# Développement d'une méthodologie pour la mesure de la conductivité thermique des mortiers par la méthode fluxmétrique

## Siyimane Mohaine<sup>1,3</sup>, Frédéric Grondin<sup>1</sup>, Mohamed Rougui<sup>2</sup>, Ahmed Loukili<sup>1</sup>

RÉSUMÉ. L'évaluation de la conductivité thermique des matériaux cimentaires a gagné en importance, notamment au vu de l'introduction des bétons à propriété thermique, conjuguant performances thermiques et structurales pour la réalisation d'éléments ayant une contrainte thermique. Cette étude a pour but de mettre au point une procédure expérimentale pour la mesure de la conductivité thermique de mortiers à surface rugueuse, par la méthode du fluxmètre avec une instrumentation externe permettant de corriger les résistances de contact, et garantissant la meilleure répétabilité possible. Plusieurs éprouvettes de mortier de conductivité allant jusqu'à 2 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>1</sup> ont été préparées et séchées jusqu'à masse constante. Les mesures ont été effectuées à une température moyenne de 10°C avec une différence de température entre les plaques de l'appareil de 10°C. Pour une meilleure répétabilité, l'acquisition des températures doit se faire sur les plaques correctrices de résistance de contact et les éprouvettes doivent être séchées à la fin de chaque essai.

ABSTRACT. The evaluation of cementitious materials' thermal conductivity has gained more importance, especially with the introduction of concrete with a thermal property. These concretes combine thermal and structural performances for building elements that require a given thermal requirement. The aim of the study is to develop an experimental procedure for the measurement of rough-surface mortars' thermal conductivity. The measurements are made with a heat flow meter with an external instrumentation kit to correct interface thermal resistance with the best possible repeatability. Different mixes with thermal conductivity less than 2 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> were casted and tested at dried state. The tests were conducted at a mean temperature of 10°C with a temperature difference between the instrument's plates of 10°C. For an optimal repeatability, temperatures must be read on the two rubber interface sheets that aim to correct interface thermal resistance. The samples have to be oven-dried at the end of each test.

MOTS-CLÉS: conductivité thermique, fluxmètre, matériaux cimentaires, répétabilité.

KEY WORDS: thermal conductivity, heat flow meter, cementitious materials, reproducibility.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR-CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Nöe, 44300 Nantes, France

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Université Mohamed V-Agdal, Ecole Supérieure de Technologie, Salé, Maroc

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Edycem, Rue du Fléchet, 85600 Boufféré, France

L'intérêt technique et social grandissant pour l'efficacité énergétique des bâtiments a suscité un engouement pour l'étude des propriétés thermiques des matériaux de construction durant ces dernières années. La performance thermique de ces derniers est un facteur clé pour l'optimisation de l'efficacité énergétique du secteur de la construction et la réduction de l'émission des gaz à effet de serre [SCH 16]. Cette performance est souvent caractérisée par la conductivité thermique des matériaux. Ce paramètre est pris en compte lors de la conception des bâtiments, du calcul de leur consommation d'énergie ainsi que pour l'optimisation et calcul de leur efficacité énergétique. Les bétons et mortiers de ciment sont des matériaux complexes dont l'hétérogénéité se traduit de manière très claire sur leur conductivité thermique. On retrouve dans la littérature divers mélanges dont la conductivité peut aller de 0.7 à 2 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> [UYS 04; KIM 03]. Cette disparité est attribuée à plusieurs facteurs, principalement la teneur en granulats [GAO 14], les conditions de mesure (température ambiante et le taux d'humidité des éprouvettes) [FIA 06; TAO 13] et les méthodes de mesures. Il existe deux grandes familles de méthodes de mesure de la conductivité thermique suivant le régime thermique utilisé [DEG 77]: les méthodes dites stationnaires (plaque chaude gardée et fluxmètres) et les méthodes à régime transitoire. Ces dernières présentent l'avantage d'avoir un coût ainsi qu'un temps d'exécution de mesures relativement faibles. Cependant, l'interprétation des résultats pour des matériaux à forte hétérogénéité peut être délicate étant donné que l'incertitude des mesures ne descend pas en dessous de 10%. Les méthodes à régime stationnaire, malgré un temps de mesure plus conséquent pour l'établissement du régime permanent, présentent l'avantage de garantir des incertitudes de mesures acceptables ainsi qu'une bonne répétabilité. La méthode fluxmétrique présente l'avantage d'offrir une meilleure répétabilité pour des éprouvettes de grandes dimensions et avec un coût de temps d'exécution moindre. Cette qualité est très appréciée lors des contrôles de qualité industriels, où la meilleure répétabilité possible est recherchée pour détecter les écarts éventuels. La conductivité thermique des bétons et mortiers est en général mesurée par plaque chaude gardée. Les conditions de parfaite planéité et de minimisation de la rugosité des surfaces exposées rendent la préparation des éprouvettes de tels matériaux rugueux de nature délicate. De telles irrégularités peuvent induire des résistances thermiques de contact dans toute lame d'air existante sur les surfaces exposées.

La résistance thermique totale mesurée d'un échantillon est alors :

$$R_{totale} = e/\lambda + 2\delta T/q [m^2 K/W]$$

Où e représente l'épaisseur de l'échantillon,  $\lambda$  sa conductivité thermique,  $\delta T$  le gradient de température et q le flux. Pour des matériaux relativement conducteurs tels que le béton ou le mortier, les résistances thermiques de contact deviennent significatives et la résistance thermique acquise par l'appareil peut être erronée, induisant une mesure de conductivité thermique également fausse.

Dans cette étude, nous avons développé une méthodologie de mesure de la conductivité thermique des matériaux cimentaires en exploitant la méthode fluxmétrique augmentée de thermocouples externes et de plaques correctrices pour pallier les résistances thermiques de contact qui pourraient être induites. La méthodologie repose aussi sur une optimisation des conditions de séchage du matériau.

### 2. Procédure expérimentale

#### 2.1. Préparation des échantillons

L'étude a été réalisée sur des mortiers de ciment de différents rapports eau-sur-ciment (E/C) avec la même quantité de sable. Des éprouvettes prismatiques 30x30x8 cm³ pour les différents mélanges ont été préparées et mises dans des bacs remplis d'eau dans une chambre à 100% d'humidité relative jusqu'à l'âge de 28 jours. Par la suite, les éprouvettes ont été étuvées à 80°C pendant un mois puis à 105°C jusqu'à atteindre une masse constante. Les éprouvettes ont ensuite été gardées dans des enveloppes étanches jusqu'à la date de l'essai.

#### 2.2. Essai et paramètres de mesures

Les appareillages à fluxmètres sont en général capables de mesurer uniquement la résistance totale d'un échantillon [TLE 03]. Le signal Q [ $\mu$ V] émis par le fluxmètre est proportionnel au flux thermique q [W.m<sup>-2</sup>] traversant l'échantillon. Ce dernier est proportionnel à la différence de température  $\Delta T$  entre les deux plaques de l'appareil, et donc inversement proportionnel à la résistance thermique totale :

$$q = N(T).Q = \Delta T/(e/\lambda + 2R_{contact}) [W.m^{-2}]$$

où N(T) [W  $m^{-2}\mu V^{-1}$ ] est le facteur de calibration de l'appareil pour une température moyenne donnée (( $T_{chaude} + T_{froide}$ )/2). C'est la quantité de flux nécessaire pour créer  $1\mu V$  de signal électrique de sortie du

265

fluxmètre. De ce faitugonhone la Mantanae-theumitjue 21 encoin 201 devient loghite 30 (20 train): celle des mortiers, les thermocouples internes des deux plaques du fluxmètre ne peuvent être utilisés pour acquérir correctement la différence de température le long de l'échantillon. Une solution proposée est de monter des thermocouples externes entre les surfaces concernées et de fines plaques de 2 mm en silicone comme montré sur la Figure 1. Des conductivités thermiques allant jusqu'à 2 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> peuvent être mesurées.



Figure 1. Disposition du fluxmètre avec thermocouples externes

Dans cette etude deux configurations ont ete evaluees : les thermocouples sont soit montes sur les deux plaques de silicone, soit directement sur les surfaces des éprouvettes de mortier. Les mesures ont été effectuées à une température moyenne de 10°C avec une différence de température de 10°C imposée entre les plaques. La masse des éprouvettes a été contrôlée à la fin de chaque essai pour prendre en compte des éventuelles reprises d'humidité.

#### 3. Résultats et discussions

Les résultats des mesures des deux configurations sont reportés dans le Table 1et le Table 2. Dans les deux cas, on constate que la différence de température réelle le long des éprouvettes, acquise par les thermocouples, est inférieure à la différence de température. Le gradient mesuré qui traverse les éprouvettes lorsque les thermocouples sont montés sur les surfaces est nettement plus faible que lorsque les thermocouples sont montés sur les plaques, d'où une conductivité thermique plus importante ( $\lambda$  est inversement proportionnelle à  $\Delta T_{acquis}$ ). Le gradient de température est également plus faible pour les éprouvettes plus denses dans les deux configurations.

<b>Table 1.</b> Mesures de conductivité à $T_{mov}=10^{\circ}C$ et $\Delta T_{impo}$	sá=10°C avec thermocouples montés sur l'éprou	vette
--	---	-------

Eprouvette	Densité sèche (kg/m³)	$T_{\text{moyenne}}$ (°C)	$\Delta T_{acquis}$ (°C)	λ (W/m.K)	% différence moyenne
C1	1925.14	9.79	5.27	1.53127	2.6%
C1	1925.14	10.29	3.08	1.61234	-2.6%
C2	1913.19	9.47	3.76	1.66039	-2.0%
C2	1913.19	10.15	5.16	1.59369	2.0%
C3	1728.89	9.12	6.79	1.20942	-0.03%
C3	1728.89	9.46	6.16	1.20869	0.03%

**Table 2.** Mesures de conductivité à  $T_{mov}=10^{\circ}C$  et  $\Delta T_{impos\acute{e}}=10^{\circ}C$  avec thermocouples montés sur les plaques

Eprouvette	Densité sèche (kg/m³)	$T_{\text{moyenne}}$ $(^{\circ}C)$	$\Delta T_{acquis}$ (°C)	λ (W/m.K)	% différence moyenne
C3	1728.89	9.72	6.57	1.05477	-0.55%
C3	1728.89	9.07	7.08	1.04314	0.55%
C4	1957.22	9.5	5.68	1.32573	2.16%
C4	1957.22	9.55	6.47	1.38438	-2.16%
C5	2021.81	11.01	6.16	1.51724	1.36%
C5	2021.81	9.74	6.03	1.55898	-1.36%

En termes de répátabilité glatha-le 3 montage de 20 thanno 2017 les 1918 que 20 arrind trices est d'environ  $\pm 2\%$  contre  $\pm 3\%$  pour un montage sur l'éprouvette. De plus, la différence de température minimale conseillée aux bornes d'une éprouvette pendant un essai de conductivité en régime permanent est de 5°C. Cette condition est toujours vérifiée en montant les thermocouples sur les plaques alors que des différences de 3°C sont mesurées pour des éprouvettes à densité plus élevée lorsque les thermocouples sont montés directement sur l'éprouvette. Pour cette étude, la différence de température imposée est 10°C puisque c'est généralement l'ordre de grandeur utilisé pour des matériaux relativement conducteurs. Toutefois, il serait intéressant d'étudier l'effet d'un  $\Delta T_{imposé}$  plus important (15°C ou 20°C) dans les deux configurations sur la conductivité thermique, la répétabilité des mesures et le gradient mesuré aux bornes des échantillons.

Les mesures ont été effectuées à  $T_{moy}$ =10°C suivant les préconisations de la norme NF EN 12664. Cependant, cette température de mesure est propice à une migration d'humidité, surtout si la durée de l'essai est importante. Pour les résultats obtenus, la durée d'essai pour les différentes éprouvettes varie entre 1 h et 3 h. Un contrôle de masse à la fin des essais a montré que le gain en masse des éprouvettes était d'environ 10 g, soit 1,4 kg/m³ de plus par rapport à la densité sèche. Il est donc nécessaire d'étuver les éprouvettes à la fin de chaque essai jusqu'à atteindre la masse sèche pour garantir les mêmes conditions de mesure.

#### 4. Bibliographie

- [DEG 77] DEGIOVANNI A, "Conductivité et diffusivité thermique des solides, Techniques de l'ingénieur". *Traité Mesures et Contrôle, Fiche n° R 2 850.*, 33(0), 1977.
- [FIA 06] FIALA, L. & BAYER, P., "Effect of Moisture on the Thermal Conductivity of a Cementitious Composite.", 27(4), 2006, pp.1228–1240.
- [GAO 14] Gao, T. et al., Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 2014, pp.130–136.
- [KIM 03] KIM, K.-H. et al., "An experimental study on thermal conductivity of concrete". *Cement and Concrete Research*, 33(3), 2003, pp.363–371.
- [SCH 16] SCHIAVONI, S. et al., "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 2016, pp.998-1011.
- [TAO 13] TAOUKIL, D. et al., "Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite." *Construction and Building Materials*, 48, 2013, pp.104–115.
- [TLE 03] TLEOUBAEV, A. & BRZEZINSKI, A., "Combined Guarded-Hot-Plate and Heat Flow Meter Method for Absolute Thermal Conductivitu Tests Excluding Thermal Contact Resistance." *Proceedings of the Twenty-Seventh International Thermal Conductivity Conference*. Knoxville, Tenessee, USA, 2003, In H. Wang & W. Porter, eds. pp. 502–509
- [UYS 04] UYSAL, H. et al., "The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete." *Cement and Concrete Research*, 34(5), 2004, pp.845–848.