

UNE ADAPTATION DU TRAITEMENT D'IMAGES NUMÉRIQUES DE LAMES MINCES À L'ANALYSE DE LA STRUCTURE D'UN GRÈS À DIVERS STADES DE LA COMPRESSION

JEAN-FRANÇOIS GAMOND

LGIT, Observatoire de Grenoble, BP 53, 38041 Grenoble cedex,
France, e-mail: gamond@obs.ujf-grenoble.fr

MARIUSZ MŁYNARCZUK, BOGUSŁAW OBARA

Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences,
ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków, Pologne.

Résumé: On étudie sur des carottes de grès déformés expérimentalement la nucléation, la localisation et la maturation de zones de failles et de fractures. L'évolution du matériau est suivie par traitement d'images de lames minces. Les contours de grains, souvent mal définis dans notre matériau d'expérience, conduisent à mettre au point un algorithme de traitement spécifique. Celui-ci permet en définitive de quantifier dans chaque lame mince les changements de taille de grains, de facteur de forme et d'orientation préférentielle liés à la localisation progressive de la bande de cisaillement.

Abstract: Experimentally deformed sandstone specimens are used to study the onset, localization and mature stages of faults and fractures. These rupture mechanisms are studied through image processing of thin sections. Poorly defined grain boundaries, often observed in our sandstones, necessitate to create a specific processing algorithm. It allows us to quantify the changes of the grain size on each thin section, aspect ratio and preferred orientation generated by the progressive localization of the shear band.

1. INTRODUCTION

Les modes de déformation localisés qui donnent naissance à des failles et des fractures dans les roches intéressent les sismologues, les géologues pétroliers, les mineurs et les hydrogéologues qui cherchent à connaître l'évolution de la structure et des propriétés mécaniques dans les zones de failles. Pour analyser à toutes les échelles les mécanismes progressifs de nucléation, d'évolution et de maturation qui ont pour résultat une faille ou une fracture, nous utilisons une approche expérimentale.

Cette approche consiste à créer par compression triaxiale sur des éprouvettes de grès (de Tumlin, Pologne) des surfaces de rupture par cisaillement et d'en observer les microstructures. Pour une pression de confinement donnée, chacune des éprouvettes d'une série est déformée jusqu'à une valeur du raccourcissement axial plus grande que la précédente. Après l'essai, chaque éprouvette est consolidée par injection d'une résine colorée puis coupée pour réaliser des lames minces parallèles à la génératrice du

cylindre. Une image numérique de chaque lame est réalisée sous microscope optique. L'étude de ces images aux divers stades du raccourcissement axial permettra de décrire les mécanismes microscopiques engendrés par la localisation de la zone de rupture depuis l'état non déformé. Ils ont pour résultat la fragmentation de certains grains, donc la modification de leur taille et de leur forme. Ainsi un grain arrondi fragmenté par plusieurs cracks produit plusieurs petits grains de forme allongée. Cette procédure d'étude engendre donc un grand nombre d'images et pour les analyser nous avons besoin d'un outil de traitement le plus automatique possible pour quantifier plusieurs paramètres: taille et forme des grains et des pores et leurs modifications; longueur, orientation, géométrie des microfissures; répartition spatiale et temporelle des modifications.

2. ETAT DE L'ART

Déterminer les paramètres géométriques des roches exige des mesures stéréologiques lourdes. Le travail présenté ici est l'application d'une analyse d'image automatique et de procédures de morphologie mathématique pour déterminer comment une zone de cisaillement modifie la structure d'une roche.

L'analyse d'image implique plusieurs étapes: 1) acquisition de l'image; 2) traitement de l'image; 3) reconnaissance de formes; 4) mesures sur les images. Ce travail traite principalement de l'étape-clé de l'analyse d'image, c'est-à-dire du traitement qui transforme des images en couleurs ou en niveaux de gris en une ou plusieurs images binaires où tous les objets importants sont correctement identifiés. Cette procédure est appelée *segmentation de l'image* (SERRA [8]). Lorsque l'on obtient une image correctement segmentée, les mesures des paramètres géométriques des objets analysés ne présentent pas de difficultés majeures.

Les outils d'analyse d'image disponibles dans les années 80 (Quantimet, Pericolor) sont maintenant remplacés par des logiciels spécialisés plus évolués contenant nombre d'opérations prédéfinies d'analyse d'image. Les travaux présentés ici ont été effectués au moyen du logiciel Aphelion. Le principe du logiciel d'analyse d'image est que l'utilisateur formule des algorithmes mettant en œuvre une série de transformations qui appliquées à l'image d'entrée produit une image résultante où tous les objets recherchés sont bien cartographiés. En général un algorithme donné ne permet la mesure automatique que d'un type d'élément structural.

Les techniques d'analyse d'image deviennent de plus en plus populaires dans l'analyse pétrographique. Dans l'analyse des grès la plupart des chercheurs se cantonne à la mesure de la porosité, car cet élément est d'une grande importance pour les pétrographes (CEREPI et al. [3]). Une analyse complète de la structure des grès est plus rarement effectuée (CARO, Di GIULIO [2], SERRA et MŁYNARCZUK [9], MŁYNARCZUK [5]). Certains auteurs utilisent l'analyse d'image pour décrire la géométrie des zones de cisaillement. Par exemple la mesure de la porosité des zones de cisaillement des grès de Fontainebleau est l'objet du travail de SULEM et

OUFFROUKH [10]. BIED et al. [1] travaillent sur des images MEB et mesurent la distribution des tailles de grains d'une zone de cisaillement dans un grès. Des techniques d'analyse d'image basiques ont été utilisées par RAWLING et GOODWIN [7] pour la mesure des orientations préférentielles de forme de grains d'une zone de cisaillement dans des sédiments peu lithifiés du Bassin d'Albuquerque, USA. Dans un article de HEILBRONNER et KEULEN [4] les techniques d'analyse d'image sont appliquées à la description quantitative de granites déformés et OBARA [6] présente une détection automatique des fractures dans des dolomites et des granites.

3. PROBLÈMES SPÉCIFIQUES AU GRÈS DE TUMLIN

Le grès de Tumlin (Pologne) sélectionné pour les expériences est un grès à grain moyen, principalement constitué de quartz et de particules d'argile. Le quartz constitue 75–85% du volume et se présente sous deux formes: des grains arrondis isométriques et des zones très irrégulières de ciment siliceux. Les grains isométriques, d'origine détritique, de 40 à 1200 μm , représentent 80% du matériel siliceux. Les contacts entre grains sont souvent grossièrement planaires, l'enfouissement ayant mis en œuvre des processus de dissolution–cristallisation. Néanmoins, des contacts ponctuels sont préservés reflétant l'arrangement initial des grains. Le ciment siliceux (15–20% du quartz total) remplit des espaces entre des grains qui n'ont pas de contacts. Il se révèle donc d'origine diagénétique précoce, avant la compaction mécanique. Les observations au MEB montrent que les particules d'argile (10% du volume total) sont des plaquettes d'illite néoformées, de 5 à 20 μm , qui forment une pellicule autour des grains de quartz et remplissent souvent partiellement les pores. Les pores visibles en lame mince constituent 6 à 10% du volume. La pellicule d'illite permet dans la plupart des cas de très bien délimiter le contour du grain (figure 1) mais dans certains cas elle est très peu visible et se réduit à un fantôme. Il était donc

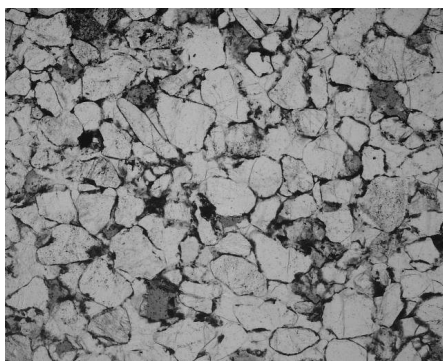


Fig. 1. Image initiale du grès de Tumlin (100 \times , lumière naturelle)

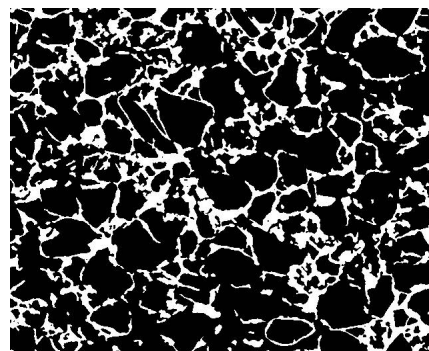


Fig. 2. Résultat de la segmentation des particules d'argile

nécessaire de mettre au point une méthode de traitement d'image spéciale capable de détecter le plus possible de ces grains aux contours mal définis.



Fig. 3. Résultat de la segmentation des pores

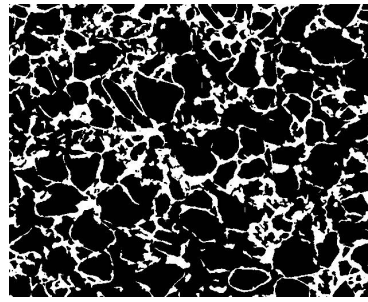


Fig. 4. Somme des argiles, pores, cracks et limites de grains détectés par l'algorithme à la première étape

4. ACQUISITION DES IMAGES

Le but de l'analyse d'image est de déterminer (de segmenter) les grains, les pores et les enrobages d'argile sur les lames minces de grès. La figure 1 présente l'image typique du matériau. Les images sont prises sous microscope en lumière naturelle avec un grossissement de 100. La résolution de l'image est de 1280×1024 pixels. La surface couverte par l'image est de $2205 \times 1765 \mu\text{m}$. Les images sont prises de telle façon qu'elles peuvent être assemblées en une bande traversant entièrement la lame et contenant la zone de cisaillement (voir figure 7a).

5. SEGMENTATION DES PARTICULES D'ARGILE

Pour distinguer les particules d'argile sur l'image, les images de départ sont filtrées par un filtre moyen de 5×5 . Puis le résultat est transféré dans l'espace colorimétrique YIQ . Sur la composante Y on réalise une opération de Black Top-Hat suivie par une procédure de seuillage et un petit filtrage au moyen d'une ouverture par reconstruction. La figure 2 présente le résultat final de cet algorithme.

6. SEGMENTATION DES PORES

L'algorithme de segmentation des pores est semblable à celui présenté ci-dessus. La seule différence est que le seuillage est réalisé sur la composante I de l'espace YIQ et n'est pas précédé par une opération de Top-Hat. Le résultat final de la détection des pores est présenté sur la figure 3.

7. DÉTECTION DES GRAINS DE QUARTZ

Dans la première étape de la détection des grains on ajoute les résultats de la détection des argiles et des pores. L'image résultante constitue la première approche de la détection des grains. Afin d'obtenir davantage d'information sur les limites de grains (spécialement les plus petits et les plus fins) on pratique un algorithme de détection d'objets linéaires sur la composante *Y* du système colorimétrique YIQ. Il en résulte une amélioration de l'information sur les limites de grains – voir figure 4.

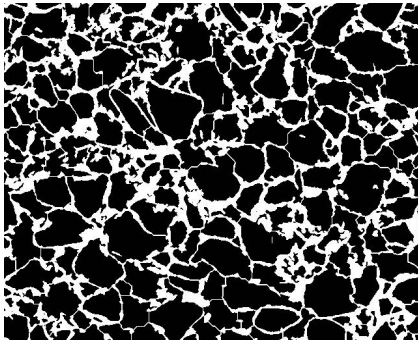


Fig. 5. Détection automatique des grains

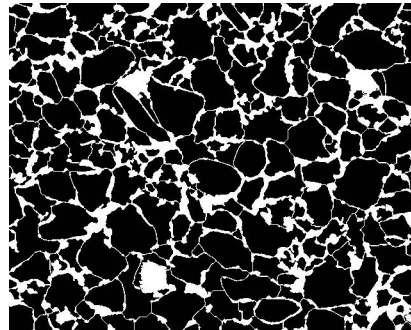


Fig. 6. Segmentation des grains: résultat final

Mais sur cette image les contours de grains ne sont parfois que partiellement détectés et pas entièrement fermés. Pour corriger cela on utilise un algorithme de watershed. La figure 5 montre le résultat de la détection automatique des grains. Cependant, le résultat obtenu n'est pas encore parfait parce que certaines limites de grains enrobés d'un très mince film d'argile, sont peu visibles voire presque invisibles. Seule l'expérience du minéralogiste lui permet de les détecter. C'est pourquoi l'image de la figure 5 requiert quelques corrections manuelles qui consistent à ajouter les limites non détectées et à enlever celles qui n'existent pas. La figure 6 présente le résultat de la correction manuelle et du dernier filtrage.

8. ANALYSE DE LA BANDE D'IMAGES CONTIGUËS

Pour analyser les changements de la structure de la roche en fonction de la distance par rapport à la zone de cisaillement, on assemble une série de 5 images contiguës et on obtient la bande d'image représentée sur la figure 7a. On joint également, selon le même schéma, les images résultant de l'algorithme décrit. Pour ne pas biaiser les mesures, on a enlevé des fichiers analysés les objets coupés par le bord des photos. Les objets identifiés pris en compte pour les mesures sont représentés sur la figure 7b.

Pour décrire la géométrie des grains, 3 paramètres ont été pris en compte:

- *Surface moyenne des grains*.
- *Rapport de Feret minimum sur maximum*. Les diamètres minimal et maximal de Feret peuvent être définis comme les côtés du plus petit rectangle possible pouvant contenir l'objet analysé.
- *Rapport d'aspect logarithmique*. Il est défini comme $\log_{10}((Y_{\max} - Y_{\min})/(X_{\max} - X_{\min}))$. C'est un symétrique de la mesure du rapport d'aspect.

De façon à présenter l'évolution des paramètres, l'image de la figure 7b a été divisée en 30 zones d'une largeur de 190 μm . On calcule la valeur moyenne des paramètres dans chaque zone. On convient qu'un grain appartient à la zone analysée si son centre de gravité se trouve dans cette zone. Dans la bande d'image il y a une zone de cisaillement importante à environ 3515 μm , une plus petite à 2375 μm et une petite zone de microfractures à environ 1050 μm .

Le paramètre de *taille moyenne* (figure 7c) montre que dans les zones de cisaillement les grains sont plus petits qu'ailleurs. Ceci est dû à la fracturation des grains dans ces zones. Le rapport min/max de Ferret (figure 7d) rend compte du fait que ces grains fracturés sont allongés (au contraire les grains arrondis ont un rapport proche de 1.0) et que la zone où ils sont les plus nombreux est à la distance de 3515 μm . La figure 7e montre que ces grains allongés sont orientés verticalement (valeurs positives du paramètre). Des grains de même orientation révèlent la deuxième zone de cisaillement (2375 μm) alors que d'autres grains sont légèrement allongés dans la direction horizontale (valeurs négatives du paramètre).

9. CONCLUSIONS

Pour une roche polyminérale dont les grains ont des contours mal définis, la mise au point d'un traitement d'images spécifique sur des images numériques de lames minces permet d'obtenir, moyennant une intervention limitée de l'opérateur, une bonne *segmentation* des composants. Il devient alors possible de quantifier dans chaque lame mince les paramètres de changements de taille de grains, de facteur de forme et d'orientation préférentielle dont l'évolution spatiale et temporelle permettront de décrire les mécanismes intimes de la rupture depuis le stade de la déformation diffuse jusqu'à la localisation de la bande de cisaillement.

RÉFÉRENCES

- [1] BIED A.E., SULEM J., MARTINEAU F., *Microstructure of shear zones in Fontainebleau sandstone*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39, 917–932.
- [2] CARO F., Di GIULIO A., *Reliability of textural analysis of ancient plasters and mortars through automated image analysis*, Materials Characterization, 2004, 53, 243–257.

- [3] CEREPİ A., DURAND C., BROSE E., *Pore microgeometry analysis in low-resistivity sandstone reservoirs*, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002, 35, 205–232.
- [4] HEILBRONNER R., KEULEN N., *Grain size and grain shape analysis of fault rocks*, Tectonophysics, 2006, 427, 199–216.
- [5] MLYNARCZUK M., *Description of sandstones structures by automated image analysis procedures*, Proc. 9th European Congress on Stereology and Image Analysis, Zakopane, 2005, 100–109.
- [6] OBARA B., *Identification of transcrystalline microcracks observed in microscope images of a dolomite structure using image analysis methods based on linear structuring element processing*, Computers & Geosciences, 2007, 33, 151–158.
- [7] RAWLING G.C., GOODWIN L.B., *Structural record of the mechanical evolution of mixed zones in faulted poorly lithified sediments, Rio Grande rift, New Mexico, USA*, Journal of Structural Geology, 2006, 28, 1623–1639.
- [8] SERRA J., *Image Analysis and Mathematical Morphology*, London, 1981, Academic Press.
- [9] SERRA J., MLYNARCZUK M., *Morphological Merging of Multidimensional Data*, Proceedings of STERMA Conference, Kraków, 2000.
- [10] SULEM J., OUFFROUKH H., *Shear banding in drained and undrained triaxial tests on a saturated sandstone: Porosity and permeability evolution*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43, 292–310.