

Contraintes exercées par le gel dans les fractures des massifs rocheux : aspects expérimentaux et modélisation

Marion Bost, Ahmad Pouya

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MSRGI/GMRGE
58 Boulevard Lefebvre 75015 Paris
marion.bost@lcpc.fr

Résumé :

Afin d'améliorer les méthodes de prévision des chutes de blocs en milieu montagneux, la contrainte générée par les cycles de gel-dégel dans la fracturation naturelle des roches doit pouvoir être déterminée. Un tube de calcaire surcarotté a été instrumenté et soumis à des cycles de gel-dégel. L'analyse inverse des déformations orthoradiales mesurées a permis de définir le profil longitudinal des contraintes radiales dans l'entaille. A chaque instant, ce profil présente une valeur maximum qui avec le temps, se déplace en profondeur dans l'entaille et augmente en amplitude. L'effet conjugué des cinétiques de propagation thermique au sein de la roche, de changement de phase liquide-solide et de migration de l'eau serait à l'origine de cette allure ondoiyante que nous avons essayée de décrire par des formules simples.

Abstract :

Rock falls constitute the most current natural hazard risk in mountainous area. To assess or predict this risk in limestone cliffs, it is necessary to know the stresses in the natural fractures developed in freeze-thaw cycles. This phenomenon has been studied in laboratory by physical tests on artificial notches. The stress profiles deduced from the measurements result from a coupling between thermal propagation, water phase shift and water flow in the notch and porous rock matrix. They show a maximum value depending on time and moving in-depth in the notch. A simple formulation for this evolution is established.

Mots-clefs :

gel-dégel ; fracture ; contrainte

1 Introduction

La difficulté de prévision des chutes de blocs rocheux en milieu montagneux pose un problème en terme de maintenance des infrastructures et de gestion de risques. La caractérisation temporelle du risque de rupture dans les massifs rocheux passe par la description de la cinétique des phénomènes d'altération. Plus particulièrement, pour l'exemple des falaises de calcaires en région montagneuse, on peut estimer que le processus prépondérant d'altération est la propagation de la fissuration sous l'effet des cycles de gel-dégel (Frayssines, 2005).

L'identification d'un modèle de contraintes exercées par le gel dans la fissuration de la roche s'avère nécessaire pour pouvoir quantifier la progression de ce réseau d'altération. Or, l'augmentation volumique accompagnant le passage de l'eau de l'état liquide à l'état solide ne suffit pas à déterminer les contraintes exercées lors des cycles de gel-dégel dans les milieux poreux (Baron *et al*, 1992). Les migrations d'eau à l'état solide et à l'état liquide, à l'interface entre roche et fissure, au cours des cycles, complexifient le modèle de génération de contraintes par dilatation volumique (Djaballah Masmoudi, 1998). En effet, en faisant subir un essai de gel-

dégel à des blocs fissurés de matériaux de porosité différente mais de même géométrie, la mesure de pression en fond de fissure met en évidence des valeurs différentes (Bost *et al*, 2006). Pour les mêmes raisons, la sensibilité au gel des calcaires dépend de l'intensité du cycle de gel-dégel (Prick, 1999).

Afin d'étudier ces contraintes, un dispositif expérimental simple a été mis en place à partir du suivi des déformations d'un tube de calcaire soumis au gel. Le logiciel CESAR-LCPC a ensuite permis de déterminer, par analyse inverse, le profil des contraintes le long du tube.

2 Principe et dispositif expérimental

Un tube de calcaire préalablement saturé et rempli d'eau a été soumis à des cycles de gel-dégel. Ses déformations ont été mesurées jusqu'à la rupture. Un profil de déformations orthoradiales le long du tube au cours des cycles a ainsi été établi.

2.1 Dispositif expérimental

Un cylindre de calcaire (Larrys, carrière du Moulin d'Arlet, Yonne) de 242 mm de haut percé en son centre et surcarotté sur une partie de sa hauteur (FIG.1) a été soumis à des cycles de gel-dégel entre -5°C et 20°C . Le cylindre a été préalablement saturé en eau à la pression atmosphérique. Le remplissage en eau de l'entaille créée par le surcarottage a été effectué entre chaque cycle.

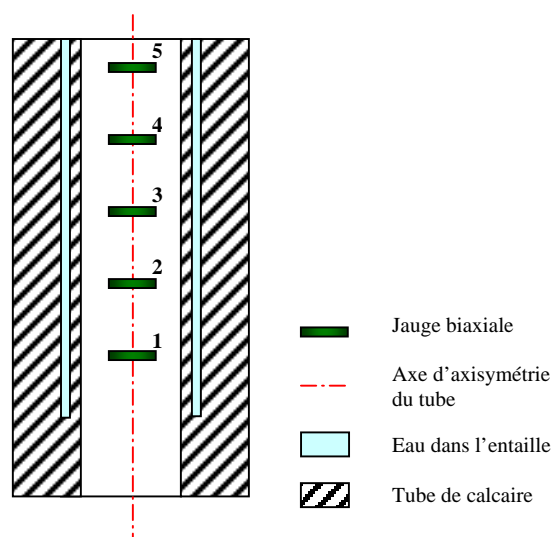


FIG.1 – Coupe longitudinale du tube de calcaire instrumenté.

Au cours des cycles, les déformations orthoradiales et longitudinales ont été suivies en cinq points le long du cylindre intérieur à l'aide de jauges bi-axiales (FIG.1) montées en quart de pont.

Afin d'assurer la compensation thermique des jauges, un cycle de gel-dégel sans eau a été effectué. Il a permis de déterminer le coefficient de dilatation thermique de chacune des jauges. Par la suite, au cours des cycles, la température a été suivie en trois points le long du cylindre intérieur. Les mesures faites par les jauges ont ainsi été corrigées en température.

2.2 Résultats

D'après le suivi de température, la période de gel dure de 8 à 10h pour que le cylindre s'équilibre thermiquement et mécaniquement. Au cours de cette période, le changement de

phase de l'eau, de l'état liquide à l'état solide, déforme le cylindre intérieur par compression comme l'indique le relevé des différentes jauges orthoradiales compensées en température (FIG.2). Deux cycles seulement ont été nécessaires pour mener l'éprouvette de calcaire jusqu'à la rupture. Le fait que la jauge 1 soit la seule jauge à subir de nouveau une compression après l'initiation instantanée de la rupture indique que la rupture s'est initiée en fond d'entaille entre les jauges 1 et 2 (FIG.2).

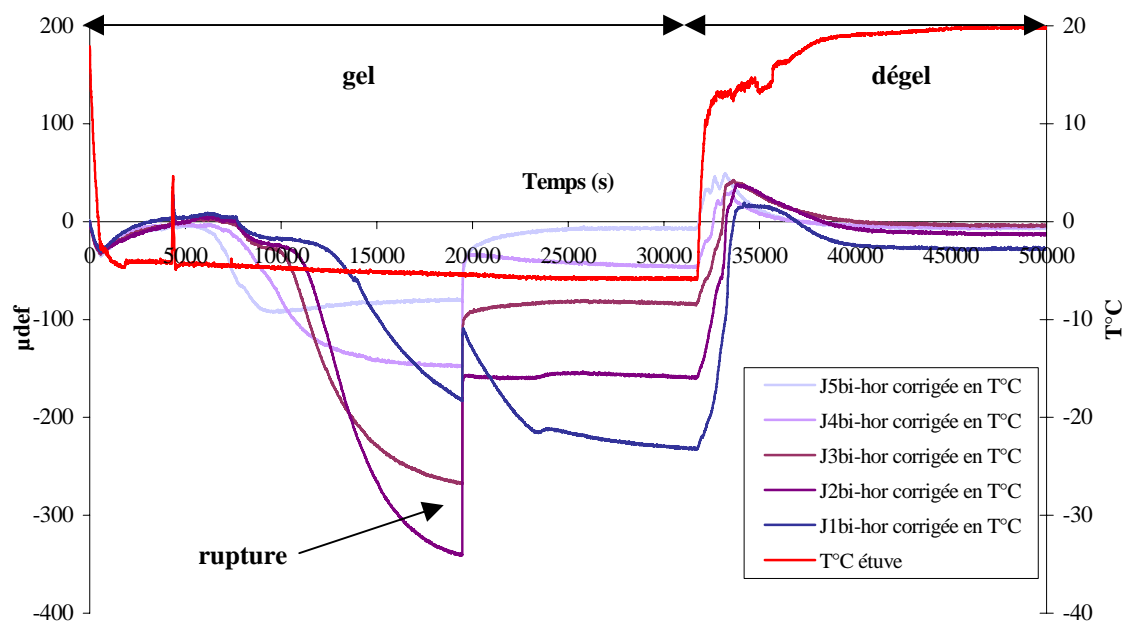


FIG.2 – Mesures des jauges corrigées en température au cours du cycle 2.

A partir de ces données relevées au cours du temps et en cinq points le long de l'entaille, une allure de la déformation orthoradiale peut être déterminée à chaque instant le long de cette entaille.

3 De la déformation orthoradiale à la contrainte générée par le gel

Les caractéristiques mécaniques du calcaire utilisé ayant été mesurées, une modélisation numérique à l'aide du logiciel CESAR-LCPC a été entreprise afin de déterminer, par analyse inverse, les profils de contraintes le long du tube compatibles avec les déformations mesurées en différents instants des cycles de gel-dégel.

3.1 Principe

Le choix d'expérimenter un échantillon cylindrique permet de simplifier le modèle à deux dimensions du fait de l'axisymétrie. La déformation orthoradiale du cylindre intérieur est connue en cinq points ce qui permet de définir une allure linéaire par morceaux. Notre première approche de la contrainte radiale dans l'entaille sera donc une approximation par une fonction linéaire par morceaux,

$$\sigma(x) = \sum_{i=1}^5 p_i \Psi_i(x) \quad (1)$$

où - x est la profondeur dans l'entaille

- p_i sont les coefficients tels que $\sigma(x_i) = p_i, \forall i$

- Ψ_i est la fonction de contrainte radiale élémentaire définie en chaque point i de profondeur x_i de l'entaille (FIG.3).

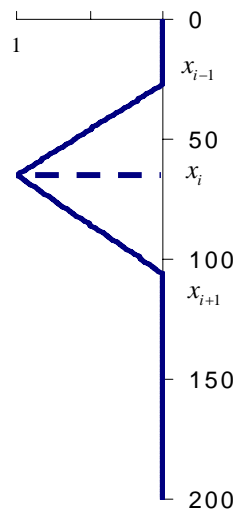


FIG.3 – la fonction Ψ_i , le long de l'entaille.

D'après des observations expérimentales faites antérieurement, la contrainte est prise nulle en haut de l'entaille soit en $x = 0$. Entre le cinquième point de mesure et le fond de l'entaille, la contrainte est supposée constante.

Le comportement du calcaire étudié est considéré élastique linéaire avant rupture. Par conséquent la déformation orthoradiale le long du cylindre intérieur peut être définie de la manière suivante à partir des mêmes coefficients p_i que (1) :

$$\varepsilon^T(x) = \sum_{i=1}^5 p_i \varepsilon^i(x) \quad (2)$$

où - ε^T est la fonction de déformation orthoradiale théorique définie en chaque point i de profondeur x_i du cylindre intérieur

- ε^i est la fonction de déformation orthoradiale élémentaire le long du cylindre intérieur résultant de la contrainte appliquée Ψ^i le long de l'entaille.

En particulier en chaque point à la profondeur x_j où se situe une jauge de mesure,

$$\varepsilon^T(x_j) = \sum_{i=1}^5 p_i \varepsilon^i(x_j) \quad (3)$$

Ainsi l'écart entre $\varepsilon^T(x_j)$ et ε_j^M a été minimisé pour déterminer les coefficients p_i les plus adéquats, avec ε_j^M , la déformation orthoradiale mesurée par la jauge à la profondeur x_j . La méthode des moindres carrés a été utilisée :

$$\text{soit la quantité } D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^5 (\varepsilon^T(x_j) - \varepsilon_j^M)^2, \text{ il est nécessaire que } \forall i, \frac{\partial D}{\partial p_i} = 0.$$

En produit de matrice, ce système s'écrit :

$$A_{ik} p_k = B_i \quad (4)$$

où $A_{ik} = \sum_{j=1}^5 \varepsilon^i(x_j) \varepsilon^k(x_j)$ et $B_i = \sum_{j=1}^5 \varepsilon^i(x_j) \varepsilon_j^M$.

Les paramètres $\varepsilon^i(x_j)$ ont été déterminés sous le logiciel CESAR-LCPC par sollicitation successive mécanique ψ^i du tube surcarotté de calcaire modélisé. Les paramètres ε_j^M ont été mesurés au niveau des jauges au cours des cycles de gel-dégel. A_{ik} et B_i connues, les p_k sont déterminés par inversion de matrice :

$$p_k = (A^{-1})_{ki} B_i \quad (5)$$

3.2 Allure de la contrainte selon le modèle linéaire par morceaux

L'hypothèse d'un comportement élastique linéaire limite l'analyse au premier cycle de gel-dégel, unique cycle avant la rupture. Mais le relevé continu des jauges au cours du cycle permet de définir l'allure linéaire par morceaux de la contrainte dans l'entaille à chaque instant. Ainsi le profil de contrainte le long de l'entaille a été déterminé toutes les heures au cours de la partie gel du cycle (FIG.4).

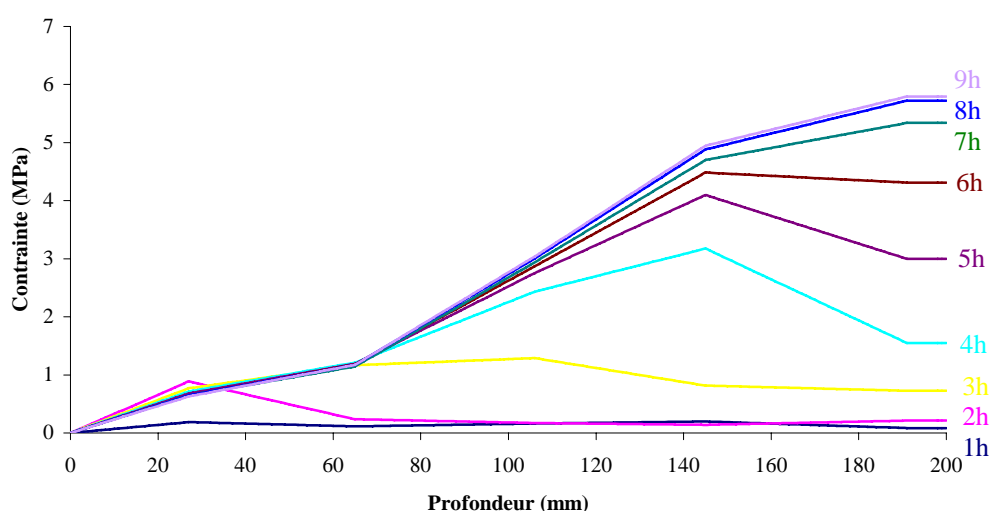


FIG.4 – Profils de contrainte le long de l'entaille au cours du cycle 1.

Les résultats indiquent que la contrainte le long d'une entaille remplie d'eau, générée par le changement de phase au cours d'un cycle de gel-dégel, varie à la fois dans l'espace et dans le temps. A chaque instant, la contrainte présente une valeur maximum qui avec le temps, se déplace en profondeur dans l'entaille et augmente en amplitude (FIG.4).

4 Evolution spatio-temporelle de la contrainte le long d'une entaille au cours d'un cycle de gel-dégel

L'analyse des données ci-dessus a permis d'établir une formule approximative pour décrire l'évolution des profils de contrainte au cours du temps.

En examinant qualitativement ces courbes, nous avons cherché à exprimer, à un instant t , le profil de la contrainte en fonction de la profondeur x dans l'entaille sous la forme d'une combinaison de fonctions :

$$f_1(x) = \frac{\alpha x}{(1 + \beta x)^2} \text{ et } f_2(x) = \frac{\alpha x}{1 + \beta x} \quad (6)$$

f_1 caractérise plutôt l'effet transitoire d'un maximum de contrainte évoluant avec le temps et f_2 , l'allure pour x à l'infini. L'étude d'ajustement des courbes sous la forme suivante est en cours :

$$\sigma(x,t) = \frac{\alpha(t)x}{(1 + \beta(t)x)^2} + \frac{a(t)x}{1 + b(t)x} \quad (7)$$

où α, β, a, b sont des fonctions du temps.

Cette formulation n'a d'intérêt que parce qu'elle fournit une synthèse phénoménologique des données des expériences. La signification physique des paramètres de cette loi et leurs liens avec la géométrie de l'éprouvette et la nature de la roche doivent être recherchés, afin de pouvoir extrapoler cette loi à d'autres contextes. Ces analyses et réflexions, enrichies des résultats d'autres expériences, se poursuivent actuellement et constituent la perspective du présent travail.

5 Conclusions

Le phénomène de progression des fractures dans les falaises des massifs rocheux, en particulier calcaires, sous l'effet des contraintes créées par le gel est qualitativement bien connu. Mais une recherche dans la littérature existante montre qu'il n'existe que de rares données quantitatives et presque aucun modèle permettant d'estimer les contraintes développées par ce phénomène. Nos expériences ont montré que ce phénomène et le profil de contraintes qui en résulte au cours du temps, sont plus complexes qu'ils ne paraissent a priori. Ces expériences et les résultats qu'elles fournissent constituent un premier pas dans la compréhension et la modélisation quantitative de ce phénomène, indispensable pour estimer la cinétique de dégradation des falaises de calcaires.

Références

- Baron, J., Ollivier, J.P. 1992 *La durabilité des bétons*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 453p
- Bost, M., Pouya, A., Martineau, F. 2006 Effets mécaniques du gel sur l'évolution d'une fissure dans un bloc de calcaire. In *Actes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur 2006 « Risques géotechniques et environnementaux liés à l'aménagement. » Risques naturels en zone montagneuse*, III pp.153-160
- Djaballah Masmoundi, N. 1998 *Modélisation et expérimentation de la perméabilité et des mécanismes de transfert dans les milieux poreux au cours du gel*. Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 205p
- Frayssines, M. 2005 *Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux (rupture)*. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble, 218p
- Prick, A. 1999 *Etude de la cryoclastie et de l'haloclastie par méthode dilatométrique*. Mémoire de la Classe des Sciences, ed. Académie Royale de Belgique, 311p