

## Pressurisation thermique d'une roche saturée

Siavash Ghabezloo, Jean Sulem

CERMES, Ecole National des Ponts et Chaussées  
6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Champs-sur-Marne,  
Marne la Vallée cedex 2, France  
[ghabezlo@cermes.enpc.fr](mailto:ghabezlo@cermes.enpc.fr), [sulem@cermes.enpc.fr](mailto:sulem@cermes.enpc.fr)

### Résumé :

*L'augmentation de la température dans les milieux poreux saturés en conditions non-drainées conduit à un phénomène de pressurisation thermique du fluide interstitiel due à la différence des coefficients d'expansion thermique du fluide et de la matrice solide. Cette augmentation de la pression interstitielle induit une diminution de la contrainte moyenne effective et peut conduire à une rupture en cisaillement ou à une fracturation hydraulique. Ce phénomène de pressurisation thermique est étudié ici expérimentalement pour une roche granulaire saturée à partir d'essais de chauffage non-drainés sous un état de contrainte isotrope maintenu constant. Les résultats de l'essai de chauffage non-drainé sont modélisés à l'aide d'un modèle de comportement thermo-poro-élastique non-linéaire de la roche granulaire.*

### Abstract :

*Temperature increase in saturated porous materials under undrained conditions leads to thermal pressurization of the pore fluid due to the discrepancy between the thermal expansion coefficients of the pore fluid and of the solid matrix. This increase in the pore fluid pressure induces a reduction of the effective mean stress and can lead to shear failure or hydraulic fracturing. This phenomenon of thermal pressurization is experimentally studied here for a saturated granular rock in an undrained heating test under constant isotropic stress. The test results are modelled using a non-linear thermo-poro-elastic constitutive model of the granular rock.*

**Mots-clefs : Pressurisation thermique ; chauffage non-drainé ; grès**

### 1 Introduction

L'augmentation de la température dans les milieux poreux saturés en conditions non-drainées conduit à un phénomène de pressurisation thermique du fluide interstitiel dû à la différence des coefficients d'expansion thermique du fluide et de la matrice solide. Cette augmentation de la pression interstitielle induit une diminution de la contrainte moyenne effective et peut conduire à une rupture en cisaillement ou à une fracturation hydraulique.

Ce phénomène est important dans le génie pétrolier où la roche réservoir au voisinage du puits et les gaines de ciments peuvent subir de brusques variations de température en phase d'exploitation. Il est également important en géophysique dans l'étude des glissements sismiques. En effet, lors d'un glissement rapide, comme c'est le cas pour un séisme, la chaleur produite par la dissipation de l'énergie de frottement est emprisonnée à l'intérieur de la zone de glissement sans avoir le temps de se dissiper en raison de la rapidité du processus et de la faible perméabilité des zones de faille qui contiennent souvent une grande quantité de matériaux argileux. Il en résulte une augmentation importante de la température. Cette augmentation de température conduit à une augmentation de la pression des fluides interstitiels contenus dans la faille et donc à une réduction de la résistance au frottement qui peut tendre au cas limite d'un glissement libre sur une base non frottante. Ce mécanisme peut expliquer le relâchement des contraintes observé lors d'un séisme (Sulem et al 2006).

Ce phénomène de pressurisation thermique est étudié ici expérimentalement pour une roche granulaire saturée à partir d'essais de chauffage non-drainés sous un état de contrainte isotrope maintenu constant. La roche choisie pour cette étude est le grès de Rothbach contenant 80% de quartz et 20% de feldspath. La porosité mesurée de ce grès est de 16%.

## 2 Formulation du problème

Les équations qui régissent le phénomène de la pressurisation thermomécanique des matériaux poreux peuvent être décrites d'après l'approche de Bishop (1973). Dans cette approche, schématisée sur la figure 1, le problème est décomposé en trois problèmes indépendants et les variations de volume de l'élément du milieu poreux et de chacun de ses constituants, supposés isotropes et élastiques, sont écrits séparément, comme présenté sur le tableau 1 pour un élément de volume unité.  $n$  est la porosité Lagrangienne définie comme le rapport de volume de l'espace poreux sur le volume total de l'élément à l'état de référence.  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta T$  et  $\Delta u$  sont les variations de la contrainte moyenne, température et la pression interstitielle respectivement.  $c_f$  et  $c_s$  sont respectivement les compressibilités du fluide interstitiel et de la matrice solide et  $c_d$  est la compressibilité drainée de l'élément.  $\alpha_f$  et  $\alpha_s$  sont respectivement les coefficients d'expansion thermique du fluide interstitiel et la matrice solide et  $\alpha_d$  est le coefficient d'expansion thermique drainée de la roche saturée.

La variation de volume totale est la somme des variations volumiques obtenues dans chaque problème. Pour un chargement thermomécanique non-drainé, la variation de volume de l'élément est égale à la somme des variations de volume des constituants .

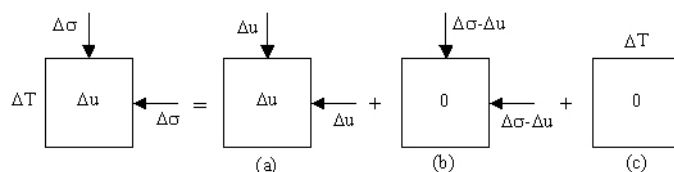


FIG. 1 – Décomposition du chargement thermomécanique

Problème	Variation du volume des constituants		Variation du volume de l'élément
	Fluide interstitiel	Matrice solide	
(a)	$nc_f \Delta u$	$(1-n)c_s \Delta u$	$c_s \Delta u$
(b)	-	$c_s (\Delta\sigma - \Delta u)^*$	$c_d (\Delta\sigma - \Delta u)$
(c)	$-n\alpha_f \Delta T$	$-(1-n)\alpha_s \Delta T$	$-\alpha_d \Delta T$
Somme	$nc_f \Delta u + (1-n)c_s \Delta u + c_s (\Delta\sigma - \Delta u)$ $-n\alpha_f \Delta T - (1-n)\alpha_s \Delta T$		$c_s \Delta u + c_d (\Delta\sigma - \Delta u)$ $-\alpha_d \Delta T$

\* Contrainte moyenne sur la matrice solide :  $\frac{\Delta\sigma - \Delta u}{1-n}$ , Variation du volume :  $(1-n)c_s \frac{\Delta\sigma - \Delta u}{1-n}$

TABEAU. 1 – Variations du volume dans le problème décomposé

En faisant quelques réarrangements mathématiques on obtient :

$$\Delta u = B \Delta\sigma + \Lambda \Delta T \quad (1)$$

avec

$$B = \frac{(c_d - c_s)}{n(c_f - c_s) + (c_d - c_s)} \quad (2)$$

et

$$\Lambda = \frac{n\alpha_f + (1-n)\alpha_s - \alpha_d}{n(c_f - c_s) + (c_d - c_s)} \quad (3)$$

L'équation (1) décrit la variation de la pression interstitielle dans un matériau poreux soumis à un chargement thermomécanique.  $B$  est le coefficient de Skempton et  $\Lambda$  est le coefficient de pressurisation thermique. Pour un matériau purement thermo-élastique  $\alpha_d = \alpha_s$  et on trouve l'expression de coefficient de pressurisation thermique élastique donnée par Rice (2006).

$$\Lambda = \frac{\alpha_f - \alpha_n}{c_f + c_n} \quad (4)$$

ou  $\alpha_n$  et  $c_n$  sont le coefficient de l'expansion thermique et la compressibilité de l'espace poreux définis comme

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \alpha_s \\ c_n &= \frac{1}{n}(c_d - (1+n)c_s) \end{aligned} \quad (5)$$

L'équation (4) met en évidence que la différence entre le coefficient d'expansion thermique de l'eau et celui de l'espace poreux est le facteur provoquant la pressurisation thermique des matériaux poreux.

La déformation volumique de l'élément est donnée par la somme des variations du volume dans les trois problèmes :

$$\varepsilon_v = c_s \Delta u + c_d (\Delta \sigma - \Delta u) - \alpha_d \Delta T \quad (6)$$

En remplaçant  $\Delta u$  par l'expression donnée dans l'équation (1) on trouve :

$$\varepsilon_v = c_u \Delta \sigma - \alpha_u \Delta T \quad (7)$$

ou  $c_u$  est la compressibilité non-drainée du matériau poreux exprimée comme :

$$c_u = c_d - B(c_d - c_s) \quad (8)$$

et  $\alpha_u$  est le coefficient d'expansion thermique non-drainée.

$$\alpha_u = \alpha_d + \Lambda(c_d - c_s) \quad (9)$$

En utilisant les équations (2) et (3) et en supposant un comportement purement thermo-élastique,  $\alpha_d = \alpha_s$ , le coefficient d'expansion thermique non-drainée d'un matériau poreux s'exprime de la façon suivante (McTigue, 1986)

$$\alpha_u = \alpha_s + Bn(\alpha_f - \alpha_s) \quad (10)$$

### 3 Comportement mécanique isotherme du grès de Rothbach

Les équations (4) et (5) montrent que pour évaluer le coefficient d'expansion thermique d'un matériau poreux, les compressibilités de matériau et sa matrice solide,  $c_d$  et  $c_s$ , doivent être connus. Afin de mesurer la compressibilité de la matrice solide, un essai de compression isotrope a été réalisé dans lequel la pression de confinement et la pression interstitielle ont été augmentées d'une manière égale et simultanée, comme le problème (a) dans la figure (1). Le résultat est présenté sur la figure (2). Le module de compression de la matrice solide,  $K_s = 1/c_s$ , est évalué égal à 41,6 GPa.

Pour mesurer la compressibilité drainée de la roche, un essai de compression isotrope drainée avec un cycle de charge-décharge a été réalisé. La courbe de contrainte effective – déformation volumique est présentée sur la figure (3). Le module tangent de compression drainée,  $K_d = 1/c_d$ , est la pente de cette courbe. La contrainte effective de Biot est définie comme :

$$\sigma' = \sigma - bu \quad , \quad b = 1 - K_d/K_s \quad (11)$$

où  $b$  est le coefficient de Biot qui prend en compte la compressibilité de la matrice solide. Comme  $K_d = d\sigma'/d\varepsilon_v$  est une fonction de  $\sigma'$  et celui-ci est une fonction de  $K_d$ , le traitement des données de cet essai a été fait d'une manière itérative. En prenant une valeur initiale pour le coefficient de Biot la courbe de contrainte effective - déformation volumique a été calculée. Pour calculer le module de compression  $K_d$ , en fonction de la contrainte effective, la courbe de contrainte effective - déformation volumique est approximée par la fonction suivante :

$$\sigma' = a + be^{c\varepsilon_v} \quad (12)$$

où les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  ont été calés. L'avantage de cette équation est la linéarité de l'expression de module de compression en fonction de la contrainte effective.

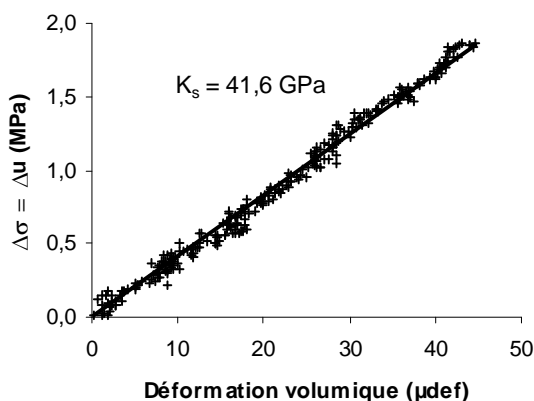


FIG. 2 – Mesure de module de compression de la matrice solide (μdef : μm/m)

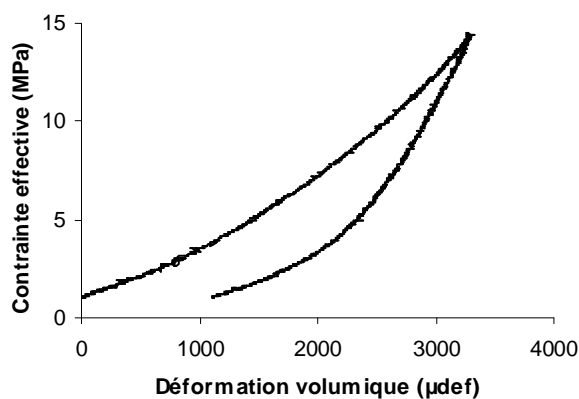


FIG. 3 – Résultats de l'essai de compression isotrope drainé, charge-décharge (μdef : μm/m)

$$K_d = d\sigma'/d\varepsilon_v = c\sigma' - ac \quad (13)$$

En utilisant l'expression de  $K_d$ , une nouvelle expression du coefficient de Biot est calculée et ce processus itératif a été répété jusqu'à la convergence du problème. L'expression finale de  $K_d$  pour la courbe de charge, qui est un module de compression élasto-plastique est la suivante :

$$K_d = 0,35 \sigma' + 1,80 \quad \text{avec } K_d \text{ en GPa et } \sigma' \text{ en MPa} \quad (14)$$

Le module de compression élastique non-linéaire est obtenu pour la courbe de décharge :

$$K_d = 0,97 \sigma' + 0,93 \quad \text{avec } K_d \text{ en GPa et } \sigma' \text{ en MPa} \quad (15)$$

#### 4 Comportement thermique du grès de Rothbach

Afin de mesurer le coefficient d'expansion thermique drainée de la roche, un essai de chauffage drainé, comme le problème (c) dans la figure (1), a été réalisé. La température initiale de l'essai est de 21°C. Le résultat de cet essai est présenté sur la figure (4). Le coefficient d'expansion thermique drainée,  $\alpha_d$ , obtenu est égal à  $28 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Le phénomène de pressurisation thermique a été étudié dans un essai de chauffage non-drainé sous une contrainte isotrope, maintenu constante égale à 10 MPa. La température initiale de l'essai est de 20°C. Les résultats sont présentés sur les figures (5) et (6). La pressurisation thermique non-linéaire observée est due aux non-linéarités du comportement mécanique du grès et également au comportement thermique non-linéaire de l'eau. La pente de la courbe de pressurisation diminue avec augmentation de la pression interstitielle.

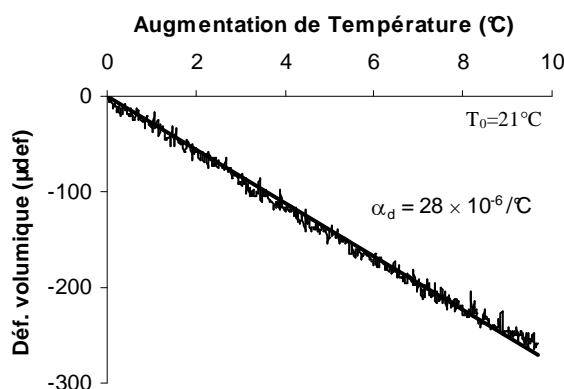


FIG. 4 – Mesure du coefficient d'expansion thermique drainée de la roche ( $\mu_{\text{def}}$  :  $\mu\text{m/m}$ )

Pour les pressions interstitielles voisines de la pression de confinement, la courbe devient quasiment horizontale et on n'observe plus de pressurisation. Ce phénomène est probablement dû à la présence de l'eau entre l'échantillon et la membrane à cause de la faible différence entre la pression de confinement et la pression interstitielle. A cause d'un problème de dysfonctionnement des capteurs de déplacement au début de l'essai, la courbe des déformations volumiques est présentée pour la partie de l'essai à partir de 40°C.

#### 5 Simulation analytique de l'essai de chauffage non-drainé

La formulation présentée pour le comportement thermo-élastique non-drainé des matériaux poreux avec le modèle de comportement élastique non-linéaire développé pour le grès de Rothbach nous permet de simuler analytiquement l'essai de chauffage non-drainé. Comme l'essai a été réalisé sous une pression de confinement constante, le terme  $\Delta\sigma$  dans les équations (1) et (7) est nul. L'augmentation de la pression interstitielle avec la pression de confinement maintenue constante, diminue la contrainte effective (décharge élastique) et donc l'expression du module de compression présentée pour le cas de décharge (équation (15)), doit être utilisée pour calculer le terme  $c_n$  dans l'équation (5). Les déformations volumiques ont été calculées en utilisant l'équation (10).

Le coefficient d'expansion thermique et la compressibilité de l'eau sont calculés en fonction de la pression interstitielle et la température (Spang 2002).

Les résultats de la simulation présentés sur les figures (5) et (6) montrent une bonne concordance avec les résultats de l'essai de chauffage non-drainé. Le phénomène de

pressurisation thermique et aussi l'expansion thermique non-drainée de la roche ont été bien reproduits à partir des résultats des essais de compression et de chauffage drainé.

Comme on a déjà mentionné, la pression interstitielle observée pendant l'essai de chauffage non-drainé ne peut pas atteindre la pression de confinement. Cette limitation nous empêche de pouvoir atteindre dans un essai de chauffage, la contrainte effective nulle ou éventuellement la fracturation hydraulique de l'échantillon. Cependant la simulation analytique permet de prévoir la température, à laquelle la pression interstitielle atteint la pression de confinement : 60°C pour cet essai.

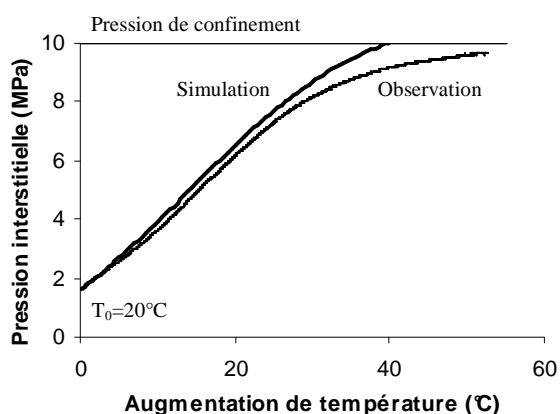


FIG. 5– Pressurisation thermique observée dans l'essai de chauffage non-drainé et sa simulation analytique

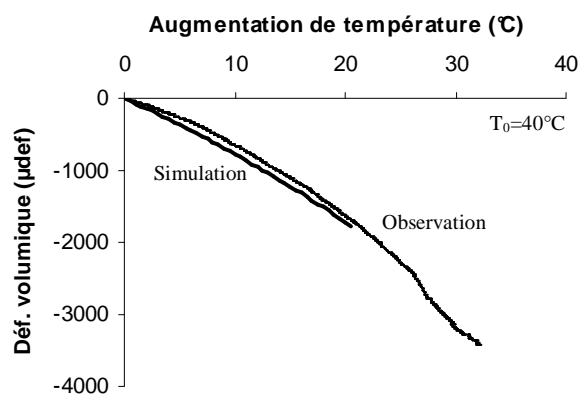


FIG. 6– Déformation volumique de l'échantillon dans l'essai de chauffage non-drainé et sa simulation analytique ( $\mu_{def}$  :  $\mu\text{m/m}$ )

## 5 Conclusions

Le phénomène de pressurisation thermique des matériaux poreux est étudié pour une roche granulaire via un essai de chauffage non-drainé sous un état de contrainte maintenu constant. La formulation de comportement thermo-élastique des matériaux poreux est présentée. Cette formulation avec un modèle de comportement élastique non-linéaire développé pour le grès de Rothbach permis une simulation analytique de l'essai de chauffage non-drainé. Les résultats de simulation ont montré une bonne concordance avec les résultats de l'essai.

## Références

- Bishop, A.W., 1973, The influence of an undrained change in stress on the pore pressure in porous media of low compressibility, *Geotechnique* 23(3).
- McTigue, D. F. 1986, Thermoelastic response of fluid-saturated porous rock, *Journal of Geophysical Research*, 91(B9), 9533—9542.
- Rice, JR, 2006, Heating and weakening of faults during earthquake slip, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, B05311.
- Spang, Bernhard, 2002, Excel Add-In for Properties of Water and Steam in SI-Units, <http://www.cheresources.com/staff.shtml>
- Sulem, J., Lazar, P. and Vardoulakis, I., 2006, Thermo-Poro-Mechanical Properties of Clayey Gouge and Application to Rapid Fault Shearing, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomechanics*, in print.