



**HAL**  
open science

# Caractérisation par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale

Stephen Hedan, Philippe Cosenza, Valéry Valle, Justo Cabrera

## ► To cite this version:

Stephen Hedan, Philippe Cosenza, Valéry Valle, Justo Cabrera. Caractérisation par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422458

**HAL Id: hal-03422458**

**<https://hal.science/hal-03422458>**

Submitted on 9 Nov 2021

**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.

# Caractérisation par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale

S. HEDAN<sup>a</sup>, P. COSENZA<sup>a</sup>, V. VALLE<sup>b</sup>, J. CABRERA<sup>c</sup>

a. Laboratoire HydrASA, CNRS UMR 6269, ENSIP, 1 Rue Marcel Doré, 86022 Poitiers Cedex

b. Institut Pprime, CNRS UPR3346, 2 Bd Marie et Pierre CURIE, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex

c. DEI-SARG Department, Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, Fontenay-aux-Roses

## Résumé :

Le comportement hygro-mécanique de l'argilite de Tournemire est étudié en mesurant la cinétique de déformation au cours d'un processus de dessiccation. La méthode optique non invasive appelée « Corrélation d'Images Numérique » (CIN) permet de mesurer facilement les champs de déformations au cours de la transformation physique. Les carottes d'argilite de Tournemire sont soumises à une désaturation forcée par chauffage pour cinq paliers de températures : 40°C; 80°C, 105°C, 150°C et 200°C. Les champs de déformations ont montré que les mécanismes de déformations observés sont principalement contrôlés par les hétérogénéités de la roche (présence de concentrations de déformations). Les microfissures induites par dessiccation sont parallèles au litage et localisées à l'interface entre des grains non argileux (ici concrétions calcaires) et la matrice argileuse. Après 5 heures de chauffage, les résultats montrent une fermeture de ces microfissures associée avec une diminution des concentrations de déformations.

## Abstract :

The hygro-mechanical behaviour of Tournemire argillite was studied by measuring the deformation induced by a desiccation process. The used non-invasive method called "Digital Image Correlation" (DIC) enables easily the measurements of strain fields during a physical transformation. A set of samples taken from the Tournemire site was submitted to a desaturation process in an oven at five temperatures: 40°C; 80°C, 105°C, 150°C and 200°C. Strain results have shown that the observed deformation mechanisms are mainly controlled by the rock heterogeneities (inducing strain localizations). The microcracks induced by desiccation were parallel to the bedding planes and located at the interface between non-clayey grains/heterogeneities (here calcite nodules) and the clay matrix. After few hours of heating, a closure of these microcracks associated with a decrease of strain localizations was observed.

**Mots clefs :** Corrélation d'Images Numériques, Argilite, Dessiccation, Champs de déformations

## 1 Introduction

Le milieu argileux est actuellement considéré comme la barrière géologique pour le stockage profond de déchets radioactifs à cause de ses caractéristiques de faible perméabilité et de rétention de radioéléments. Parmi les questions cruciales liées à l'évaluation à long terme du stockage des déchets radioactifs, l'étude de la zone appelée 'Excavation Damage Zone' (EDZ) est d'une importance particulière. Après excavation, la création et l'extension de la zone perturbée sont contrôlées par de nombreux paramètres : le champ de contrainte initial, les propriétés des matériaux (par exemple, l'anisotropie des matériaux), l'existence de zones de fractures naturelles ou des hétérogénéités locales de la masse rocheuse, la géométrie de la galerie et l'état hydrique existant dans la galerie [1].

En examinant ce dernier, les fractures associées au processus de désaturation du milieu argileux ont été observées sur les fronts et les parois des galeries de la plate-forme expérimentale de Tournemire. Ce processus de fracturation hydrique a été montré *in situ* par la présence de fissures sub-horizontales espacées d'environ vingt centimètres, sur toutes les parois verticales en contact avec l'air ambiant. En hiver (air sec), les ouvertures de la fissure peuvent atteindre une valeur de 2 mm, en été (air humide), ces fissures sont

complètement fermées. Le but de cette étude expérimentale était d'étudier en laboratoire, ce processus de fracturation en utilisant une méthode optique non invasive et non destructive (Corrélation d'Images Numériques). Cette méthode consiste à enregistrer avec une caméra, des images numériques d'un échantillon soumis à une transformation mécanique (chauffage) et en utilisant un algorithme de corrélation d'images afin d'obtenir des champs de déplacements sur la surface analysée. Par cette méthode, les champs de déplacements 2D ( $u_x, u_y$ ) peuvent être calculés. Les champs de déformations ( $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$ ), les champs de contraintes principales ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ), et les directions principales ( $\theta_1, \theta_2$ ) peuvent être obtenus par différences finies à partir des déplacements mesurés.

## 2 Contexte géologique et stratégie d'échantillonnage

Le site expérimental de Tournemire (figure 1) correspond à une structure monoclide simple formée, à grande échelle, par 3 couches ; une couche inférieure calcaire et dolomitique d'environ 300m d'épaisseur (Hettangien, Sinémurien et Carixien), la couche argileuse constituée des formations du Toarcien et Domérien, et une couche supérieure calcaire et dolomitique de plus de 300 mètres qui constitue l'ossature morphostructurale du Causse de Larzac. La couche argileuse est encadrée par 2 aquifères calcaires : L'aquifère de l'Aalénien dans la partie supérieure et l'aquifère régional du Carixien dans sa partie inférieure. L'ensemble de ces couches jurassiques est affecté vers le nord du site par une faille régionale, la faille de Cernon [2] [3].

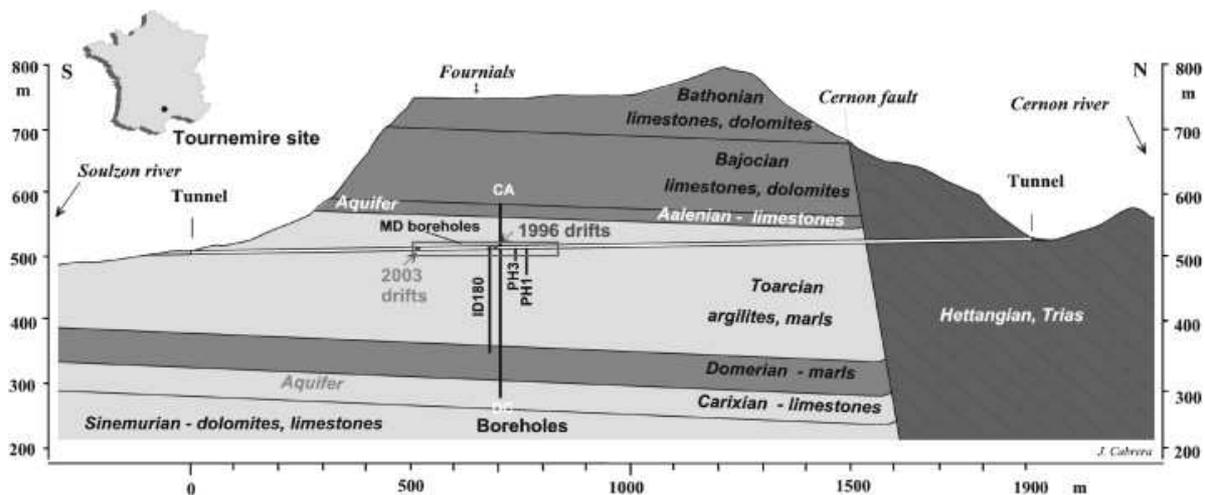


FIG. 1 – Coupe géologique du tunnel de Tournemire avec la localisation de Tournemire [3]

L'argilite de Tournemire affiche une texture typiquement anisotrope induite par le compactage et la stratigraphie des couches qui alternent avec du carbonate détritique, couches riches en argile [4]. La minéralogie de l'argilite a été dominée par le quartz (24-36%), phyllosilicate (39-51%), de la calcite (16-17%) et feldspars (4-8%) avec un peu de pyrite, de dolomite et sidérite. En outre, l'argilite de Tournemire a une teneur en eau de 3,5-4% à l'état de saturation.

Deux séries de deux échantillons, dans une zone non perturbée (i.e. loin de l'EDZ), ont été utilisées pour cette étude expérimentale. Ces deux séries ont été extraites des forages GSM135 et GSM180, qui ont été forés en 2009. Le forage GSM180 a été réalisé subvertical et perpendiculaire au litage et le GSM135 a été foré avec un angle de 135° par rapport à la verticale. Au début de cette étude, les échantillons sont dans un état quasi-saturé. Les dimensions initiales des échantillons sont 200 mm de hauteur (H) et un diamètre  $\varnothing$  de 78 mm.

## 3 Corrélation d'Images Numériques, processus de dessiccation

Les méthodes de champs [5] [6] [7] [8] sont de plus en plus utilisées dans le domaine de la mécanique expérimentale. Ces techniques sont très prometteuses pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux et structures : elles sont non-invasives, non destructives et permettent d'obtenir des données spatialisées. Les principales méthodes de mesure optique plein champ sont la photoélasticité, le moiré, l'interférométrie, les méthodes de grilles, ainsi que la Corrélation d'Image Numérique (CIN). Dans cette étude, la mesure de champs cinématiques a été réalisée en utilisant la méthode optique CIN. Ce choix est

justifié par le mode opératoire décrit ci-dessous. Cette méthode consiste à enregistrer avec une caméra  $\mu$ Eye de marque IDS (CMOS 1/2') (1280x1024 pixels<sup>2</sup>), des images numériques d'un échantillon soumis à une transformation mécanique (processus de dessiccation dans notre cas) et en utilisant un algorithme de corrélation d'images afin d'obtenir déplacements plein champ ( $u_x, u_y$ ). La valeur de chaque pixel est comprise entre 0 à 255 (8 bits), avec la valeur la plus basse représente le noir (la plus haute valeur, blanc) et les valeurs intermédiaires représentant les différents niveaux de gris. La CIN est basée sur une comparaison de sous-domaines de nombres entre deux images enregistrées par une caméra. La fonction de corrélation utilisée est une transformée de Fourier (FFT). En effet, la transformée de Fourier transforme respectivement  $f_1(x,y)$  et  $f_2(x,y)$  en  $F_1(u,v)$  et  $F_2(u,v)$ , et  $c_{f_1f_2}(x,y)$  est la fonction de corrélation de  $f_1(x,y)$  et  $f_2(x,y)$ , la relation s'écrit :

$$F[c_{f_1f_2}(x,y)] = F_1(u,v) F_2^*(u,v) \quad (1)$$

où  $F[ ]$  sont les transformées de Fourier

$$F(u,v) = F[f(x,y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \cdot e^{-j2\pi(xu+yv)} dx dy \quad (2)$$

et  $F_2^*(u,v)$  est le conjugué complexe de  $F_2(u,v)$ .

En fonction de l'équation (1) la fonction de corrélation peut être obtenue en appliquant une transformée inverse  $F^{-1}[ ]$  de :

$$c_{f_1f_2}(x,y) = F^{-1}[F_1(u,v)F_2^*(u,v)] \quad (3)$$

Le logiciel CIN a été développé à l'Institut Pprime (CNRS-UPR3346) (ex LMS de POITIERS) pour déterminer les champs de déplacements ( $u_x, u_y$ ), les champs de déformations ( $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$ ), les champs de contraintes principales ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ), et les directions principales ( $\theta_1, \theta_2$ ). Dans la suite de l'étude, seuls le champ de déformation principale ( $\varepsilon_1$ ) sont tracés et analysés.

## 4 Résultats et discussion

Les images sont enregistrées chaque minute et permettent de localiser visuellement les fissures (ouverture de 80  $\mu$ m) induites par le chauffage et de calculer les champs de déformations. Les caractéristiques de nos quatre échantillons sont récapitulées dans le tableau suivant (tableau 1) : la profondeur d'extraction de la carotte, la hauteur de la carotte initiale avant désaturation, la plage des températures imposées ( $T$ ), la durée totale des essais ( $t$ ) ainsi que sa teneur en eau initiale ( $w$ ). La durée de chaque palier thermique (40, 80, 105, 150, 200°C) est d'environ une heure. Les résultats du champ de déformation principale  $\varepsilon_1$  pendant le processus de dessiccation (échantillon 1) sont représentés sur la figure 2.

Nom du forage	GSM135		GSM180	
N° carotte	1	2	3	4
Profondeur à partir de la galerie [m]	3,30	3,50	3,80	4,00
Hauteur [mm]	200	70	70	70
$T$ [°C]	40-200	50-200	50-200	50-150
$t$ [hours]	5	8	8	26,6
$w$ [%]	2,70	4,30	3,60	3,5

TAB. 1 – Caractéristiques des carottes, températures imposées ( $T$ ), durée des essais ( $t$ ), teneur en eau ( $w$ )

Dès le début du chauffage (au bout de 12 min à 40°C), une concentration de la déformation est observée à l'interface entre le nodule de calcite et la matrice d'argile. Cette concentration est non structurée spatialement (c.a.d pas de symétrie, pas d'orientation privilégiée). Il en résulte de la présence d'une incompatibilité des déformations dues au contraste élevé entre les propriétés thermo-mécaniques des minéraux différents.

Au cours des paliers thermiques suivants (80°C, 105°C et 150°C), les valeurs de déformations et ainsi que la concentration correspondante ont progressé. Après deux heures de chauffage, des fissures détectables à l'œil (ouverture > 80  $\mu$ m) sont apparues sur les images numériques de speckle (figure 2). La présence d'une discontinuité nette à l'interface entre les nodules de calcite et de la matrice argileuse a confirmé que l'initiation et la propagation des fissures dans nos échantillons sont contrôlées par une incompatibilité des déformations.

La localisation des fissures peut être déterminée et localisée rapidement après le début de la désaturation (quelques minutes) grâce au champ de déformation mesuré car la concentration initiale des déformations se superpose parfaitement avec ces fissures de dessiccation. Ainsi, la CIN est un outil adapté pour localiser les fissures de dessiccation dans les roches argileuses.

De plus, après 230 minutes de chauffage (150°C), les valeurs des déformations ( $\epsilon_j$ ) diminuent rapidement (Figure 2) et les fissures deviennent indétectables sur les images numériques. Ce phénomène ressemble à un "processus de guérison" (fermeture de fissures de dessiccation), qui peut se traduire par une dilatation thermique des différents minéraux composant la roche argileuse, et ainsi refermant ces mêmes fissures. La même étude a été menée sur trois autres carottes avec des paliers et des temps de température différents (tableau 1). Les résultats ont confirmé la présence de concentrations des déformations, la création de fissures de dessiccations se superposant avec les concentrations, ainsi qu'une orientation privilégiée des fissures (parallèle aux plans de litage).

En outre, une corrélation claire entre la durée des paliers thermiques et les moments d'ouverture des fissures (et fermetures) ont été observés: ce dernier résultat a souligné que la cinématique des fractures induites par le chauffage est fortement liée à la durée du palier thermique et régimes transitoires hydrauliques.

## 5 Conclusion

Les résultats de cette étude expérimentale mettant en œuvre une méthode optique (CIN) sont les suivants :

- (i) Les fissures (ouverture  $\geq 80 \mu\text{m}$ ) par chauffage commencent à être observables à 80°C. Comme on peut l'observer sur les fronts et parois des galeries, ces fissures sont parallèles aux plans de litage et espacées de 20 à 25 millimètres (non représenté ici).
- (ii) Ces fissures sont apparues également à l'interface entre la matrice argileuse et les hétérogénéités macroscopiques non-argileux (par exemple, des nodules calcaires) (figure 2).
- (iii) Avant l'observation de ces fissures à une échelle macroscopique, des concentrations de déformations ont été mesurées à proximité de l'emplacement des fissures à venir.
- (iv) Lorsque l'eau a totalement été supprimée des échantillons, autour de 100-150°C en fonction de la durée des paliers thermiques, les fissures ne sont pas plus observables et semblaient être fermées (voir figure 2 à l'instant  $t = 246 \text{ min}$ ). Ce phénomène original est probablement associé à la dilatation thermique de la phase solide.
- (v) Les concentrations des déformations sont organisées suivants deux réseaux: un réseau principal associé aux fissures (parallèles aux plans de litage) et un réseau secondaire connecté au réseau principal qui se met en place dans un deuxième temps, avec une organisation spatiale complexe.

## Remerciements

Nous souhaitons remercier le GNR TRASSE (CNRS/IRSN) pour le financement de cette étude.

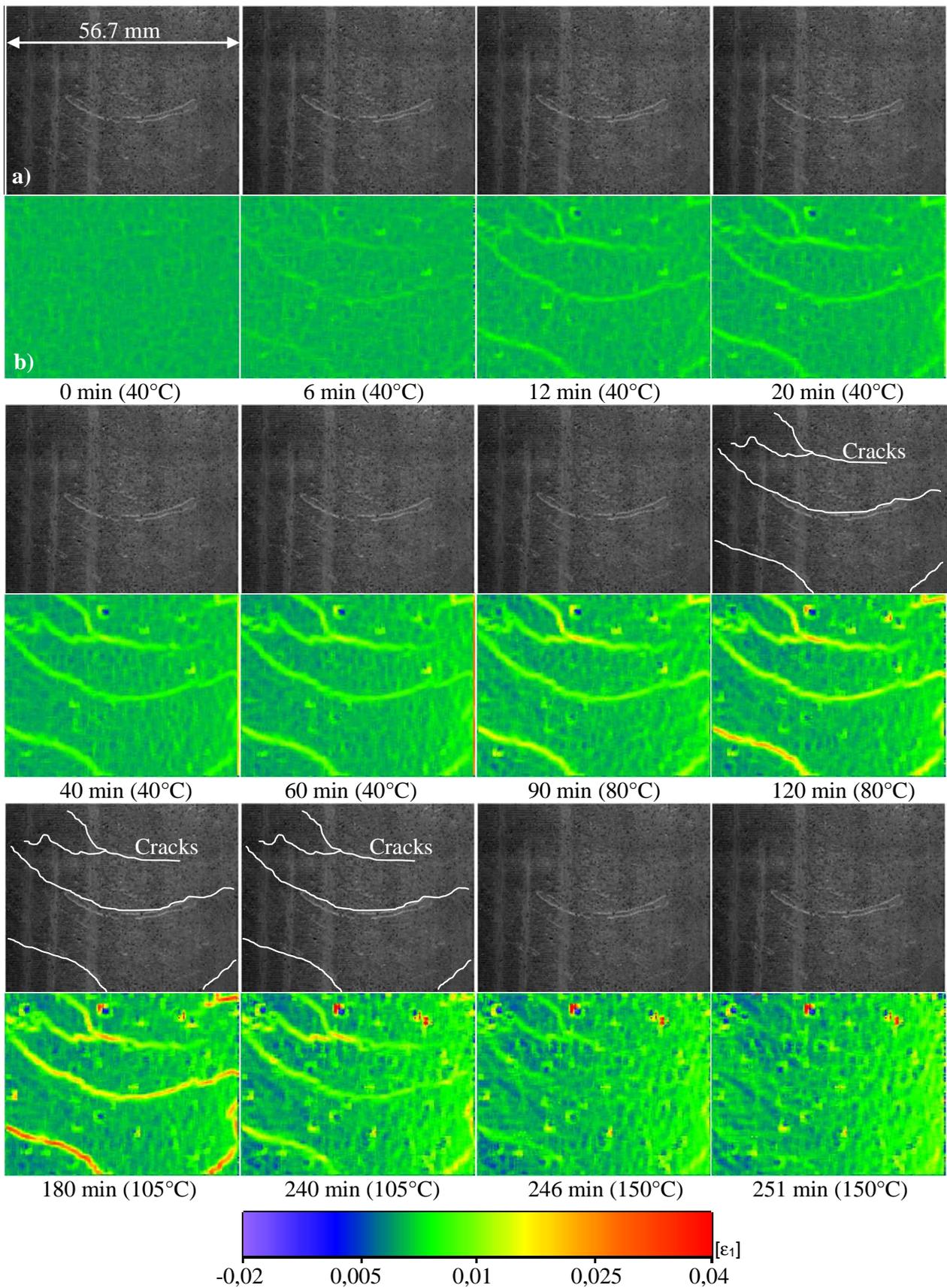


FIG. 2 – a- Image de speckle utilisée en CIN, b- Champs de déformation principale  $\epsilon_1$  pendant un essai de désaturation

## References

- [1] Matray J.M., Savoye S., & Cabrera, J., 2007 Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France): *Engineering Geology* 90: 1-16.
- [2] Cabrera J., Beaucaire C., Bruno G., De Windt L., Genty A., Ramambasoa N., Rejeb A., Savoye S, Volant P. *Projet Tournemire, Synthèse des programmes de recherche 1995-1999.*
- [3] Boisson J.Y., (1996) Caractérisation d'une formation argileuse - Etude des transferts au laboratoire à partir des argilites du tunnel de Tournemire. CCE report no. 3, ref. SERGD 96r06.
- [4] Charpentier D., Cathelineau M., Mosser-Ruck R. Bruno G., 2001 Evolution minéralogique des argilites en zone sous-saturée oxydée: exemple des parois du tunnel de Tournemire (Aveyron, France) *C. R. Acad. Sci. Paris*, 332(II): 601-607.
- [5] Bruck, H.; McNeill, S.; Sutton, M. & Peters, W. 1989. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Experimental Mechanics* 29: 261-267.
- [6] Schreier, H. W.; Braasch, J. R. & Sutton, M. A. 2000. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. *Optical Engineering* 39: 2915-2921
- [7] Hedan, S. Valle, V. & Cottron, M. 2010 In Plane Displacement Formulation for Finite Cracked Plates Under Mode I Using Grid Method and Finite Element Analysis *Experimental Mechanics* 50(3): 401-412.
- [8] Ritter, R. 1996. Strain measurement in material testing by optical methods. In *Local strain and temperature in non-uniform fields at elevated temperatures*. Ziebs J and Bressers J editors Woodhead: 1-12