

Apport des mesures de champs par corrélation d'images pour l'étude de la déformation de géomatériaux

JEREMIE DAUTRIAT^a, MICHEL BORNERT^b, ALEXANDRE DIMANOV^b, NICOLAS GLAND^a,
JEAN RAPHANEL^b

a. Institut Français du Pétrole, 92852 Reuil-Malmaison

b. Laboratoire de Mécanique des Solides, UMR 7649, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau

Résumé :

La technique de mesure de champs de déformation à partir de corrélation d'images a été appliquée à des échantillons de roches carbonatées poreuses, observés en microscopie optique et électronique à balayage au cours d'un chargement de compression uniaxial. Nous avons observé le développement de localisations à différentes échelles et identifié les mécanismes d'endommagement ou de compaction mis en jeu à l'échelle des hétérogénéités de la microstructure.

Abstract :

The technique of strain fields measurements from digital image correlation was applied to samples of porous carbonate rocks, that were observed by optical and scanning electron microscopy during uniaxial compression. We observed the development of localization at different scales and identified the mechanisms of damage and compaction operating at the scale of the microstructure heterogeneity.

Mots clefs : mesures de champs, corrélation d'images, géomatériaux poreux, endommagement

1.Introduction

La technique de mesure de champs mécaniques par corrélation d'images acquises lors de sollicitations permet de caractériser le comportement mécanique des matériaux fonctionnels hétérogènes. Nous l'avons appliquée sur des échantillons de carbonate d'Estailades sous compression uniaxiale. Ce carbonate est constitué à 99 % de calcite de taille de grains de 1 à 10 μm , qui forment deux types d'agrégats (d'environ 100 à 500 μm), les uns denses, les autres microporeux. La porosité est bimodale, avec une large mésoporosité (inter – agrégat) et une microporosité (intra – agrégat), qui présentent des seuils de pores de 10 μm et de 0.3 μm , respectivement. La porosité moyenne est d'environ 28 %, mais elle varie localement et d'un échantillon à un autre entre 24 et 31 % du fait de la distribution hétérogène des différents agrégats. D'après les mesures hydromécaniques et les observations post mortem, ces hétérogénéités de microstructure seraient impliquées dans les mécanismes d'endommagement, et influenceraient les perméabilités directionnelles et les compressibilités [1]. L'extensométrie de champs vise à mettre directement en évidence le rôle de ces hétérogénéités sur l'évolution du champ de déformation, et en particulier sur la localisation et les mécanismes d'endommagement. Cette technique n'a encore jamais été appliquée sur ce type de matériau, dont la déformation axiale globale avant rupture n'excède pas le demi pourcent. Un dispositif de caméras optiques permet de mesurer l'évolution du champ de déformation 2D aux échelles macro- et mésoscopique sur la surface d'échantillons cylindriques de 10 cm de hauteur et 5 cm de diamètre. Un dispositif expérimental in-situ permet le même type d'essais dans la chambre d'un microscope électronique à balayage (MEB).

2. Techniques expérimentales

2.1. Corrélation d'images numériques

L'extensiométrie par mesures de champs basée sur la corrélation d'images numériques (CID) est une technique de mesure optique, sans capteurs de déplacements, ni jauges de contact. Elle consiste à comparer les images acquises à l'état non déformé (de référence) et celles acquises à différentes étapes de déformation au cours d'une sollicitation. Plus précisément, on suit l'évolution spatiale d'un ensemble de points repérés sur l'image de référence, ce qui permet de mesurer le champ de déplacement, puis à déterminer le champ de déformation associé. A chaque point de repère i est associé un domaine de corrélation, D . Après déformation on identifie les domaines les plus semblables, homologues à ceux de l'image de référence, en minimisant une fonction de corrélation C (de valeur nulle pour la similitude parfaite). C s'exprime par :

$$C(\Phi_0) = 1 - \frac{\sum_{i \in D} (f(\underline{X}_i) - \bar{f}_D) \cdot (g(\underline{x}_i) - \bar{g}_D)}{\sqrt{\sum_{i \in D} (f(\underline{X}_i) - \bar{f}_D)^2} \sqrt{\sum_{i \in D} (g(\underline{x}_i) - \bar{g}_D)^2}}, \quad (1)$$

où \underline{X}_i et \underline{x}_i sont respectivement les coordonnées (en pixels) des points homologues dans l'image de référence et dans l'image déformée et qui sont associés par une transformation mécanique $\underline{\Phi}$, inconnue, dont $\underline{\Phi}_0$ est une approximation qui minimise C , $f(\underline{X})$ et $g(\underline{x})$ sont les niveaux de gris respectifs du point i de l'image de référence et de l'image déformée, associée par la transformation $\underline{\Phi}_0$, \bar{f}_D et \bar{g}_D sont respectivement les moyennes de niveaux de gris sur le domaine D et sur son domaine homologue transformé par $\underline{\Phi}_0$. La transformation est supposée être une translation couplée à une rotation et une déformation homogène, dont on considère le gradient égal au gradient macroscopique. La minimisation de C et une optimisation par interpolation bilinéaire des niveaux de gris sur chaque domaine de l'image déformée sont réalisées grâce au logiciel *CorrelManuV* (développé au LMS par M. Bornert) et permettent de déterminer les déplacements à une fraction de pixel près. Les coordonnées des centres des domaines homologues déterminent le champ de déplacement qui est utilisé pour calculer le champ de déformation. Celui-ci est obtenu en tout point de la grille, par la moyenne des gradients de transformation affectant un domaine délimité par les points voisins, obtenue par intégration sur le contour d'un domaine considéré. Pour le détail du calcul le lecteur pourra se référer à [2] et [3]. Cette technique ne permet la détermination du champ de déformation que dans le plan d'observation. La composante hors plan peut toutefois être évaluée en supposant une déformation axisymétrique et une déformation constante dans cette troisième direction. Le champ de déformation est alors représenté sous forme d'une carte de déformation qui est superposée à la microstructure. En chaque point de la grille de calcul, la composante de déformation étudiée est symbolisée par une croix dont la couleur est fonction de sa valeur au voisinage du point.

2.2. Essais avec suivi optique

Les essais de chargement sont réalisés sur une machine uniaxiale pilotée en déplacement grâce à un capteur LVDT. La charge est mesurée par un capteur de force placé sur le piston. Les essais, d'environ dix minutes, ont été réalisés à un taux de chargement de 1 $\mu\text{m/s}$, jusqu'à la rupture à ~ 15 MPa. On réalise jusqu'à 250 images à deux échelles d'observation, de part et d'autre d'un même échantillon de 10 cm de hauteur et de 5 cm de diamètre, sur lequel ont été usinés des méplats. Une caméra CCD Imperx (16 Mpixel) couvre l'intégralité de l'échantillon (échelle macro, taille de pixel env. 22 μm). Une caméra CCD Spot (4 Mpixel) couvre une zone de 7,5 mm de côté (échelle méso, taille de pixel $\sim 3,5$ μm). Un mouchetis de peinture à la bombe aérosol permet d'augmenter le contraste local et de mieux définir des points de repère. Les gouttelettes de peinture doivent être plus petites que la base de mesure. Ici, elles varient entre 10 et 100 μm et couvrent quelques pixels. L'axe des caméras est aligné perpendiculairement aux méplats avec soin. L'éclairage de l'échantillon doit fournir l'histogramme de niveaux de gris le plus large possible, mais sans saturations. La caméra Imperx comporte un éclairage direct par halogène annulaire. L'objectif de microscope de la caméra Spot comporte deux lampes latérales. Lors du chargement, les différents équipements du dispositif expérimental, ou la colonne de chargement, peuvent subir des déplacements parasites (translations

simples). Pour quantifier ces erreurs de mesure, on réalise avant chargement quelques images de l'échantillon après de légers déplacements des platines des caméras dans le plan d'observation et suivant sa normale. Dans les configurations adoptées pour l'acquisition des images (éclairage, mouchetis) et pour la corrélation (taille de domaine de 50pixels), les erreurs sur le calcul des champs de déplacement sont de l'ordre de 0,032% et de 0,04% pour la corrélation macro et méso respectivement.

2.3. Essais in-situ MEB

Le Microscope Electronique à Balayage (MEB) Quanta 600 est aménagé pour recevoir un banc d'essais en compression uniaxiale. Le pilotage du dispositif se fait en déplacement, avec un taux minimum de 1 $\mu\text{m/s}$. Le chargement est réalisé par paliers, car le temps d'acquisition des images est de plusieurs minutes. Seulement 5 images peuvent être réalisées par essai. Le contraste naturel entre les différents constituants du matériau est suffisant en imagerie par électrons secondaires. Contraste et brillance sont ajustés avant chaque acquisition afin que l'histogramme des niveaux de gris couvre la plage des 256 niveaux, sans saturations. La taille du faisceau et la vitesse de balayage (30 μs ou 15 μs , soit respectivement des temps d'acquisition de 7 et 3,5 mn) sont déterminées pour le meilleur compromis entre la qualité du rapport signal / bruit et les problèmes d'évacuation de charge. Les grandissements varient de x40 à x160. Pour un grandissement x40, l'image obtenue couvre environ le quart de l'échantillon, soit 3,7x3,4 mm^2 , la résolution est de ~ 910 nm/pixel. Cette échelle permet d'obtenir des informations sur des phénomènes locaux, mais représentatifs de l'ensemble de l'échantillon. Le grandissement x160 permet de descendre à une résolution de ~ 230 nm/pixel. Les échantillons sont découpés à la scie diamantée lente en forme parallélépipédique, d'une hauteur de 1 cm et de 0.5 cm de côté. Les faces de chargement sont rectifiées par polissage. La face d'observation est polie au papier SiC jusqu'au grade 4000. Les échantillons sont nettoyés au bain ultrasonique et séchés en étuve pendant 24 heures. La surface d'observation est métallisée à l'or. Comme pour les essais macroscopiques on réalise une série d'images à l'état initial, entre deux déplacements de la platine de quelques pixels. Indépendamment du grandissement, les paramètres de corrélation sont restés inchangés pour le traitement, soit une taille de domaine de 30pixels, et une base de mesure de la déformation locale de 60pixels. A grandissement 80, l'erreur sur la mesure des champs de déplacement est de l'ordre de 0,13%. Sensiblement plus importante que celle mesurée en optique, cette erreur est toutefois 3 à 5 fois moindre que celles mesurées lors de précédentes études [4]. Cette différence s'explique essentiellement par un meilleur pilotage du faisceau et une résolution plus importante offert par le MEB utilisé dans cette étude.

3. Résultats

3.1. Essais macroscopiques

La figure 1 montre la courbe de chargement typique, avec la déformation axiale globale mesurée par LVDT en fonction de la contrainte appliquée, mais on montre aussi les déformations axiales et radiales mesurées par CID. Les mesures réalisées aux échelles macro et méso sont cohérentes, mais les dernières sont plus bruitées. Les mesures macro sur le méplat seul ou sur un domaine plus large sont identiques car la profondeur de champ couvre l'essentiel de l'éprouvette. La mesure macro donne un module d'Young de 13,1 GPa et un coefficient de Poisson de l'ordre de 0,25. La mesure par LVDT donne un module d'Young de 5,9 GPa et une déformation axiale largement surestimée, qui prend en compte la mise en place et les déformations du dispositif de chargement. La figure 1 présente aussi des cartes de déformations macro à trois étapes de la sollicitation. Pendant la mise en place de l'échantillon, jusqu'à $e_{11} \sim 0,12$ % le champ de déformation est homogène. Une lentille de déformation se développe à $e_{11} \sim 0,2$ % (image B). Elle évolue et génère un gradient de déformation le long de l'échantillon (image C). Les déformations équivalentes locales dans la partie supérieure sont dix fois plus fortes que celles dans la partie inférieure. Au pic de contrainte, à l'initiation de la dilatance, apparaît une forte localisation (image D), qui préfigure l'emplacement de la fracturation macroscopique. La déformation axiale mesurée par CID dans une zone proche de la zone de propagation de la fracture macroscopique est trois fois supérieure à celle mesurée dans la partie basse de l'échantillon. L'observation de la microstructure indique la présence d'un amas d'agrégats denses dans la zone centrale de l'échantillon, alors que la partie inférieure de l'échantillon présente une distribution

plus homogène d'agrégats denses et microporeux. La Figure 2 montre la courbe de chargement et la surface considérée à l'échelle méso (2% de la surface globale). Plutôt qu'arbitraire, le positionnement de cette zone a été guidé par ses hétérogénéités. La partie basse et la partie supérieure de la zone présentent différentes concentrations d'agrégats denses. La partie centrale ne contient que des agrégats microporeux. La figure 2 présente aussi les cartes des déformations équivalentes mesurées à 4 étapes de la sollicitation. Comme observé macroscopiquement, le champ de déformation est homogène durant la phase élastique ($< 3MPa$). La zone d'étude n'enregistre pas de localisation, indépendamment des hétérogénéités de structure. Mais, à partir de $\sim 8MPa$ différents événements de localisation se mettent en place successivement. Ils correspondent à l'ouverture (microfissuration) de zones de faiblesse (entre des agrégats denses) orientées obliquement à la direction de chargement (B), puis à leur propagation à travers la zone d'agrégats microporeux (C), et leur intensification précèdent le pic de contrainte (D). Enfin, une forte relaxation macroscopique est associée à la coalescence des microfissures (E).

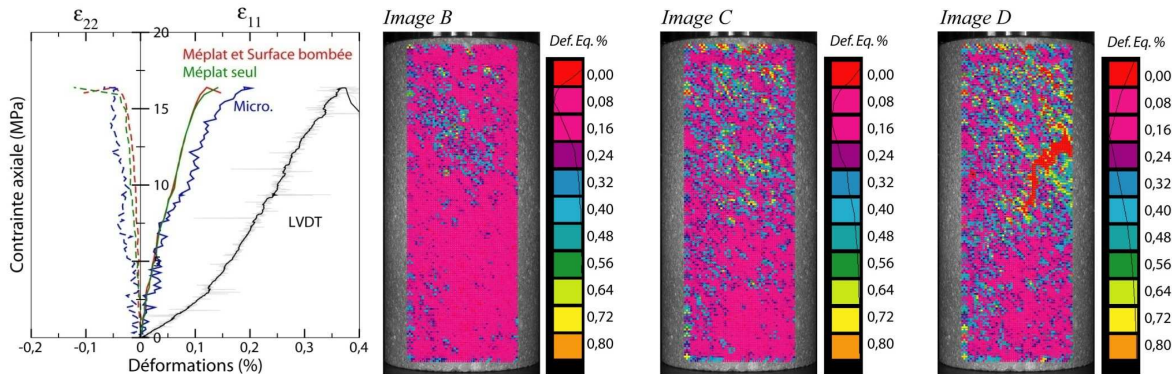


Figure 1. La courbe de chargement montre les déformations axiales ϵ_{11} et transverses ϵ_{22} mesurées par CID aux échelles méso (en bleu) et macro (en vert et rouge) et la déformation axiale mesurée par LVDT (courbe noire) en fonction de la contrainte axiale appliquée. Cartes de déformations équivalentes superposées à l'image de référence pour 3 instants B, C et D correspondant respectivement à $\epsilon_{11(LVDT)} \sim 0,2, 0,29$ et $0,37$ %. La base de mesure est de 130 pixels. La localisation sur l'image D préfigure la fracture macroscopique.

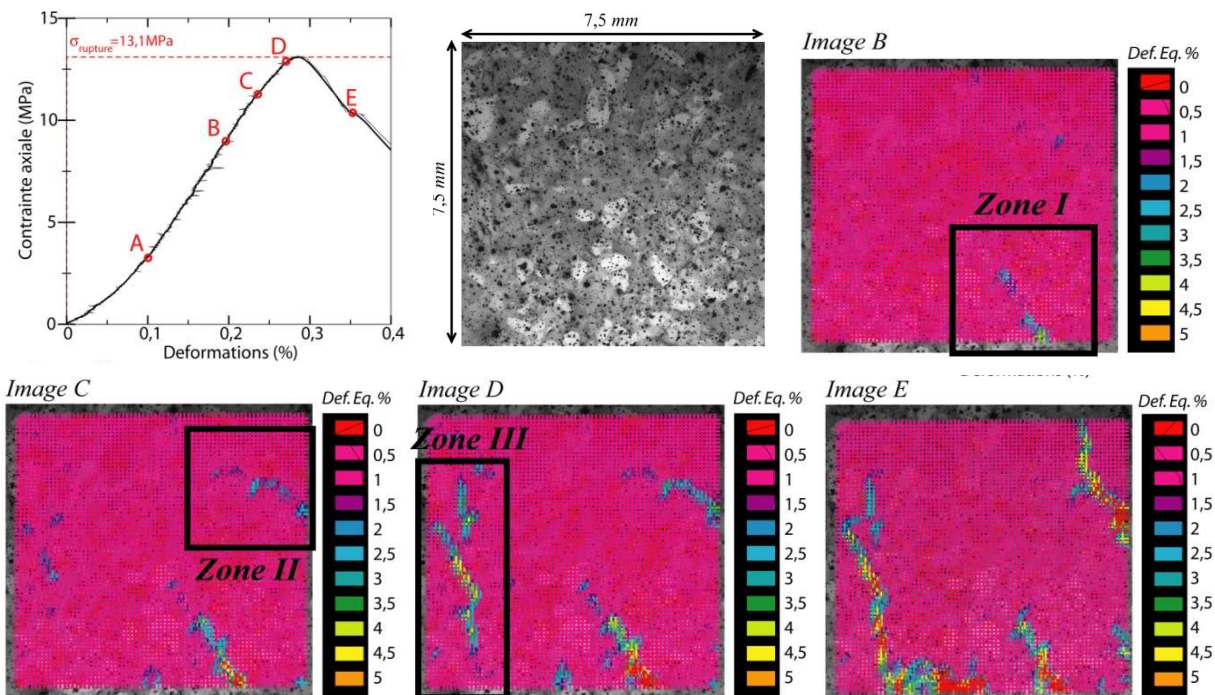
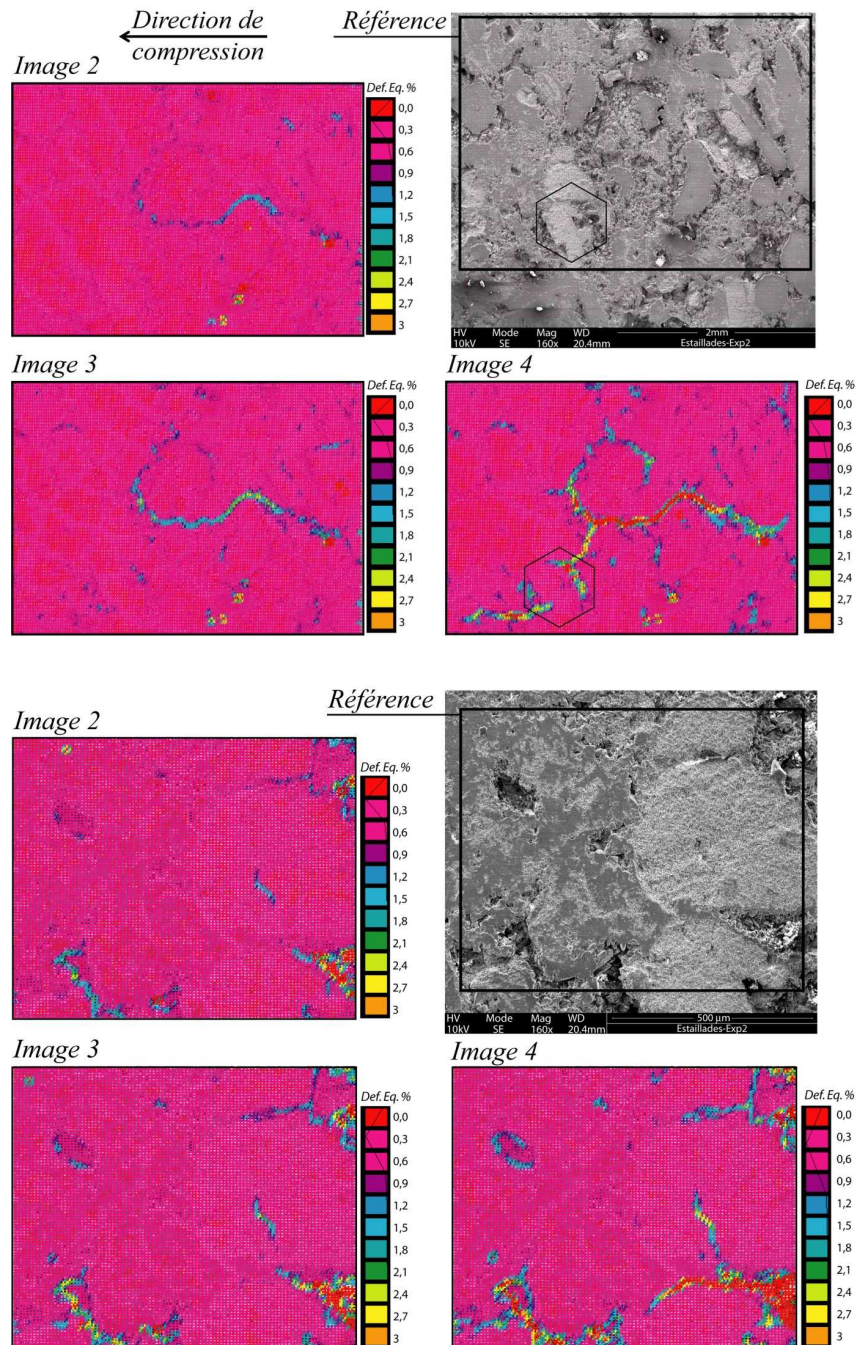


Fig. 2. Courbe de chargement, image de référence (avec mouchetis) et cartes des déformations équivalentes à quatre instants repérés sur la courbe. Base de mesure 36 pixels.



Figures 3 et 4. Cartes des déformations équivalentes mesurées à partir d'images MEB acquises à trois étapes de la sollicitation. La base de mesure est de 60 pixels. L'axe de compression est horizontal.

3.2. Essais in situ MEB

L'objectif de l'approche micro est de rendre compte des mécanismes locaux mis en jeu à l'échelle de la microstructure, et qui peuvent avoir un impact sur les déformations à plus grande échelle. La zone d'étude de $3 \times 2 \text{ mm}^2$ reste comparable à celle étudiée en microscopie optique à l'échelle méso, mais la résolution d'image beaucoup plus fine permet d'observer en détail les différents agrégats. La figure 3 présente les cartographies de déformations équivalentes calculées sur une série d'images acquises au cours de trois paliers consécutifs de chargement. Les cartographies mettent clairement en évidence l'évolution progressive d'une localisation de la déformation qui apparaît dès le début du chargement. Cette localisation apparaît aux interfaces d'agrégats denses (gris foncé), qui sont des zones de forte porosité. La localisation s'exprime essentiellement par l'ouverture d'une microfissure (au centre de l'image), dont la propagation sinueuse est

conditionnée par la géométrie des agrégats. Quelques localisations de moindre amplitude apparaissent aux interfaces des agrégats qui constituent un amas plus dense sur la partie gauche de l'image. En revanche, aucun évènement de localisation n'est visible au sein des quelques agrégats microporeux (gris clair). La propagation de la microfissure n'est pas instantanée, mais se fait graduellement en suivant les zones de plus faible résistance. On observe également un mouvement local plus important dans la zone la plus tortueuse de la fissure. Le dernier palier de chargement fait l'objet d'une relaxation de contrainte plus importante que les paliers précédents. Comme le montre l'image 4, cette relaxation est liée à une ouverture importante de la zone centrale. Les déformations locales sont supérieures à 10%, soit un déplacement relatif des lèvres de la fissure d'environ 6 pixels, et sont à l'origine d'une ramification de la fissure principale. Il faut noter, que cette ramification ne se propage pas au sein de l'agrégat microporeux qu'elle rencontre (zone marquée par un hexagone sur l'image de référence), bien qu'une nouvelle fissure s'ouvre en aval de celui-ci. La structure microporeuse et généralement homogène de ces agrégats leur permet probablement d'accommoder la déformation de façon diffuse. Aussi, leur présence concourt à maintenir l'intégrité du matériau. Cependant, s'ils présentent des inhomogénéités, ils sont aussi capables de localisation. C'est ce qui est montré sur la Figure 4, à l'échelle de quelques agrégats. La zone considérée, d'une surface inférieure à 1mm^2 , est constituée d'agrégats microporeux sur la droite et d'agrégats plus denses (dont les contours sont mal définis) sur la gauche. Cependant, si les agrégats microporeux présentent des inhomogénéités pré existantes, ils sont aussi capables de localisation. C'est ce qui est montré sur la Figure 4, à l'échelle de quelques agrégats. La zone considérée, d'une surface inférieure à 1mm^2 , est constituée d'agrégats microporeux sur la droite et d'agrégats plus denses (dont les contours sont mal définis) sur la gauche. La plus forte localisation (par fissuration) est observée dans les zones les plus poreuses, aux interfaces entre les différents types d'agrégats, mais une localisation compactante apparaît aussi au sein de l'agrégat microporeux le plus gros, qui présente une zone centrale de plus forte porosité. Ces structures poreuses locales qui préexistent au sein des agrégats microporeux ne sont pas rares, mais leur fermeture n'apparaît que si elles sont orientées perpendiculairement à la direction de chargement.

4. Conclusions

Nous avons appliqué la technique de corrélation d'images 2D aux carbonates, ce qui n'avait encore jamais été réalisé. En raison des très faibles déformations à la rupture, il était essentiel de quantifier rigoureusement les erreurs liées à la méthode de calcul des champs de déplacement. Cette étude a comporté une importante phase d'optimisation de la qualité des images, notamment par l'amélioration du contraste local et par le choix des paramètres de corrélation (taille de grille, taille des domaines de corrélation...), afin d'obtenir un compromis satisfaisant entre précision sur la mesure du champs de déplacement et précision sur la localisation. La complémentarité des différentes échelles d'observation a permis de mettre en évidence les différents modes de déformations et la chronologie de leur mise en place lors du chargement. Aux deux échelles d'observation, les traitements d'images, acquises au cours du chargement sur les échantillons macroscopiques de carbonate, sont cohérents et permettent de rendre compte correctement des taux de déformation globale. Ils permettent également de caractériser l'impact des hétérogénéités mésoscopiques sur une localisation précoce de la déformation, mais également d'observer de façon précoce la mise en place d'un important réseau de microfissure. De plus, cette technique montre que les mesures de jauges conventionnelles ne sont pas suffisamment précises. A l'échelle du MEB, la mesure de champs révèle des micromécanismes de déformation non visibles par une observation directe des images. Elle confirme une accommodation diffuse de la déformation dans les agrégats microporeux et l'ouverture de microfissures aux interfaces et dans les zones poreuses.

References

- [1] Dautriat J., Comportement hydromécanique de roches réservoirs sous contraintes, Thèse X, 2009.
- [2] Bornert M., Morphologie microstructurale et comportement mécanique, Thèse X, 1996.
- [3] Doumalain P., Microextensométrie par corrélation d'images, Thèse X, 2000.
- [4] Racine A., Influence de l'orientation des hydrures sur les modes de déformation, d'endommagement et de rupture du Zircaloy-4 hydruré. Thèse X, 2005.