
Etude de l'effet des basses températures sur la microstructure des granites et leur comportement mécanique

Mokhfi TAKARLI - William PRINCE AGBODJAN - Laurent MOLEZ - Hui BIAN

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique.

INSA de Rennes, 20 Avenue des Buttes de Coësmes. 35043 Rennes

Mokhfi.Takarli@ens.insa-rennes.fr, William.Prince-Agbodjan@insa-rennes.fr,

Laurent.Molez@insa-rennes.fr, Hui.Bian@ens.insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. Dans cette étude nous avons exploré les effets des variations de température sur la microstructure et le comportement mécanique de deux roches granitiques. Des échantillons représentatifs de deux roches granitiques, initialement séchés ou saturés à l'eau, ont été soumis à des cycles répétés (300 cycles) de variations de température entre -20°C et +20°C. Au cours de ces essais, des changements de la microstructure de la roche ont été mis en évidence par la mesure de l'évolution de la perméabilité et de la vitesse des ondes longitudinales. Ces évolutions microstructurales se traduisent à la fin des essais par une perte des performances mécaniques, notamment par une baisse de la rigidité. Les mécanismes mis en jeu lors de la dégradation de la roche sont multiples : les dilatations et contractions différentielles des minéraux, le gel de l'eau dans le réseau poreux et les effets de l'interaction eau-roche.

ABSTRACT. A study is reported on the temperature variations and the water freezing/thawing effects on some physical (gas permeability and P-wave velocity) and mechanical (compressive strength and Young modulus) properties of two granites. The failure process evolution is also investigated. The studied samples were initially dried at 105°C or saturated with water, and then subjected at 300 heating/cooling cycles of 24h between +20°C and -20°C. Results show that this ageing process induces microstructural changes in the rock material which affect the mechanical behavior of the samples. The degradation mechanisms highlighted in this study are the mineral contraction and dilatation, the water freezing-thawing cycles and the water-rock interaction.

MOTS-CLÉS : Granite, Perméabilité, Vitesse d'ondes ultrasonores, Microfissures, Propriétés mécaniques, Processus de rupture.

KEYWORDS: Granite, Permeability, P-wave velocity, Microcracks, Mechanical properties, Failure process.

1. Introduction

Dans les conditions d'exploitation, les matériaux rocheux se dégradent sous l'effet de différents processus d'altération. Cette dégradation est lente et peut se manifester par une perte des performances mécaniques et/ou une évolution des propriétés physiques de la roche. Par ailleurs les principaux mécanismes qui interviennent dans l'altération des roches sont connus. On distingue : (i) les mécanismes physico-chimiques tels que la dissolution, l'hydrolyse, l'hydratation, l'échange d'ions, l'oxydation, etc ; (ii) les mécanismes physiques qui sont principalement la dilatation et la contraction des minéraux, le gel-dégel de l'eau et la cristallisation des sels. Les variations de température et l'action de l'eau constituent les deux principaux facteurs à l'origine de ces processus de dégradation.

Dans ce travail, nous avons visé un double objectif; d'une part examiner l'effet des basses températures sur les propriétés physiques et mécaniques de deux roches granitiques de faible porosité (<1%), et d'autre part examiner l'effet du gel sur ces propriétés. Pour cela, nous avons considéré deux cas d'étude : des échantillons secs et des échantillons saturés à l'eau. Les deux types d'échantillons ont été soumis à 300 cycles de variations de température entre -20°C et +20°C.

2. Matériaux et procédure expérimentale

2.1. Matériaux

Les matériaux étudiés « G.F1 » et « G.F2 » correspondent à deux roches granitiques prélevées dans les Pyrénées. Pour la roche « G.F1 », l'analyse pétrographique a révélé la composition approximative suivante : 30% de quartz, 10% de feldspaths alcalins et environ 56% de plagioclases. Les micas noirs sont présents en faible proportion 4%. Il s'agit d'une granodiorite. La roche « G.F2 » contient approximativement 40% de quartz, 23% de feldspaths alcalins, 31% de plagioclases et environ 6% de micas noirs. La principale différence minéralogique entre ces deux roches réside donc dans le fait que G.F1 est plus riche en plagioclases tandis que G.F2 est plus riche en quartz. Les dimensions des grains minéraux ont été également déterminées sur lames minces par la méthode du diamètre du cercle de surface équivalente. Ainsi, les échantillons de la roche « G.F1 » sont constitués de grains de diamètre moyen de 0,66mm. Ceux de la roche « G.F2 » se distinguent par une composition plus fine avec un diamètre moyen de 0,43mm.

2.2. Cycles thermiques

Des éprouvettes cylindriques de 40mm de diamètre et 60mm de hauteur ont été soumises à 300 cycles de gel-dégel, d'une durée de 24h pour chaque cycle, avec des variations de température entre +20°C et -20°C. Dans ce contexte, les éprouvettes

destinées à l'étude de l'effet exclusif des basses températures ont été d'abord séchées dans une étuve à 105°C de manière à éliminer toute présence d'eau. Elles ont été ensuite placées dans des sacs hermétiques de manière à éviter tout échange d'humidité avec le milieu extérieur. La décongélation de ces échantillons est réalisée dans des sacs étanches, en salle sèche à (20°C et 60% d'humidité relative). Pour l'étude de l'effet du gel, les éprouvettes ont été étuvées à 105°C puis saturées à l'eau avant d'être soumises aux variations de température entre -20°C et +20°C. La décongélation est réalisée dans ce cas, par immersion dans l'eau.

2.3. Techniques de mesures :

La caractérisation et la quantification des dommages induits par les processus de dégradation ont été réalisées par deux méthodes : d'une part, des méthodes non destructives qui permettent de suivre l'évolution de l'endommagement au cours des sollicitations cumulées, d'autre part par des méthodes destructives destinées à préciser les caractéristiques et le comportement mécanique résiduels des échantillons au terme de la dégradation simulée. Les mesures non destructives (perméabilité et vitesse d'ondes ultrasonores) ont été réalisées tous les 25 cycles. La perméabilité est mesurée par percolation de gaz d'hélium à pression constante (0,6MPa) dans la direction longitudinale des éprouvettes. Chaque mesure de perméabilité et de vitesse d'ondes ultrasonores est précédée d'un séchage préalable de l'échantillon à 105°C. Nous avons vérifié que ces séchages successifs n'ont pas d'influence sur les vitesses de propagation des ondes longitudinales et qu'ils n'affectent pas les mesures de perméabilité au-delà des deux premiers cycles. Pour les méthodes destructives, les échantillons ont été soumis, au terme des 300 cycles de gel-dégel, à des essais de compression simple au cours desquels sont effectuées des mesures simultanées de déformations, d'émission acoustique et de perméabilité au gaz. Ceci, nous a permis d'analyser l'effet des processus de dégradation sur la résistance mécanique, les propriétés élastiques et le processus de rupture sous charge.

3. Résultats et discussions

3.1. Effet des cycles thermiques sur les propriétés physiques : échantillons secs

Sur les figures 1.a et 1.b, nous avons représenté l'évolution des vitesses de propagation des ondes ultrasonores. On constate d'une façon générale, que la vitesse de propagation des ondes longitudinales (V_L) commence par diminuer à partir d'un certain nombre de cycle (approximativement à partir du 75ème cycle). Elle se stabilise par la suite au bout de 200 cycles environ. La diminution constatée est attribuée à la création, sous l'effet des variations thermiques, de nouvelles fissures ou l'extension de celles qui existaient déjà dans le matériau. En effet, dans les roches cristallines comme les granites, l'anisotropie thermique des minéraux constitutifs de

la roche provoque des inégalités de dilatations ou de contractions et par conséquent des déplacements relatifs aux limites des cristaux (Perami et al., 1992). Il en résulte des contraintes intergranulaires qui peuvent conduire à la fissuration de la roche notamment au niveau des joints de grains (Menéndez, 1999).

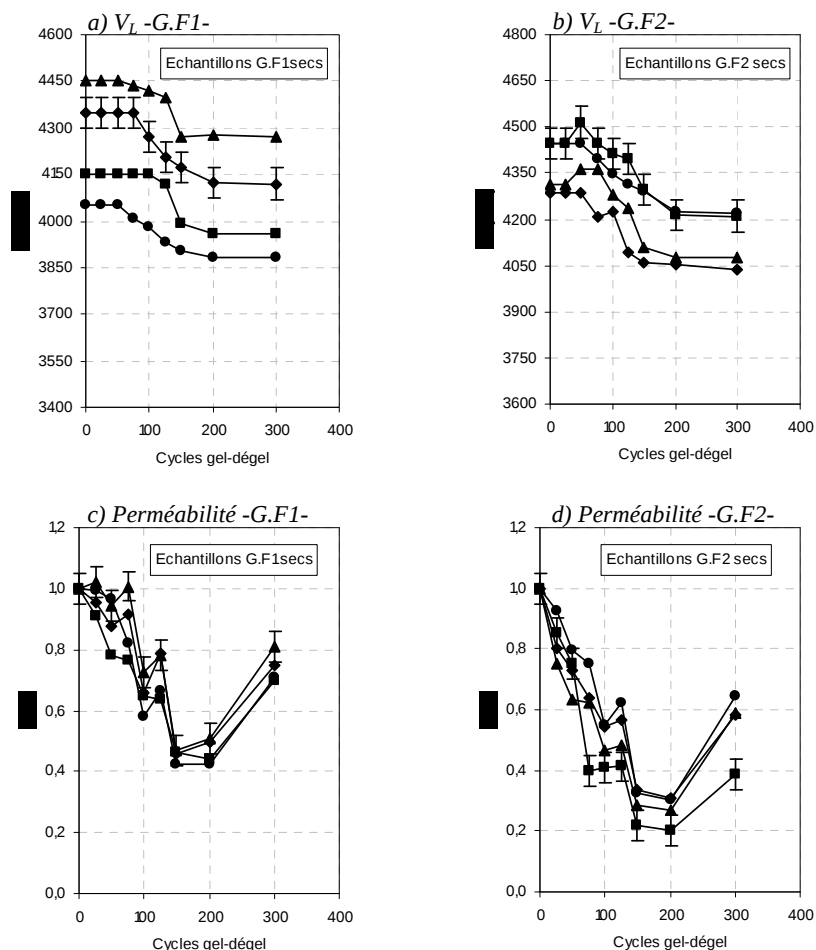


Figure 1. Evolution des propriétés physiques au cours de cycles thermiques entre -20°C et $+20^{\circ}\text{C}$. Echantillons initialement séchés à 105°C .

Les figures 1.c et 1.d représentent l'évolution de la perméabilité au cours des cycles thermiques. Contrairement à toute attente, on observe une diminution régulière de la perméabilité jusqu'à 150 cycles environ. La perméabilité ne commence à augmenter qu'au-delà de ce stade. La fissuration décelée par les mesures des vitesses d'ondes ultrasonores n'est donc pas une fissuration connectée et les diminutions de perméabilité traduisent plutôt une restriction des chemins

d'écoulement. Tout se passe comme si les refroidissements successifs des échantillons entraînaient chaque fois une contraction des grains minéraux et une fermeture partiellement irréversible du réseau poral existant. Parallèlement, de nouvelles microfissures se forment à cause des différences de propriétés thermiques des grains accolés. L'interconnexion de ces fissures n'intervient qu'au-delà d'un certain nombre de cycles et cela justifie l'augmentation de la perméabilité au bout de 200 cycles environ.

3.2. Effet des cycles thermiques sur les propriétés physiques : échantillons saturés (gel-dégel)

La [figure 2](#) représente l'évolution des vitesses de propagation des ondes longitudinales (V_L) et de la perméabilité (k). On note à nouveau une diminution nette de la vitesse de propagation des ondes longitudinales au cours des cycles successifs. Cette diminution est plus prononcée que celle observée sur les échantillons secs soumis au refroidissement, et elle est plus marquée pour les échantillons dont la porosité initiale est élevée (G.F2). Cette diminution s'explique bien par les tensions induites lors des cycles répétés de transformation de l'eau en gel.

Pour ce qui concerne la perméabilité, on note encore une fois une diminution marquée dès le début des cycles de gel/dégel et jusqu'à 200 cycles environ. La fissuration décelée par les mesures d'ultrasons ne se traduit pas nécessairement par un accroissement des transferts gazeux. Dans ces matériaux granitiques à faible porosité, les cycles de gel-dégel produisent des effets combinés d'ordre physique, thermique et chimique que nous schématisons comme suit : (i) lorsque la température baisse, les pores et les fissures engorgés d'eau sont soumis simultanément à deux phénomènes à effets opposés. D'un côté, le refroidissement tend à refermer les fissures par contraction globale de l'échantillon, et de l'autre, l'effet de gel qui tend à écarter les lèvres des fissures. En fonction de l'intensité relative de chacun de ces deux processus, on peut avoir soit une diminution soit une augmentation de la perméabilité ; (ii) d'autre part, la présence d'eau sous forme liquide dans la roche peut modifier la morphologie du réseau poreux par interaction chimique avec les minéraux constitutifs ([Serra et al., 1998](#)). Dans le cas des roches granitiques, la dégradation chimique des minéraux est un processus extrêmement long. Par contre, si des minéraux argileux sont déjà présents dans la roche, ils peuvent s'hydrater par adsorption d'eau, augmenter de volume et réduire l'espace poreux. L'interaction eau-roche peut également donner naissance à de nouveaux produits d'altération par cristallisation ou précipitation sous forme de gels minéraux ([Ganor et al., 2004](#)). Les phases néoformées constituent des obstacles à l'écoulement du gaz à travers le réseau poreux et par conséquent entraînent une diminution de la perméabilité. Nous avons pu vérifier sur plusieurs échantillons qu'une simple immersion dans l'eau pendant 4 mois pouvait entraîner une diminution de la perméabilité d'environ 20%. Celle-ci reste néanmoins bien plus faible que les diminutions de perméabilité provoquées par les cycles de gel-dégel.

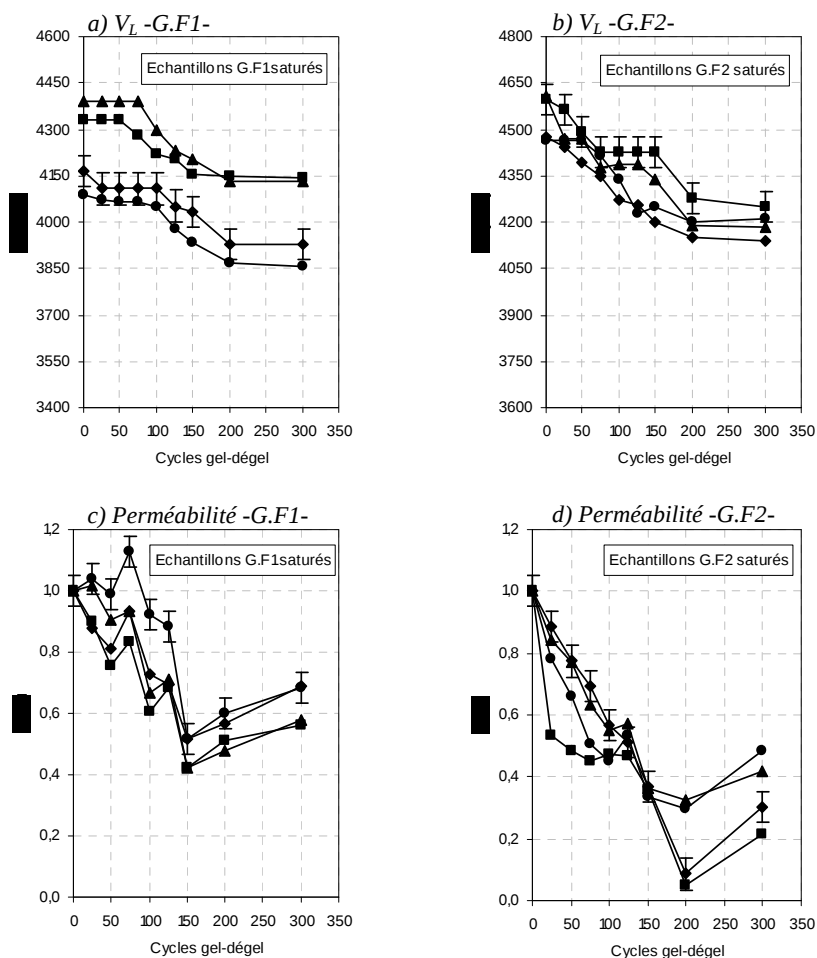


Figure 2. Evolution des propriétés physiques au cours de cycles thermiques entre -20°C et +20°. Echantillons initialement saturés à l'eau.

En résumé, les principaux mécanismes pouvant être mis en jeu lors des cycles de gel-dégel et affecter la microstructure de la roche sont : (i) des processus physiques de dilatation-contraction qui aboutissent à modifier la morphologie des fissures existantes et à créer de nouvelles microfissures ; (ii) des processus de gélification-pression qui induisent des contraintes mécaniques susceptibles d'accroître les décohésions entre les grains ; (iii) des processus de dissolution-précipitation qui peuvent modifier le réseau des circulations fluides. Au total, il s'agit donc d'un processus thermo-hydro-mécano-chimique qui se produit à l'échelle microstructurale avec des incidences attendues sur les caractéristiques mécaniques macroscopiques.

3.3. Evolution des propriétés mécaniques macroscopiques :

Les résultats obtenus par les essais de compression uniaxiale sont regroupés dans le [tableau 1](#). Pour les échantillons G.F2, la résistance mécanique n'est pas affectée par les processus de dégradation. Le module de Young subit par contre une diminution d'environ 16% pour les échantillons secs et 25% pour les échantillons initialement saturés à l'eau avant d'être soumis aux variations de température. Pour les échantillons G.F1, la diminution de la résistance en compression est également faible de 5,4% et 5,6% respectivement pour les échantillons secs et saturés. Pour le module d'élasticité longitudinal, la diminution est d'environ 21% et 19%. De même, l'analyse du processus de rupture des échantillons de roche, défini par l'analyse des courbes contrainte-déformations, contrainte perméabilité et des histogrammes acoustiques a montré que les valeurs des différents seuils de microfissuration restent quasi inchangées au terme des sollicitations de dégradation.

Tableau 1. Effet des variations de température sur les propriétés mécaniques, échantillons secs et échantillons saturés.

Ech.	Etat initial		300 cycles T°			
			Ech. Secs		Ech. saturés	
	σ_c (MPa)	E (GPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)
G.F1	211,8±1,2	64,0±2,0	200,3±5,5	50,2±2,2	199,8±6,1	51,3±2,9
G.F2	247,3±11,2	71,5±7,5	246,7±7,1	59,6±1,8	247,8±4,8	53,4±5,4

Pour les échantillons G.F2, dont la porosité initiale est la plus élevée, la diminution du module d'élasticité est plus significative (25%) dans le cas des échantillons initialement saturés à l'eau puis soumis aux variations de température entre -20°C et +20°C. Ce résultat s'explique par la présence de l'eau dans le réseau poreux qui accentue l'affaiblissement de la roche par ces actions mécano-physico-chimiques. Cependant, l'action de l'eau lors des variations de température dépend fortement de la porosité initiale de la roche, c-à-d du volume accessible à l'eau au sein de l'échantillon. Ainsi, on note que pour les échantillons G.F1, dont la porosité initiale est relativement faible, la diminution du module de Young est quasi identique lorsque les cycles sont réalisés en condition sèche ou saturée.

4. Conclusions

Dans cette étude nous avons exploré les effets des variations de température sur la microstructure et le comportement mécanique de deux roches granitiques. Les essais réalisés ont consisté à soumettre les échantillons de roche, initialement séchés ou saturés à l'eau, à des cycles répétés (300 cycles) de variations de température

entre -20°C et +20°C. Les résultats obtenus ont révélé les points suivants : (i) des modifications de la microstructure de la roche qui se traduisent principalement par une diminution de la perméabilité (k) et de la vitesse des ondes longitudinales (V_L). La diminution de V_L se fait probablement par la création de nouvelles microfissures et/ou l'extension de celles qui existaient déjà dans le matériau. Ceci est dû aux dilatations et contractions inégales et répétées des minéraux constitutifs de la roche. Par ailleurs, la diminution de la perméabilité met en évidence le rétrécissement du réseau poreux sous l'effet de la contraction globale des échantillons de mesure. Dans le cas où les échantillons sont saturés à l'eau puis soumis aux cycles de variations de température, l'évolution des propriétés physiques mesurées dépend de deux processus supplémentaires dus à la présence d'eau dans le réseau poreux : on note d'une part, la gélification qui peut engendrer des contraintes mécaniques susceptibles d'accroître les décohésions entre les grains et d'autre part, la dissolution et/ou la précipitation qui peuvent modifier le réseau des circulations fluides. (ii) les modifications microstructurales, mises en évidence par les techniques non destructives, entraînent une perte de performances mécaniques et notamment la diminution du module d'élasticité longitudinale. La résistance en compression ainsi que le processus de rupture ne sont pratiquement pas affectés par ce type de sollicitation.

5. Bibliographie

GANOR J., ROUEFF E., EREL Y., and BLUM J.D., (2004). The alteration kinetics of granite and its minerals-implications for comparison between laboratory and field dissolution rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.69 (3), pp. 607-621.

MENÉNDEZ B., DAVID C., and DAROT M., (1999). A study of the crack network in thermally and mechanically cracked granite samples using Confocal Scanning Laser Microscopy. *Phys. Chem. Earth (A)*, vol.24 (7), pp. 627-632.

PERAMI R., PRINCE W., ESPAGNE M., (1992). Influence de la microfissuration thermique de roches sur leurs propriétés mécaniques en compression. *Structure et comportement des géomatériaux*, Col. René Houpert, 10-11 sept., 1992, Nancy, pp. 77- 86.

SERRA H., DUDOIGNON P., and GUY C., (1998). Influence de la présence de smectite sur les mécanismes de colmatage de microfractures : exemple d'interactions eau/hawaïte, *C. R. Acad. Sci.*, Paris, pp. 93-99.