
Influence des différentes sollicitations thermiques sur la fissuration des bétons calcaires

Mallet Céline¹, Belayachi Naima¹, Marzak Mounir¹

¹ Université d'Orléans, Université de Tours, INSA Centre Val de Loire Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé Polytech Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans, France

celine.mallet@univ-orleans.fr - naima.belayachi@univ-orleans.fr- mounirelmarzak@hotmail.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de ce travail est de contribuer à comprendre le comportement irréversible des matériaux dû à l'endommagement en étudiant l'influence de la fissuration sur les propriétés physiques et de transfert des matériaux après différentes sollicitations thermiques. Les matériaux considérés ont été choisis avec une microstructure différente permettant de montrer également l'impact de la microstructure sur l'apparition de la fissure. Un béton à granulats calcaire a été comparé à une roche calcaire très poreuse. Les mesures de vitesse des ondes élastiques, de porosité et de conductivité thermique ont été effectuées sur les échantillons après le traitement thermique choisi ici comme sollicitation pour étudier la fissuration. Trois protocoles différents ont été utilisés : choc thermique, augmentation progressive à haute température et cycles thermiques répétés entre la température ambiante et une température plus importante. La comparaison montre une influence significative de l'augmentation de la densité de fissures sur les propriétés des deux matériaux avec une nette différence par rapport à leur microstructure.

ABSTRACT. The objective of this work is to contribute to understand the irreversible behaviour of the materials due to damage by studying the influence of the crack on the physical and transfer properties after different thermal treatments. The considered materials are chosen with different microstructures in order to investigate its influence on the crack nucleation. A limestone concrete has been compared to a very porous natural limestone. The measurement of elastic wave velocities, porosity and thermal conductivity were made on the samples after the heat treatment. Three different protocols were considered: thermal shock, gradual increase at high temperature and repetitive thermal cycles between room and higher temperature. The comparison shows a significant influence of the increase of the crack density on the properties of the two materials with a huge difference due to the microstructure.

MOTS-CLÉS : fissuration, porosité, choc thermique, cycles de température, béton-calcaire, pierre calcaire.

KEY WORDS: crack, porosity, thermal shock, temperature cycles, limestone concrete, limestone.

1. Introduction

Les matériaux de constructions des ouvrages et plus particulièrement les bétons, subissent différentes transformations parfois irréversibles comme la fissuration sous des sollicitations mécaniques, hydriques ou encore thermiques. Cet endommagement peut compromettre la stabilité, la pérennité et la durabilité des ouvrages. Il est donc nécessaire de comprendre la fissuration et son influence sur le comportement global des matériaux, notamment les conditions de nucléation des fissures. Face aux différents enjeux d'utilisation, l'instabilité thermique est prise en compte dans la réglementation des études. Cependant, la compréhension du phénomène est incomplète et représente une importance capitale pour améliorer cette réglementation [MIN 14]. En plus des hautes températures dans le cas d'un incendie, le changement brutal de température (chaud-froid) est également à l'origine d'une propagation de fissure importante dans les matériaux [OUG 11].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des sollicitations thermiques sur la fissuration au travers de différentes propriétés des matériaux. Nous considérons un béton à granulat calcaire, et une pierre-calcaire (Tuffeau), dans le but de comparer un matériau naturel et artificiel d'une part, et d'autre part pour examiner l'effet de la microstructure sur l'apparition de fissure [NAS 09]. Les trois traitements thermiques utilisés ont été choisis pour examiner l'effet d'un choc thermique brutal, d'une augmentation progressive de température en suivant la courbe normalisée et un changement cyclique de température. Après le traitement thermique, des mesures de propriétés géophysiques (vitesse d'ondes élastiques, porosité et conductivité thermique) ont été effectuées.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Les matériaux de l'étude

Deux matériaux calcaires à microstructure différente ont été utilisés dans cette étude. Le premier est un matériau béton-calcaire (BC), élaboré au laboratoire à base de granulats calcaires avec un rapport eau ciment de 0,5. Le second est un matériau naturel (le Tuffeau) qui est une pierre calcaire très poreuse (initialement de 46 %). La microstructure est donc très différente pour les deux matériaux : pour le premier elle est caractérisée par une matrice (pâte de ciment) dans laquelle sont noyés les grains de sable et de calcaire ; pour le second, c'est une microstructure à grains avec une dominance de calcite.

2.2. Les protocoles thermiques

Trois protocoles ont été choisis pour les sollicitations thermiques. Le premier est un test de choc thermique [OUG 11] (Figure 1-a). Les échantillons subissent tout d'abord un échauffement lent dans une étuve jusqu'à une température maximale maintenue constante pendant 18h et sont plongés instantanément dans l'eau à 20°C. Quatre températures ont été considérées (70, 105, 200 et 800°C). Le second protocole consiste à un changement lent de température entre 20°C et 180°C de manière cyclique (Figure 1-b). Le troisième protocole, représente une augmentation progressive à 800 °C en respectant la vitesse de montée en température de la courbe de température normalisée (ISO 834-1) puis une descente progressive aussi (Figure 1-c).

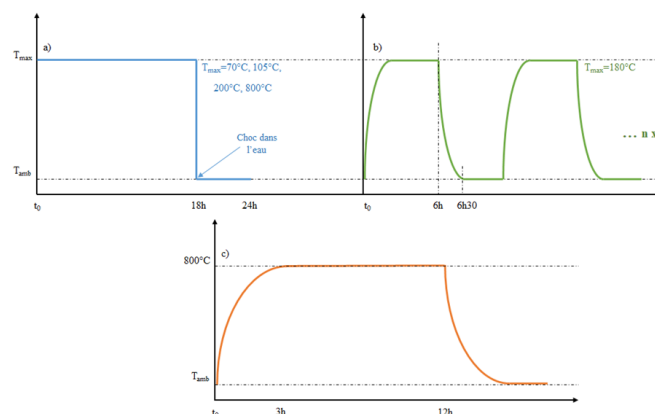


Figure 1 : Les différents protocoles thermiques : (a) choc thermique, (b) cycles thermiques répétitifs, (c) augmentation progressive à haute température.

2.3. Mesures réalisées

Les vitesses des ondes élastiques P et S sont mesurées en utilisant des capteurs piézoélectriques avec un contact parfait avec la surface des échantillons. Un capteur génère une onde à la fréquence de 0,15 MHz qui traverse l'échantillon et est enregistrée par un capteur situé sur la face opposée. Le temps de propagation de l'onde élastique est mesuré entre les capteurs émetteur et récepteur. La vitesse des ondes est ensuite calculée en prenant en compte la distance entre les deux capteurs. La mesure du temps est réalisée avec une précision de $\pm 1 \mu s$. Ces mesures permettent d'obtenir une estimation de la description du réseau de fissure dans le matériau. En effet grâce à la théorie des milieux effectifs, le paramètre clé de l'endommagement, la densité de fissure, est déterminée à partir des modules élastiques par les relations suivantes [GUE 11] :

$$\frac{K_0}{K} = 1 + \frac{\rho_c}{1-2\nu_0} H \left(1 - \frac{\nu_0}{2}\right) \quad (1)$$

$$\frac{G_0}{G} = 1 + \frac{\rho_c}{1+\nu_0} H \left(1 - \frac{\nu_0}{5}\right)$$

Avec, ν_0 , K_0 , G_0 , les coefficients de Poisson, modules de rigidité et de cisaillement du matériau initial en fonction de la vitesse des ondes V_p et V_s , tel que :

$$G = \rho V_s^2$$

$$K = \rho V_p^2 \left(\frac{4}{3}\right) G \quad \text{et} \quad H = \frac{16(1-\nu_0^2)}{9 \left(1 - \frac{\nu_0}{2}\right)} \quad (2)$$

La conductivité thermique des matériaux a été mesurée à l'aide de la technique du fil chaud en utilisant le conductimètre FP2C de NEOTIM. Pour chaque cas, la valeur moyenne de la conductivité est calculée à partir de 5 à 10 mesures.

Enfin, la porosité accessible à l'eau a été déterminée en considérant la masse volumique apparente et réelle des matériaux avec la mesure de la masse sèche, la masse à l'état saturé, et la masse de l'échantillon immergé dans l'eau. Les échantillons sont préalablement séchés dans une étuve à 60°C jusqu'à stabilité de la masse (0,01 g entre deux mesures successives). La saturation des échantillons est réalisée après leur mise sous vide dans un dessiccateur à l'aide d'une pompe.

3. Résultats et Discussion

Sur la figure 2, la vitesse des ondes est présentée en fonction des différentes températures des trois protocoles thermiques. À mesure que l'importance du traitement thermique augmente, on remarque que les vitesses diminuent pour les deux matériaux. Cette diminution traduit l'apparition d'un endommagement. Les chocs thermiques présentent une diminution assez lente des vitesses jusqu'à 200°C. Les cycles thermiques semblent avoir un effet plus concret. En effet, la variation des vitesses est plus visible de 10 à 20 cycles puis à 30 (en particulier pour les ondes P). Contrairement à notre intuition, ce n'est pas le choc thermique à 800°C qui amène au plus fort endommagement mais le traitement progressif à cette même température. Ceci semble indiquer que même à faible vitesse de refroidissement, l'endommagement peut-être très important. Cette remarque est corrélée avec le fait que les cycles progressifs de chauffe et refroidissement amènent à un endommagement équivalent voir plus important que lors d'un choc thermique à température équivalente.

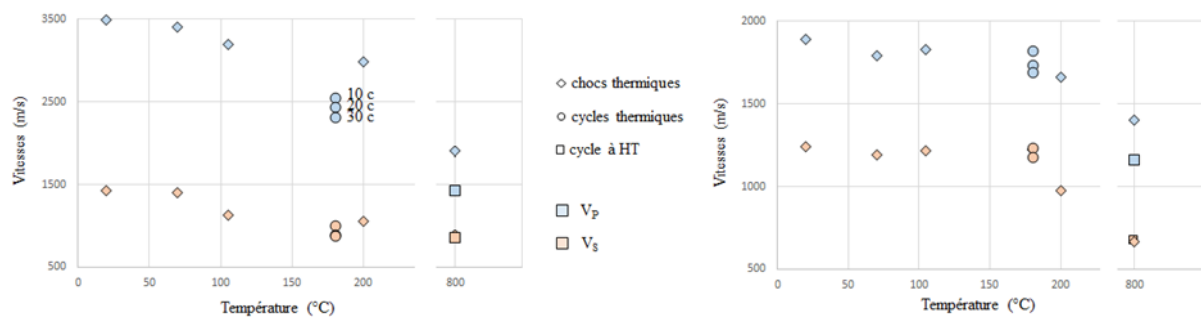


Figure 2 : Vitesses des ondes P et S mesurées sur le béton-calcaire (à gauche) et le Tuffeau (à droite) pour les trois protocoles thermiques.

La Figure 3 montre l'évolution de la conductivité thermique et de la porosité en fonction de la densité de fissure. On remarque que l'augmentation de la densité de fissure est corrélée avec la diminution de la conductivité thermique. Ceci traduit le lien entre l'augmentation du nombre de fissure et de la connectivité du réseau de fissure dans son ensemble. Cependant, la densité de fissure n'augmente avec la porosité que pour le béton calcaire. Le Tuffeau présente un comportement différent et peu intuitif à priori : la porosité diminue avec l'augmentation de la densité de fissure. Notre interprétation est liée d'une part à l'ouverture des fissures qui ne doit pas être suffisante dans le Tuffeau pour laisser passer l'eau et d'autre part à la microstructure du béton qui permet à de plus nombreuses et grandes fissures de se créer.

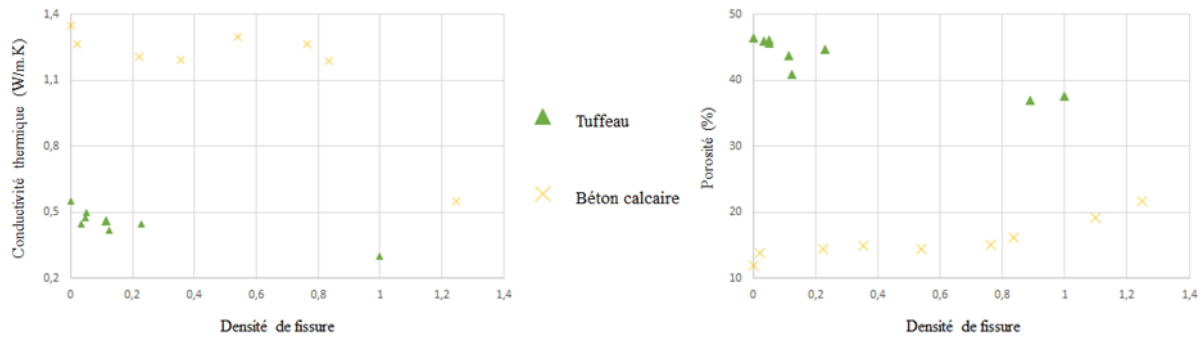


Figure 3 : Evolution de la conductivité thermique et de la porosité en fonction de la densité de fissure.

4. Conclusion

Les résultats ont mis en évidence l'importance de la répétition des cycles de température dans l'endommagement des matériaux en comparaison des chocs thermiques. On a aussi remarqué l'augmentation de la porosité et la diminution de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation de la densité de fissure permettant de montrer la connectivité du réseau de fissures. Il y a cependant une différence de comportement que l'on a attribué à une différence d'ouverture de fissures qui serait moins importante dans le cas du Tuffeau comparé au béton à granulats cimentés.

Des observations, non présentées ici, de microstructures ont été réalisées et semblent valider cette interprétation. En effet des fissures plus larges et plus nombreuses ont été observées sur les échantillons de béton à traitement thermique équivalent. Cette dernière observation traduit l'importance de la microstructure sur le comportement et les propriétés de transport des réseaux de fissures.

5. Bibliographie

[GUE 11] GUEGUEN Y., KACHANOV M., « Effective elastic properties of cracked rocks-an overview », In *Mechanics of crustal rocks*, 2011, p. 73-125.

[MIN 14] MINDEGUIA J-C., CARRE H., PIMIENTA P., LaBORDERIE C., « Experimental discussion on the mechanisms behind the fire spalling of concrete », *Fire and Materials*, Wiley-Blackwell, 2014, Article first published online, <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2254>.

[NAS 09] NASSERI M. H. B., SCHUBNEL A., BENSON P. M. and YOUNG R. O., « Common evolution of mechanical and transport properties in thermally cracked Westerly granite at elevated hydrostatic pressure », *Rock Physics and Natural Hazards*, 2009, p. 927-948.

[OUG 11] OUGIER-SIMONIN A., GUEGUEN Y., FORTIN J., SHUBNEL A. and BOUYER F., « Permeability and elastic properties of cracked glass under pressure », *Journal of Geophysical Research*, 2011, p. 116 (B7).