniques expérimentales utilisées, contrainte axiale au premier pic et déformations de cisaillement maximum et volumique dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09.

Nom d'essai	Cpir-tm-45-01 ( $\beta=45^\circ$ )	Cpir-tm-45-02 ( $\beta=45^\circ$ )
Techniques de mesures	DIC-2D ; Tomographie RX avant et après l'essai	DIC-2D ; Tomographie RX avant et après l'essai
Contrainte au premier pic (MPa)	7.8	6.9
Déformation de cisaillement issue de l'analyse DIC (analyse des photos acquises en début et en fin de chargement)	<p style="text-align: center;">Déformation de cisaillement maximum      Déformation volumique</p>	<p style="text-align: center;">Déformation de cisaillement maximum      Déformation volumique</p>

Tableau 6.4. Présentation des techniques expérimentales utilisées, contrainte axiale au premier pic et déformations de cisaillement maximum et volumique dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09. (suite)

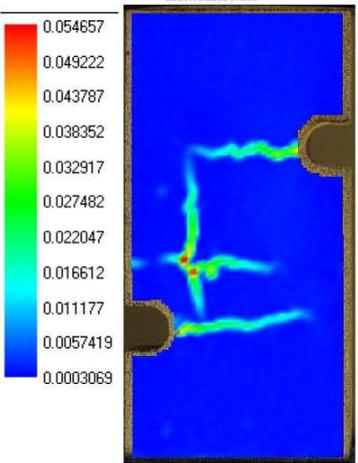
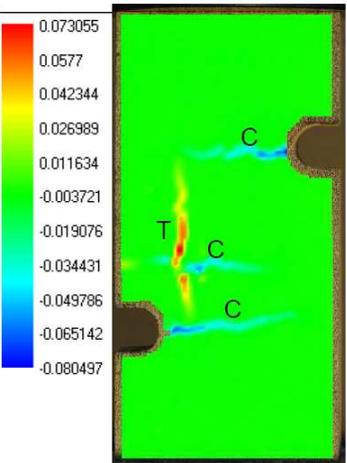
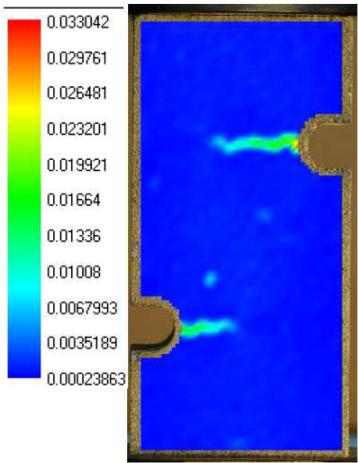
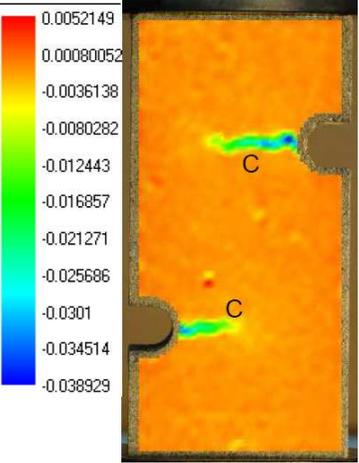
Nom d'essai	Cpir-tm-55-01 ( $\beta=55^\circ$ )	Cpir-tm-55-02 ( $\beta=55^\circ$ )
Techniques de mesures	DIC-2D ; Tomographie RX avant et après l'essai	DIC-2D ; Tomographie RX avant et après l'essai
Contrainte au premier pic (MPa)	7.5	7.4
Déformation de cisaillement issue de l'analyse DIC (analyse des photos acquises en début et en fin de chargement)	<p>Déformation de cisaillement maximum</p>  <p>Déformation volumique</p> 	<p>Déformation de cisaillement maximum</p>  <p>Déformation volumique</p> 

Tableau 6.4. Présentation des techniques expérimentales utilisées, contrainte axiale au premier pic et déformations de cisaillement maximum et volumique dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09. (Suite)

## 6.4.2. Essai Cpir-tm-35-01

Deux techniques de mesure de champs ont été utilisées dans l'essai Cpir-tm-35-01 : les mesures d'EA effectuées par le système Mistras en utilisant les capteurs piézoélectriques de laboratoire 3SR et les mesures des champs cinématiques par la technique DIC. La Figure 6.48 présente le positionnement des six capteurs piézoélectriques collés sur trois faces de l'échantillon (la face 4 est étudiée par corrélation d'images).

Parmi 130 photos de la face 4 enregistrées au cours du chargement (1 photo/4s), 9 photos sont choisies pour les analyses DIC. La taille du pixel dans les photos est égale à  $34 \times 34 \mu\text{m}^2$ . Les instants de l'enregistrement de ces 9 photos sont indiqués sur la courbe contrainte axiale - déformation axiale dans la Figure 6.49. La Figure 6.50 présente l'évolution, en fonction du temps, de la contrainte axiale, du taux des coups des EA ( $dN_C$ ) et du taux de l'énergie absolue des EA ( $dE_{abs}$ ) enregistrés par le capteur numéro 5.

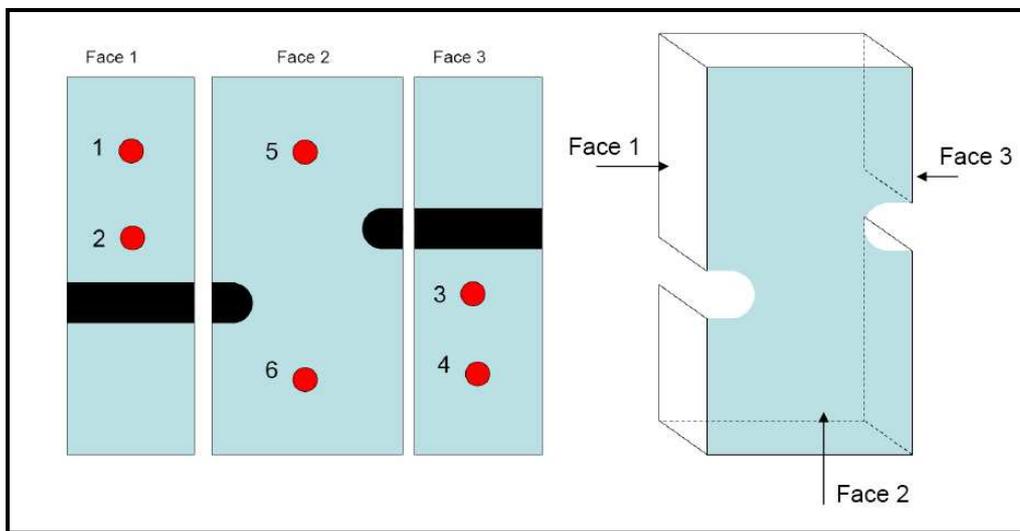


Figure 6.48. Essai Cpir-tm-35-01. Positionnement des six capteurs acoustiques.

La Figure 6.51 montre les résultats de l'analyse DIC entre les photos 1 et 2 enregistrées avant la première chute de contrainte. Dans la Figure 6.52, nous présentons les cartes des déformations de cisaillement maximum et volumique issues des analyses incrémentales DIC des photos choisies, sur lesquelles la présence des fortes discontinuités peut être observées. Ensuite, les discontinuités sont identifiées et les sauts de déplacement le long de ces fissures sont quantifiés par la méthode DIC-F (Les figures 6.53 et 6.54). La valeur  $K_{min}$  dans l'identification des discontinuités est choisie égale à  $5 \mu\text{m}$ .

Les photos 1 et 2 sont enregistrées respectivement au début du chargement et au premier pic de la contrainte axiale. Les valeurs  $dN_C$  et  $dE_{abs}$  restent très faibles dans cet intervalle à l'exception d'un saut marqué sur ces deux courbes avant l'acquisition de la photo 2. L'analyse DIC de ce couple de photos présentée dans la Figure 6.51 ne montre aucune forte discontinuité. Quatre zones de concentration de déformation (Z1-Z4) sont obtenues sur la carte de déformation de cisaillement maximum aux niveaux des encoches. Pourtant, les déformations de cisaillement mesurées dans ces zones sont encore relativement faibles (0.13%). Deux zones de forte compression (déformation volumiques d'environ -0.3%) sont remarquées aux extrémités des encoches sur la carte de déformation volumique. Les vecteurs des déplacements relatifs mettent en évidence la présence d'une zone de forte compression entre deux encoches.

- **Evolution des bandes de compaction**

L'incrément 2-3 correspond à la première chute de l'effort. L'enregistrement des activités d'EA augmente fortement dans cet incrément. La première discontinuité *C1* est observée à l'extrémité de l'encoche supérieure sur les cartes de la déformation de cisaillement et de la déformation volumique (Figure 6.52). Les déformations volumiques négatives mesurées dans cette zone et les composantes normales montrent que *C1* est un mode de compaction. Ensuite, nous remarquons l'apparition de la deuxième bande de compaction *C2* sur l'extrémité de l'encoche inférieure dans l'incrément 3-4. Plus tard, ces deux bandes de compaction *C1* et *C2* se propagent des extrémités des encoches dans la direction horizontale vers deux bords de l'échantillon jusqu'à la photo n°8. Une chute de la contrainte axiale accompagnée de fortes activités acoustiques est remarquée dans l'incrément 7-8 mais aucune nouvelle discontinuité n'est observée en surface. Soulignons que la propagation de *C1* et de *C2* s'arrête lorsque ces bandes arrivent aux niveaux de l'encoche opposée. La chute finale de l'effort dans le dernier incrément 8-9 correspond à la formation de deux bandes de compaction *C3* et *C4* et d'une fissure verticale de traction *T*. Au cours de la propagation des bandes de compaction, l'activité des EA reste importante.

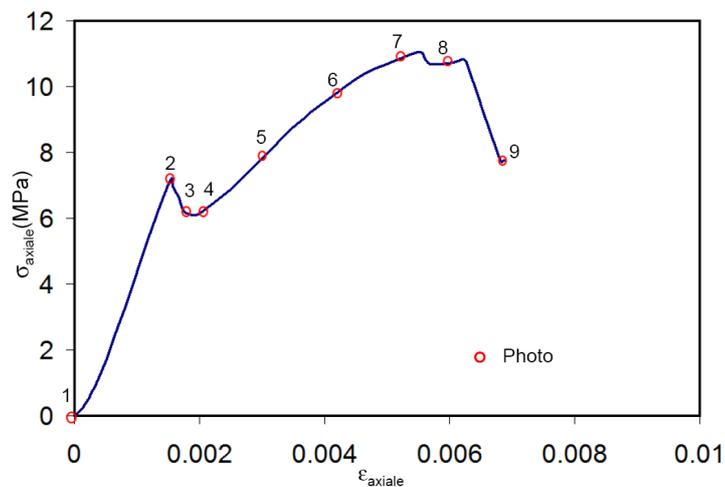


Figure 6.49. Essai Cpir-tm-35-01. Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale mesurée par DIC avec indication des 9 photos utilisées dans les analyses des fissures.

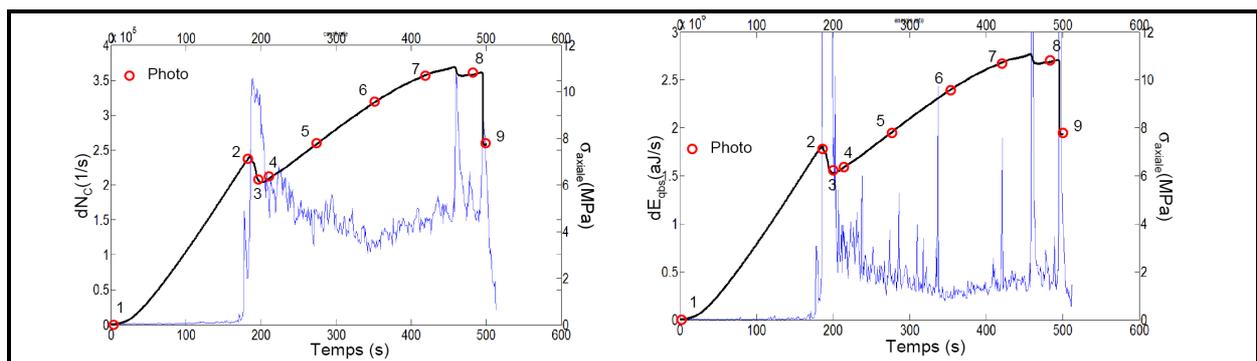
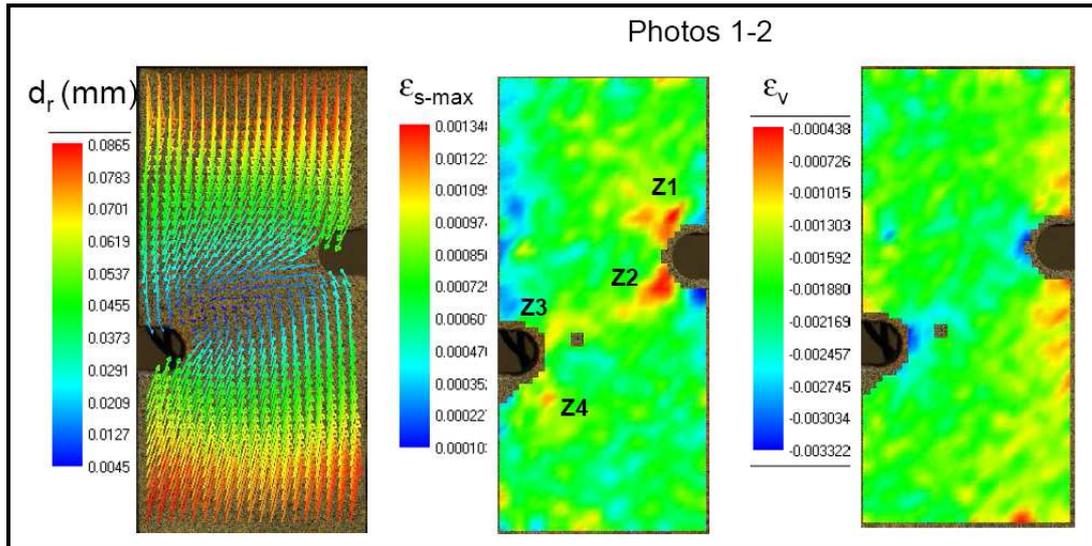


Figure 6.50. Essai Cpir-tm-35-01. Contrainte axiale et taux des coups des EA ( $dN_C$ ) en fonction du temps (à gauche). Contrainte axiale et taux des énergies absolues des EA ( $dE_{abs}$ ) en fonction du temps avec l'indication des photos utilisées dans les analyses des fissures (à droite).



Dimension des motifs :  $20 \times 20 \text{ pixel}^2$  ; pas de la grille : 40 pixels

Figure 6.51. Essai Cpir-tm-35-01. Carte des vecteurs déplacement relatif, de la déformation de cisaillement maximum et de la déformation volumique issues de l'analyse DIC entre les photos 1-2.

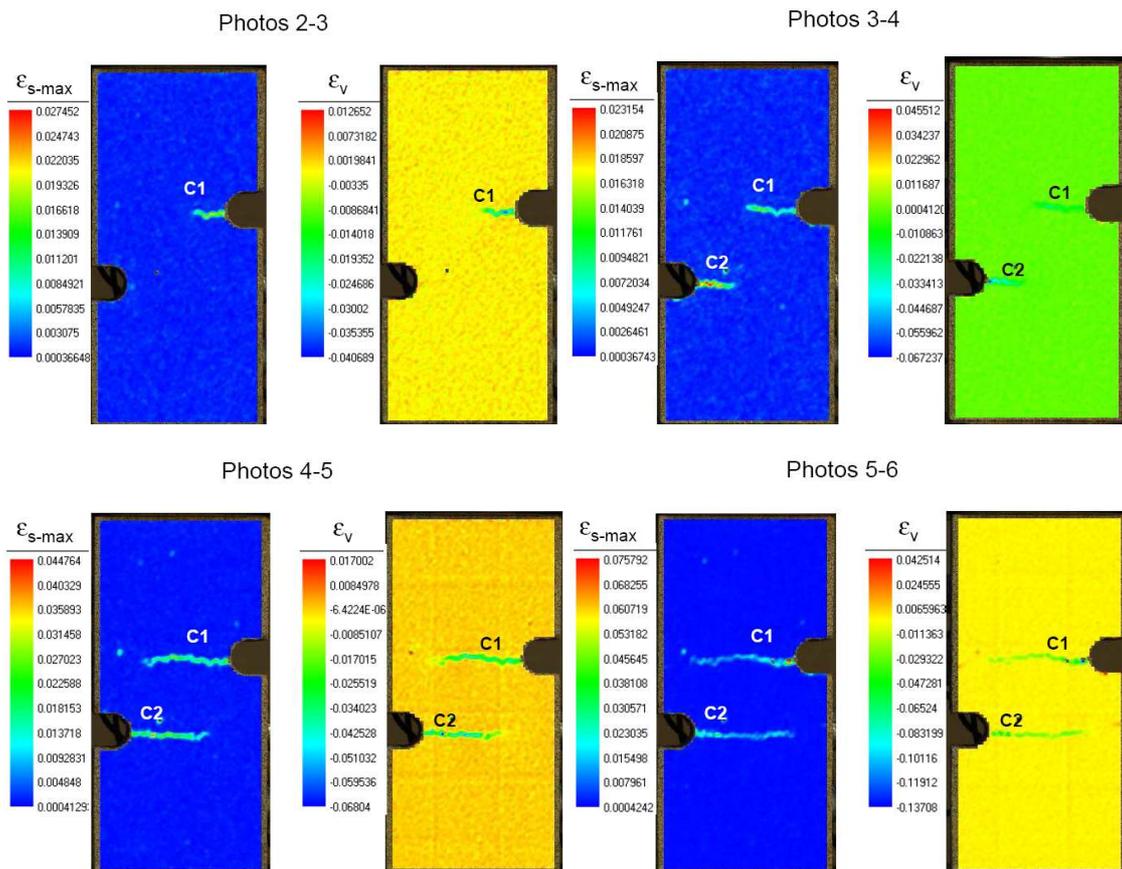


Figure 6.52. Essai Cpir-tm-35-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum et des déformations volumiques issues de l'analyse incrémentales DIC. Dimension des motifs :  $20 \times 20 \text{ pixel}^2$  ; pas de la grille : 10 pixels

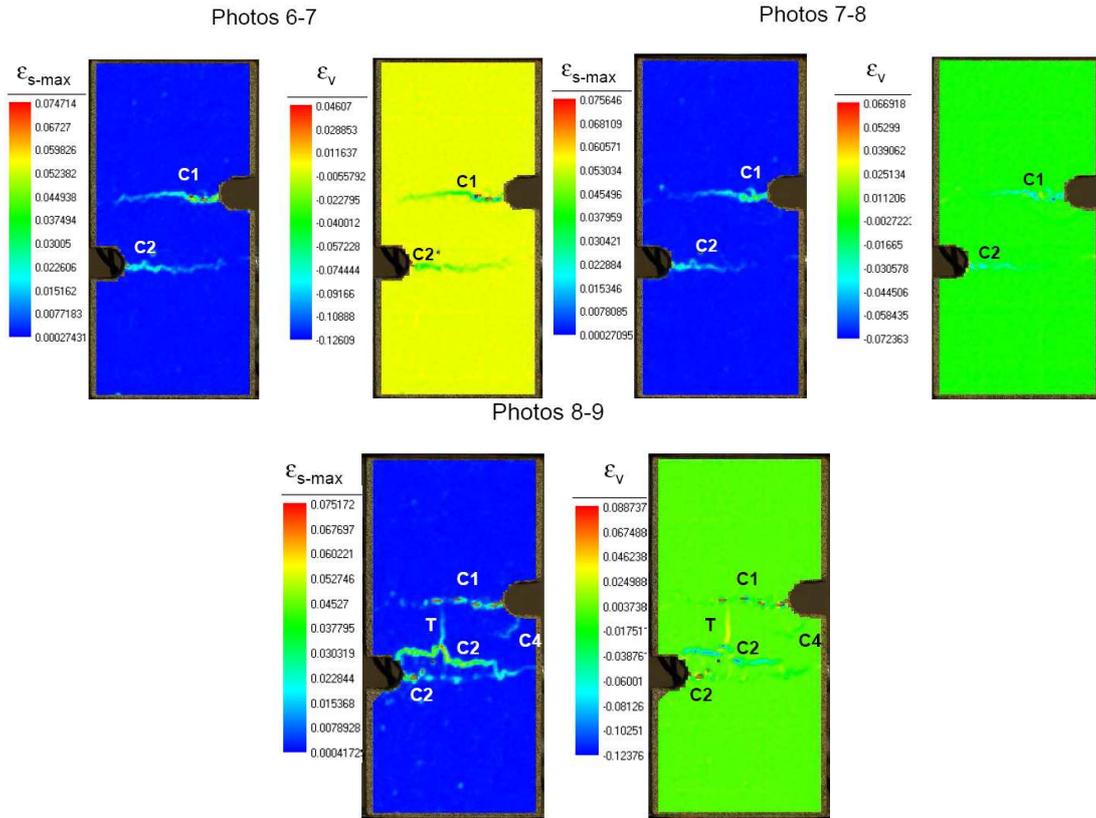


Figure 6.52. Essai Cpir-tm-35-01. Cartes des déformations de cisaillement maximum et des déformations volumiques issues de l'analyse incrémentales DIC. Dimension des motifs :  $20 \times 20 \text{ pixel}^2$  ; pas de la grille : 10 pixels. (Suite)

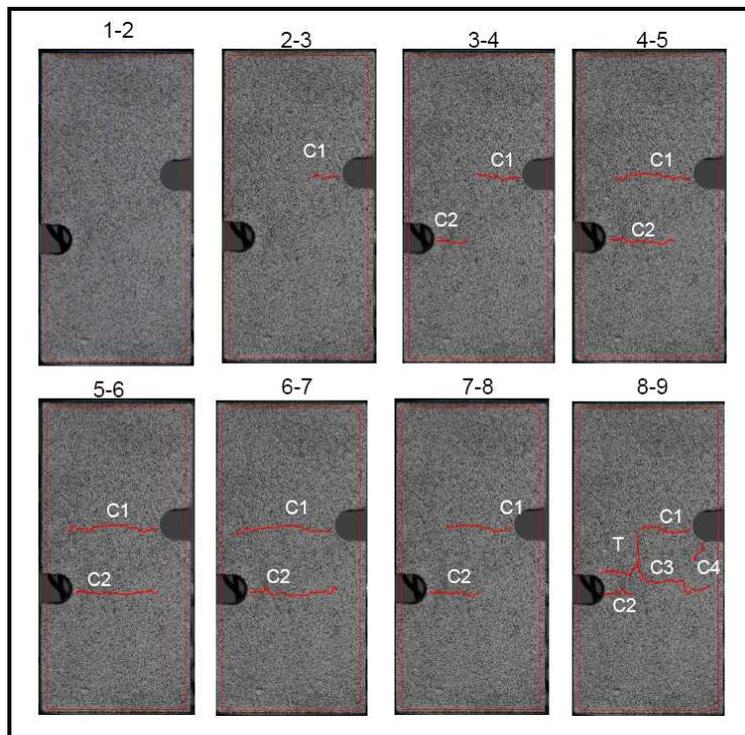


Figure 6.53. Essai Cpir-tm-35-01. Fissures identifiées par la technique DIC-F dans des couples de photos successives.  $K_{min} = 5 \mu m$ .

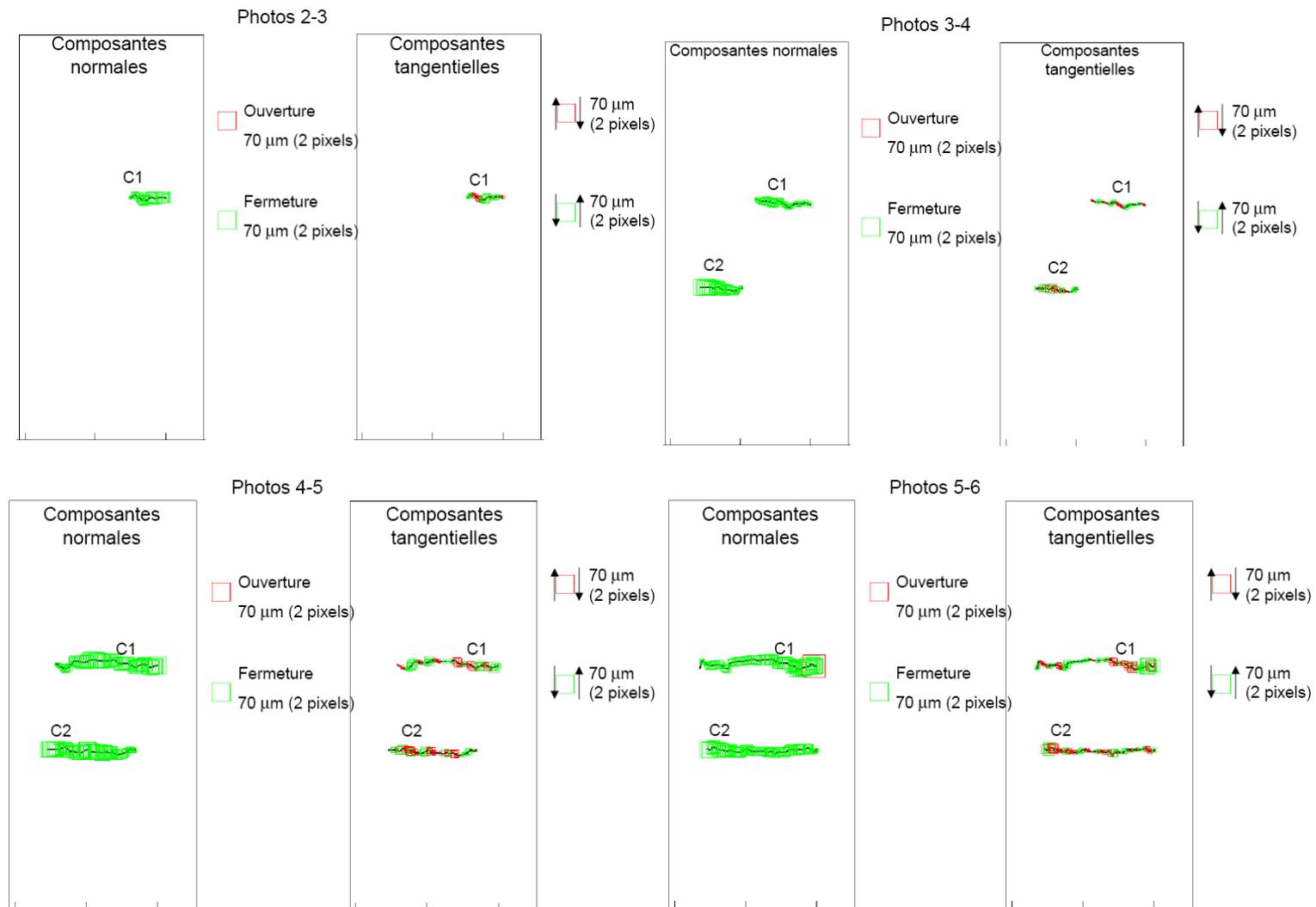


Figure 6.54. Essai Cpir-tm-35-01. Cartes des composantes normales et tangentielles des sauts de déplacements le long des fissures quantifiées par la méthode DIC-F.

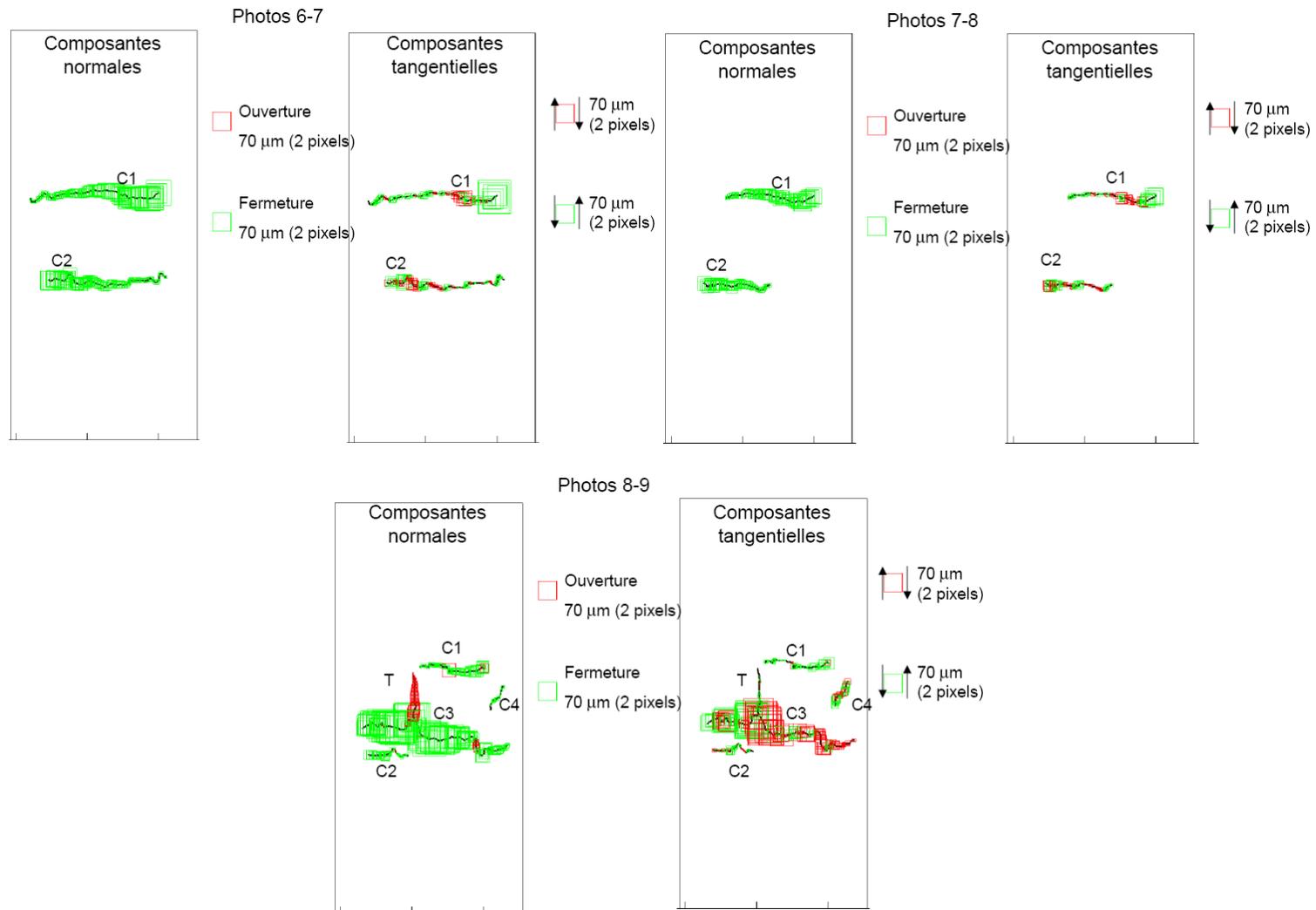


Figure 6.54. Essai Cpir-tm-35-01. Cartes des composantes normales et tangentielles des sauts de déplacements le long des fissures quantifiées par la méthode DIC-F. (Suite)

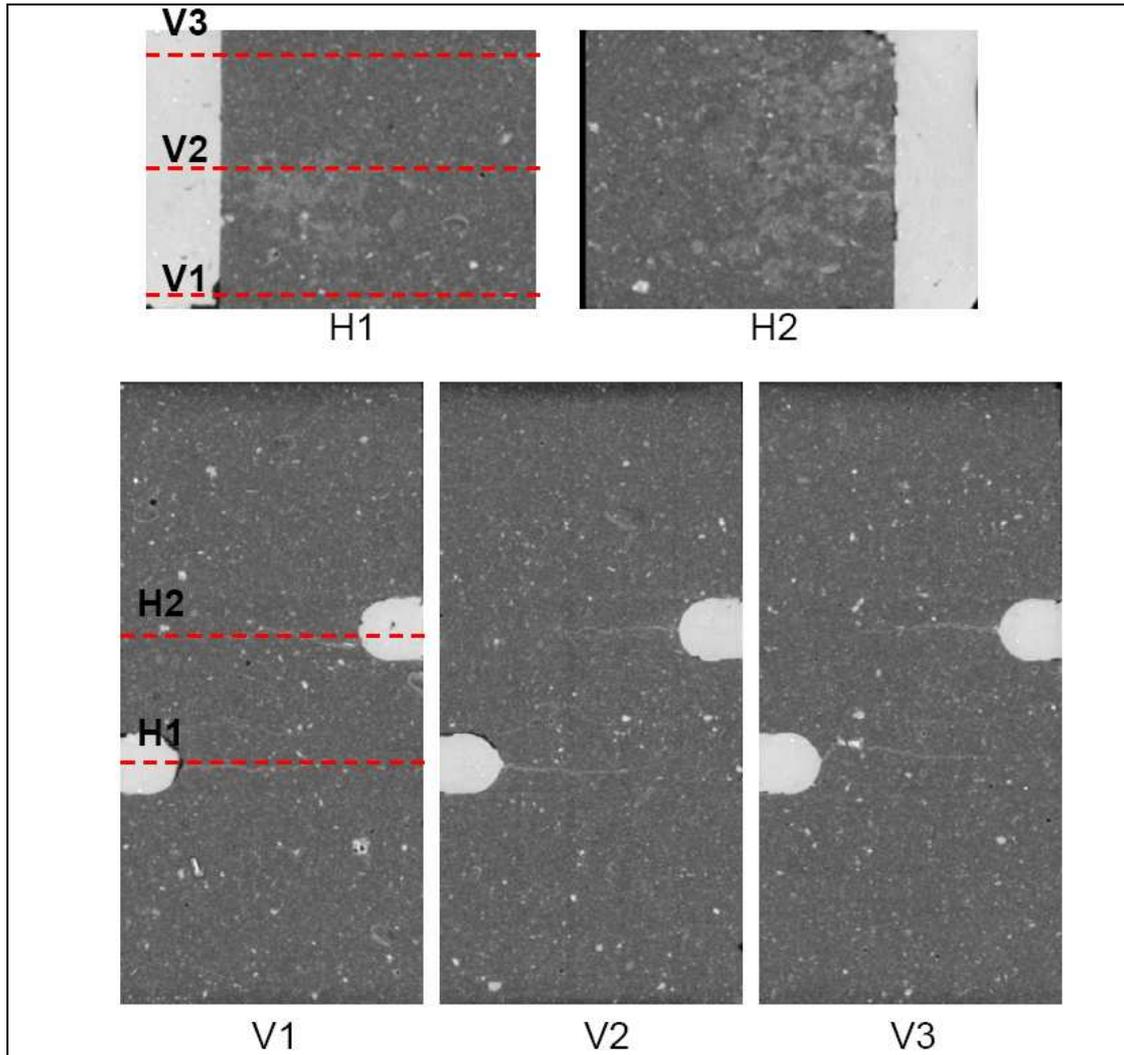


Figure 6.55. Essai Cpir-tm-35-01. Deux coupes horizontales (H1-2) et trois coupes verticales (V1-3) de l'échantillon après la rupture. Taille du voxel :  $128 \times 128 \times 128 \mu\text{m}^3$ .

La Figure 6.55 montre quelques coupes tomographiques (deux coupes horizontales et trois coupes verticales) de l'échantillon après l'essai (taille du voxel :  $128 \times 128 \times 128 \mu\text{m}^3$ ). A cette résolution, les bandes de compaction sont visibles sous la forme des bandes plus claires dans les images. Pourtant, cette résolution spatiale ne permet pas de détecter la présence de la fissure de traction  $T$ . L'ouverture maximale de cette fissure est de  $40 \mu\text{m}$  qui est inférieure à un pixel des images tomographiques.

## 6.5. Conclusion

Une campagne d'essais de compression uniaxiale a été réalisée sur les échantillons de type Meuwissen de Tuf et de CPIR09 en utilisant la combinaison de nombreuses techniques de mesures de champs. Pour les deux matériaux, trois angles différents de l'inclinaison du pont de roche ( $\beta$ ) ont été examinés :  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $55^\circ$ .

Dans tous les essais sur **le Tuf**, avant l'apparition des fissures, la localisation de la déformation de cisaillement ( $\epsilon_{s-\max}$ ) et des zones de compaction sont systématiquement constatées au niveau des encoches et dans le pont de roche (Figure 6.56). Les déformations dans ces zones s'intensifient avec l'augmentation de la charge appliquée. Dans cette phase de la localisation des déformations, les EA

augmentent légèrement. Les premières fissures apparaissent toujours dans les zones de la localisation de déformation  $\epsilon_{s-max}$ . Deux types principaux des fissures sont reportés : les fissures de type de wing cracks  $W$  se propagent en mode I dans la direction verticales entre les extrémités des encoches et les surfaces d'appui des échantillons ; et les fissures  $P$  qui apparaissent dans le pont de roche et rejoignent les encoches. Lors des essais avec  $\beta=35^\circ$ , les wing cracks  $W$  sont les fissures systématiquement reportées. Dans les essais avec  $\beta=45^\circ$ , les deux types de fissures sont observés. Pour  $\beta=55^\circ$ , les ruptures sont les fissures  $P$  localisées sur le pont de roche. La formation de ces fissures est souvent issue de la coalescence de fissures de taille plus petite qui apparaissent avant le pic de la contrainte. Le mode de la propagation des fissures  $P$  déterminé par DIC-F est généralement le mode mixte (cisaillement et ouverture) sauf les parties, dans la zone de concentration de la compaction au niveau des encoches, qui sont toujours en mode de compaction.

Les mesures de vitesse de propagation d'ondes élastiques et la localisation des hypocentres des EA ont été menées dans quelques essais au GFZ Potsdam. Une diminution importante des vitesses d'ondes mesurées pour les trajectoires traversant le pont de roche a été constatée bien avant que les fissures sont détectables en surface (notons que les vitesses d'ondes mesurées dans les trajectoires qui ne traversent pas les zones de déformations localisées décroissent très peu). Cette diminution est très probablement liée au développement de l'endommagement dans la zone de la localisation. Bien que l'ouverture des fissures soit constatée par les analyses DIC-F, les événements EA de type S (cisaillement) et de type C (compaction) sont majoritaires et très peu d'événements de type T (traction) sont localisées. Nous pouvons supposer que, dans cet essai, la microfissuration dans l'échantillon est gouvernée plutôt par mode II de cisaillement et par mode de compaction. L'ouverture observée n'est donc qu'une conséquence d'un glissement sur une surface rugueuse après la formation des microfissures, qui s'accompagne à la coalescence de celles-ci.

Dans l'essai Tf-tm-55-01, l'utilisation de la technique de stéréo-corrélation d'image SIC nous a permis de quantifier les déplacements hors plan au cours du chargement. Les déplacements hors plan sont dus à la fois à la déformation suivant l'axe  $z$  – perpendiculaire à la surface étudiée par technique DIC mais aussi à une faible rotation de l'échantillon à cause du défaut de la planéité des surfaces d'appui. Cependant, l'influence des déplacements hors plan sur l'incertitude de la mesure de déplacement par DIC (2D) est très faible et peut être négligée. Nous avons montré, grâce à ces mesures SICn que les fissures ne fonctionnent pas en mode III (mode de cisaillement hors plan) dans cet essai. Dans le même essai, l'utilisation d'un système optique composé d'un microscope à longue distance associé à une caméra a permis d'observer la présence précoce d'une compaction à l'échelle très locale (une « fermeture » de l'ordre de  $2\ \mu\text{m}$ ) qui sera impossible avec des caméras usuelles.

Dans les essais de type Meuwissen sur le **CPIR09**, avant l'apparition de fissures, la localisation de déformation de cisaillement est beaucoup moins visible que celle détectée sur le Tuf. Pourtant, la présence des zones de compaction aux niveaux des encoches est nettement détectable sur les cartes de déformations volumiques. Ces zones correspondent aux lieux de fortes compressions montrées par la simulation en élasticité. Dans ces zones, les bandes de compaction s'initient et l'apparition de ces bandes est à l'origine de la première chute de contrainte. Ces bandes de compaction se propagent de manière stable dans la direction horizontale vers les bords de l'échantillon. Ces bandes arrêtent de se propager lors qu'elles atteignent le niveau de l'encoche opposée (Figure 6.57). Ensuite, les nouvelles fissures qui apparaissent sont des nouvelles bandes de compaction aussi bien des fissures de traction dans la direction verticale.

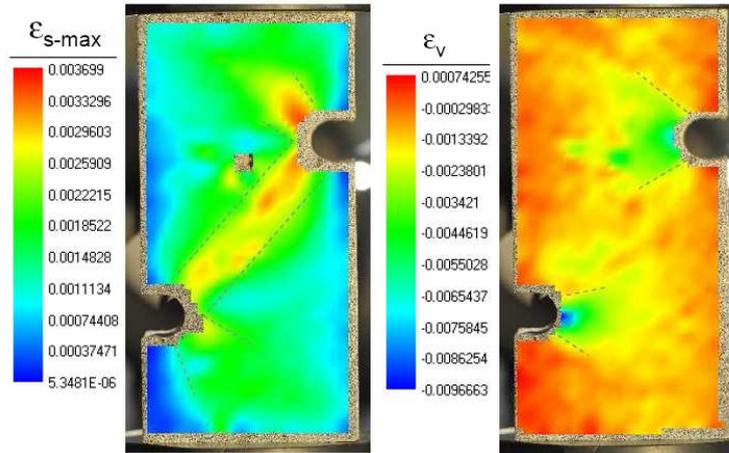


Figure 6.56. Figures « typiques » des localisations des déformations de cisaillement avant l'apparition des fissures dans les essais de type Meuwissen sur le Tuf. Déformations de cisaillement maximum ( $\epsilon_{z-max}$ ) et volumique ( $\epsilon_v$ ) présentées sont issues de l'essai Tf-tm-55-01.

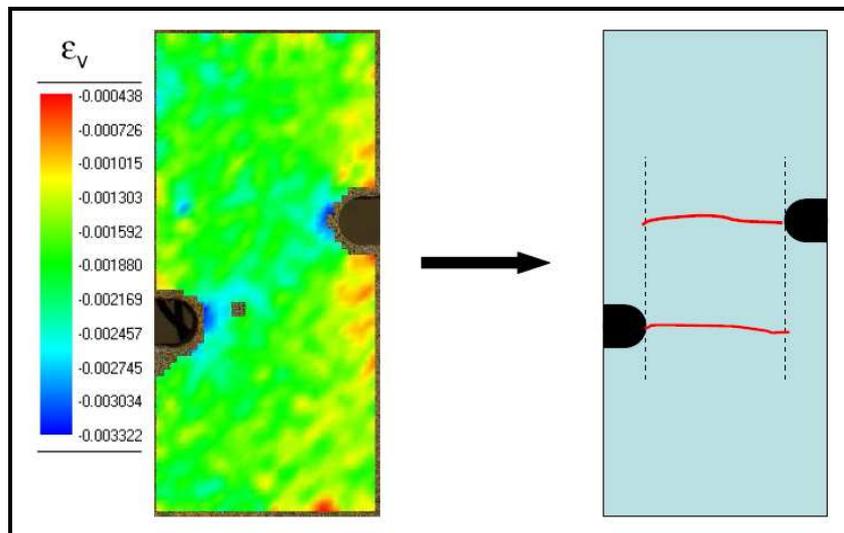


Figure 6.57. Localisation de la compaction au niveau des encoches et bandes de compactions dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09.

# Conclusion et perspectives

## Conclusion générale

L'objectif principal du travail de recherche présenté dans ce manuscrit est d'étudier la localisation de la déformation et la fissuration dans les roches tendres par la mise en œuvre simultanée de diverses techniques expérimentales de mesure de champs.

Les deux matériaux choisis dans notre étude sont le **Tuf de Naples** (une roche volcanique) et le **CPIR09** (une « roche » artificielle). Ces matériaux ont tous les deux des valeurs de résistance à la rupture qui les positionnent dans la catégorie des roches tendres. Bien que les porosités de ces matériaux soient comparables (autour de 40-50%), leurs microstructures sont très différentes. Le Tuf est une roche naturelle qui présente une forte hétérogénéité (*e.g.*, fissures préexistantes, inclusions de différentes densités). Etant un matériau artificiel, le CPIR09 est bien plus homogène (*i.e.*, sans fissures préexistantes visibles). De plus, la taille de pores dans le CPIR09 est plus importante que dans le Tuf. Lors des essais de compression uniaxiale, la rupture des éprouvettes de Tuf est caractérisée par une rupture en mode I, *i.e.*, avec des macro-fissures parallèles à l'axe du chargement ; quant au CPIR09, il présente plutôt une rupture par compaction dans des bandes perpendiculaires à l'axe du chargement.

Les résultats les plus significatifs de notre étude ont été résumés à la fin de chaque chapitre, nous ne rappelons ci-dessous que les contributions principales de ce travail.

- **Le développement et la mise en œuvre d'une nouvelle technique d'analyse quantitative des fissures : DIC-F**

Pour caractériser les processus et les modes de fissuration en surface des échantillons testés, une nouvelle technique appelée « *Digital Image Correlation for Fracture - DIC-F* » a été développée dans le cadre de cette thèse. Cette technique est un post-traitement des champs de déplacement mesurés par la DIC, qui permet d'automatiser l'identification des lignes de discontinuité de déplacement (*i.e.*, les fissures), puis de quantifier les sauts de déplacement le long de telles discontinuités en utilisant les informations du champ de déplacement. Les sauts de déplacements sont décomposés en composantes normales et tangentielles, par rapport à la trajectoire locale de la fissure.

L'utilisation des techniques de DIC et de DIC-F nous a permis de comprendre mieux les mécanismes de fissuration. A titre d'exemple, dans les essais sur le Tuf, en plus des fissures

primaires « classiques » (les *wing cracks*), ces techniques nous ont permis de détecter et caractériser des fissures secondaires en mode I (les fissures apparaissant dans le pont de roche après les *wing cracks* et avant la coalescence) avec une très faible ouverture, qui sont généralement invisible dans les photos.

- **La mise en évidence d'un nouveau mode de rupture (compaction) dans des échantillons comportant des entailles (CPIR09)**

Deux configurations d'entailles « classiques » ont été examinées sur les échantillons de CPIR09 en utilisant les techniques de DIC et de DIC-F. Deux types principaux des fissures ont été observés. Les fissures primaires, qui apparaissent avant le pic de contrainte dans les zones où une simulation élastique en EF prédit des fortes contraintes de traction, sont systématiquement les « *wing cracks* ». Ce type de fissures a été observé par les études précédentes sur différentes roches, y compris le Tuf de Naples. Ensuite, des fissures secondaires, qui sont en effet des bandes de compaction, se mettent en place dans les zones de concentration de la contrainte de compression, au niveau des pointes de l'entaille. Notons que, à notre connaissance, cette rupture en mode de « compaction » n'avait été jamais observée antérieurement pour ce type d'essais sur les roches. Quand les échantillons ont deux entailles, en plus des *wing cracks* et des bandes de compaction, des nouvelles fissures en mode mixte (mode I et mode II) peuvent apparaître dans la zone centrale encadrée par les *wing cracks* internes. Ces fissures relient les bandes de compaction internes et conduisent à la rupture macroscopique des échantillons.

- **La mise en œuvre d'une géométrie spécifique qui favorise la localisation des déformations de cisaillement en compression uniaxiale**

Dans l'étude de la localisation des déformations, nous avons utilisé une forme particulière des échantillons, inspirée par la géométrie initialement proposée par Meuwissen (1998) pour des essais de traction sur les métaux. Cette géométrie a été optimisée de manière à solliciter fortement le matériau en cisaillement avant l'apparition de fissures. Ainsi, l'évolution de la localisation de la déformation et la fissuration dans les éprouvettes sont interprétées directement en surface par les techniques d'analyse d'images.

- **Une étude de la transition de la déformation localisée à la fissuration a été faite sur les deux matériaux en combinant plusieurs techniques de mesure de champs**

Les résultats obtenus sur les échantillons de Tuf avec la géométrie de type Meuwissen nous semblent particulièrement intéressants. Avant l'apparition des fissures, la localisation des déformations de cisaillement aux niveaux des encoches et dans le pont de roche, entre les encoches, a été systématiquement mise en évidence. De plus, des zones de compaction sont toujours constatées aux pointes des encoches. Dans les zones où se localise la déformation de cisaillement, deux types principaux de fissures sont observés : soit des fissures de type « *wing cracks* » *W* (mode I) qui se propagent dans la direction verticale entre les pointes des encoches et les surfaces d'appui de l'échantillon ; soit des fissures *P* en mode mixte (mode I et mode II) qui apparaissent dans le pont de roche et rejoignent les encoches. La présence précoce d'une très petite bande de compaction a été mise en évidence par l'utilisation d'un microscope à longue distance lors de l'un des essais.

Les mesures de vitesse de propagation d'ondes élastiques et la localisation des hypocentres des EA ont été effectuées dans les quelques essais réalisés au GFZ de Potsdam sur le Tuf. Une diminution importante des vitesses d'ondes mesurées pour les trajectoires traversant la zone de la localisation au niveau du pont de roche a été constatée dans la phase de localisation des déformations de cisaillement. Cette diminution est très probablement liée au développement de l'endommagement et de la microfissuration dans la zone de localisation. La localisation des événements EA a été réalisée pour un essai qui ne présente les fissures que dans le pont de roche. Bien que l'ouverture des fissures soit constatée par les analyses DIC-F, les événements EA de type S (cisaillement) et de type C (compaction) sont majoritaires et très peu d'événements de type T (traction) sont localisés. Nous pouvons supposer que dans cet essai, la microfissuration dans l'échantillon est gouvernée plutôt par des modes de cisaillement et de compaction. L'ouverture observée ne serait donc qu'une conséquence d'un glissement sur une surface rugueuse, après la formation des microfissures, qui s'accompagne à la coalescence de celles-ci.

Dans les essais de type Meuwissen sur le CPIR09, avant l'apparition de fissures, la localisation de la déformation de cisaillement est bien moins visible que celle détectée sur le Tuf. Pourtant, la compaction présente dans les zones aux pointes des encoches est nettement détectable et plus forte que celle dans le Tuf. Dans ces zones, les bandes de compaction s'initient et se propagent dans la direction horizontale vers les bords de l'échantillon. Ces bandes arrêtent de se propager lors qu'elles atteignent le niveau de l'encoche opposée. Ensuite, de nouvelles bandes de compaction apparaissent, aussi bien que des fissures de traction (dans la direction verticale).

Au vu de l'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire, les techniques de mesures de champs apparaissent comme des outils permettant d'enrichir de manière significative notre connaissance sur l'évolution de la localisation de la déformation et sur les modes d'endommagement localisé au cours d'une sollicitation mécanique. Bien que ces observations expérimentales ne représentent pas forcément les mécanismes de fissuration dans tous types des roches, la méthodologie et les protocoles expérimentaux développés dans notre étude pourront être appliqués sur d'autres matériaux. Enfin, nos résultats expérimentaux constituent une base de données qui sera fort utile pour la modélisation de l'endommagement localisé et de la rupture dans les roches tendres (*e.g.*, calibration et développement de modèles, identification des paramètres des matériaux par analyse inverse).

## Perspectives

La poursuite de ce travail peut être envisagée dans les voies suivantes :

- (i) Une analyse détaillée de l'initiation et de l'évolution de la coalescence dans les ponts de roche n'a pas été possible dans notre étude à cause de la relative rapidité de ces processus. Pour surmonter cette difficulté, une première perspective serait de combiner les techniques de DIC et de DIC-F avec un système optique permettant d'enregistrer des images à des échelles spatiales plus petites et à des meilleures résolutions temporelles.
- (ii) La présence et la propagation des bandes de compaction, comme nous les avons mises en évidence dans les essais de compression uniaxiale sur les échantillons de CPIR09, n'avaient été jamais observées antérieurement, à notre connaissance, dans aucune étude de ce type. Il serait intéressant d'effectuer la même campagne d'expériences sur d'autres roches naturelles très poreuses, susceptibles de présenter le même mode de rupture (*e.g.*, des carbonates très poreux comme le Tuffeau de Maastricht [Baxevanis et *al.*, 2006]).

- (iii) Les quelques essais réalisés sur le Tuf au GFZ de Potsdam suggèrent que la mesure des vitesses d'ondes élastiques pendant la déformation d'une roche permet d'en quantifier l'endommagement en cours de chargement. D'autre part, ces essais ont confirmé l'intérêt de l'utilisation de la technique de localisation des EA dans l'étude de la fissuration dans les roches. Le troisième prolongement possible serait ainsi de mener des essais sur des échantillons de type Meuwissen en combinant systématiquement la DIC-2D et les EA avec la technique de la tomographie ultrasonore (*cf.* Viggiani et Hall, 2008 ; Hall, 2009).
- (iv) La technique DIC-F développée dans notre travail s'est révélée un outil puissant dans l'étude de la fissuration en 2D. Cependant, les « vrais » mécanismes de fissuration sont souvent 3D. Les extensions de la technique DIC-F au traitement de modes de fissuration tridimensionnelles devront ainsi être envisagées. De tels outils permettront d'étudier la fissuration en mode de cisaillement hors plan (mode III) en utilisant les déplacements 3D issus de l'analyse SIC ou la fissuration au cœur d'échantillons présentant des entailles 3D à partir d'analyses DIC-3D volumiques (voir Germanovich et Dyskin 2000 pour un exemple de géométrie d'échantillons).

---

# Références

- Adrian, R.J., (2005).** *Twenty years of particle image velocimetry.* Exp. Fluids., vol. 39, no. 2, pp. 159-169.
- Alshibili K.A., Sture S., Costes N.C., Franck M.L., Lankton M.R., Batiste S.N., Swanson R.A. (2000).** *Assessment of localized deformation in sand using X-ray computed tomography.* Geotech. Testing J., vol 23, no. 3, pp. 274-29.
- Al-Shayea, N .A., (2005).** *Crack propagation trajectoiries for rocks under mixed mode I-II fracture.* Eng. Geol., vol. 81, no. 1, pp. 84-97.
- Associazione Geotecnica Italiana, (1977).** *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche* (Associazione Geotecnica Italiana, Roma, 1977).
- Aversa, S., Evangelista, A., (1998).** *Mechanical behavior of a volcanic tuff: Yield, strength and destructurement effect,* Rock Mech. Rock Eng., vol. 31, no. 1, pp. 25-42.
- Avril, S., Bonnet, M., Bretelle, A.S., Grédiac, M., Hild, F., Ienny, P., Latourte, F., Lemosse, D., Pagano, S., Pagnacco, E., Pierron, F., (2008).** *Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements.* Exp. Mech., vol. 48, no. 4, pp. 381-402.
- Barenblatt, G.I., (1962).** *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle materials.* Adv. Appl. Mech., vol. 7, pp. 55–129.
- Baxevanis, Th., Papamichos, E., Flornes, O., Larsen, I., (2006).** *Compaction bands and induced permeability reduction in Tuffeau de Maastricht calcarenite.* Acta Geotechnica, vol. 1, no. 2, pp. 123-135.
- Bieniawski, Z.T., (1967).** *Mechanism of brittle fracture of rock. Part III – experimental studies.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 4, no. 4, pp. 407-423.
- Bobet, A., Einstein, H., (1998).** *Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material.* Int. J. Fracture, vol. 92, no. 3, pp. 221-252.
- Bobet, A., (2000).** *The initiation of secondary cracks in compression.* Engin. Fracture Mech, vol. 66, no. 2, pp. 187-219.
- Bornert, M., Bremond, F., Doumalin, P., Dupré, J-C., Fazzini, M., Grédiac, M., Hild, F., Mistou, S., Molimard, J., Orteu, J-J., Robert, L., Surrel, Y., Vacher, P., Wattrisse, B., (2008).** *Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: Methodology and results.* Exp. Mech., vol. 49, no. 3, pp. 353-370.

- Brace, W.F., (1964).** *Brittle fracture of rocks*. In State of Stress in the Earth's Crust, Proceedings of the International Conference, Santa Monica, Calif. Edited by W.R. Judd. American Elsevier Publishing Company, New York, pp. 110-178.
- Brace W.F., Bombolakis E.G., (1963).** *A note on brittle crack growth in compression*. J. Geophys. Res., vol. 68, no. 12, pp. 3709-3713.
- Bruck, H.A., McNeil, S.R., Sutton, M.A., Peters, W.H., (1989).** *Digital image correlation using Newton–Raphson method of partial differential correction*. Exp. Mech., vol. 29, no. 3, pp. 261-268.
- Chang, S.H., Lee, C.I., (2004).** *Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 41, no. 7, pp. 1069–1086.
- Charalampidou, E.M., Hall, S. A., Stanchits, S., Lewis, H., Viggiani, G. (2010).** *Characterization of shear and compaction bands in a porous sandstone deformed under triaxial compression*. Tectonophysics 2010 online first. 10.1016/j.tecto.2010.09.032
- Chen, J, Zhang, X., Zhan, N., Hu, X., (2010).** *Deformation measurement across crack using two-step extended digital image correlation*. Opt. Lasers Engin., vol. 48, no. 11, pp. 1126-1131.
- Coudert, T., (2005).** *Reconstruction tridimensionnelle du volume intérieur d'une chaussure: évaluation du chaussant*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, Annecy, France.
- Dascalu C., (2007).** *An introduction to fracture mechanics in linear elastic materials*. Revue Européenne de Génie Civil. vol. 11, no. 7-8, pp. 893-906.
- Dautriat, J., Bornert, M., Gland, N., Dimanov, A., Raphanel, J. (2010).** *Localized deformation induced by heterogeneities in porous carbonate analysed by multi-scale digital image correlation*. Tectonophysics 2010 online first. doi:10.1016/j.tecto.2010.09.025
- De Sanctis, F., (2005).** *Studio dei meccanismi di rottura fragile nel tufo Napoletano*. Thèse de Doctorat. Università di Napoli Federico II, Napoli, Italy.
- Desrues J., (1984).** *La localisation de la déformation dans les matériaux granulaire*. Thèse de Doctorat. USMG et INPG, Grenoble, France.
- Desrues, J., (1995).** *Analyse stéréophotogrammétrique de la fissuration progressive*. Photomécanique 95, Y. Berthaud, D. Paraskevas & M. Taroni Eds., Éditions Eyrolles, Paris, 149-162.
- Desrues J., Viggiani G., (2004).** *Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry*. Int. J. Num. Anal. Method. Geomech., vol. 28, no. 4, pp. 279-321.
- Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., Mazerolle, F., (1996).** *Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography*. Géotechnique, vol. 46, no. 3, pp. 529-546.
- Dugdale D.S., (1960).** *Yielding of steel sheets containing slits*. J. Mech. Phys. Solids., vol. 8, no. 2, pp. 100-104.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., Read, R. S., (1998).** *Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock*. Can. Geotech. J., vol. 35, no. 2, pp. 222 - 233.
- Evangelista, A., Aversa, S., (1994).** *Experimental evidence of non-linear and creep behaviour of pyroclastic rocks*. Proc., Course on Visco-plastic Behaviour of Geomaterials. Cristescu, N. D., Gioda, G. (eds.), CISM Courses and Lectures no. 350, Springer Wien New York, 55-102.
- Feignier, B., Young, R.P., (1992).** *Moment tensor inversion of induced microseismic events: evidence of non-shear failures in the  $-4 < M < -2$  moment magnitude range*. Geophys. Res. Letters, vol. 19, no. 14, pp. 1503-1506.

- Ferrero A.M., Migliazza M., Roncella R., Tebaldi G., (2008).** *Analysis of the failure mechanisms of a weak rock through photogrammetrical measurements by 2D and 3D visions.* Engin. Fract. Mech., vol. 75, no. 3-4, pp. 652-663.
- Fink, F., Yamanouchi, M., Reinhardt, H.W., Grosse, C.U., (2003).** *Evaluation of mode I of concrete in a splitting test using acoustic emission technique.* Int. J. Fracture, vol. 124, no. 3-4, pp. 139-152.
- Fortin, J., Stanchits, S., Dresen, G., Guéguen, Y., (2006).** *Acoustic emission and velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone.* J. Geophys. Res., vol. 111., B10203.
- Fortin, J., Stanchits, S., Dresen, G., Guéguen, Y., (2009).** *Acoustic emission monitoring during inelastic deformation of porous sandstone : comparison of three modes of deformation.* Pure Appl. Geophys., vol. 166, no. 5-7, pp. 823-841.
- Garcia, D., (2001).** *Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images.* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.
- Germanovich, L.N., Dyskin, A.V., (2000).** *Fracture mechanisms and instability of openings in compression.* Int. J. Rock Mech. Min. Scie., vol. 37, no. 1-2, pp. 263-284(22)
- Grégoire, D., (2008).** *Initiation, propagation, arrêt et redémarrage de fissures sous Impact.* Thèse de Doctorat. Institut National de Sciences Appliqués de Lyon, Lyon, France.
- Griffith, A.A., (1920).** *The phenomena of rupture and flow in solids.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, vol. 221, pp. 163-198.
- Grosse, C.U., Reinhardt, H.W., Finck, F., (2003).** *Signal-based acoustic emission techniques in civil engineering.* J. Materials Civil. Engin., vol. 15, no. 13, pp. 274-279.
- Grosse, C.U., Fink, F., (2006).** *Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques.* Cement and Concrete composites. vol. 28, no. 4, pp. 330-336.
- Guler M., Edil T.B., Bosscher P.J., (1999).** *Measurement of particle movement in granular soils using image analysis.* J. Comp. Civil. Eng., vol. 13, no. 2, pp. 116-122.
- Haddadi, H., Belhabib, S., (2008).** *Use of rigid-body motion for investigation and estimation of the measurement errors related to digital photograph correlation technique.* Opt. Lasers Engin., vol. 46, no. 2, pp. 184-196.
- Haddadi, H., Belhabib, S., Gaspérini, M., Vacher, P., (2005).** *Identification of the parameters of swift law using strain field measurements.* In: 8th European mechanics of materials conference, Cachan, France; 2005.
- Hall, S.A., De Sanctis, F., Viggiani, G., (2006).** *Monitoring fracture propagation in a soft rock (Neapolitan Tuff) using acoustic emission and digital photographs.* Pure Appl. Geophys. vol. 163, no. 10, pp. 2171-2204.
- Hall S.A., Viggiani G., Bésuelle P., (2007).** *Analysis of fracture in a soft rock (Neapolitan Tuf) using digital image correlation with displacement discontinuity quantification.* EuroConference of rock physics and geomechanics on rocks. EMFCSC. Erice. Sicily (Italy).
- Hall, S.A., (2009).** *When geophysics met geomechanics: Imaging of geomechanical properties and processes using elastic waves.* Mech. Natural Solids, Kolymbas, D. et Viggiani, G. (Eds.), vol. VIII, 304 p., Springer, pp. 147-175
- Hardy H.R., (2003).** *Acoustic emission/Microseismic activity, volume 1: Principles, Techniques and geotechnical applications,* A.A. Balkema.
- Helm, J.D., (2008).** *Digital image correlation for specimens with multiple growing cracks.* Exp. Mech., vol. 48, no. 6, pp. 753-762.

- Hild, F., Roux, S., (2006).** *Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties – a review.* Strain, vol. 42, no. 2, pp. 69-80
- Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P.E., (1976).** *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements.* Cem. Conc. Res., vol.6, no. 6, pp. 773-782.
- Hoek E., Bieniawski Z.T., (1965).** *Brittle rock fracture propagation in rock under compression.* Int. J. Fract. Mech., vol. 1, no. 3, pp. 137-155.
- Horii H., Nemat-Nasser S., (1985).** *Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure.* J. Geophys. Res., vol. 90, no. B4, pp. 3105-3125.
- Hosseini, M., (2005).** *Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'une roche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation.* Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Huang, J.F., Chen, G.L., Zhao, Y.H., Wang, R., (1990).** *An experimental study of the strain field development prior to failure of a marble plate under compression.* Tectonophysics, vol. 175, no. 1-3, pp. 283-90.
- Inglis C. E., (1913).** *Stress in a plate due to the presence of crack and sharp corners.* Transaction of the Royal Institution of Naval Architecture, vol. 55, pp. 219-241.
- Ingraffea A.R., Heuze F.E., (1980).** *Finite element models for rock fracture mechanics.* Int. J. Num. Analys. Method. Geomech., vol. 4, no. 1, pp. 25-68.
- Irwin G.R., (1948).** *Fracture dynamics.* In: Fracturing of Metals. Amer. Soc. For Metals, pp. 147-166.
- Irwin G.R., (1957).** *Analysis of stresses and strains near the ends of a crack traversing a plate.* J. Appl. Mech. vol. 24, pp. 361-364.
- Katsaga, T., Sherwood, E.G., Collins, M.P., Young, R.P., (2008).** *Acoustic emission imaging of shear failure in large reinforced concrete structures.* Int. J. Fracture, vol. 148, no. 1, pp 29-45.
- Kurz, J.H., Grosse, C.U., Reinhardt, H-W., (2005).** *Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete.* Ultrasonic, vol. 43, no. 7, pp. 538-546.
- Laitaj E.Z., (1974).** *Brittle fracture in compression.* Int. J. Fracture, vol.10, no. 4, pp.525-561.
- Landis, E.N., Nagy, E.N., (2000).** *Three-dimensional work of fracture for mortar in compression.* Engin. Fracture Mech., vol. 65, no. 2-3, pp. 223-234.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.L., (1978).** *Aspect phénoménologiques de la rupture par endommagement.* Journal de Mécanique Appliquée, vol. 2, pp. 317-365.
- Lei, X.L., Kusunose, K., Rao, M., Nishizawa, O., Satoh, T., (2000).** *Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring.* J. Geophys. Res., vol. 105, no. B3, pp. 127- 139.
- Lei, X.L., Kusunose, K., Nishizawa, O., Satoh, T., Nishizawa O., (2003).** *The hierarchical rupture process of a fault: an experimental study.* Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 137, no. 1-4, pp. 213 - 228.
- Lenoir, N., (2006).** *Comportement mécanique et rupture dans les roches argileuses étudiées par micro tomographie à Rayons X.* Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Lenoir, N., Bornert, M., Desrues, J., Bésuelle P. and Viggiani, G., (2007).** *volumetric digital image correlation applied to X-ray micro tomography images from triaxial compression tests on argillaceous rocks.* Strain, Int. J. Exp. Mech., vol. 43, no. 3, 193-205.
- Li Y-P., Chen L-Z., Wang Y-H., (2005).** *Experimental research on pre-cracked marble under compression.* Int. J. Solids. Struc., vol. 42, no. 9-10, pp. 2505-2516.

- Liu, J. and Iskander, M., (2004).** *Adaptive cross correlation for imaging displacements in soils.* J. Comp. Civil Engin., vol. 18, no. 1, pp. 46–57.
- Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V., Ponomarev, A., Sidorin, A., (1991).** *Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite.* Nature. vol. 350. pp. 39–42.
- López-Crespo P., Burguete, R.L., Patterson, E.A., Shterenlikht, A., Withers, P.J., Yates, J.R., (2009).** *Study of a Crack at a Fastener Hole by Digital Image Correlation.* Exp. Mech., vol. 49, no. 4, pp. 551-559.
- Marec, A., (2008).** *Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante.* Thèse de Doctorat. Université du Maine, Le Mans, France.
- Meglis, I.L., Chow, T.M., Young, R.P., (1995).** *Progressive microcrack development in tests in Lac du Bonnet granite - I. Acoustic emission source location and velocity measurements.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 32, no. 8, pp. 741-750.
- Meuwissen, M.H.H., Oomens, C.W.J., Baaijens, F.P.T., Petterson, R., Janssen, J.D., (1998).** *Determination of the elasto-plastic properties of aluminium using a mixed numerical-experimental method.* J. Material Proc. Tech., vol. 75, no. 1-3, pp. 204–211.
- MISTRAS 2001.** *Users Manual.* PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION (2001)
- Mufhieda, O., Alzo'ubi, A.K., (2004).** *Fracture mechanisms of offset rock joints- A laboratory investigation.* Geotech. Geolog. Engin., vol. 22, no. 4, pp. 545–562.
- Nasseri, M.H.B., Mohanty, B., Young, R.P., (2006).** *Fracture toughness measurements and acoustic emission activity in brittle rocks.* Pure appl. geophys. vol. 163, no. 5-6, pp. 917-945.
- Nguyen, T.L., Hall, S.A., Vacher, P., Viggiani, G., (2010).** *Fracture mechanisms in soft rock: identification and quantification of evolving displacement discontinuities by digital image correlation.* Tectonophysics online first. doi:10.1016/j.tecto.2010.09.024
- Obert, L., Duvall, W.I., (1942).** *Use of subaudible noises for the prediction of rock bursts.* Part II. Report of Investigation 3654, U.S. BuMines.
- Orowan S., (1950).** *Fundamentals of brittle behaviour in metals.* Fatigue and Fracture of Métales. MTT Symposium, June, 1950. Wiley & Sons, New York (1952).
- Otani, J., Mukunoki, T., Kikuchi, Y., (2002).** *Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams.* Soils and Foundations, vol. 42, no. 3, pp. 93-105.
- Pan, B., (2010).** *Recent progress in Digital Image Correlation.* Exp. Mech. Doi : 10.1007/s11340-010-9418-3
- Pan, B., Xie. H., Xu, B., Dai F., (2006).** *Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation.* Meas. Sci. Technol., vol. 17, no. 6, pp. 1615–1636.
- Pan B., Qian K., Xie H., Asundi A., (2009).** *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review.* Meas. Sci. Technol., vol. 20, no. 6, pp. 062001-062018.
- Park C.H., Bobet A., (2009).** *Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 46, no. 5, pp. 819-829.
- Peters W.H., Ranson W.F., (1982).** *Digital imaging techniques in experimental stress analysis.* Opt. Eng., vol. 21, no. 3, pp. 427-432.
- Poissant, J., Barthelat, F., (2009).** *A novel “subset splitting” procedure for digital photograph correlation on discontinuous displacement fields.* Exp. Mech., vol. 50, no. 3, pp. 353-364.
- Pottier, T., (2010).** *Identification paramétrique par recalage de modèles éléments finis couplée à des mesures de champs cinématiques et thermiques.* Thèse de Doctorat. Université de Savoie, Annecy, France.

- Poittier T., Toussaint F., Vacher P., (2007).** *An inverse method for material parameters determination of titanium samples under tensile loading.* Proceedings of the 11th ESAFORM Conference on Material Forming, Lyon (France), 23-25 April 2008.
- Rechenmacher, A.L., Finno, R.J., (2004).** *Digital image correlation to evaluate shear banding in dilative sands.* Geotech. Testing. J., vol. 27, no. 1, pp. 13–22.
- Reyes, O., Einstein, H.H., (1991).** *Failure mechanism of fractured rock - a fracture coalescence model.* Proceedings of the 7th international congress of rock mechanics, Aachen, Germany, vol. 1, pp 333–340.
- Réthoré, J., Gravouil, A., Morestin, F., Combescure, A., (2005).** *Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral.* J. Fracture, vol. 132, no. 1, pp. 65-79.
- Réthoré, J., Hild, F., Roux, S., (2007).** *Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique.* Compt. Methods Appl. Mech. Engin. vol. 196, no. 49-52, 5016-5030.
- Réthoré, J., Hild, F., Roux, S., (2008).** *Extended digital image correlation with crack shape optimization.* Int. J. Numer. Meth. Engng., vol.73, no. 2, 248-272.
- Rice J.R., (1968).** *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks.* J. Appl. Mech. vol. 35. pp. 379–386.
- Roscoe, K.H., (1970).** *The influence of strains in soils mechanics.* Géotechnique, vol. 20, no. 2, pp. 129-170.
- Roux S., Hild F., (2006).** *Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches.* J. Fracture, vol. 140, no. 1-4, pp. 141-157.
- Sagong, M., Bobet, A., (2002).** *Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression.* Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., vol. 39, no. 2, pp. 229-241.
- Scarpelli, G., Wood, D.M., (1982).** *Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests.* Proc. IUTAM Conf. Def. Fail. Gran. Med., Balkema, 473-484.
- Schubnel, A., Nishizawa, O., Masuda, K., Lei, X., Xue, Z., Guéguen, Y., (2003).** *Velocity Measurements and crack density determination during wet triaxial experiments on Oshima and Toki granites.* Pure Appl. Geophys., vol. 160, no. 5-6, pp. 869–887.
- Sedlak, P., Hirose, Y., Khan, S.A., Enoki, M., Sikula, J., (2009).** *New automatic localization technique of acoustic emission signals metal plates.* Ultrasonics. vol. 49, no. 2, pp. 254-262.
- Shah, K.R., Labuz, J.F., (1995).** *Damage mechanisms in stressed rock from acoustic emission.* J. Geophys. Res., vol. 100, no. B8, pp. 15527–15539.
- Shen, B., Stephanson, O., Einstein, H., Ghahreman, B., (1995).** *Coalescence of fracture under shear stresses in experiments.* J. Geophys. Res., vol. 100, no. B4, pp. 5975-5990.
- Stanchits, S., Dresen, G., Guéguen, Y., (2006).** *Ultrasonic Velocities, Acoustic Emission Characteristics and Crack Damage of Basalt and Granite.* Pure Appl. Geophys. vol. 163, no. 5-6, pp. 975-994.
- Stanchits, S., Fortin, J., Gueguen, Y., Dresen, G., (2009).** *Initiation and Propagation of Compaction Bands in Dry and Wet Bentheim Sandstone.* Pure. Appl. Geophys., vol. 166, no. 5-7, pp. 843-868.
- Stanchits, S., Mayr, S., Shapiro, S., Dresen, G., (2010 online first).** *Fracturing of porous rock induced by fluid injection.* Tectonophysics. 10.1016/j.tecto.2010.09.022.
- Sutton, M., Cheng, M., Peters, W.H., Chao, Y.J., McNeill, S.R., (1986).** *Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis.* Image Vision Comput., vol. 4, no. 3, pp. 143-150.
- Sutton M.A., Orteu J-J., Schreier H.W., (2009).** *Digital Image Correlation for Shape and deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications.* Springer.

- Sutton, M.A., Yan, J.H., Tiwari, V., Schreier, H.W., Orteu, J.J., (2008).** *The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements.* Opt. Lasers Engin., vol. 46, no. 10, pp. 746-757.
- Thakur V. (2007).** *Strain localization in sensitive soft clays.* Thèse de Doctorat. Norwegian University of Science and Technology, Norvège.
- Thiery, C., Gerstenmayer, J., (2002).** *Tomographie à rayons X .* Techniques de l'Ingénieur, pp. 1–24.
- Vacher, P., Dumoulin, S., Morestin, F., Mguil-Touchal, S., (1999).** *Bidimensional strain measurement using digital images.* J. Mech. Eng. Sci., vol. 213, no. 8, pp. 811–817.
- Valès, F., (2008).** *Modes de déformation et d'endommagement de roches argileuses profondes sous sollicitations hydro-mécaniques.* Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
- Van Geet, M., Swennen, R., Wevers, M., (2000).** *Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography.* Sedimentary Geology Vol. 132, pp. 25-36.
- Van Geet, M., (2001).** *Optimisation of microfocus X-ray computer tomography for geological research with special emphasis on coal components (macerals) and fractures (cleats) characterization.* Thèse de Doctorat. Katholieke Universiteit Leuven. Belgique.
- Vardoulakis, I., Graf, B., (1982).** *Imperfection sensitivity of the biaxial test on sand.:* Proc. IUTAM Conf. Def. Fail. Gran. Med., Balkema, pp. 485-491.
- Viggiani G., Desrues F., (2004).** *Experimental observation of shear banding in stiff clay.* *Geotechnical Innovations.* R.B.J. Brinkgreve et al. (Eds), Verlag Gleuckauf Essen. pp. 649-658.
- Viggiani, G., Lenoir, N., Bésuelle, P., Di Michiel, M., Marelo, S., Desrues, J., Kretschmer, M., (2004).** *X-ray micro tomography for studying localized deformation in fine-grained geomaterials under triaxial compression.* Comptes rendus Mécanique. vol. 332, no. 10, pp. 819–826.
- Viggiani, G., Hall, S.A., (2008).** *Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics* *Fourth Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials.* Burns, S.E., Mayne P.W. & Santamarina, J.C. (eds), Amsterdam, IOS Press, vol. 1, pp. 3-26.
- Wells A.A., (1961).** *Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture.* Proc Crack Propagation Symposium. vol. 1. paper 84.
- White, D.J., Take, W.A., Bolton, M.D., (2003).** *Soil deformation measurement using particles image velocimetry (PIV) and photogrammetry.* Géotechnique, vol. 53, no. 7, pp. 619–631.
- Wong, R.H.C., Chau, K.T., Tang, C.A., Lin, P., (2001).** *Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—Part I: experimental approach.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 38, no. 7, pp. 909-924.
- Wong R.H.C., Chau K.T., (1998).** *Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 35, no. 2, pp. 147-164.
- Wong L.N.Y., Einstein H.H., (2008a).** *Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble: Part 1. Macroscopic observations and interpretation.* Rock Mech. Rock Engin., vol. 42, no. 3, pp. 475-511.
- Wong L.N.Y., Einstein H.H., (2008b).** *Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble: Part 2—Microscopic Observations and Interpretation.* Rock. Mech. Rock. Engin., vol. 42, no. 3, pp. 513-545.
- Wong L.N.Y., Einstein H.H., (2009).** *Systematic evaluation of cracking behaviour in specimens containing single flaws under uniaxial compression.* Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. vol. 46, no. 2, pp. 239-249.

- Yoneyama S., Ogawa T., Kobayashi Y., (2007).** *Evaluation mixed-mode stress intensity factors from full-field displacement fields obtained by optical methods.* Engin. Fracture. Mech., vol. 74, no. 9, pp. 1399-1412.
- Zhang Z.X., Kou S.Q., Jiang L.G., Lindqvist P-A., (2000a).** *Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning.* Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. vol. 37, no. 5, pp. 745-762.
- Zang, A., Wagner, F.C., Stanchits, S., Janssen, C., Dresen, G., (2000b).** *Fracture process zone in granite.* J. Geophys. Res., vol. 105, no. B10, pp. 23651–23661.
- Zang, A., Wagner, F.C., Dresen, G., (1996).** *Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure.* J. Geophys. Res., vol. 101, no. B8, pp. 17507–17521.
- Zang, A., Wagner, F. C., Stanchits, S., Dresen, G., Andresen, R., Haidekker, M.A., (1998).** *Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads.* Geophys. J. Int., vol. 135, no. B3, pp. 1113-1130.

# ANNEXES

A1. Réalisation des échantillons	203
A2. Essai de compression uniaxiale sur un échantillon de Tuf fortement fissuré	206
A3. Fissuration dans les échantillons de Tuf avec des entailles rectilignes	211
A4. Fissuration dans les échantillons de CPIR09 entaillés	213
A5. Essais de type Meuwissen sur le Tuf	219
A6. Essais de type Meuwissen sur le CPIR09	231

Dans les annexes, nous montrons d'abord la procédure de la mise en forme des échantillons (A1) puis, un essai de compression simple sur un échantillon de Tuf fortement fissuré sera détaillé (A2). Enfin, les résultats des analyses DIC-2D des tous les essais réalisés dans cette thèse seront présentés. Les courbes contrainte – déformation dans les annexes de A2 à A6 sont issues des mesures par LVDT.

## A1. Réalisation des échantillons

L'étape de préparation des échantillons n'est pas anodine. La qualité du parallélisme entre les deux faces en appui est un facteur clé de la réussite des essais. Ce défaut de parallélisme doit être inférieur à 0,1mm, sans quoi, les résultats des essais sont systématiquement et fortement altérés.

La procédure de la préparation des échantillons est la suivante :

- Découpe les éprouvettes de forme parallélépipédique
- Réalisation des entailles
- Surfaçage des faces en contact avec les mors

### A1.1. Découpe et surfaçage des éprouvettes parallélépipédique

Les carottes de Tuf avec un diamètre initial de 10 cm ont été prélevées dans la région de Naples. Avant d'être découpées, les carottes ont été radiographiées afin de visualiser la distribution des inclusions et des fissures préexistantes dans matériau, ce qui nous a permis de choisir les zones où le matériau est le plus homogène. Cependant, les fissures préexistantes ne sont pas toujours visibles dans les images radiographiques. La Figure A1.1 donne une visualisation d'une carotte de Tuf par

radiographie. Une hétérogénéité forte apparaît sur la droite de l'échantillon, par contre, la zone marquée par un rectangle rouge à gauche est plus homogène et sera choisie pour découper les échantillons.

La découpe des carottes de Tuf, et des blocs de CPIR 09 a été exécutée en utilisant des scies à eau. La Figure A1.2 présente les deux scies utilisées : (a) la scie du laboratoire LEPMI, (b) la scie du laboratoire LGIT.

Après être mis en forme, tous les échantillons parallélépipédiques ont été surfacés à l'aide d'une rectifieuse au laboratoire SYMME. Le parallélisme des surfaces d'appui de l'éprouvette usinée est vérifié à l'aide d'un comparateur. Le défaut de parallélisme de deux surfaces d'appui ne dépasse pas 0.1 mm.

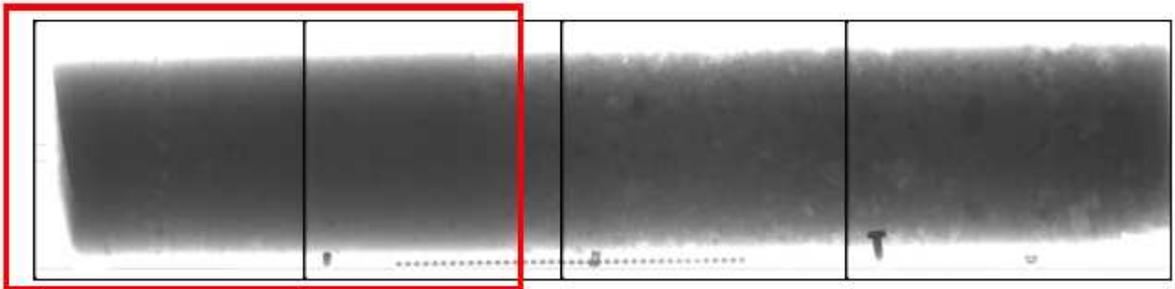


Figure A1.1. Visualisation d'une carotte de Tuf par la radiographie. La partie relativement homogène à gauche est choisie pour la réalisation des échantillons.



(a)



(b)

Figure A1.2. Deux scies à eau utilisées pour la découpe des échantillons. (a) La scie du laboratoire LEPMI, (b) la scie du laboratoire LGIT.

## A1.2. Mise en forme des éprouvettes

### ➤ Echantillons entaillés

Pour créer les entailles rectilignes dans les roches, nous avons utilisé une scie à fil diamanté de type Weill 6234 présente au CEA de Grenoble (Figure A1.3). Dans cet équipement, le fil diamanté de diamètre 0.3 mm est enroulé, à une vitesse, réglable autour d'une bobine. Pour introduire le fil à travers l'épaisseur de l'éprouvette, nous réalisons préalablement un forage de diamètre 1mm. Les fentes obtenues ont une ouverture de 0.4 mm. Le seul inconvénient de cette procédure est que les deux

pointes de la fente n'ont pas la même forme, l'une étant issue d'un perçage et la seconde réalisée par le fil. Le mécanisme de propagation des fissures ne semble pas très affecté par ce fait, comme le montre De Sanctis (2005) dans sa thèse.



Figure A1.3. Scie à fil diamanté de type Weill 6234 présente au CEA de Grenoble.

#### ➤ Echantillons de type Meuwissen

La réalisation des encoches circulaires est effectuée en utilisant une carotteuse avec le diamètre de 10 mm au laboratoire LEPMI (Figure A1.4).



Figure A1.4. Réalisation des encoches circulaires.

#### ➤ Réalisation des mouchetis :

Les textures naturelles des matériaux étudiés dans notre étude apparaissent assez homogènes. Afin d'augmenter les contrastes des surfaces des matériaux, d'enrichir les textures naturelles et ainsi d'améliorer les analyses DIC, des mouchetis noirs et blancs ont été projetés à l'aide de bombes de peinture mate sur les surfaces des échantillons quelques minutes avant les essais.

## A2. Essai de compression uniaxiale sur un échantillon de Tuf fortement fissuré

Tous les échantillons testés dans ce travail ne présentent pas des fissures préexistantes détectables par la tomographie à rayons X. Pourtant ce type de discontinuités se présente très communément dans les roches. Dans la suite, nous présentons un essai de compression uniaxiale sur un échantillon de Tuf fortement préfissuré.

### A2.1. Echantillon

L'échantillon prismatique utilisé dans cette étude a été extrait d'un bloque de tuf prélevé à Naples (Italie). Les dimensions choisies sont 50 mm, 35 mm, 100 mm respectivement pour la largeur, l'épaisseur et la hauteur. Cet échantillon a été scanné par tomographie avant essai avec une taille de voxel de  $125 \times 125 \times 125 \mu\text{m}^3$  pour visualiser la structure intérieure, plusieurs fissures préexistantes et inclusions ont été observées (Figure A2.1).

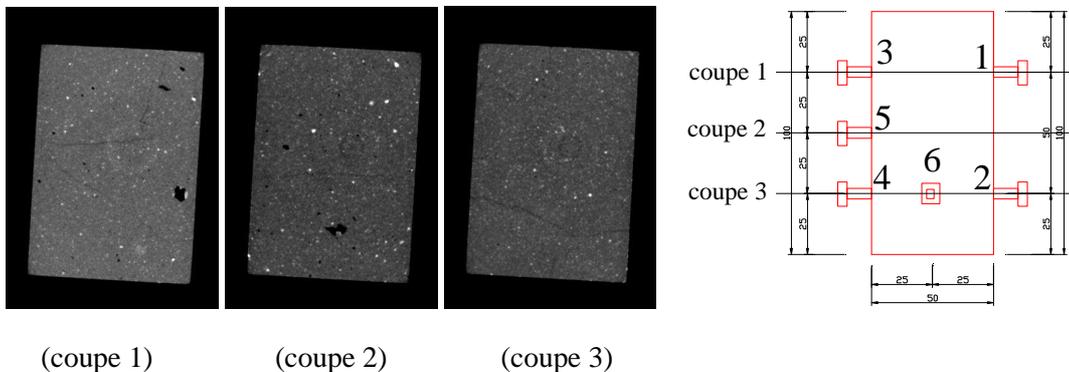


Figure A2.1. Position des capteurs et 3 coupes tomographiques horizontales représentatives de l'éprouvette.

### A2.2. Résultats et discussions

Afin de conserver l'échantillon relativement intact pour l'étude post-mortem par tomographie RX, l'effort est relâché après l'apparition du premier pic et avant la chute finale de la contrainte axiale. Le pic de contrainte axiale est de 14 MPa. 300 photos sont prises au cours de l'essai à une fréquence de 0.1 Hz (100 premières photos) et de 0.05 Hz (200 photos) (la taille du pixel de  $28.9 \times 28.9 \mu\text{m}^2$ ). La déformation est évaluée par LVDT et par l'analyse DIC-2D. Les courbes de la Figure A2.2 montrent une grande différence de mesure de la déformation par les 2 méthodes ce qui est liée à la rigidité du système expérimental. Le module d'Young  $E$  dans la partie linéaire est estimé à 3300 MPa par DIC et 2150 MPa par LVDT. Le coefficient de Poisson  $\nu$  des FGT a été calculé comme étant le rapport de la déformation horizontale moyenne sur la déformation verticale moyenne ( $\nu = 0.23$ ).

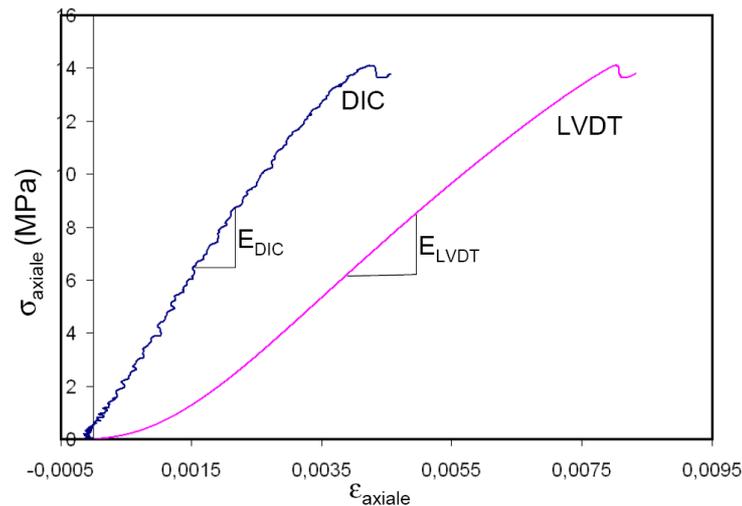


Figure A2.2. Courbes contrainte-déformation par LVDT et DIC

La Figure A2.3 présente l'évolution de l'activité acoustique, définie par nombre de coups cumulés au cours des différentes phases du comportement mécanique.

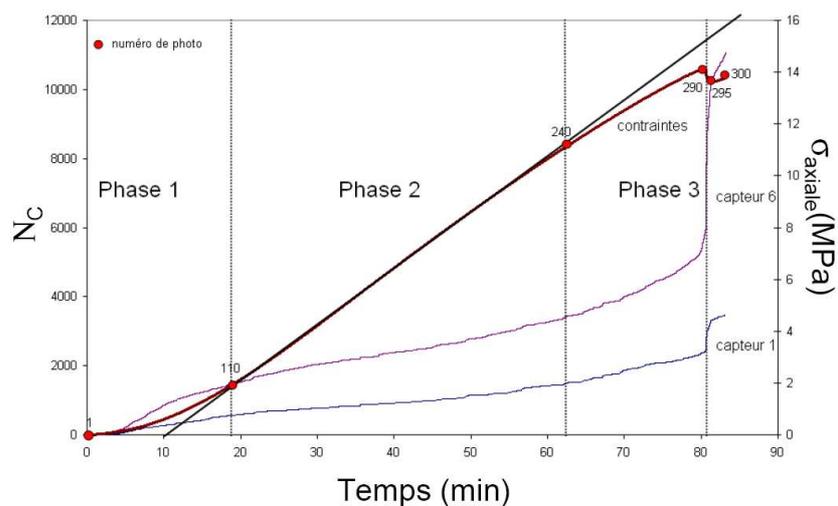
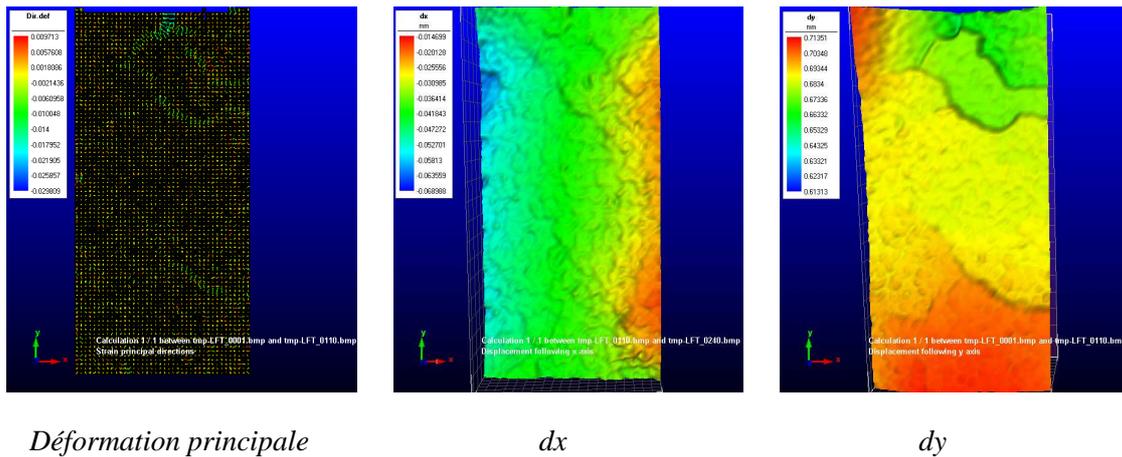


Figure A2.3. Contrainte –temps et l'activité acoustique des capteurs 1-6

Le comportement mécanique du tuf se compose de différentes phases caractérisées par l'allure de la courbe de contrainte.

- *Phase 1* : phase de serrage correspondant à la fermeture des fissures horizontales. Lors de la mise en place du système, un grand nombre d'évènements acoustiques sont détectés. Les cartes des déformations principales et des déplacements horizontaux et verticaux issues de l'analyse DIC des 2 photos 1 et 110 sont montrées dans la Figure A2.4. La déformation dans les zones de fermeture des fissures est de -0.014 (avec un pas de grille est de 40 pixels). Cette valeur négative représente la fermeture des fissures préexistantes.



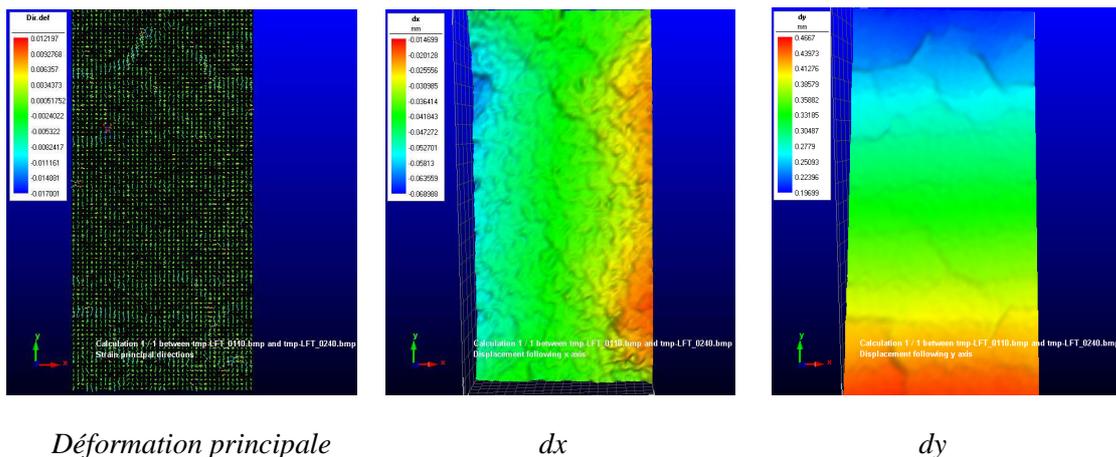
Déformation principale

dx

dy

Figure A2.4. Déformation principale, déplacements horizontaux et verticaux issus de DIC dans la phase 1 entre les images 1-110

- *Phase 2* : phase linéaire, dans cette phase, différents auteurs considèrent généralement qu'elle correspond à un comportement élastique. Une activité acoustique très faible est observée. Les fissures horizontales se ferment légèrement dans cette phase. La déformation observée dans les zones des fissures préexistantes est de -0.008, plus faible par rapport à celle dans phase de serrage (Figure A2.5).



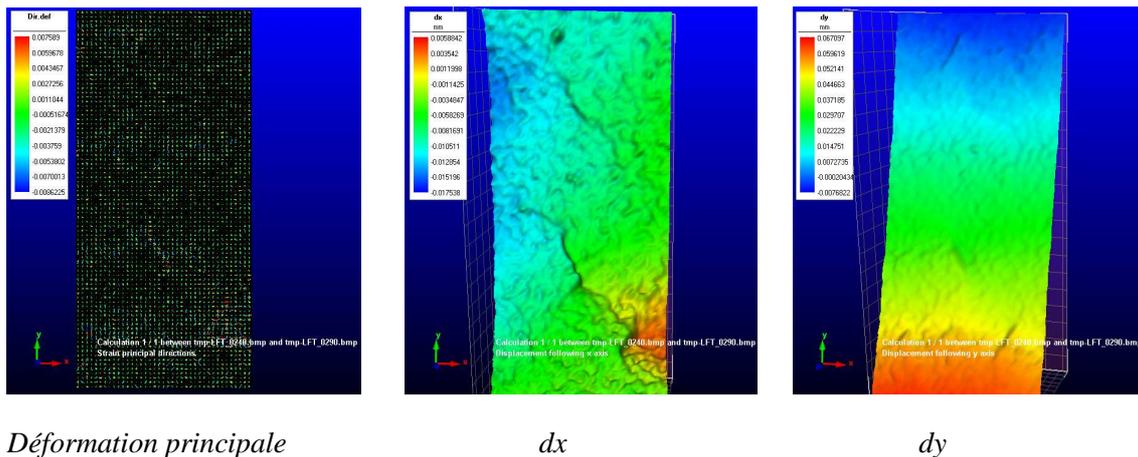
Déformation principale

dx

dy

Figure A2.5. Déformation principale, déplacements horizontaux et verticaux issus de DIC dans la phase 2 entre les images 110-240

- *Phase 3* : phase non-linéaire pré-pic, cette phase correspond à l'apparition et à la propagation de fissures. Au cours de cette phase, l'activité acoustique augmente jusqu'au pic de contrainte. La pente de la courbe contrainte – déformation diminue. Les grands sauts de l'activité acoustique à la fin de cette phase témoignent de l'initiation et de la propagation rapide de macro-fissures. L'analyse DIC des photos 240 (début de cette phase) et 290 (au pic de contrainte) de la Figure A2.6 montre l'apparition de fissures verticales ouvertes (déformation de 0.007) sur la carte de direction de déformations. Après le pic de contrainte, les macro-fissures apparaissent, l'analyse DIC des photos 290 (au pic) et 295 (après pic) donne un résultat significatif (Figure A2.7). Les fissures verticales se propagent de manière diffuse et très rapide. La déformation maximale dans les zones localisées est très élevée : 0.09.

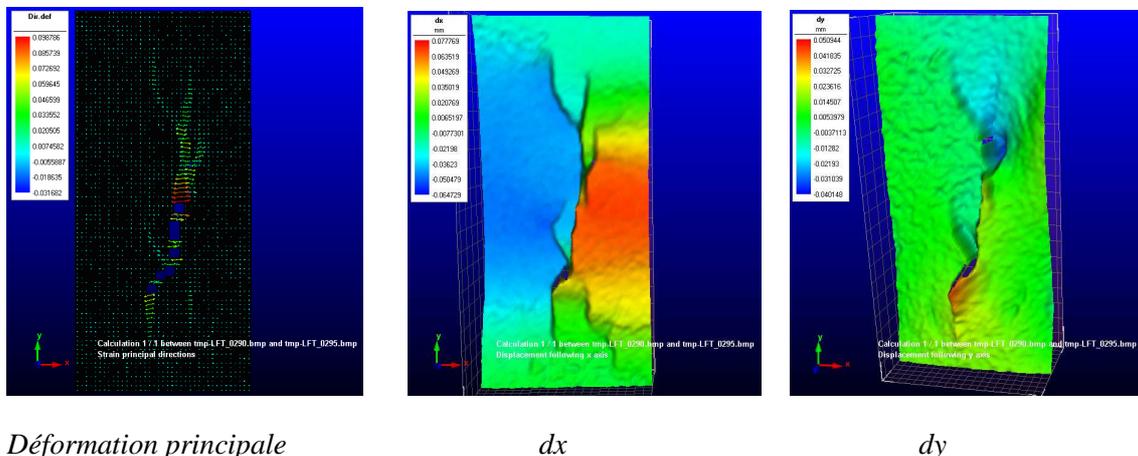


Déformation principale

dx

dy

Figure A2.6. Déformation principale, déplacements horizontaux et verticaux issus de DIC dans phase 2 entre les images 240-290



Déformation principale

dx

dy

Figure A2.7. Déformation principale, déplacements horizontaux et verticaux issus de DIC entre les images 290-295

La Figure A2.8 présente la carte des déformations principales de l'échantillon issue de l'analyse DIC entre la photo enregistrée au début (photo 1) et à la fin de l'essai (photo 300). Sur cette carte, la présence des fissures est très visible. Une déformation maximale de 0.11 est observée aux positions localisées des fissures ouvertes et une déformation maximale négative de -0.018 dans les zones de fermeture des fissures préexistantes. Les états de l'échantillon avant et après essai sont représentés par les coupes verticales reconstruites par logiciel « imageJ ». Les deux coupes présentées dans la Figure A2.8 sont très proches de la surface étudiée par DIC. Nous confirmons que la fissure observée par DIC est identique à celle observée grâce à la tomographie RX.

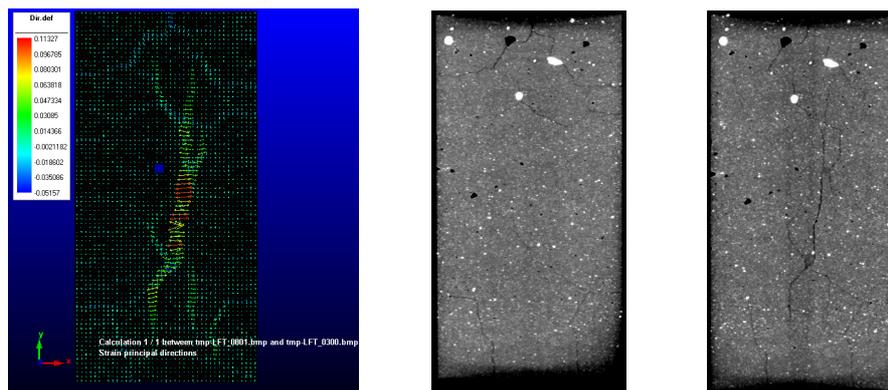


Figure A2.8. Déformations issues de DIC entre les images 1-300 et deux coupes tomographiques de l'échantillon avant et après l'essai.

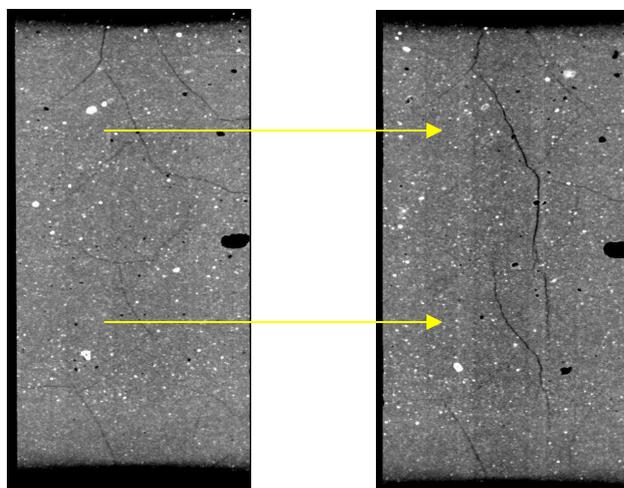


Figure A2.9. Les coupes tomographiques verticales au cœur de l'échantillon avant et après l'essai.

Les 2 coupes présentées dans la Figure A2.9 représentent la structure interne de l'éprouvette avant et après chargement. Sous chargement vertical, les fissures préexistantes verticales s'ouvrent et deviennent plus nettes après chargement. La coalescence de ces fissures est à l'origine de nouvelles fissures.

## A3. Fissuration dans les échantillons de Tuf avec des entailles rectilignes

### A3.1. Essai Tuf-E-01

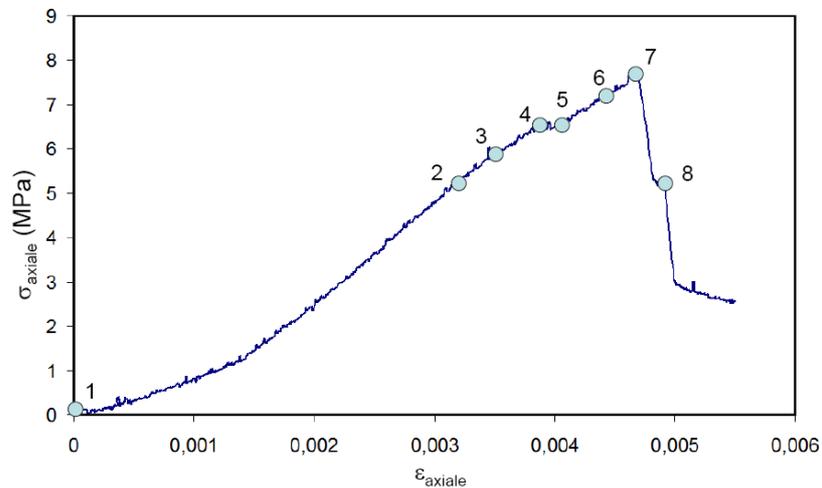
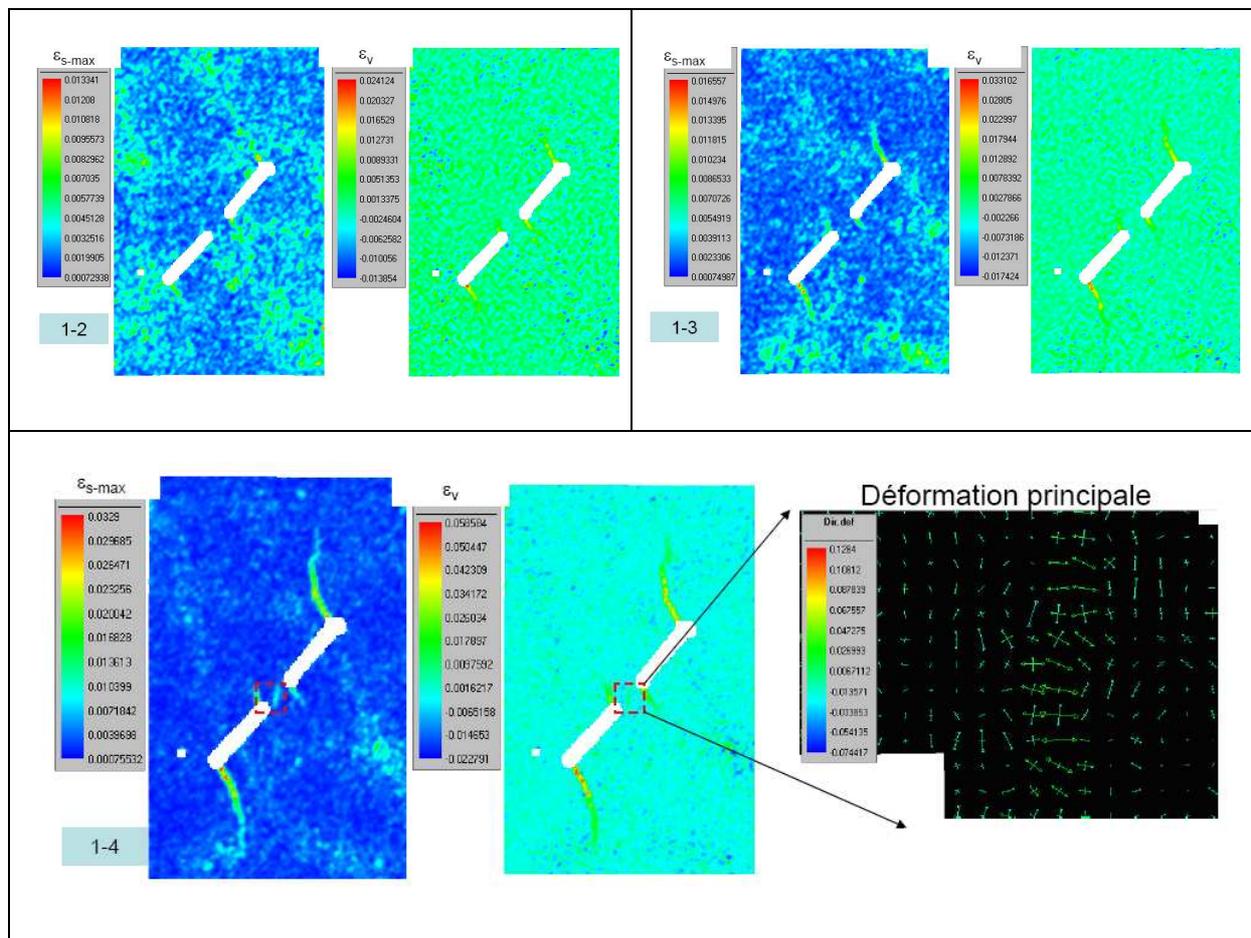


Figure A3.1. Essai Tuf-E-01. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



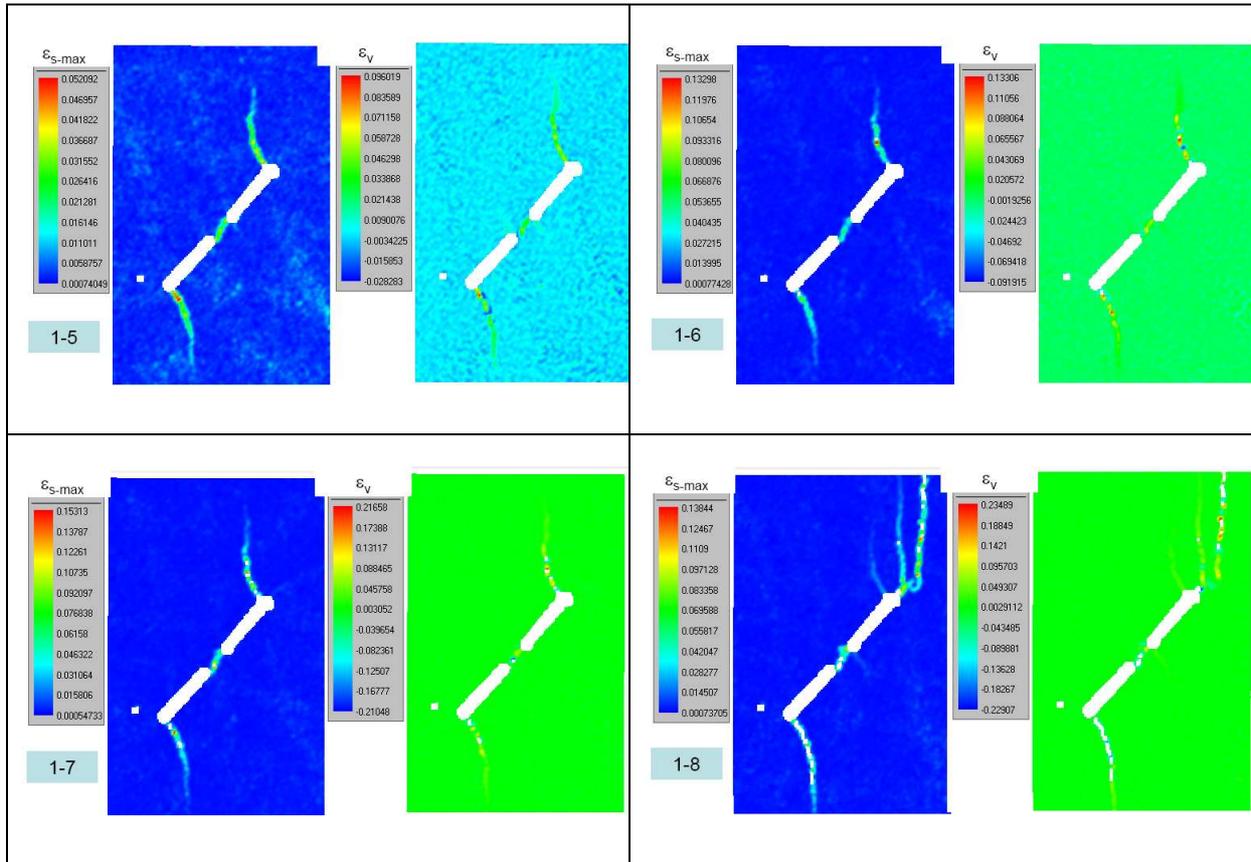


Figure A3.2. Essai Tuf-E-01. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

Les premières fissures, qui apparaissent lors de l'analyse 1-2, sont les wing cracks externes. Dans l'analyse 1-4, la présence d'une nouvelle fissure de mode I est détectée dans la partie intacte du matériau au niveau du pont de roche. Cette fissure se propage et rejoint les entailles lors de l'analyse 1-5 correspondant à la première chute de la contrainte axiale. Enfin, les nouvelles fissures apparaissent au niveau de l'entaille supérieure dans l'analyse 1-8. L'apparition brutale de ces fissures correspond à la chute importante de la contrainte axiale.

## A4. Fissuration dans les échantillons de CPIR09 entaillés

### A4.1. Essai Cpir1-E-45-01

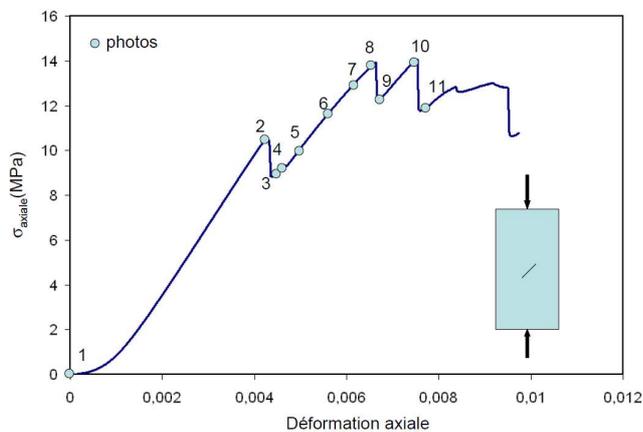
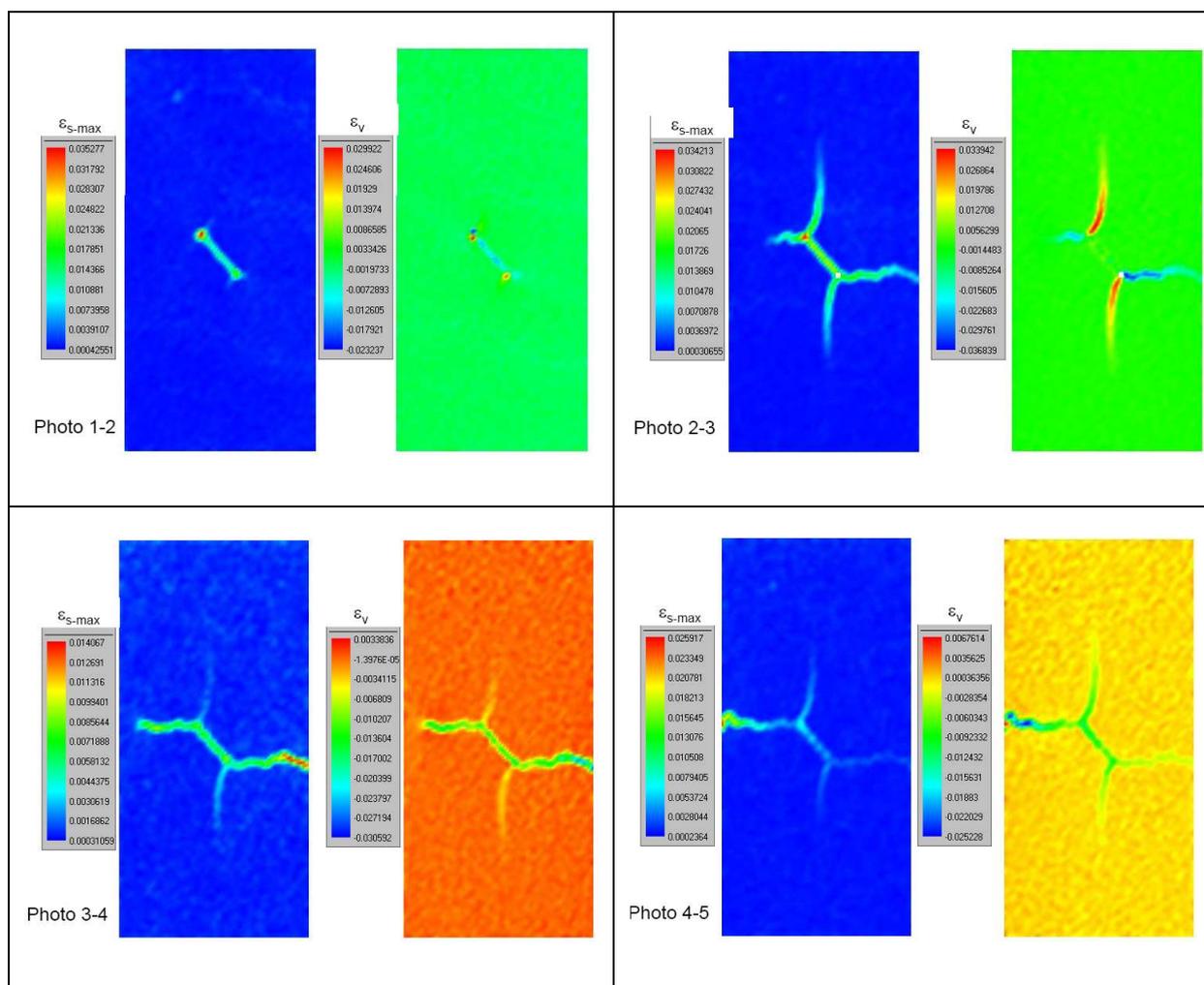


Figure A4.1. Essai Cpir1-E-45-01. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



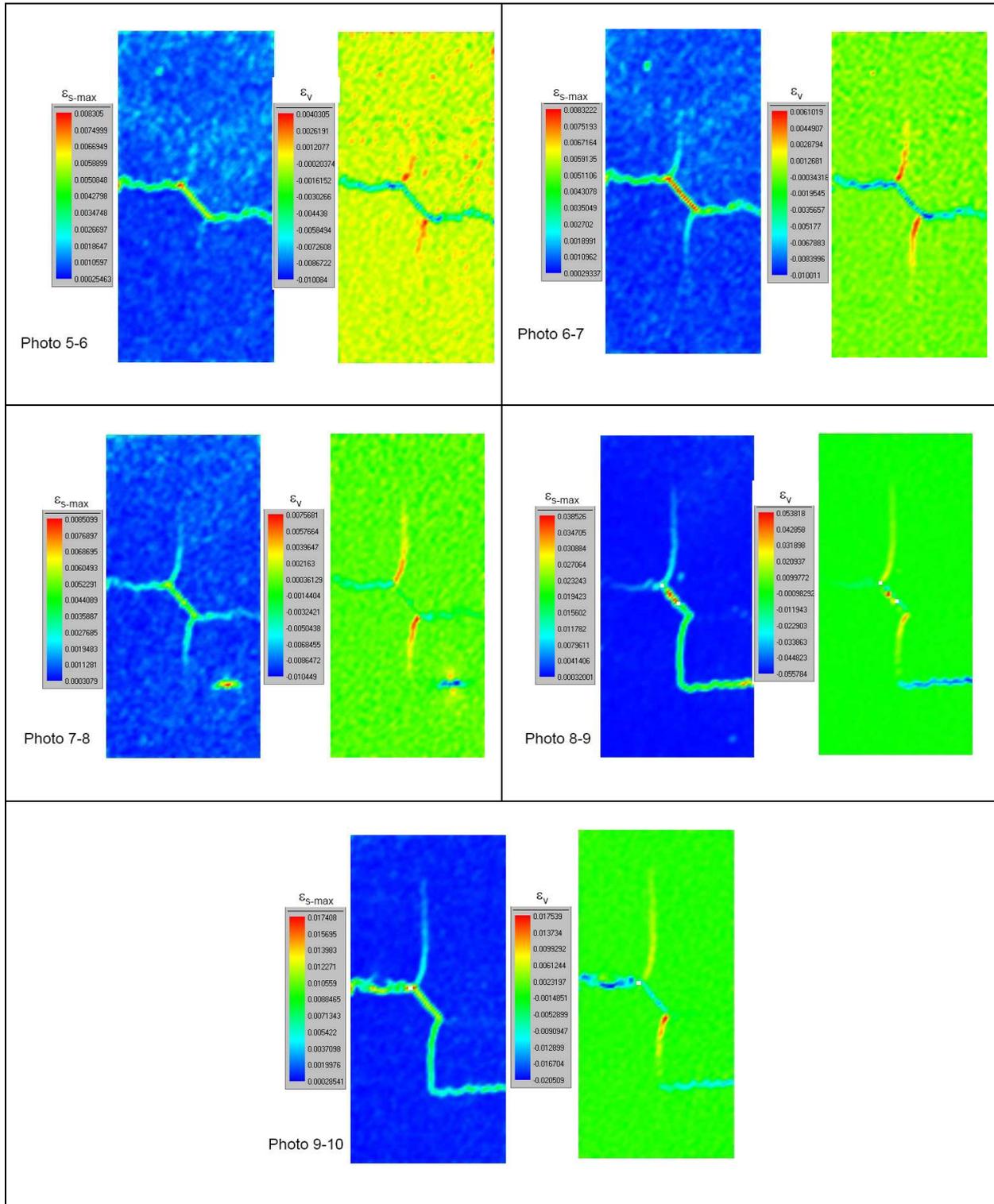


Figure A4.2. Essai Cpir1-E-45-01. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A4.2. Essai Cpir1-E-45-03

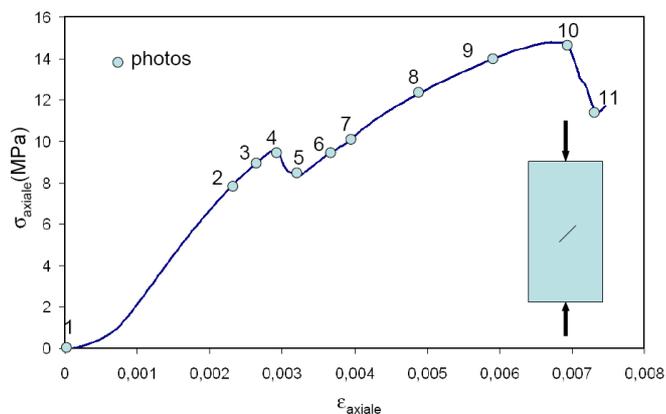
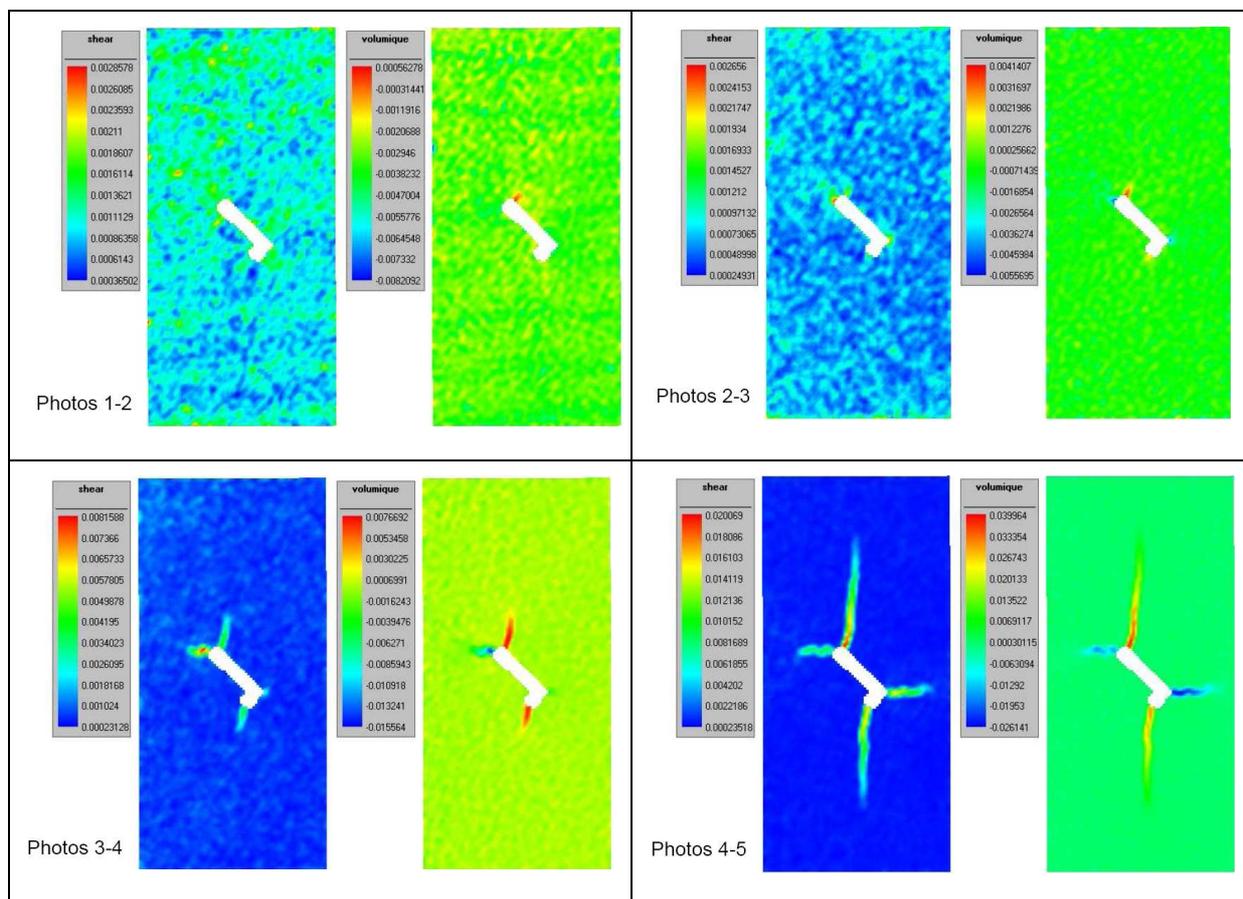


Figure A4.3. Essai Cpir1-E-45-03. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



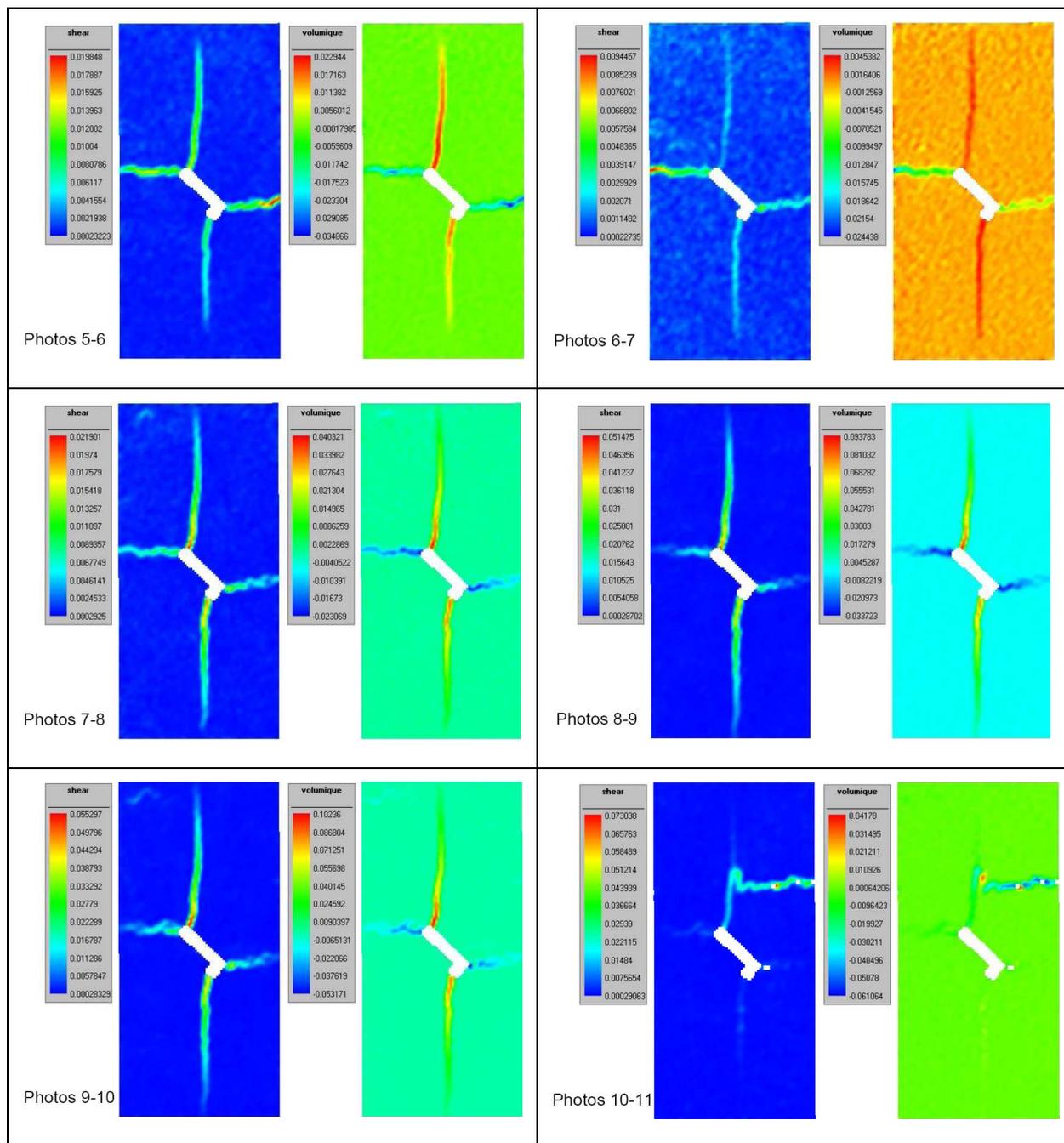


Figure A4.4. Essai Cpir1-E-45-03. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A4.3. Essai Cpir2-E-45-02

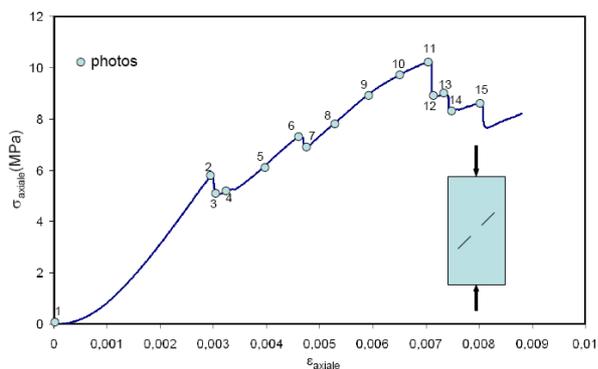
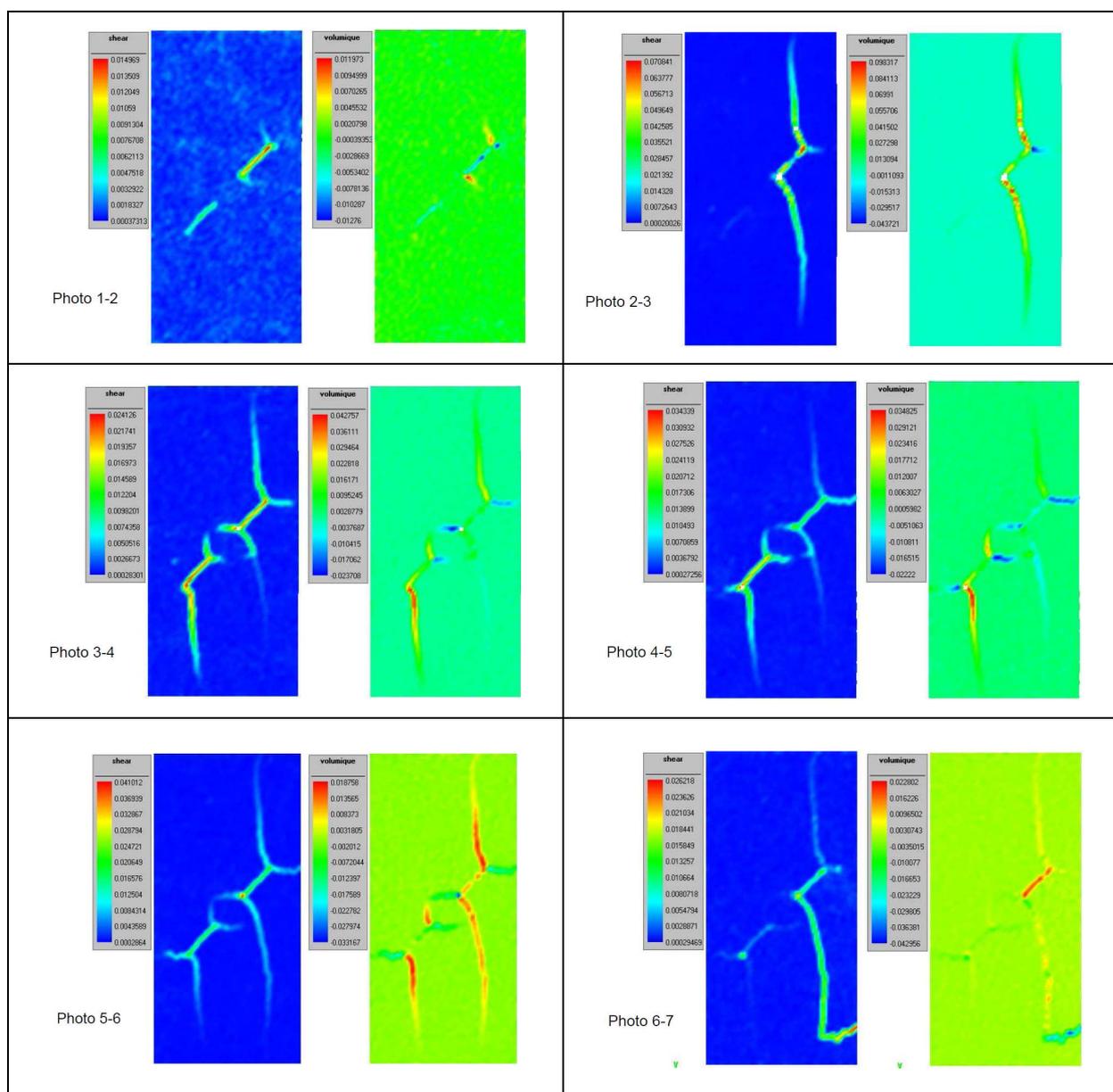


Figure A4.5. Essai Cpir2-E-45-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



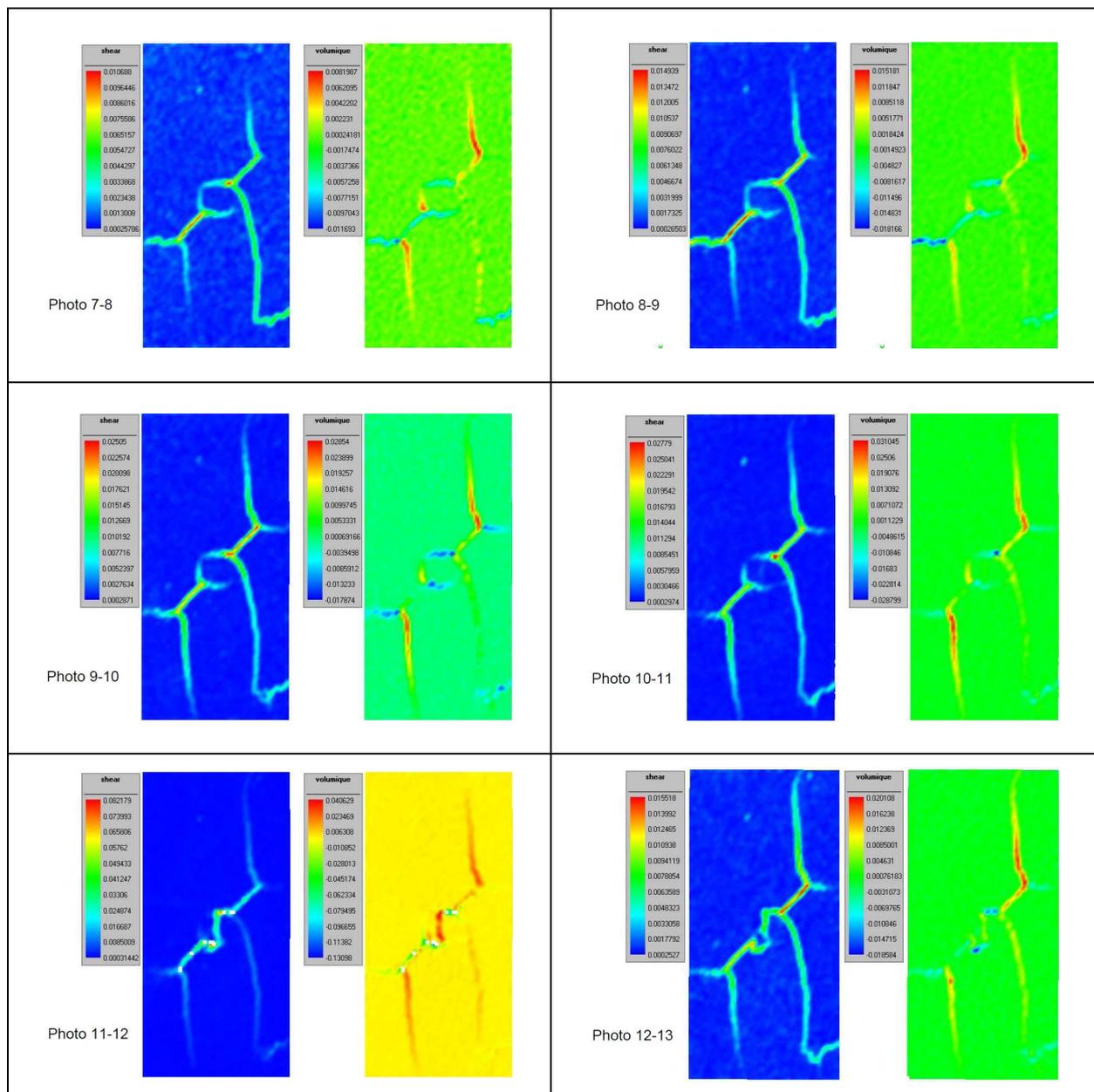


Figure A4.6. Essai Cpir2-E-45-02. Cartes de déformation de cisaillement maximum (à gauche) et de déformation volumique (à droite).

## A5. Essais de type Meuwissen sur le Tuf

### A5.1. Essai Tuf-tm-35-01

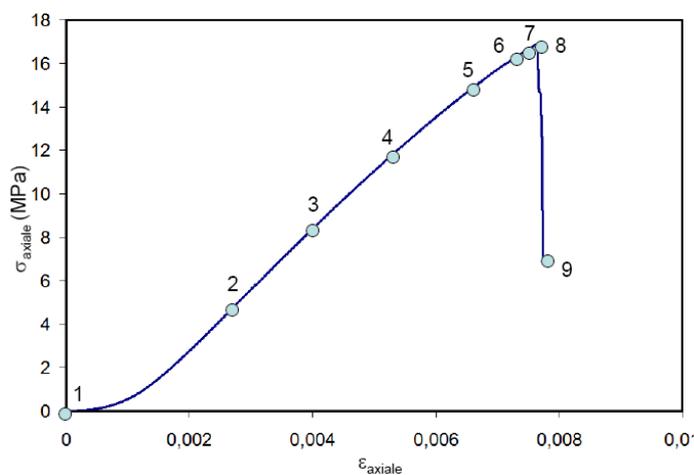
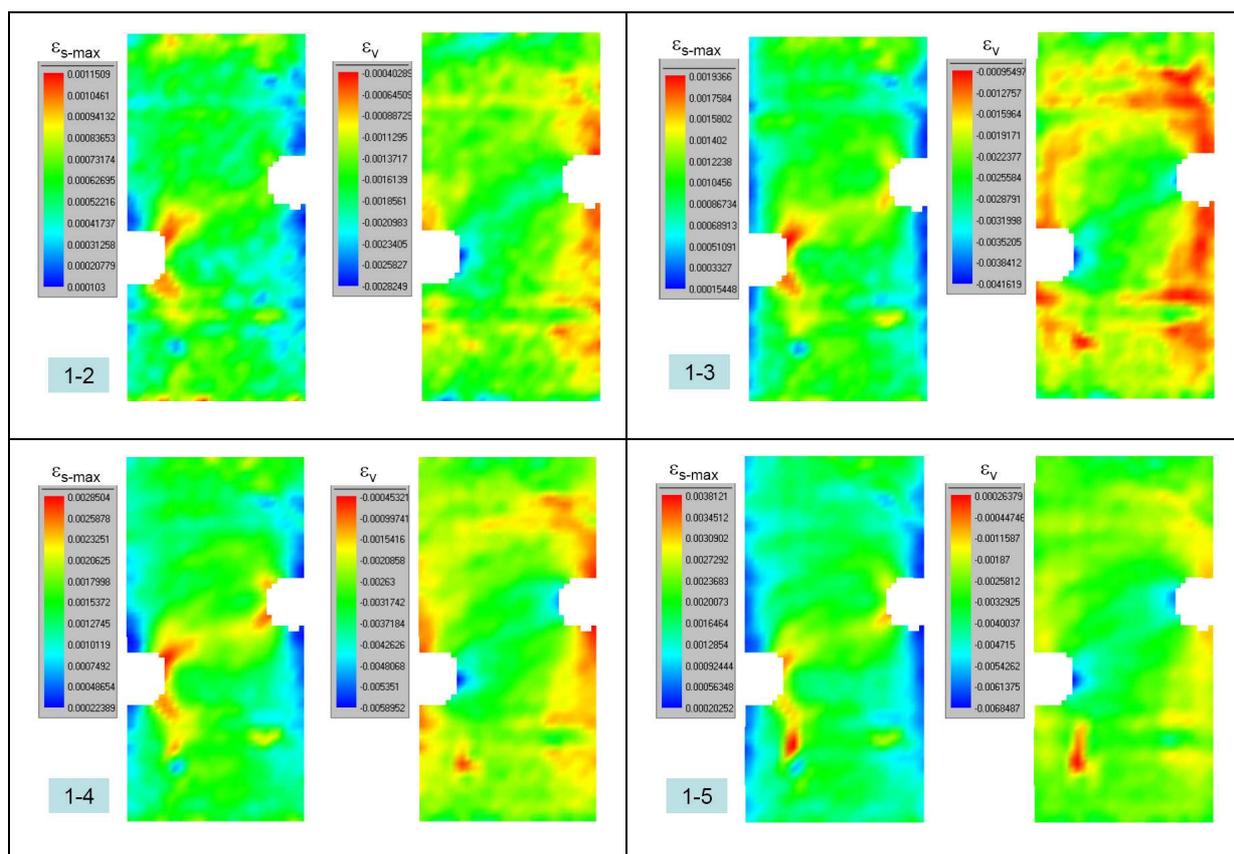


Figure A5.1. Essai Tuf-tm-35-01. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



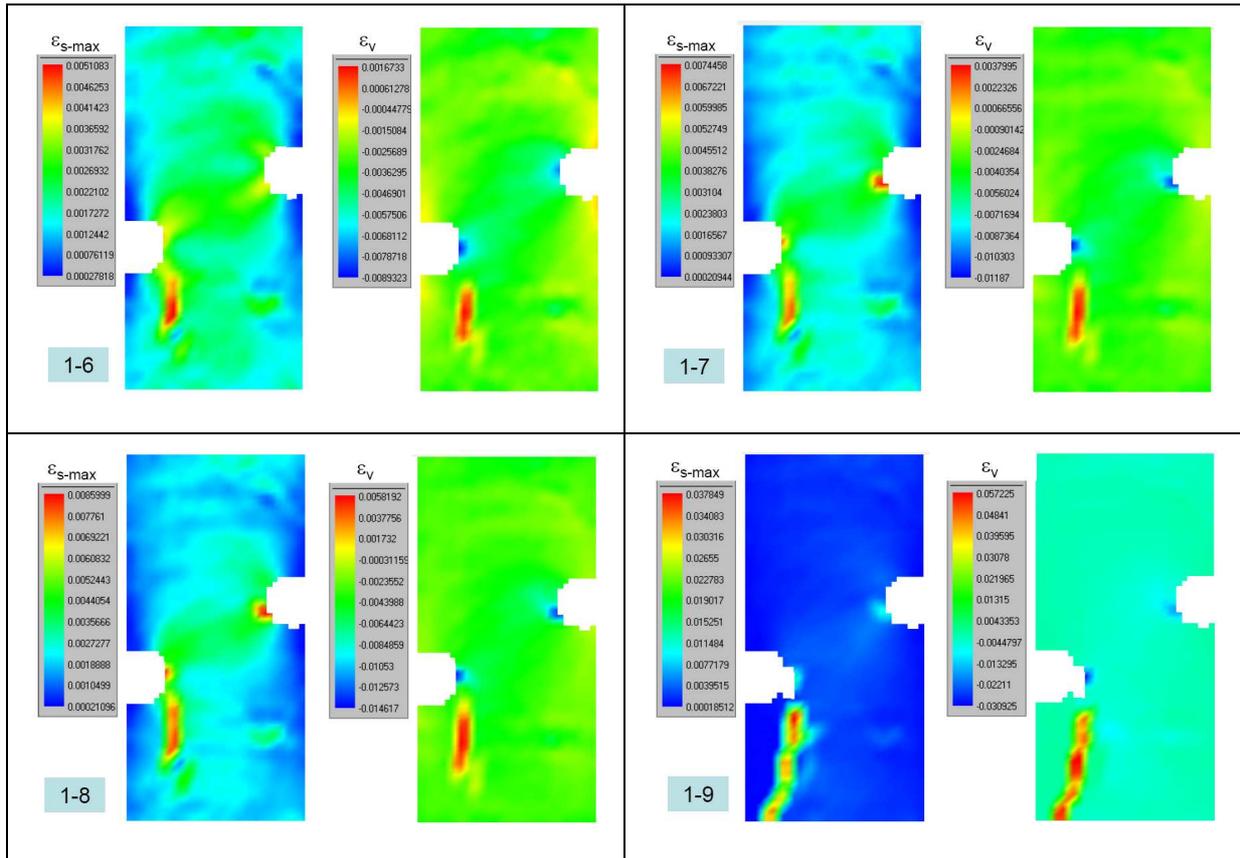


Figure A5.2. Essai Tuf-tm-35-01. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A5.2. Essai Tuf-tm-45-01

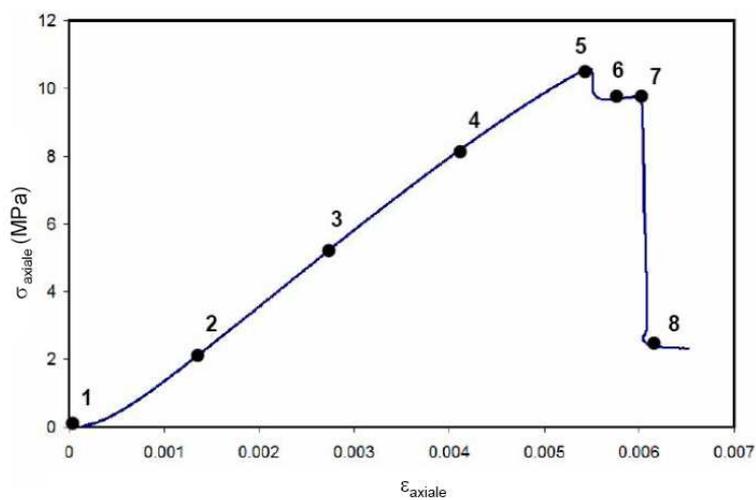
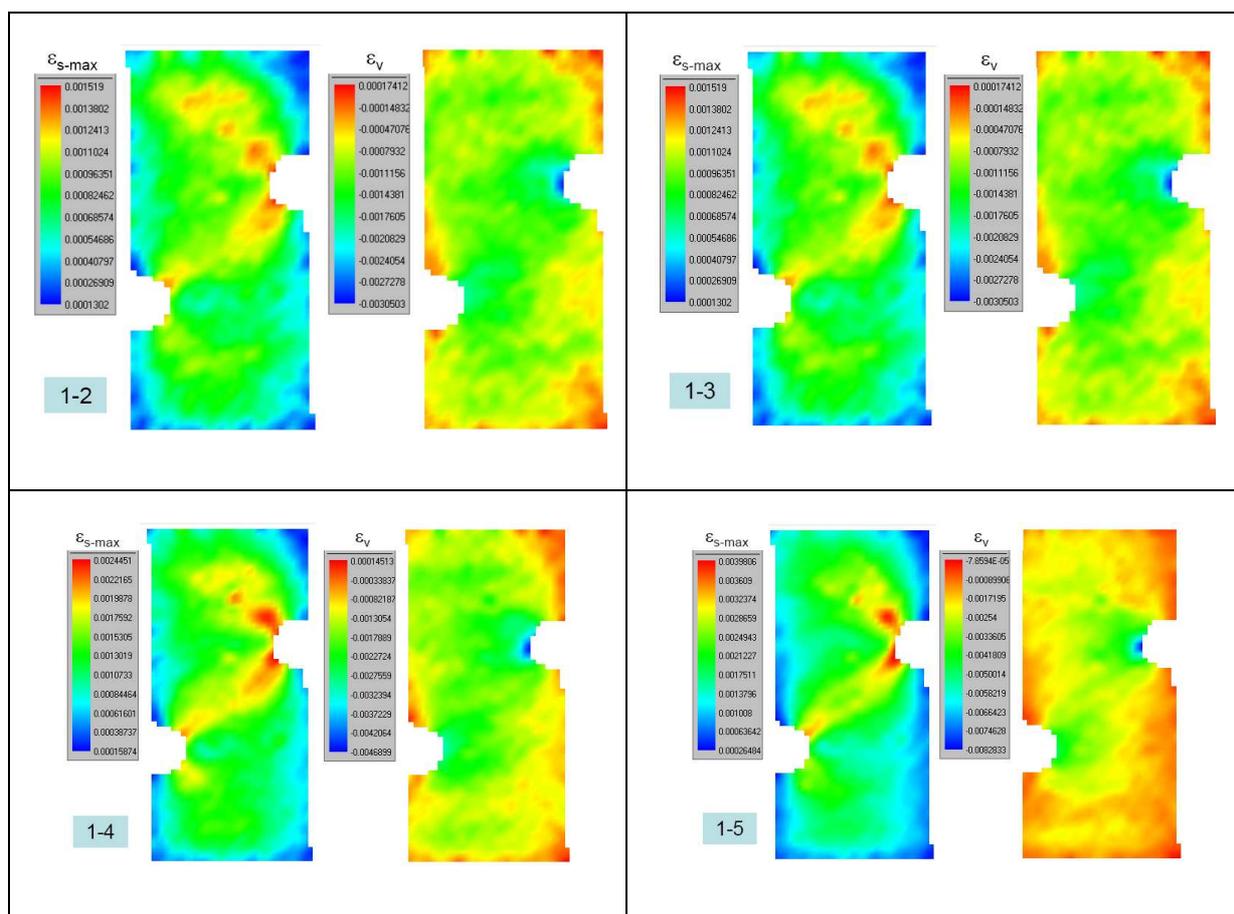


Figure A5.3. Essai Tuf-tm-45-01. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



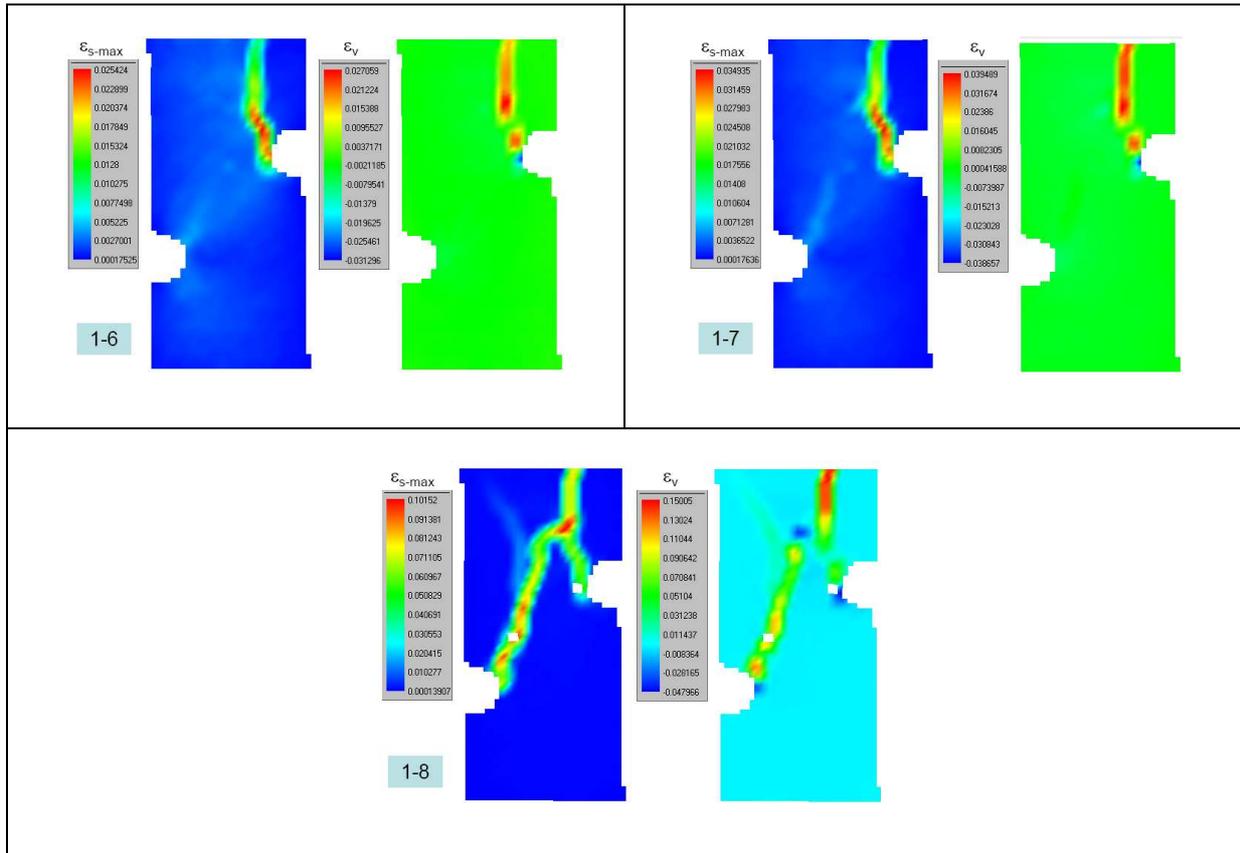


Figure A5.4. Essai Tuf-tm-45-01. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A5.3. Essai Tuf-tm-45-02

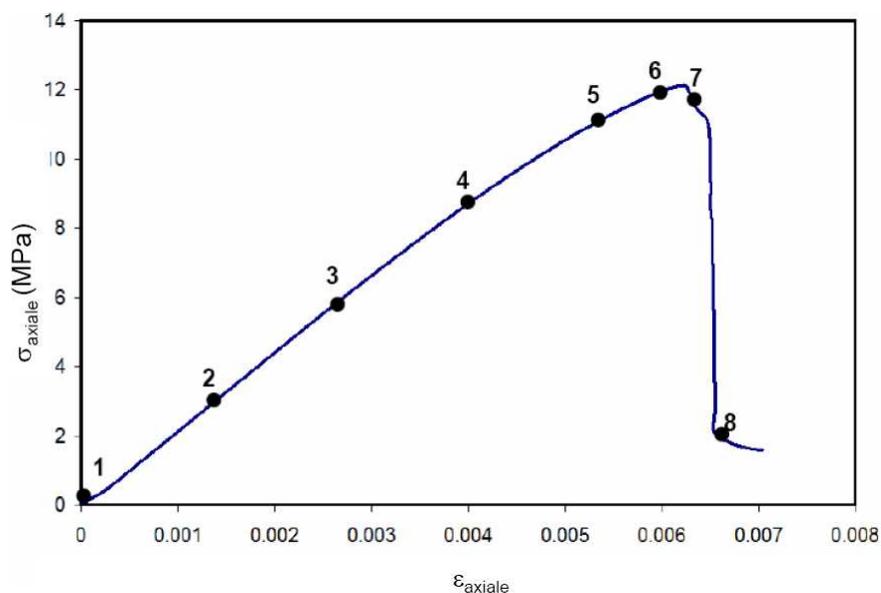
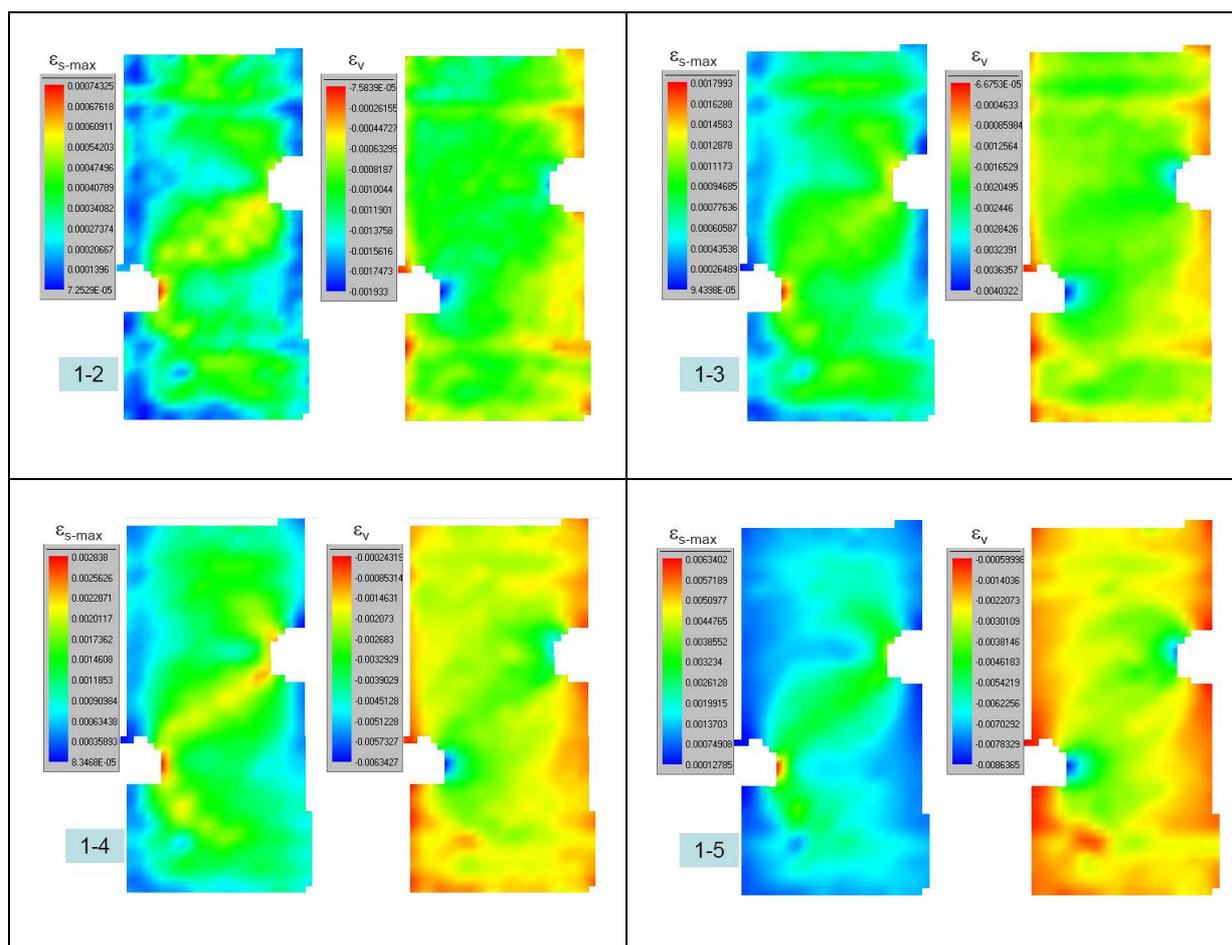


Figure A5.5. Essai Tuf-tm-45-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



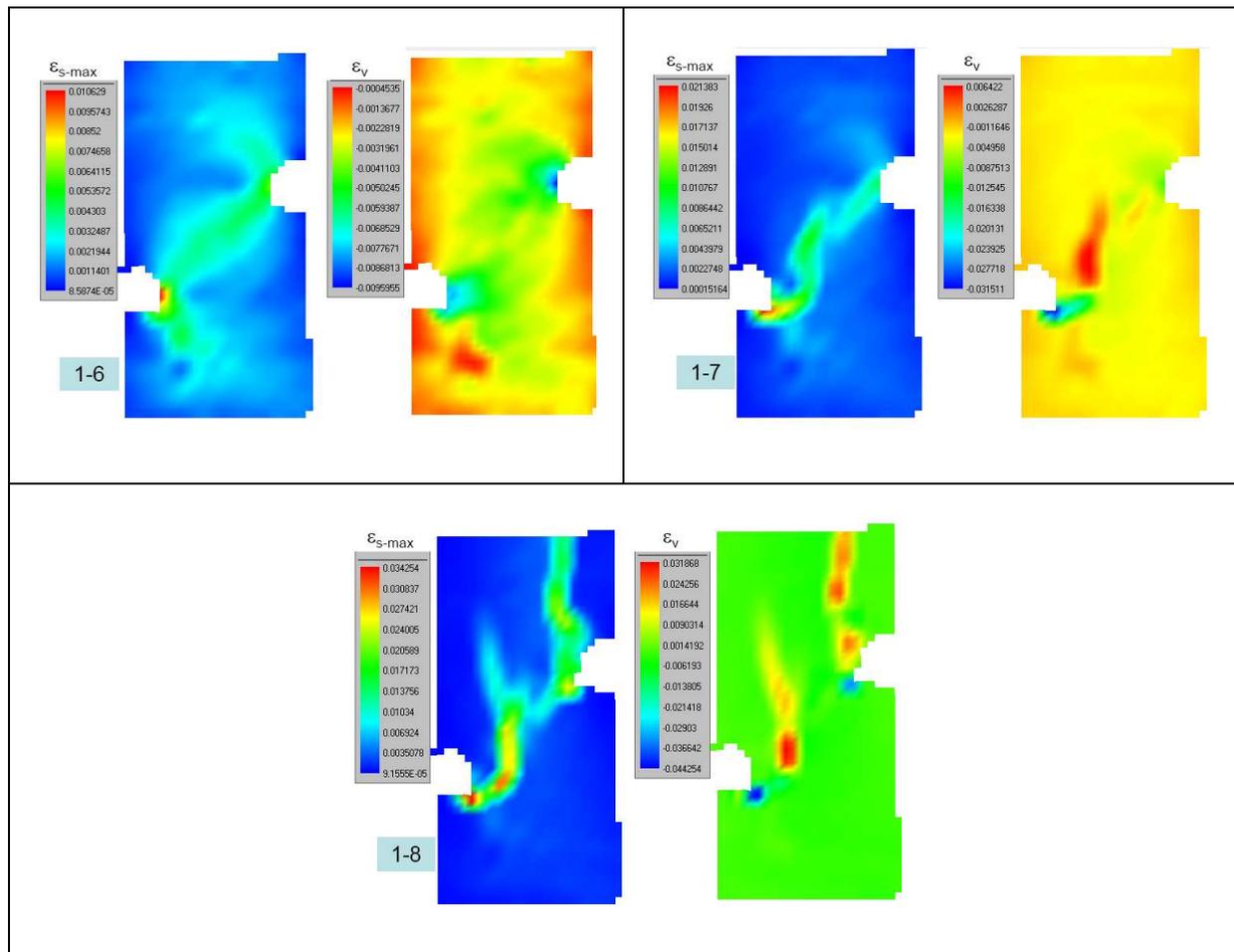


Figure A5.6. Essai Tuf-tm-45-02. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A5.4. Essai Tuf-tm-45-04

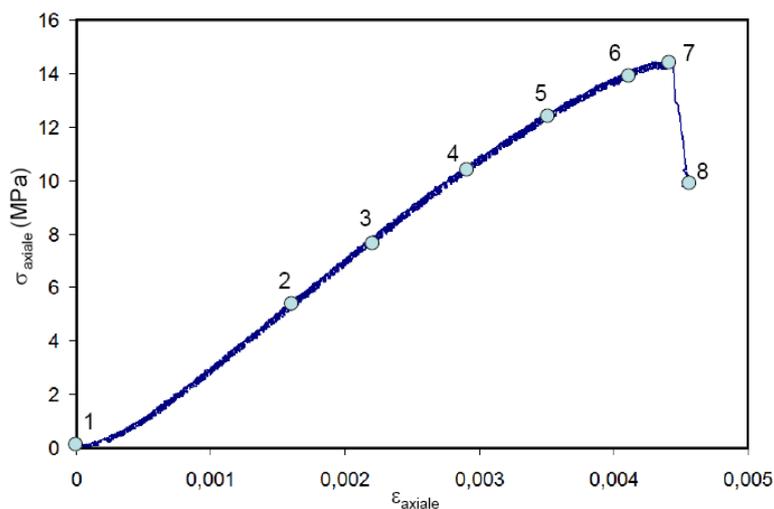
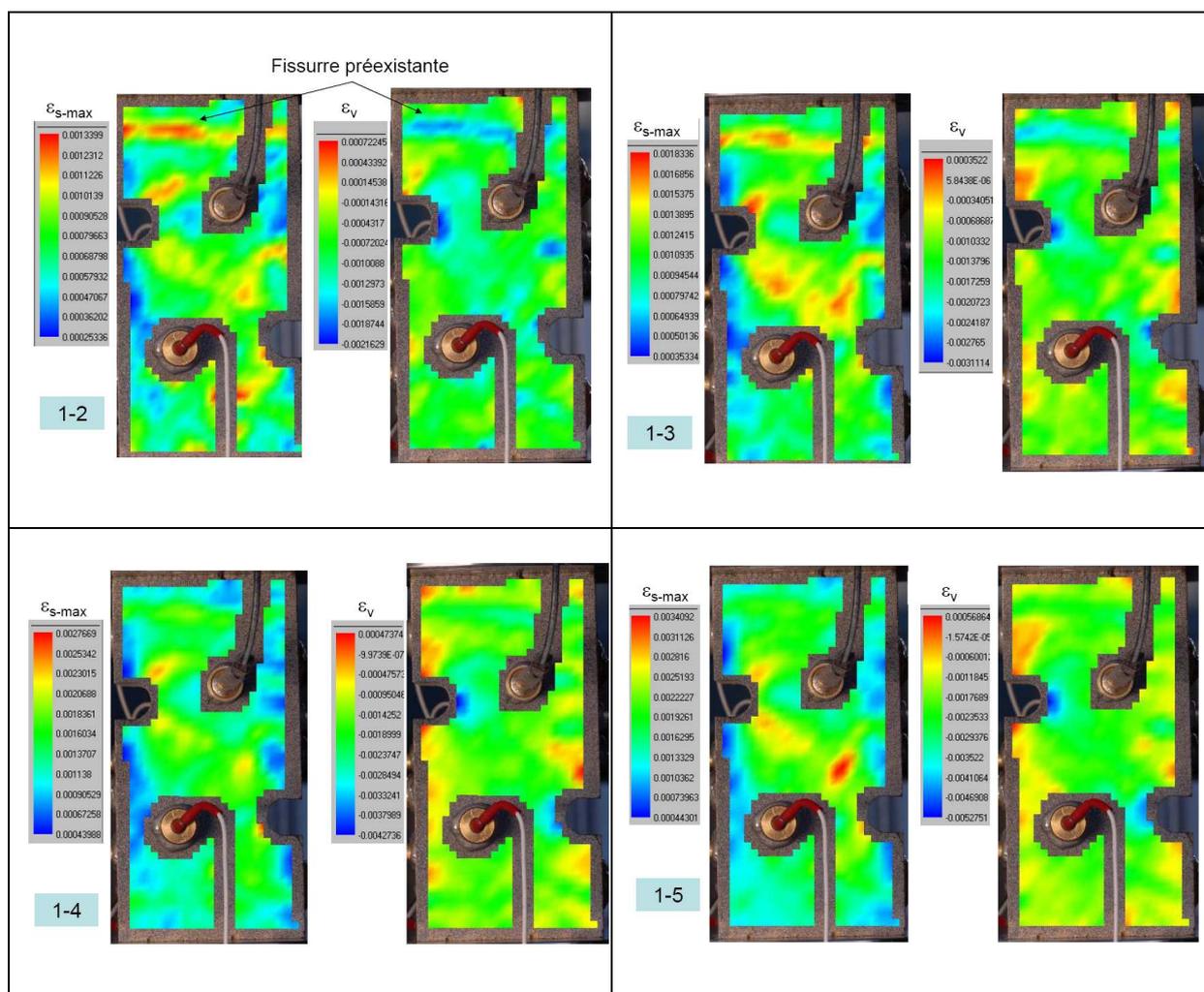


Figure A5.7. Essai Tuf-tm-45-04. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



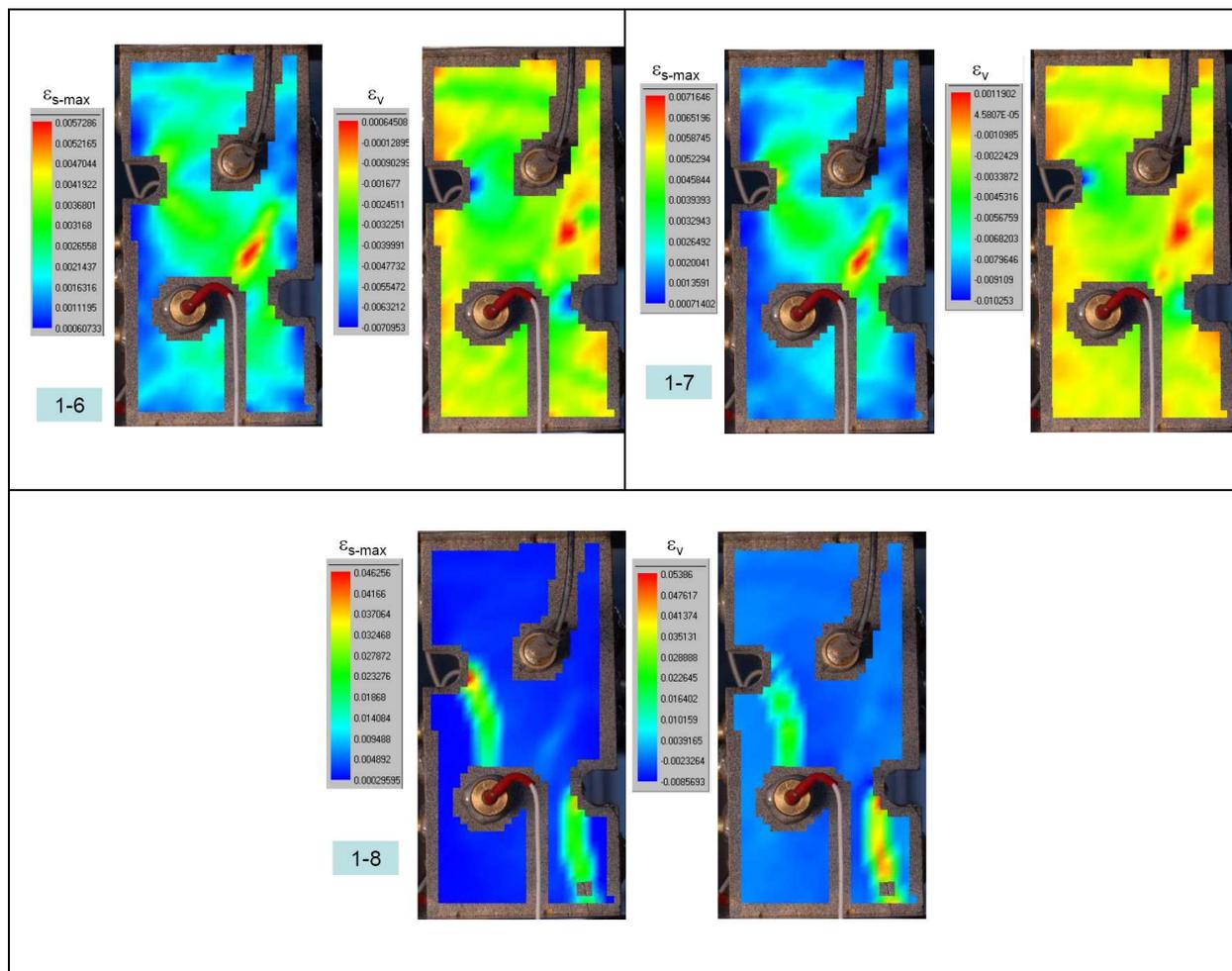


Figure A5.8. Essai Tuf-tm-45-04. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A5.5. Essai Tuf-tm-55-02

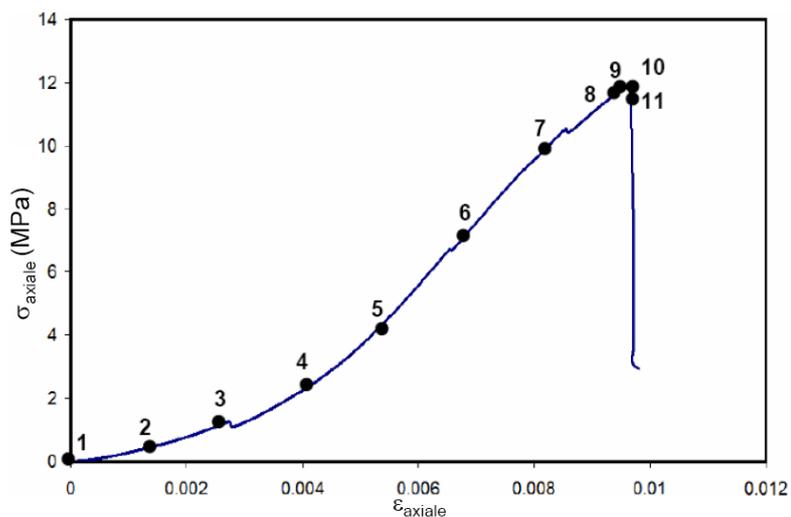
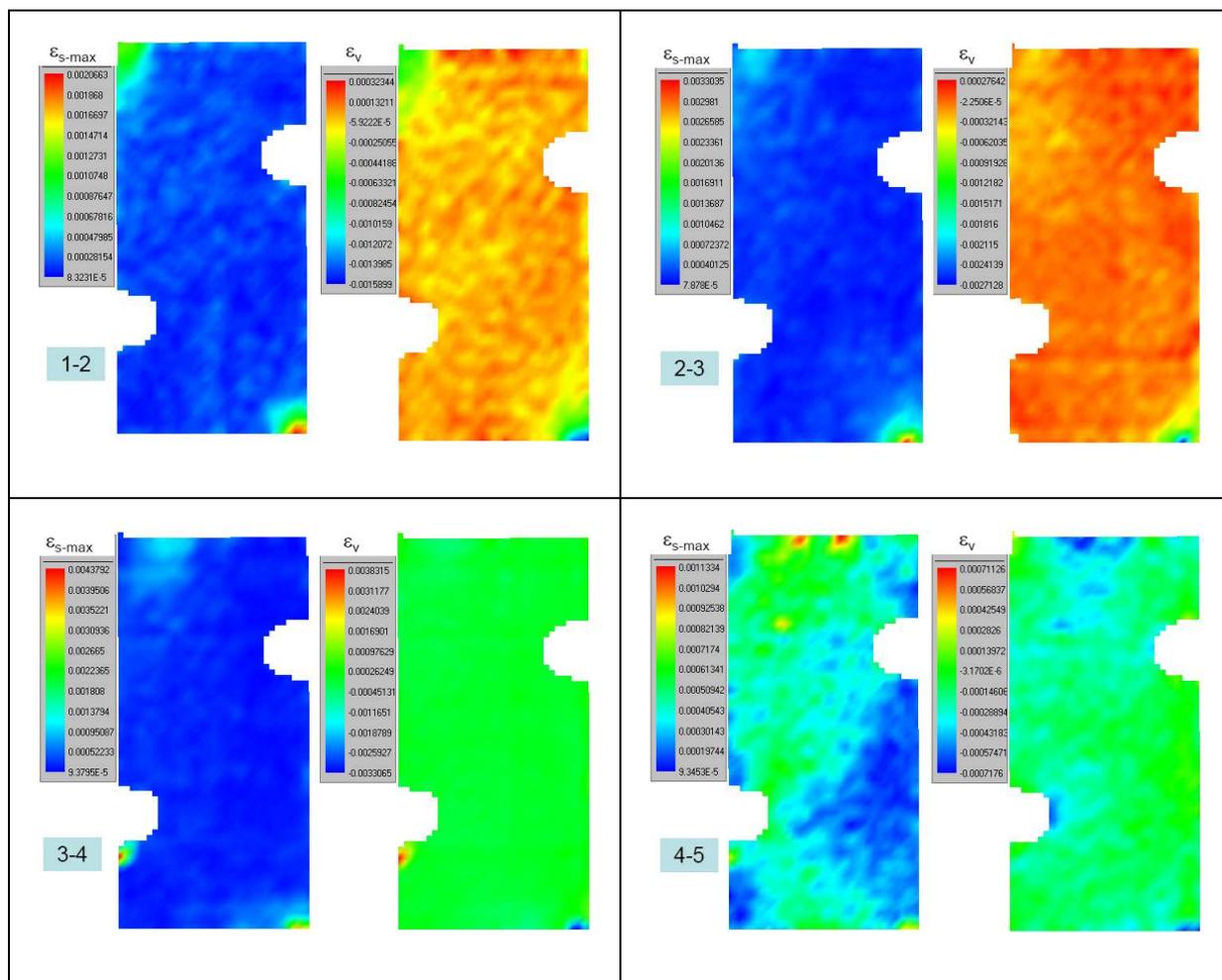


Figure A5.9. Essai Tuf-tm-55-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



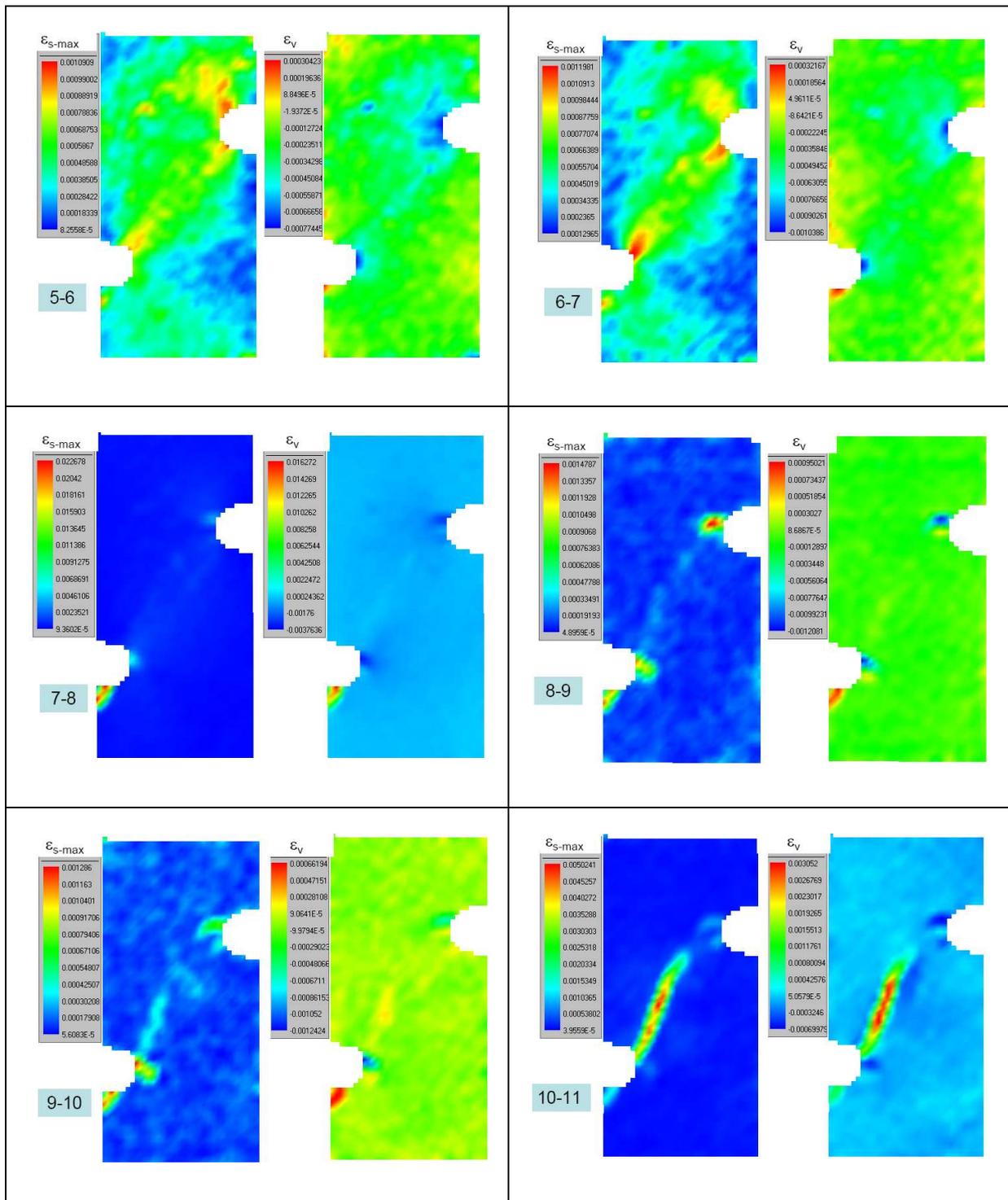


Figure A5.10. Essai Tuf-tm-55-02. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A5.6. Essai Tuf-tm-55-03

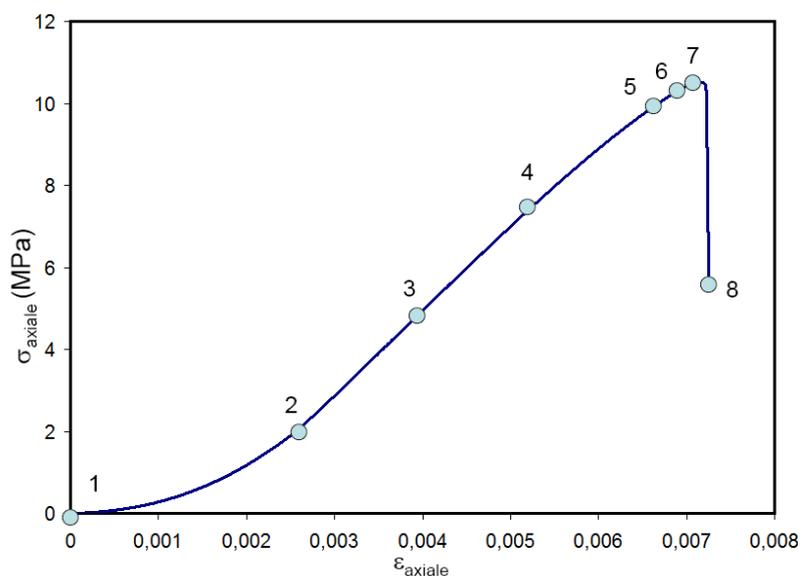
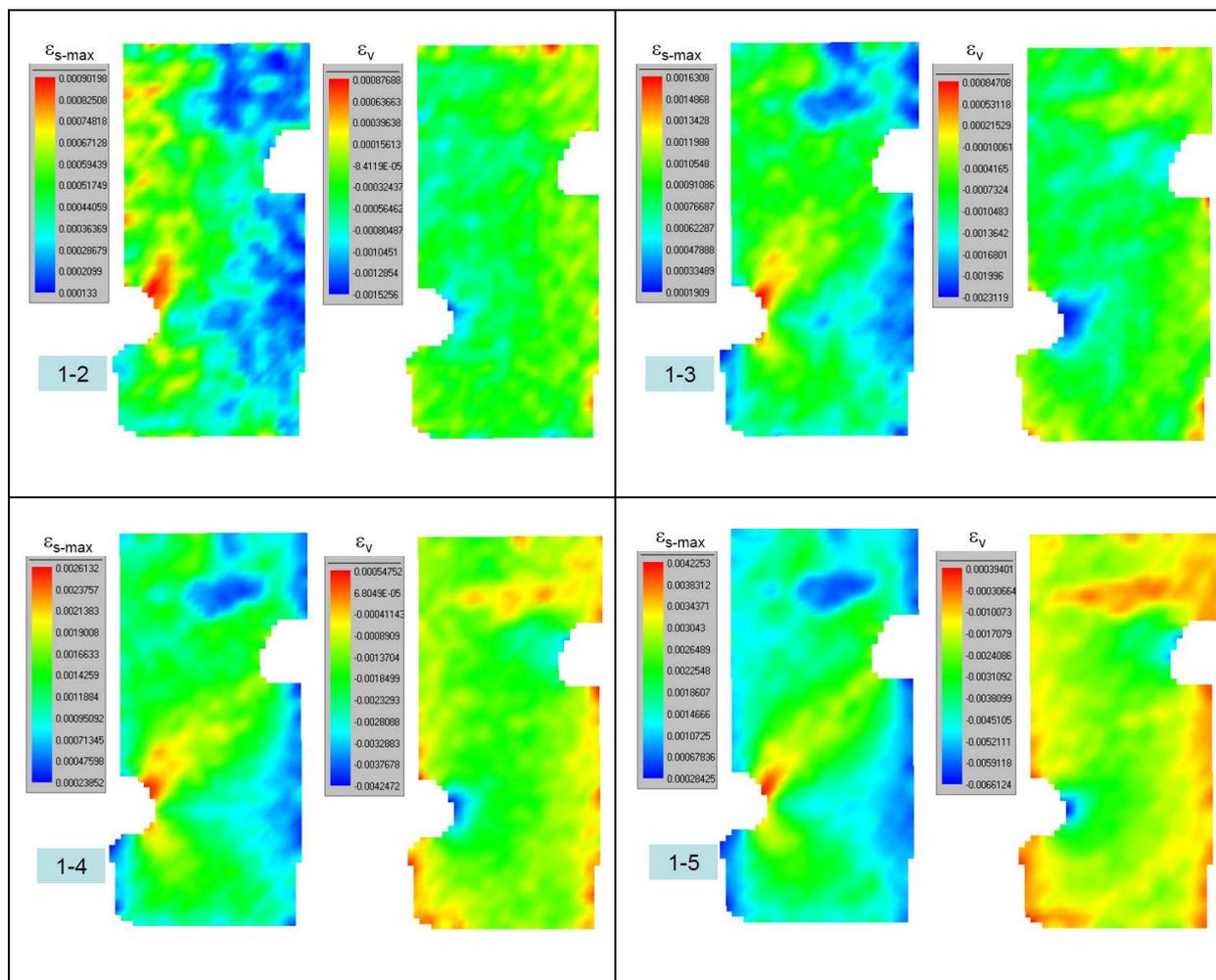


Figure A5.11. Essai Tuf-tm-55-03. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



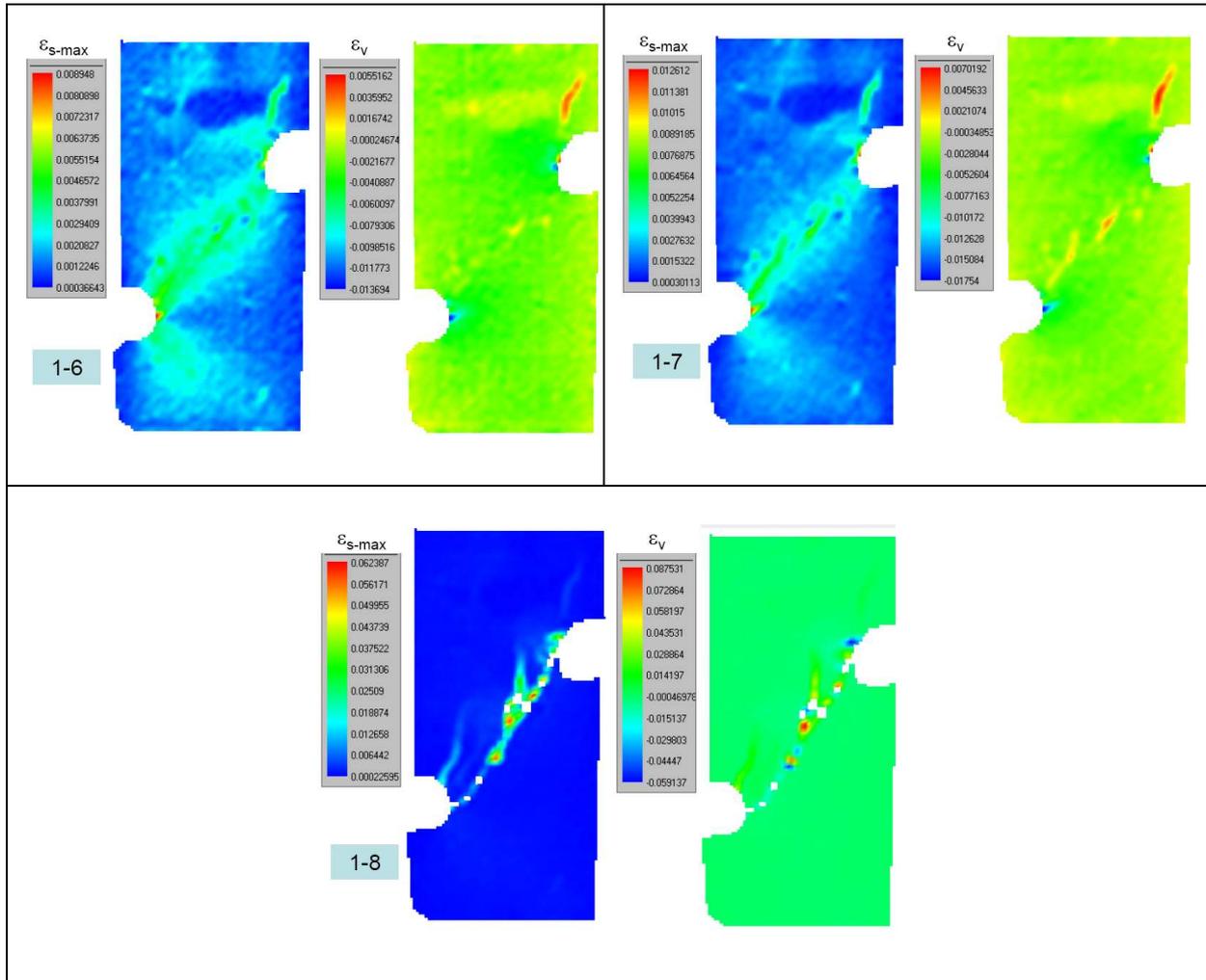


Figure A5.12. Essai Tuf-tm-55-03. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A6. Essais de type Meuwissen sur le CPIR09

### A6.1. Essai Cpir-tm-35-02

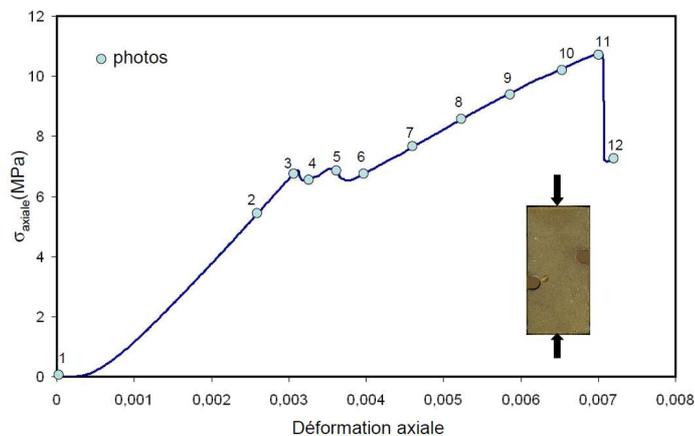
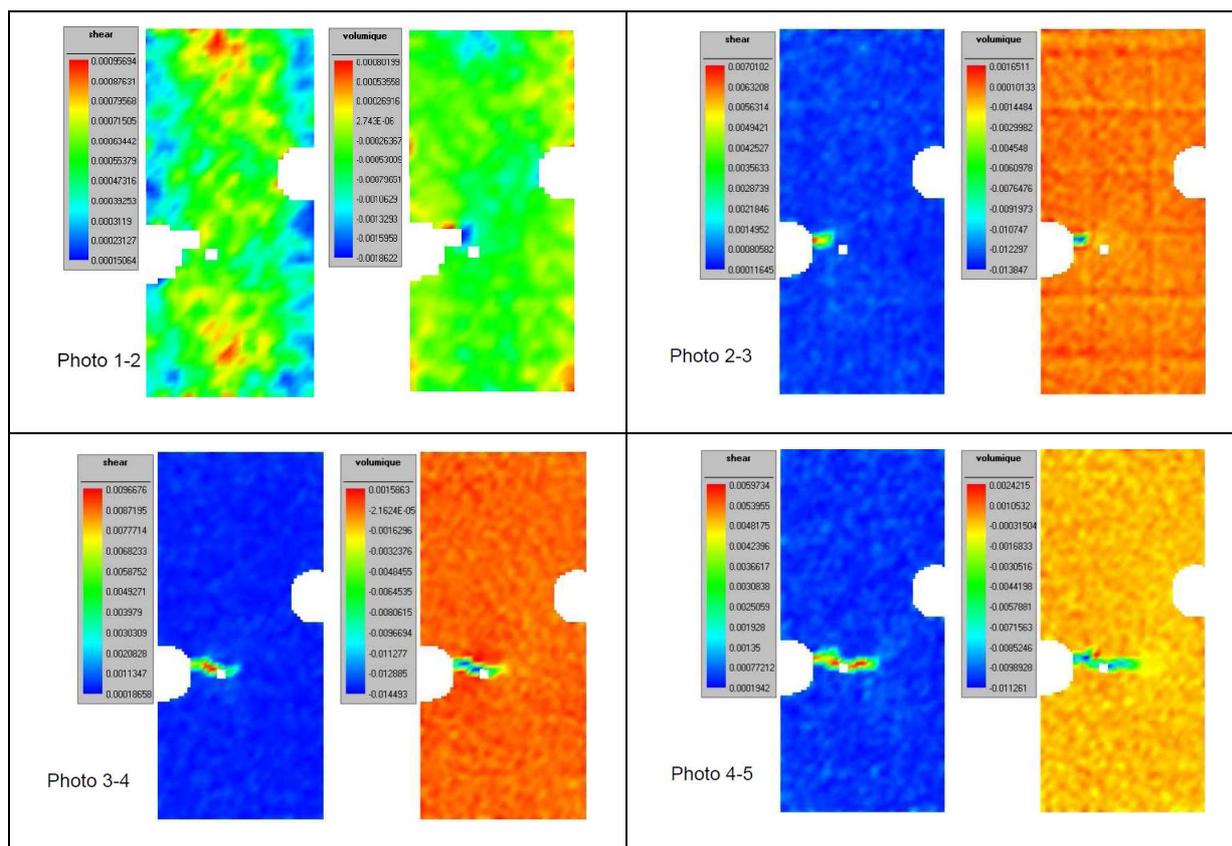


Figure A6.1. Essai Cpir-tm-35-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



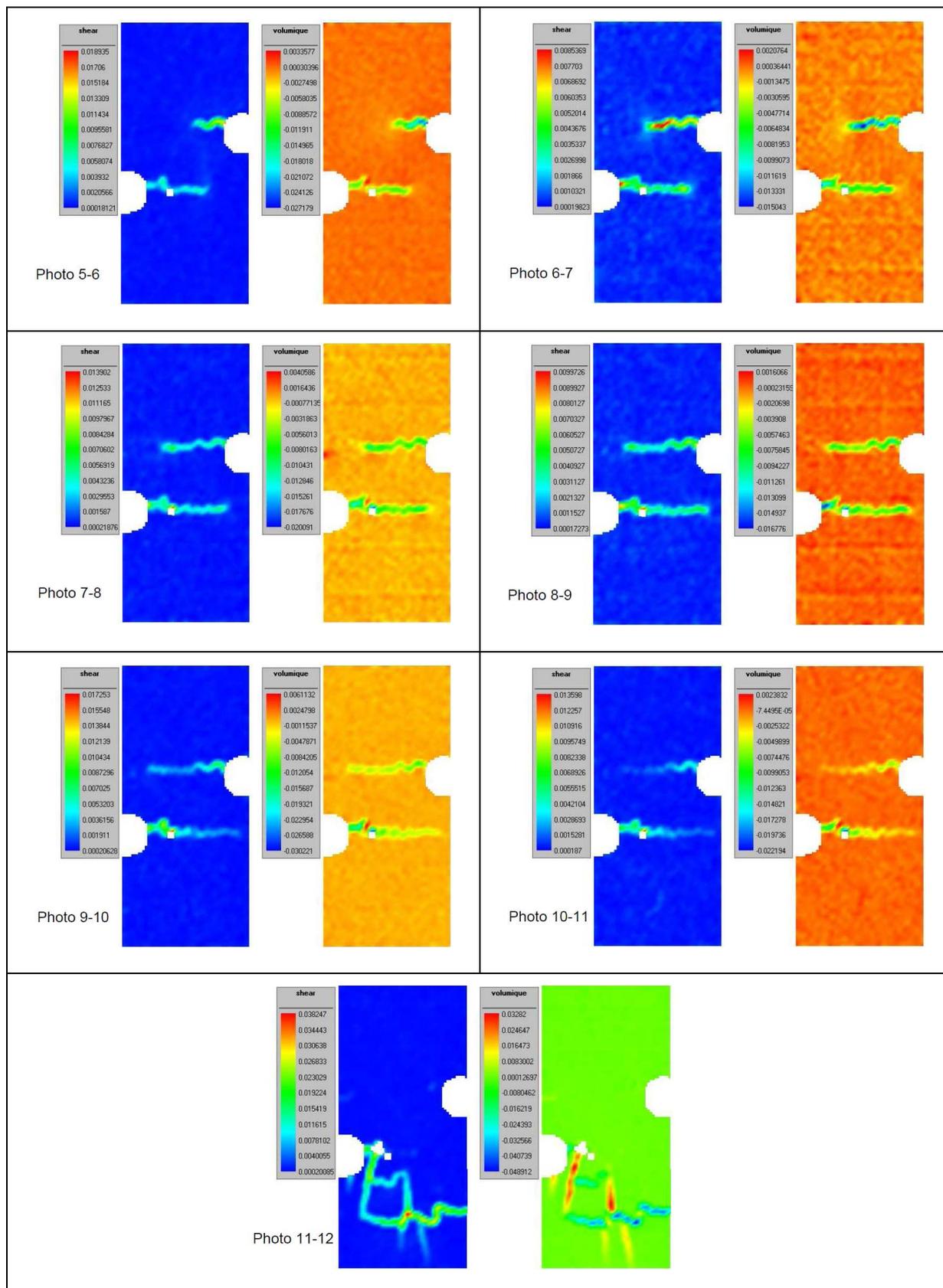


Figure A6.2. Essai Cpir-tm-35-02. Cartes de déformation de cisaillement maximum (à gauche) et de déformation volumique (à droite).

### A6.2. Essai Cpir-tm-45-01

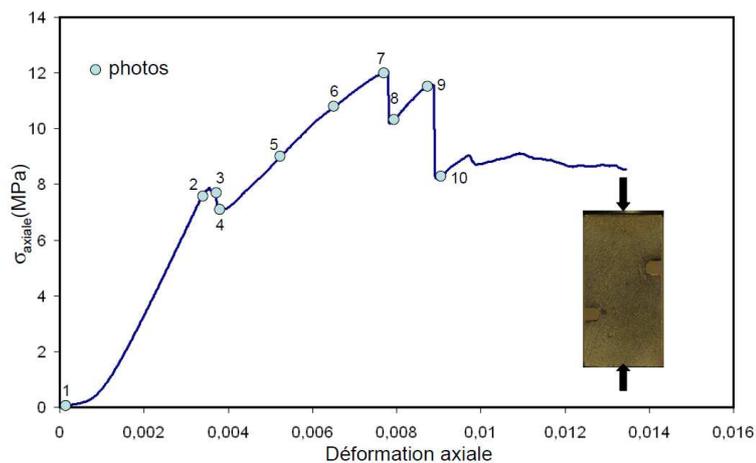
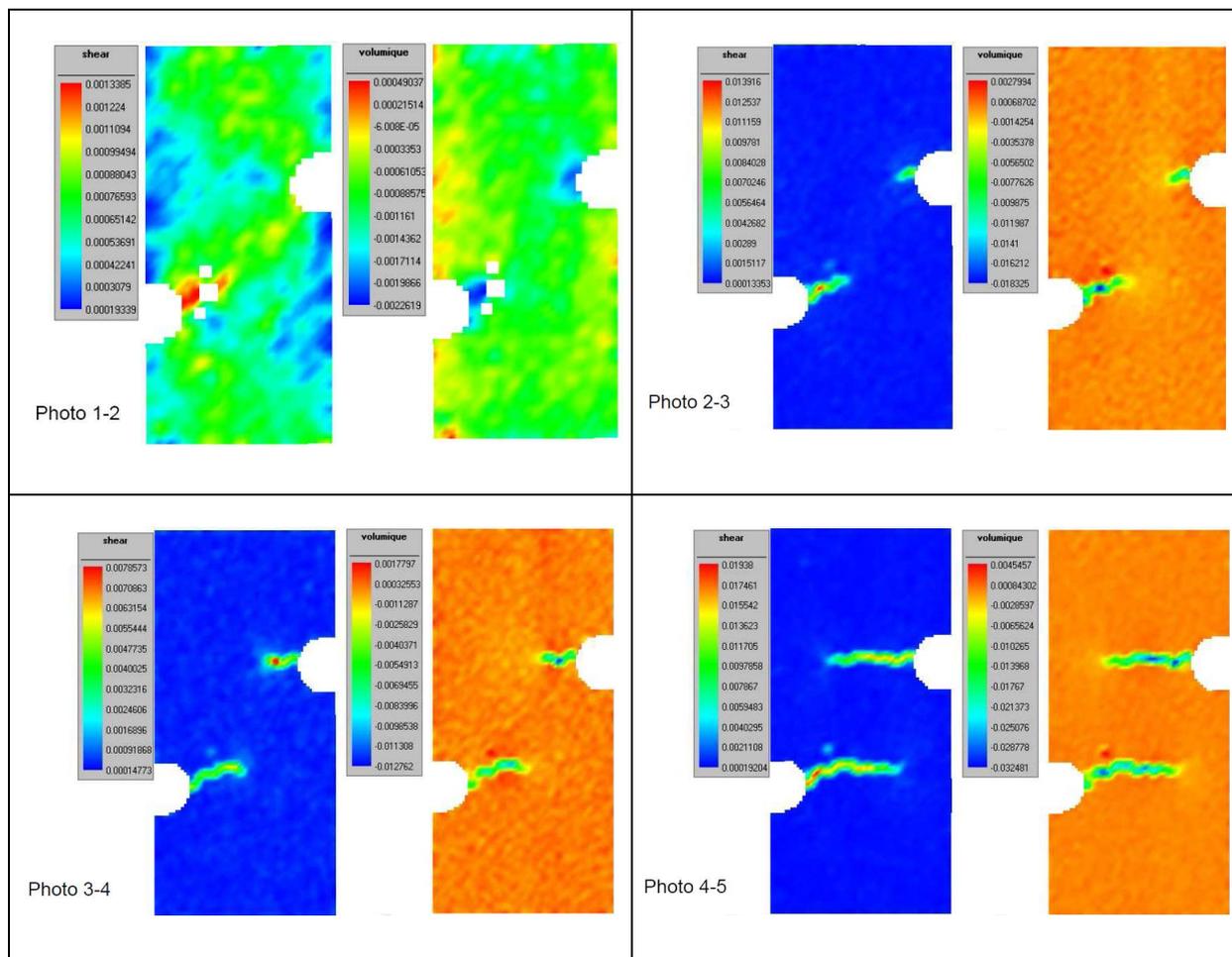


Figure A6.3. Essai Cpir-tm-45-01. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



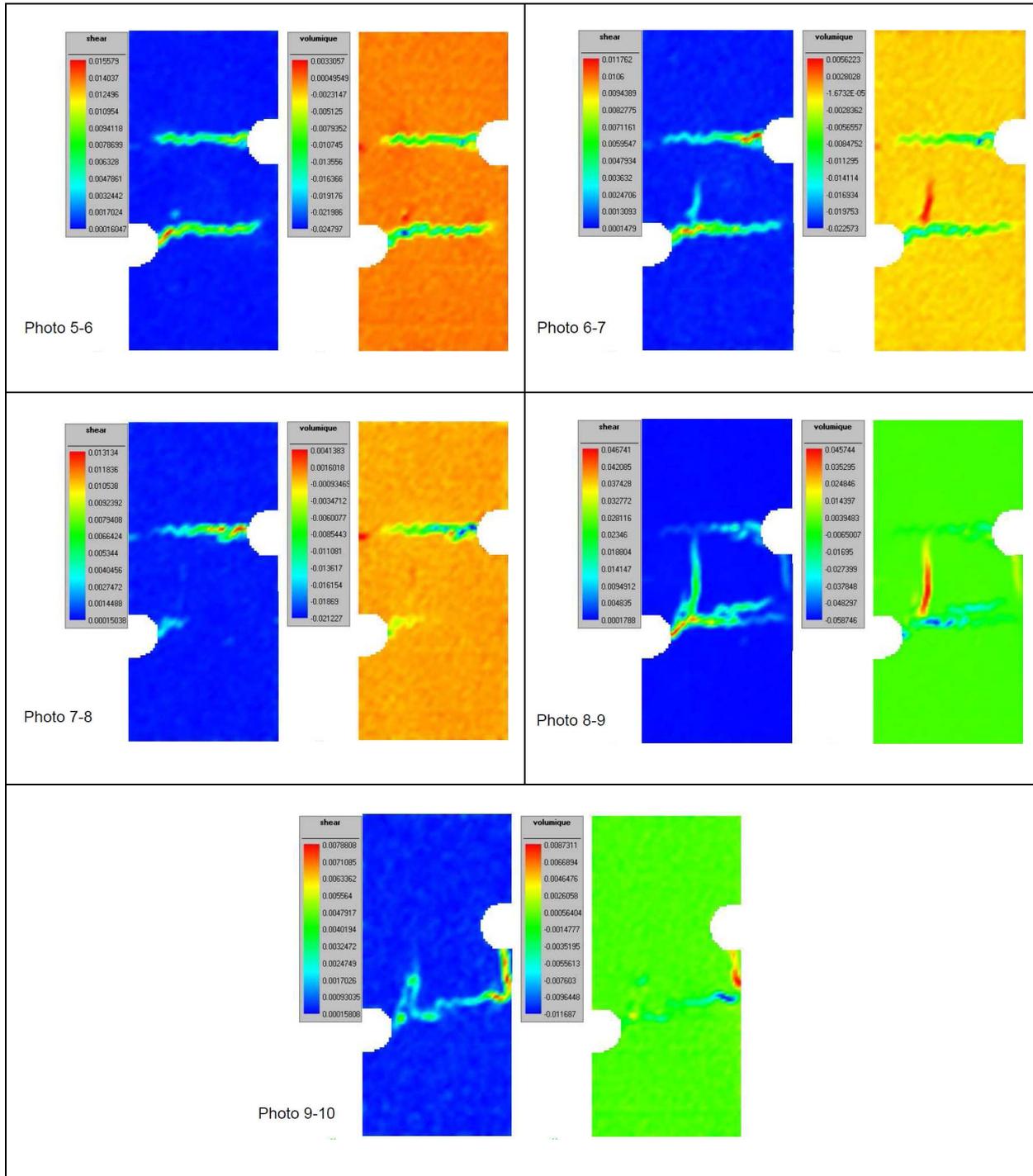


Figure A6.4. Essai Cpir-tm-45-01. Cartes de déformation de cisaillement maximum (à gauche) et de déformation volumique (à droite).

## A6.3. Essai Cpir-tm-45-02

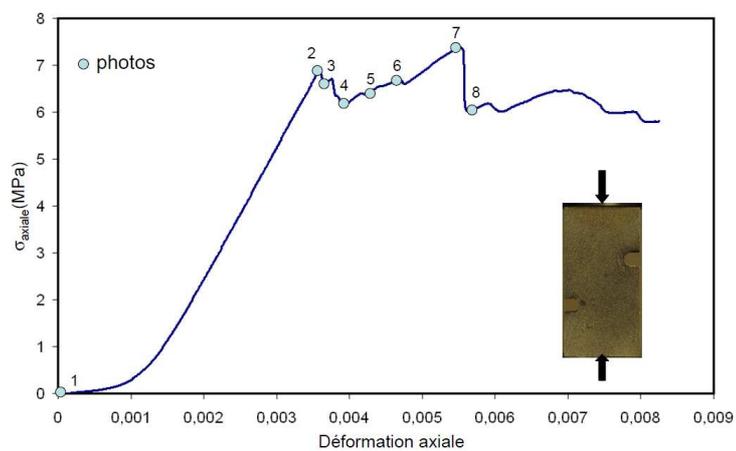
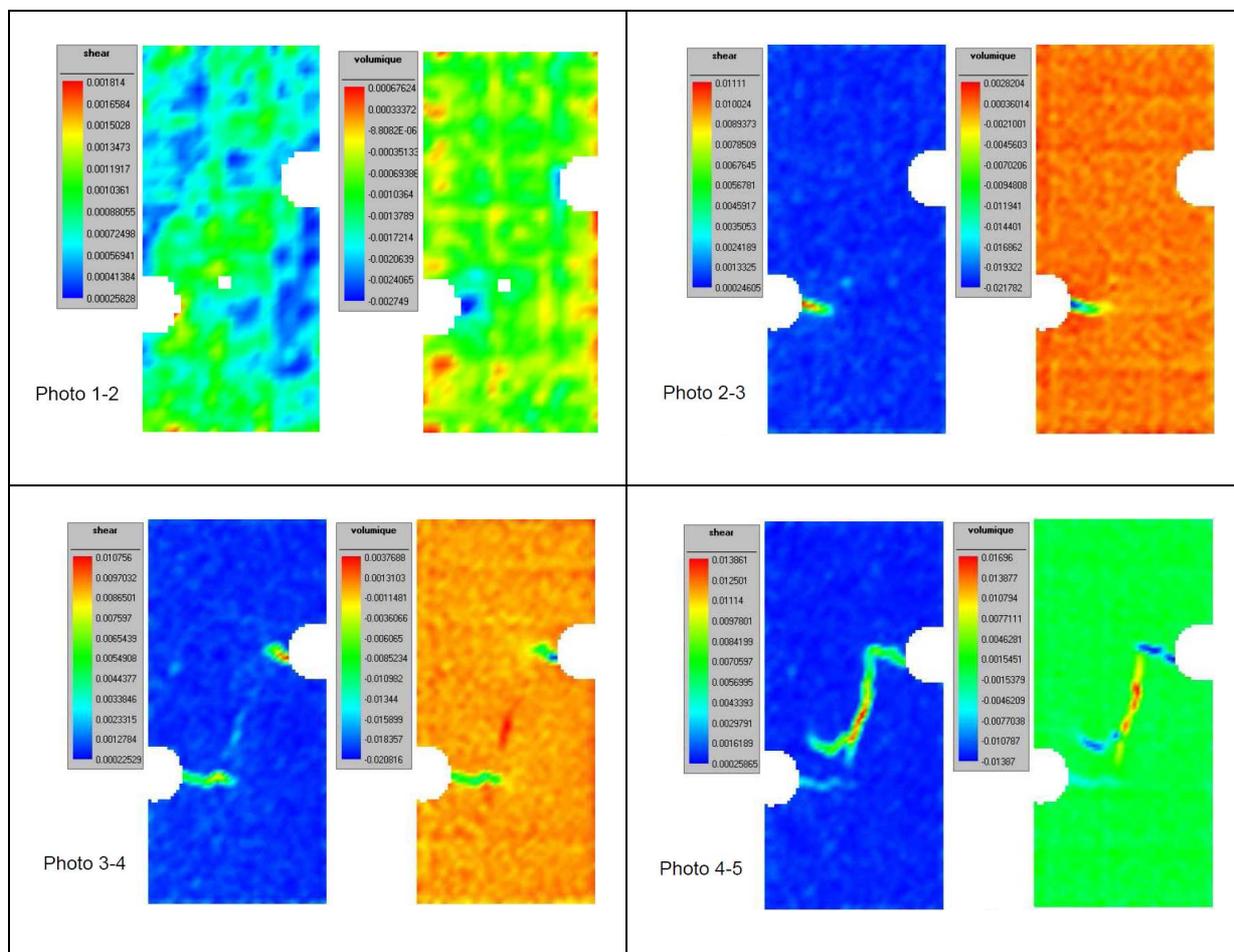


Figure A6.5. Essai Cpir-tm-45-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



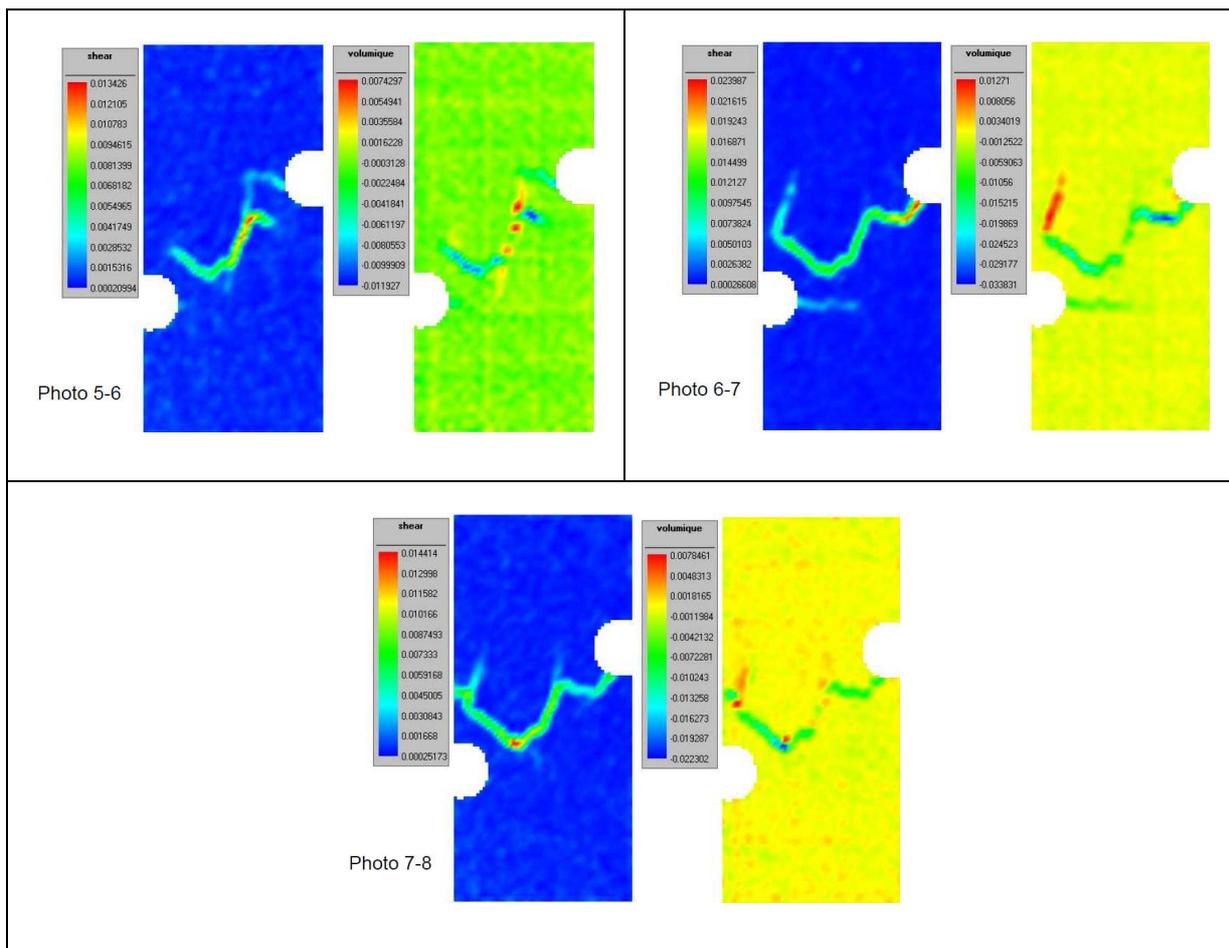


Figure A6.6. Essai Cpir-tm-45-02. Cartes de déformation de cisaillement maximum (à gauche) et de déformation volumique (à droite).

## A6.4. Essai Cpir-tm-55-01

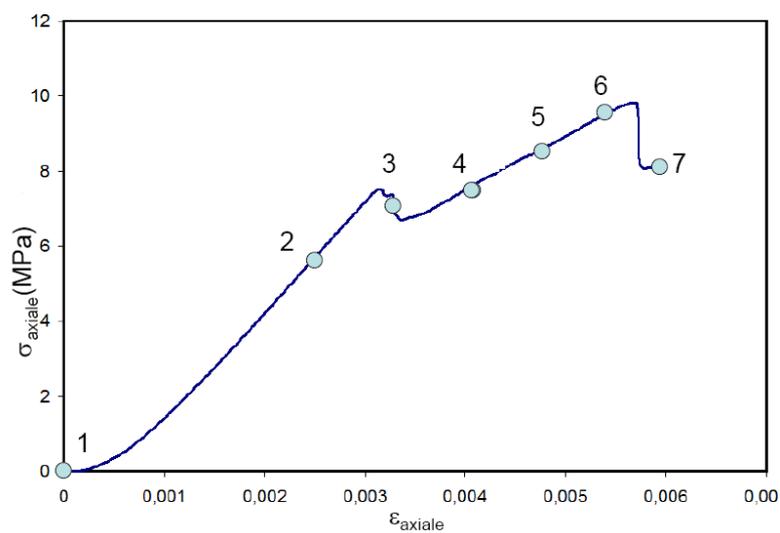
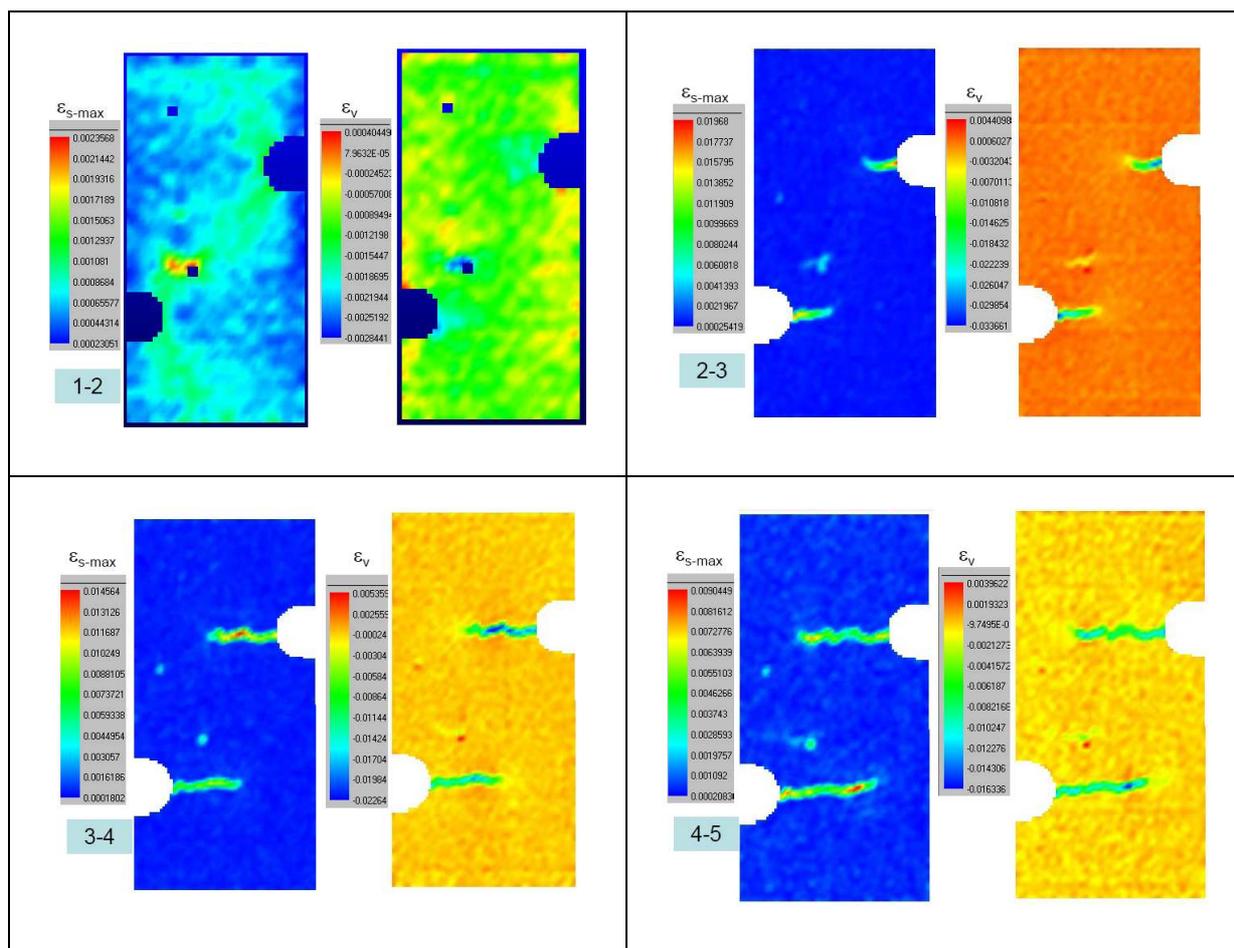


Figure A6.7. Essai Cpir-tm-55-01. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.



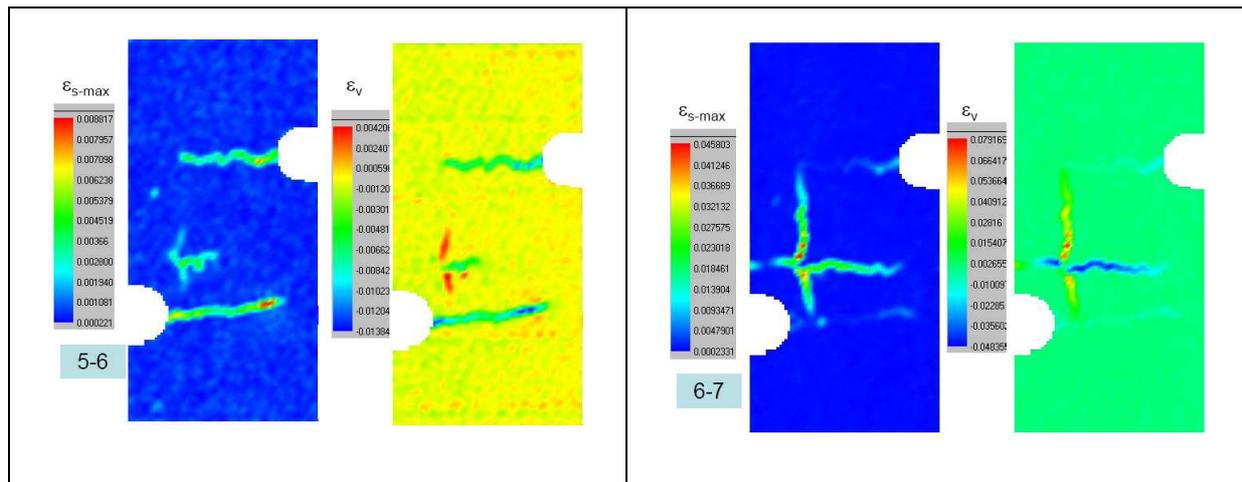


Figure A6.8. Essai Cpir-tm-55-01. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).

## A6.5. Essai Cpir-tm-55-02

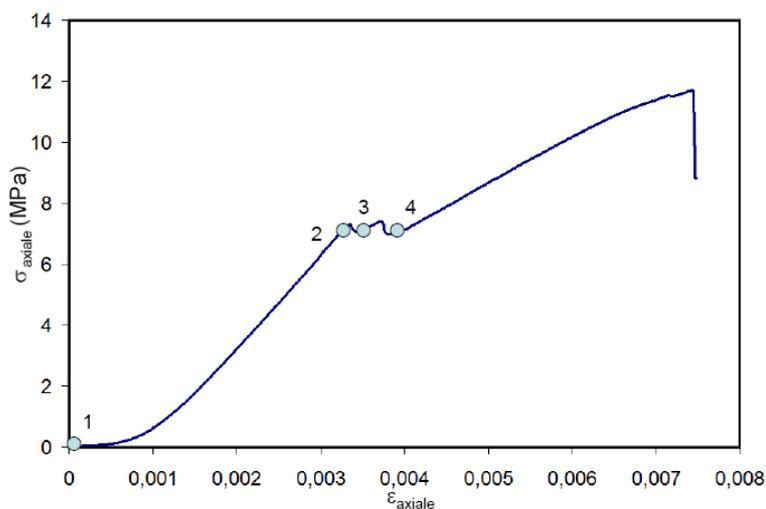


Figure A6.9. Essai Cpir-tm-55-02. Réponse contrainte-déformation avec indication des numéros des photos utilisées pour l'analyse DIC.

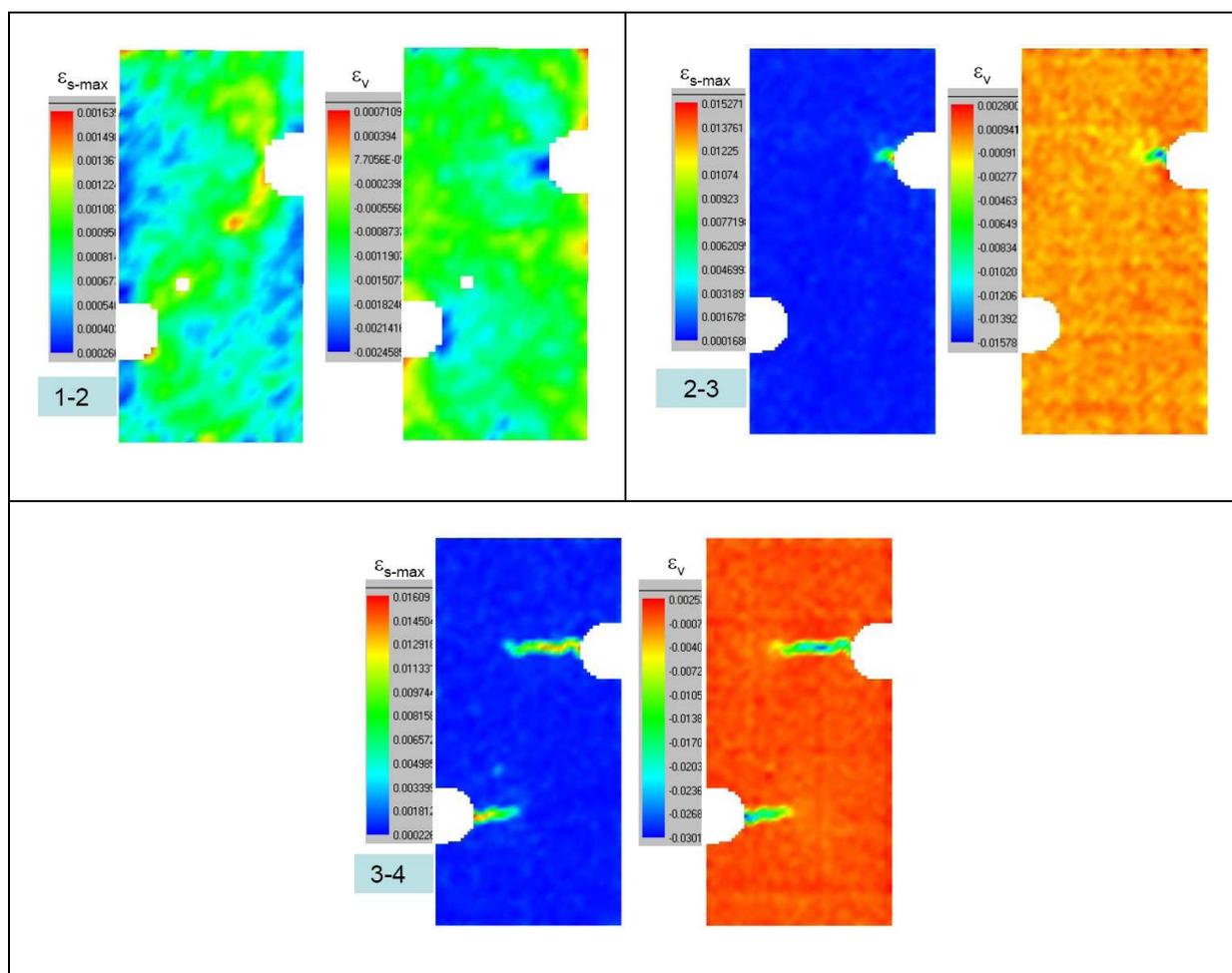


Figure A6.10 Essai Cpir-tm-55-02. Cartes de déformation de cisaillement maximum ( $\epsilon_{s-max}$ ) et de déformation volumique ( $\epsilon_v$ ).