

A Correlation between P-wave velocity and thermal conductivity of heterogeneous porous materials

Corrélation entre la vitesse d'onde P et la conductivité thermique des matériaux hétérogènes et poreux

A. Boulanouar^{1*}, A. Rahmouni¹, M. Boukalouch¹, Y. Géraud², I. El Amrani El Hassani³, M. Harnafi³ and M.J. Sebbani³

¹Laboratoire de Thermodynamique, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Mohamed V, B.P. 1014, Rabat, Maroc (* Email : cocanouar@gmail.com)

²Université de Strasbourg, EOST, Institut de physique du globe, 1 rue Blessing, F- 67084 Strasbourg Cedex, France

³Laboratoire de Recherche sur les Géomatériaux, Institut Scientifique, Université Mohamed V, B.P. 703 Rabat, Maroc

Abstract. In the present study, the petrophysical properties of five different rocks have been measured and analyzed. This is the thermal conductivity, P-wave velocity and porosity. The methodology to estimate the thermal conductivity is to impose heat flux unidirectional on a sample and measure the temperature difference across the sample. The ultrasonic testing is based on the measurement of propagation time of a P-wave in the longitudinal direction. The porosity is measured by the mercury porosimetry technique, based on the measurement of the volume of mercury intruded into the rock under different pressures (mercury intrusion). The results have been shown a direct effect of porosity on thermal conductivity and P-wave velocity. We have found good relationship between the petrophysical properties such as P-wave velocities versus porosity and P-wave velocities versus thermal conductivity coefficient. The experimental results have been then compared with theoretical models available in the literature. These results, consistent with theory, show the possibility of estimating the thermal conductivity from the P-wave velocity and the use of non-destructive methods.

Résumé. Dans ce travail, des propriétés pétrophysiques de cinq roches différentes ont été mesurées et analysées. Il s'agit de la conductivité thermique, la vitesse de propagation d'onde P et la porosité. En ce qui concerne la conductivité thermique, on impose à un échantillon un flux de chaleur unidirectionnel et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Le test ultrasonique est basé sur la mesure du temps de propagation d'une onde P dans le sens longitudinal. La porosité est mesurée par la technique de porosimétrie au mercure, basée sur la mesure de la quantité de mercure insérée dans les pores d'une roche sous différentes pressions (intrusion de mercure). Les résultats obtenus montrent un effet direct de la porosité sur La

conductivité thermique et la vitesse d'onde P. La relation entre La conductivité thermique et la vitesse d'onde P est étudiée. Cette relation apparaît quasi-linéaire. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux de plusieurs modèles théoriques et d'autres résultats expérimentaux présentés dans la littérature. Ces résultats, conformément à la théorie, montrent la possibilité d'estimer la conductivité thermique à partir de la vitesse d'onde P et par l'utilisation des méthodes non destructives.

1 Introduction

Les matériaux d'origine naturelle (roches, monuments, sols, composites) sont des milieux poreux, dont la microstructure présente une grande diversité. Ils sont constitués d'une phase solide généralement hétérogène et une phase poreuse qui peut être totalement ou partiellement saturée par un ou plusieurs fluides. L'étude du rôle de la porosité, de la conductivité thermique et de la vitesse des ondes P dans ces milieux poreux s'avère fondamentale pour des applications comme la géophysique de la subsurface et des réservoirs, la sismologie et le domaine de la construction. De nombreux travaux ont montré que la conductivité thermique d'une roche poreuse dépend essentiellement de la composition minéralogique, la porosité, la présence des fluides remplissant les pores; et de la température et la pression [1]. La porosité et la conductivité thermique jouent un rôle important dans les propriétés de transfert des interactions fluide-roche et pour caractériser les matériaux de construction. La compréhension de la relation entre ces deux paramètres pourrait être un bon moyen pour comprendre les interactions fluide-roche entre la microstructure et de caractériser la porosité d'un matériau. La méthode TCS (Thermal Conductivity Scanning) est une technique utilisée pour des mesures thermo-physiques. Des études théoriques et expérimentales ont été effectuée sur cette méthode [2, 3]. Elle est caractérisée par la mesure non destructive des propriétés thermiques d'un grand nombre de minéraux et de roches. La caractérisation des matériaux rocheux par des méthodes ultrasoniques est couramment utilisée. La vitesse de propagation des ondes ultrasonores est devenue une des principales techniques utilisées pour qualifier l'état des pierres naturelles du point de vue homogénéité et degré d'altération [4]. R. Ezzdine [5] a appliqué cette mesure sur des sculptures en calcaire, introduisant ainsi une nouvelle méthode non destructive dans le domaine du diagnostic et de la conservation des pierres naturelles. L'étude de la propagation des ondes de compression et de cisaillement dans un matériau à l'état sec et saturé permet d'évaluer les propriétés physiques des matériaux tels que sa porosité, son état de fissuration et ses propriétés élastiques (module d'Young E , coefficient de Poisson ν) dans le cadre de modélisation de la propagation des ondes. Pour les roches, on s'intéresse souvent à la propagation des ondes de compression (ondes P) et des ondes de cisaillement (ondes S). Pour une onde P, le mouvement vibratoire a lieu suivant la direction de propagation et affecte le volume de la roche. Pour une onde S, le mouvement vibratoire se propage dans un plan normal à la direction de propagation, elle est plus lente que l'onde P et ne se propage pas dans l'eau. L'onde P et l'onde S sont caractérisées par leurs vitesses V_p et V_s respectivement (vitesse primaire et vitesse secondaire d'après l'ordre de leur réception) et leur atténuation.

L'objectif de ce travail est d'étudier la porosité, la conductivité thermique et la vitesse des ondes P des roches utilisées dans le domaine de construction, de comprendre la relation entre les propriétés thermiques et les milieux poreux et d'étudier la corrélation entre la vitesse des ondes P et la conductivité thermique. Nous avons utilisé la méthode de porosimétrie au mercure pour déterminer la porosité des échantillons et la méthode TCS pour caractériser la conductivité thermique de ces échantillons. La vitesse des ondes P des échantillons est déterminée par un appareil à ultrasons.

2 Matériels et Méthodes

L'étude a porté sur cinq variétés de pierres construction de dimension 5.5x5.5x11 cm³ extraites de différentes régions du Maroc. La localisation des échantillons sélectionnés est indiquée sur le tableau 1. Des mesures de la porosité, de la conductivité thermique, et de la vitesse des ondes P ont été effectuées sur ces échantillons. Ces mesures permettront de mieux comprendre la relation entre les propriétés pétrophysiques des matériaux utilisés dans la construction.

Tableau 1: Localisation et type de roches testées

Code de l'échantillon	Type de roches	localisation
1	Calcarénite gris-bège	Taza
2	Marbre noir	Khenifra
3	Travertin	Meknès-Fès
4	Granite	Agadir
5	Biocalcarénite	Rabat-Salé

2.1 Porosimétrie au mercure

La méthode de porosimétrie à haute pression est basée sur la dépression capillaire de mercure, où l'angle de mouillabilité est supérieur à 90° et la pénétration de mercure dans les pores par l'effet de la pression. Elle permet d'estimer la taille des pores et la porosité en mesurant le volume de mercure injecté et la pression d'injection. La relation entre la pression d'injection et le rayon de pore est exprimé par l'équation de Washburn [6]:

$$P = \frac{2\sigma \cos \varphi}{R} \quad (1)$$

avec P : pression d'injection, R rayon de pore, σ tension superficielle du mercure (0,486 N/m à 25°C), φ angle de raccordement mercure-vapeur de mercure à la surface minérale ($\varphi = 140^\circ$). Les porosimétries au mercure ont été réalisées sur un appareil MICROMERITICS PORE SIZER 9320 pouvant couvrir approximativement des accès aux pores compris entre 400 et 0.03 μm soit des pressions allant de 0.001 à 300 MPa. La mesure s'opère en deux temps: la mesure basse pression (0,001-0,150 MPa) réalisée manuellement, et la mesure haute pression (0,150-300 MPa) réalisée automatiquement.

2.2 Conductivité thermique

La technique TCS permet d'éliminer l'effet de résistances thermiques de contact. Elle est basée sur la variation de température de surface de l'échantillon suite à un apport de chaleur connu et contrôlé [2]. Le dispositif expérimental est identique à celui utilisé par M. Rosener [6]. L'appareil de mesure se présente sous la forme d'un bloc mobile, composé de deux capteurs de température sensibles aux radiations électromagnétiques et d'une source de chaleur, aligné parallèlement à l'axe de déplacement, de telle sorte qu'il soit possible de mesurer la température de l'échantillon avant et après échauffement. Ce bloc se déplace à vitesse constante près de la surface de l'échantillon, le long d'une ligne de mesure, et permet ainsi d'obtenir un profil de conductivité thermique. Les deux capteurs de température (T1 et T2) permettent de mesurer la différence de température due à l'apport d'énergie. La distance entre la source et le capteur thermique mesurant la température de l'échantillon après échauffement, ainsi que la vitesse de déplacement sont constantes, il est donc possible d'exprimer l'augmentation de température au point x, $\theta(x)$ en fonction de la conductivité thermique :

$$\theta(x) = \frac{q}{2\pi x \lambda} \quad (2)$$

avec q la puissance de la source, x la distance entre la source et le capteur thermique et λ la conductivité thermique au point de mesure [2]. Pour obtenir une valeur absolue de la conductivité thermique du matériau analysé, il suffit d'aligner l'échantillon et un standard de conductivité thermique connue λ_{std} . La conductivité thermique du matériau sera déterminée à partir de λ_{std} et du rapport des différences de température :

$$\lambda(x) = \lambda_{std} \frac{\theta_{std}}{\theta(x)} \quad (3)$$

La préparation des échantillons est simple. Afin d'éviter une variation d'absorption de chaleur due aux variations de couleur à la surface de l'échantillon, une couche de peinture noire est appliquée. De cette façon, le coefficient d'absorption de chaleur est maximum et homogène. La gamme des conductivités mesurables est comprise entre 0,2 et 70 W/m.K, et l'erreur de mesure est inférieure à 3%. Pour réaliser une mesure, il suffit de positionner l'échantillon ainsi que les deux standards sur l'appareil, la mesure proprement dite étant intégralement pilotée par ordinateur.

2.3 Vitesse des ondes P

La mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un matériau, telles que les pierres, est un moyen d'investigation complémentaire des essais mécaniques présentant l'avantage d'être non-destructif [7]. La propagation des ondes dans les solides est basée sur les théories de l'élasticité qui relient efforts et faibles déformations. Ces ondes élastiques sont polarisées selon deux directions perpendiculaires en deux ondes planes : l'onde longitudinale de compression appelée onde primaire (onde P) représentant la vibration des particules parallèlement au sens de propagation de l'onde, et l'onde transversale de cisaillement appelée onde secondaire (onde S) représentant la vibration des particules perpendiculairement au sens de propagation. Le principe de mesure repose sur la production d'un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur (transducteur) appliqué sur l'une des faces de l'échantillon à contrôler. Après avoir franchir une longueur de parcours (L) dans la roche, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur (transducteur) et la base de temps électronique permet d'afficher le temps de propagation des ondes ultrasonores (t). Dès que la valeur mesurée reste stable pendant 3 secondes, un bip retentit et la vitesse du son s'affiche. La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule :

$$V = \frac{L}{t} \quad (4)$$

Pour qu'il y ait un contact parfait entre la roches et les transducteurs, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé, et il est recommandé d'employer une pâte d'accouplement constituée de Kaolin et de glycérol entre les deux extrémités de roches et en prenant soin de vérifier que les transducteurs sont bien appliqués contre la surface à tester. Les transducteurs standards à 54 KHz sont étalonnés sur l'unité d'affichage qui doit être contrôlée par un essai d'étalonnage. Le coefficient de calibrage est marqué sur la barre étalon (20.6 μm).

3 Résultats et discussions

3.1 Porosité

La porosité contrôle tous les autres paramètres physiques de la roche (densité, perméabilité, conductivité thermique...). Elle correspond au rapport du volume total des pores sur le volume total de la roche. Dans la pratique, seule la porosité ouverte d'une roche est mesurable. L'espace aménagé entre les grains et par les microfissures est souvent comptabilisé avec le volume de la porosité ouverte. La porosimétrie au mercure est la méthode la plus largement utilisée; elle consiste à mesurer le volume de mercure susceptible d'être absorbé par une roche (par injection à haute pression sous vide). Dans ce travail, nous avons utilisé la porosimétrie au mercure. La roche de Rabat-Salé présente une forte porosité des roches sédimentaires (28 %). la calcarénite de Taza et le travertin de Meknès sont relativement moins poreux (10.58 et 5.26 %). Les granites d'Agadir et les marbres de Khénifra, présentent une porosité assez faible (respectivement 0,37 et 0,59%).

3.2 Conductivité thermique- Porosité

Les résultats expérimentaux montrent que la conductivité thermique des roches change sur une gamme significative et la saturation en eau produit une conductivité plus élevée. Les conductivités thermiques des échantillons secs varient de 1,036 à 2,979 W/m.K et celles des échantillons saturés en eau varient entre 2,083 et 3,008 W/m.K. Ces résultats sont en accord avec les résultats bibliographiques [1, 8]. Les résultats obtenus (figures 1 (a) et (b)), montrent que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la porosité. Des relations linéaires entre la conductivité et la porosité apparaissent sur les figures 1 (a) et (b). Cette corrélation entre les deux paramètres permet d'estimer la porosité d'un milieu.

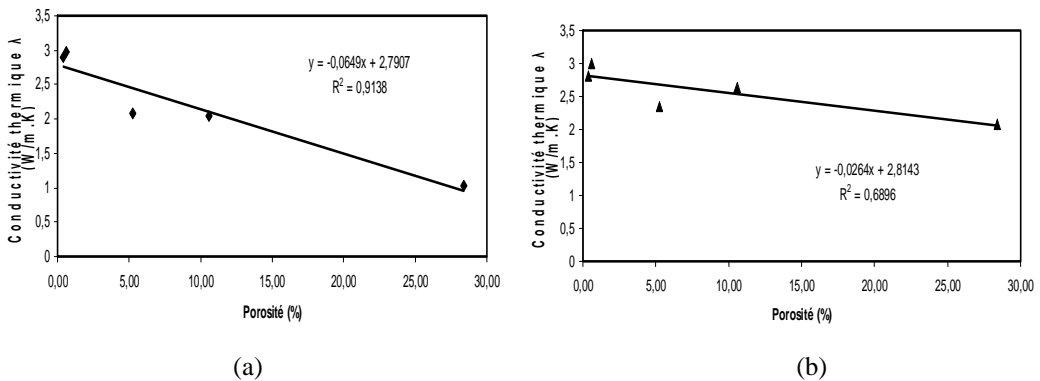


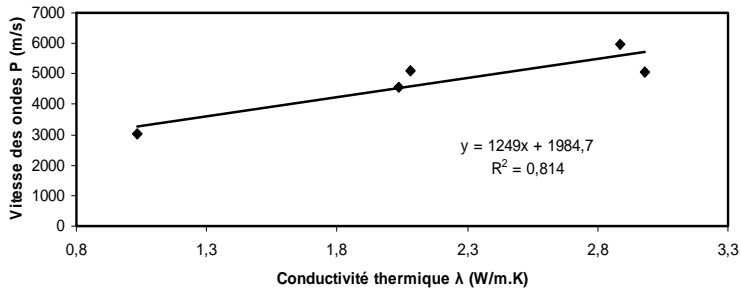
Figure 1: Variation de la conductivité thermique avec la porosité des échantillons:(a) secs et (b) saturés.

3.3 Vitesse des ondes P - Conductivité thermique

Les vitesses des échantillons sont mesurées à l'état sec et à l'état saturé. Pour les mesures à l'état sec, les éprouvettes sont séchées à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Par contre, l'état saturé des éprouvettes est obtenu en les immergeant graduellement dans l'eau. Les résultats obtenus pour la mesure de la vitesse des ondes P des échantillons secs varient de 3007 à 5960 m/s et celles des échantillons saturés en eau varient entre 2900 et 5212 m/s. Ces résultats sont en accord avec les résultats bibliographiques [9]. D'une manière générale, nous observons que la valeur la plus élevée de la vitesse de l'onde P est obtenue pour le Marbre noir de Khenifra et la valeur la plus faible est obtenue pour la biocalcarénite de Rabat-Salé.

Sur les figures 2 (a) et (b), on a représenté la relation entre la vitesse des ondes P et la conductivité des échantillons saturés et celle des échantillons secs. Cette relation apparaît quasi-linéaire de coefficient de régression $R^2 = 0,814$ à l'état sec et $R^2=0,9096$ à l'état saturé.

(a)



(b)

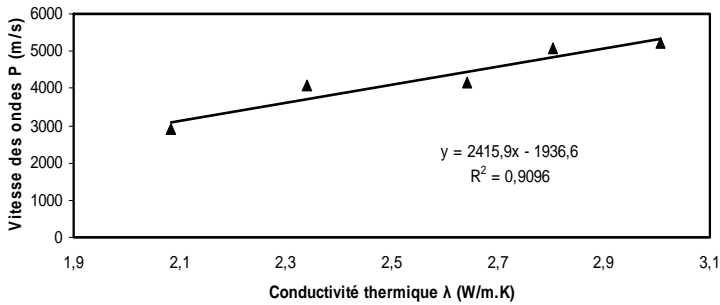
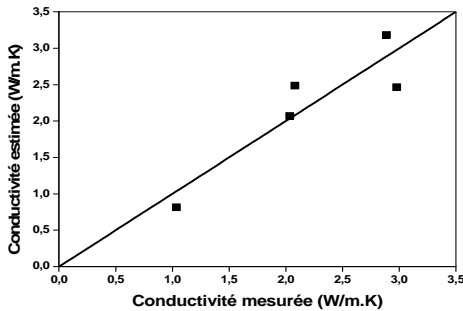
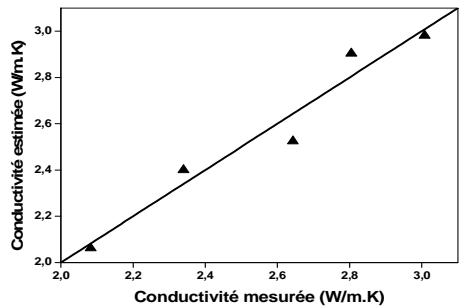


Figure 2: Vitesse des ondes P en fonction de la conductivité des échantillons:(a) secs et (b) saturés.

Les figures 3 (a) et (b) montrent les relations obtenues entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées de la conductivité thermique pour chaque échantillon. L'erreur de la valeur estimée est représentée par la distance de chaque point de données des courbes de la ligne diagonale 1:1. Un point situé sur la ligne indique une estimation précise, comme le montre les figures 3 (a) et (b).



(a)



(b)

Figure 3: Conductivité estimée, et Conductivité mesurée à partir de vitesse des ondes P des échantillons:(a) secs et (b) saturés.

4 Conclusions

Dans ce travail, des propriétés pétrophysiques de 5 échantillons ont été mesurées et analysées. Notre intérêt s'est porté sur des échantillons de roches extraites de différentes régions du Maroc afin de

rassembler des données individuelles sur chaque type de roche. Les résultats obtenus sur les vitesses d'onde P, la porosité et la conductivité thermique permettent de contribuer à la caractérisation de ces matériaux. Ainsi, la conductivité thermique des roches peut être estimée en utilisant des méthodes simples, non destructive telle que la vitesse des ondes P.

Remerciements

Ce travail réalisé, en collaboration avec nos partenaires de l'Institut Scientifique Rabat et ceux de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, entre dans le cadre du projet d'Action Intégrée Franco-Marocaine No. MA/07/168 entre l'université de Strasbourg et l'université Mohammed de Rabat.

Références

1. Clauser, C. and Huenges, E., Thermal conductivity of rocks and minerals, *Rock Physics and Phase Relations; A Handbook of Physical Constants*: Washington D.C., American Geophysical Union, p. 105-126 (1995)
2. Popov, Y., Pribnow, D., Sass, J.H., Williams, C.F & Burkhardt, H. Characterization of rock thermal conductivity by high resolution optical scanning, *Geothermics* , 253-276 **28** (1999)
3. F. Surma, Y. Géraud. Porosity and Thermal Conductivity of the Soultz-Sous-Forêts Granite. *Pure and Applied Geophysics* , pp: 1125–1136 **160** (2003)
4. A. Matthieu. Multiscale study of stone decay by salt crystallization in porous networks. *Thesis (PhD)*. Université de Cergy-Pontoise, France (2007)
5. R. Ezzdine. Endommagement des monuments historiques en maçonnerie. *Thesis (PhD)*. Université Bordeaux 1, France (2006)
6. M. Rosener.. Etude pétrophysique et modélisation des effets des transferts thermiques entre roche et fluide dans le contexte géothermique de Soultz-Sous-Forêts. *Thesis (PhD)*. Université Luis Pasteur, Strasbourg, France (2007)
7. E. Yasar, Y. Erdogan.. Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock & Mining Sciences* , p. 871-875 **41** (2004)
8. A. Rahmouni, Y. Géraud, A. Boulanouar, M. Boukalouch, A. Samaouali, I. El Amrani El Hassani, J. Sebbani. Influence de la microstructure et de la saturation en fluide sur la conductivité thermique des milieux hétérogènes et poreux. *1er Congrès de l'Association Marocaine de Thermique*, Settat 6-7 Mai (2010) Maroc
9. S. Kahraman, T. Yeken. Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity. *Bull Eng Geol Environ* 277–281 **67** (2008)