

# Caractérisation thermique de matériaux très poreux par la méthode du fil chaud

Hussein Humaish<sup>(1,2)</sup>, Bastien Ruet<sup>(1)</sup>, Laurent Marmoret<sup>(1,\*)</sup>, Hassen Beji<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Université de Picardie Jules Verne, LTI, IUT, Département Génie Civil, Avenue des Facultés, 80025 Amiens Cedex 01,

<sup>2</sup>Foundation of Technical Institutes, Technical Institute, Depart. of Surveying, Al-Kut (Iraq)

(\* Auteur correspondant : laurent.marmoret@u-picardie.fr)

## Résumé

La technique de la sonde fil chaud est utilisée pour déterminer la conductivité thermique des matériaux isolants du bâtiment. Après avoir validé la méthode de mesure sur le glycérol (milieu fluide, sans résistance de contact et sans porosité), nous l'avons appliqué à des matériaux plus complexes (milieux solides, avec résistance de contact et à fortes porosités) tels que les isolants thermiques du bâtiment. Comsol Multiphysics® a ensuite été utilisé pour étudier l'influence de paramètres tels que les constituants de la sonde, la résistance de contact et les propriétés thermiques des matériaux.

## Mots clés

Caractérisation thermique, fil chaud, méthode transitoire, milieux poreux, isolants, bâtiment

## Nomenclature

$Bi$	nombre de Biot, -	$R_c$	résistance de contact ( $= 1/H$ ), $m^2.K.W^{-1}$
$C_p$	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$t$	temps d'essai, $s$
$Fo$	nombre de Fourier, -	$T$	température, $K$
$H$	conductance de la lame d'air, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
$m$	masse de la sonde, $kg$	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$Q$	puissance électrique linéique, $W.m^{-1}$	$\gamma$	constante d'Euler (0.5772157...)
$r$	rayon de la sonde, $m$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Les pays industrialisés ont engagé depuis la crise énergétique de 1970 une politique d'économie d'énergie qui a provoqué un développement considérable du secteur de l'isolation thermique dans la construction. Il est aujourd'hui admis qu'il serait important d'accéder aux caractéristiques thermiques en usage (et non uniquement dans des conditions bien établies en laboratoire) de ces matériaux. Cette différence dans la mesure est, en particulier, due au fait que les caractéristiques thermiques des matériaux dépendent de la teneur en eau des matériaux. Pour déterminer ces caractéristiques en usage, seules les techniques de détermination des caractéristiques thermiques en régime transitoire sont possibles. Nous avons choisi d'utiliser la méthode du fil chaud du fait essentiellement de la rapidité de la mesure, de sa portabilité et de son relatif faible coût. Pour pouvoir utiliser cette technique, nous chercherons à expliquer pourquoi la cinétique expérimentale traduisant la variation de la température en fonction du logarithme du temps est une droite pour les matériaux non isolants alors que pour les matériaux isolants c'est une sigmoïde. Aussi, sachant qu'une relation mathématique linéaire est appliquée sur cette cinétique pour estimer la conductivité thermique, sur quelle partie de cette sigmoïde l'applique-t-on [1] pour obtenir une valeur cohérente avec la littérature.

Dans un premier temps, nos valeurs de la conductivité thermique obtenues expérimentalement à partir de la sonde fil chaud seront confrontées aux résultats issus de la littérature (ou de mesures par la méthode normalisée de la plaque chaude gardée). Des matériaux de porosités croissantes (glycérol, amas de billes de verre de différents diamètres, vermiculite et laine de verre) seront étudiés. Nous chercherons alors à établir l'origine de la sigmoïde. Dans un second temps, la simulation Comsol Multiphysics® sera utilisée pour évaluer l'influence de paramètres concernant la sonde (composition, dimension, ...), la résistance de contact et les caractéristiques thermiques du matériau environnant.

# 1. Etude expérimentale

## 1.1. Description de l'expérience

Nos essais ont été réalisés à partir de la sonde TP02 d'Hukseflux®. D'une longueur de 150 mm et d'un diamètre de 1.5 mm, elle est composée de plusieurs couches (constantan composant le fil chaud, une couche isolante puis la couche externe en acier inoxydable). A noter que le fil chaud n'émet de la chaleur que sur les 2/3 de la longueur de la sonde. Les mesures de température s'effectuent par l'intermédiaire de la jonction chaude positionnée à 50 mm de la base et la jonction froide à l'extrémité de la sonde. Un capteur de température de type PT1000 est intégré dans la base de la sonde.

La sonde TP02 exploite le signal thermique en régime transitoire pour déterminer la conductivité thermique du matériau environnant. L'interface de contrôle TPSYS02 assure la connexion entre la sonde de mesure et l'ordinateur (réglage des conditions d'essais en puissance et en temps, acquisition des données, visualisation des mesures). Une puissance électrique  $Q$  par unité de longueur est maintenue constante dans le fil chaud pendant la durée  $t$  de l'essai. La production de chaleur émise par effet Joule entraîne une variation de température  $\Delta T$  à l'interface sonde-matériau environnant. Après une courte période ( $>$  au temps  $t_1$ , figure 1) obtenue [2] à partir du nombre de Fourier  $Fo = \alpha \cdot t_1 / r^2 \geq 1$ , la variation de température peut alors s'exprimer par la forme linéaire simplifiée suivante respectant ainsi l'hypothèse des temps longs:

$$\Delta T = A \cdot [\ln t + B] \quad (1)$$

Avec les coefficients A et B:

$$A = \frac{Q}{4\pi r} \quad (2)$$

$$B = \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - \gamma + \frac{2\lambda}{rH} \quad (3)$$

La conductivité thermique peut alors être déterminée à partir de la pente (A) de la droite. L'ordonnée à l'origine B devrait permettre de déterminer la diffusivité thermique si l'approximation aux temps longs est satisfaite mais également si la conductance H de la lame d'air (inverse de la résistance de contact) est connue. En pratique, la valeur H varie fortement en fonction de la qualité du contact avec le matériau environnant rendant nécessaire un étalonnage préalable [3]. On constate d'ailleurs (figure 1) un décalage entre les résultats expérimentaux et les valeurs issues de l'équation 1. L'équation 4 permet la détermination de la conductivité thermique:

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot A} \quad (4)$$

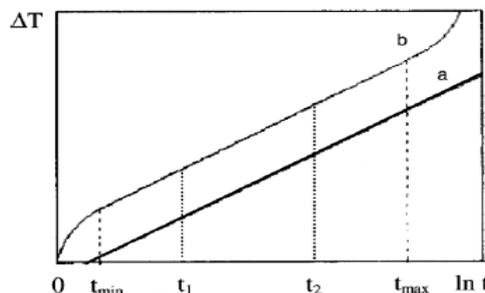


Figure 1: cinétique [4] issue de l'équation 1 (a) et valeurs typiques expérimentales (b)

La partie linéaire de la courbe de  $\Delta T$  en fonction de  $\ln(t)$  (figure 1) comprise entre  $t_1$  et  $t_2$  doit être sélectionnée pour déterminer la conductivité thermique. La valeur de  $t_2$  doit être inférieure au temps  $t_{\max}$  à partir duquel on observe une non-linéarité. Cette non-linéarité peut être attribuée aux pertes axiales et aux échanges thermiques avec l'ambiance environnante (lorsque le signal thermique atteint les limites extérieures du matériau). Pour pouvoir négliger les pertes axiales, Blackwell [5] a proposé de respecter un rapport minimal: longueur (L) sur diamètre (D) de la sonde de 25. La sonde TP02 ayant un rapport  $L/D = 150/1.5=100$  respecte cette condition. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement. Vos [6] a établi (équation 5) un temps  $t_{\max}$  à partir duquel le signal thermique atteint

les limites extérieures du matériau. Pour les matériaux étudiés dans cette étude (laine de verre, vermiculite et glycérol), du fait de leurs diffusivités thermiques, le temps maximal d'essai pour la sonde TP02 est compris entre  $10^2$  et  $10^4$ s pour un matériau supposé cylindrique de 5 cm de rayon ( $r_m$ ).

$$t_{\max} = \frac{0.6.(r_m - r)^2}{4.\alpha} \quad (5)$$

Quant à la valeur de  $t_1$ , elle devra être supérieure au temps  $t_{\min}$  (équation 6) défini par Vos [6] correspondant à la durée de la période transitoire non-linéaire. Cette période est causée par la résistance de contact, l'hétérogénéité du matériau, les phénomènes de convection et rayonnement, un déséquilibre thermique entre la température de la sonde et celle du matériau. Le temps minimal pour la sonde TP02 est compris entre 0.1 et 10s.

$$t_{\min} = \frac{50.(r)^2}{4.\alpha} \quad (6)$$

## 1.2. Essais expérimentaux

Dans un objectif final de caractérisation des matériaux à très fortes porosités comme les isolants thermiques du bâtiment, nous avons choisi d'étudier différents matériaux dont la complexité en termes de résistance de contact et de porosité sera croissante. Ainsi, l'étude débutera par le glycérol (pas de résistance de contact et aucune porosité), puis des amas de billes de verre de différents diamètres (introduisant ainsi les notions de résistance de contact et de porosité) avant de caractériser des matériaux isolants (vermiculite, polystyrène extrudé et laine de verre).

### 1.2.1. Etude du glycérol

Le glycérol est un fluide n'engendrant aucune résistance de contact et qui présente dans les handbooks une conductivité thermique à 25°C de  $0.29 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ . Pour respecter les conditions  $t_{\max}$ , un temps d'essai de 190 s a été choisi. Cette valeur est obtenue pour une épaisseur de glycérol de 1,07 cm et une diffusivité thermique de  $9.10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Pour déterminer la conductivité, nous avons calculé la pente de la cinétique (1.1863 dans l'exemple figure 2) exprimant la variation de température en fonction du logarithme du temps pour des valeurs de temps  $10 < t < 150$ s (figure 2) puis nous avons utilisé cette valeur dans la relation 4. Le système de mesure TPSYS02 d'Hukseflux® ne permet d'émettre que trois flux de chaleur ( $4.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $2.64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  et  $0.87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ ). On observe (tableau 1) que le flux élevé ( $4.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ ) permet d'obtenir des valeurs plus cohérentes avec la valeur de référence. Cependant, au-delà des 180 s, la conductivité mesurée s'éloigne de cette valeur de référence semblant valider ainsi la détermination de  $t_{\max}$ . On constate qu'un flux plus faible engendre des différences plus importantes avec cette valeur de référence mais ces différences sont inférieures à l'incertitude définie par Hukseflux ( $\pm 3\% + 0.02$ ).

Temps d'essai (s)	Flux élevé: $4.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$	Flux moyen: $2.64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$	Flux faible: $0.87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$
60	0.30	0.31	0.34
120	0.30	0.31	0.33
180	0.29	0.30	0.34
240	0.28	0.30	0.32

Tableau 1 : Résultats expérimentaux pour la conductivité ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ) du glycérol

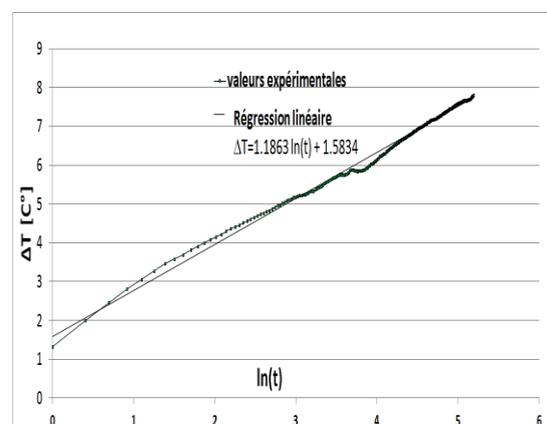


Figure 2 : Cinétique expérimentale pour le glycérol

### 1.2.2. Etude d'amas de billes de verre

Trois diamètres (2 mm, 8 mm et 10 mm) de billes de verre ont été étudiés (figure 3). Lorsque le diamètre des billes augmente, l'empilement des billes est modifié engendrant une augmentation de la porosité. Pour chaque amas de billes, dans un volume parfaitement défini, nous avons déterminés la porosité totale par saturation d'eau (tableau 2). Ces valeurs expérimentales de porosité sont en accord avec la littérature [7, 8]. La conductivité thermique mesurée à la pression atmosphérique de 1025 hPa est en cohérence avec celle obtenue par Huetter et al. [8] sachant que sa mesure a été réalisée dans une ambiance maintenue à la pression de 500 hPa. Enfin, il apparaît (figure 4) qu'une augmentation de la porosité engendre une forme sigmoïdale plus marquée de la cinétique. Cette forme sigmoïdale de la cinétique peut être attribuée au transfert de chaleur dans l'air par rapport au transfert dans les billes mais aussi aux effets de bord engendrés par les contacts entre les billes et par les échanges de chaleur entre les billes et l'air. Notre mesure de la conductivité thermique peut être considérée comme une valeur effective prenant en compte l'ensemble de ces phénomènes.

Diamètre des billes mm	Porosité totale %	Conductivité thermique mesurée W.(m.K) <sup>-1</sup>	Conductivité thermique de référence W.(m.K) <sup>-1</sup>
2	36.55	0.16	0.17 [8] et 0.20 [7]
8	40.30	0.11	
10	41.00	0.06	

Tableau 2: Propriétés des amas de billes

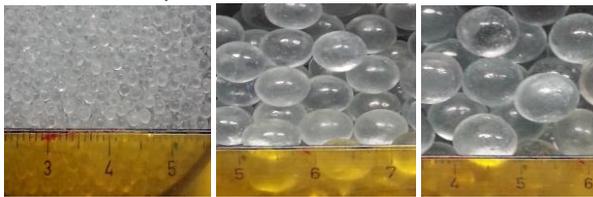


Figure 3: Amas de billes de 2,8 et 10 mm

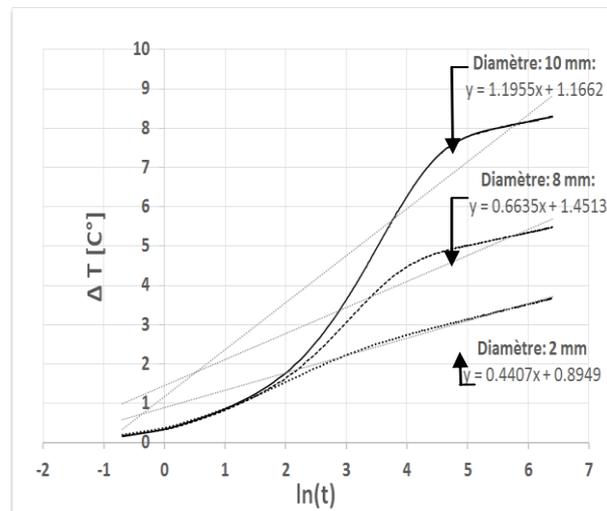


Figure 4: Résultats pour les différentes billes

### 1.2.3. Etude de différents matériaux isolants

Nous avons choisi des isolants thermiques peu sensibles à l'humidité (de façon à éviter de devoir maintenir les échantillons dans une ambiance régulée en humidité) et représentatifs des principales catégories d'isolants commercialisées: isolant d'origine minérale pulvérulent (vermiculite) ou en panneau (laine de verre) et isolant synthétique d'origine chimique (polystyrène extrudé). La vermiculite est un matériau pulvérulent d'une porosité d'environ 90% et dont la taille des gains est comprise entre 1 et 4 mm rappelant ainsi les amas de billes de verre étudiés précédemment. La laine de verre est un matériau plus structuré avec des assemblages de fibres permettant ainsi d'obtenir une porosité plus importante (environ 96%). Le polystyrène extrudé présente une porosité similaire à la laine de verre mais les pores sont fermés réduisant ainsi le transfert de chaleur dans l'air. Un temps d'essai important de 1500s et un flux faible de 0.87 W.m<sup>-1</sup> ont été appliqués à des échantillons de 10 cm de diamètre de façon à respecter les conditions de temps maximum (équation 5). On observe (figure 5) une forme sigmoïdale plus marquée pour la laine de verre et le polystyrène extrudé que pour la vermiculite. On peut noter que les variations de température sont très importantes dans la laine de verre et le polystyrène extrudé (supérieure à 10°C) bien que nous ayons utilisé le flux le plus faible permis par l'interface TPsyst02. Il y a lieu de faire attention car des phénomènes radiatifs peuvent intervenir dans ce cas pour les laines de verre. Malgré ces considérations et en considérant l'incertitude de mesure définie par Hukseflux ( $\pm 3\% + 0.02$ ), on constate une bonne cohérence entre les valeurs mesurées et celles issues de la littérature (tableau 3).

	Conductivité thermique mesurée $W.(m.K)^{-1}$	Conductivité thermique de référence $W.(m.K)^{-1}$
Vermiculite	0.071	0.076 (*)
Laine de verre	0.033	0.035 (**)
Polystyrène extrudé	0.029	0.026 (**)

(\*) Valeur obtenue au laboratoire en utilisant la méthode de la plaque chaude gardée

(\*\*) Valeur issue de l'Avis Technique de l'isolant

Tableau 3 : Conductivité thermique des isolants étudiés

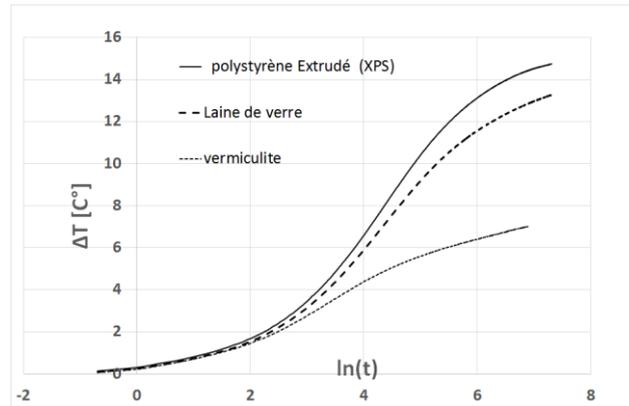


Figure 5 : cinétiques expérimentales des isolants

## 2. Simulation numérique

Nous avons utilisé Comsol Mutiphysics® de façon à simuler numériquement les évolutions de température dans la sonde et dans le matériau environnant. Un capteur a été positionné à l'interface sonde-matériau dans le but de comparer la mesure à la valeur simulée. Nous avons sélectionné le module 2-D axi-symétrique qui effectue l'étude dans un plan (2D) suivant les directions radiale et axiale du transfert de chaleur avec la prise en compte de la symétrie de la géométrie de la source et du matériau environnant suivant l'axe central de la sonde (figure 6). Nous avons cherché à représenter chaque composant de la sonde TP02 tel que défini au §1.1 [9]. Tous les tests présentés ont été obtenus pour un flux (considéré faible par Hukseflux®) de  $0.87 W.m^{-1}$  et en sélectionnant la laine de verre dans la base « matériaux » de Comsol®.

### 2.1. Validation de la simulation

La figure 6 montre la cohérence des valeurs issues de la simulation avec les résultats expérimentaux obtenus pour un flux faible de  $0.87 W.m^{-1}$  et un temps d'essai de 1500s. On constate une pente identique pour les 2 courbes aux temps très longs mais une différence dans la montée en température. Cette légère différence peut être attribuée à certaines conditions expérimentales non prises en compte par Comsol® (conditions d'ambiance en humidité et en température, précision et incertitudes des appareils de mesure et de la mesure dans la sonde, ...) ainsi qu'au modèle numérique sous Comsol® (hypothèses considérées, résolution, ...). Cependant, on peut considérer que la démarche de simulation par Comsol a été validée. Nous avons alors utilisé le programme Comsol® pour essayer de rendre plus linéaire la cinétique (figure 7) et ainsi permettre l'application plus aisée de l'approximation aux temps longs (qui utilise une régression linéaire). L'influence de différents paramètres (composition de la sonde, résistance de contact, caractéristiques thermiques des matériaux étudiés) sera testée.

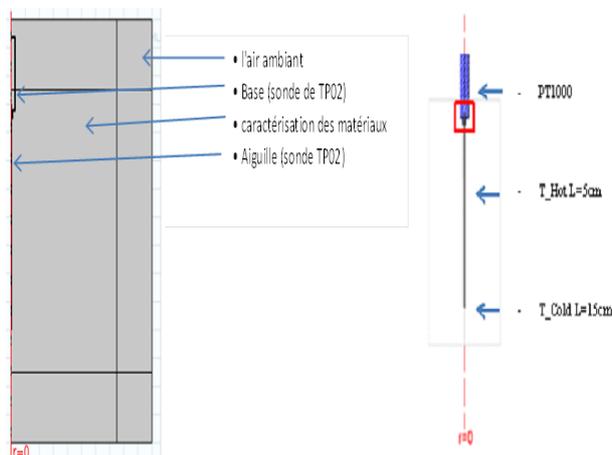


Figure 6: Sonde et son environnement dans Comsol®

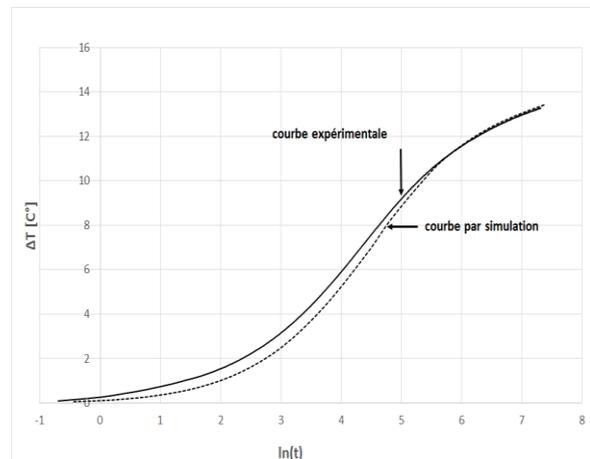


Figure 7: Validation de la simulation pour la laine de verre

## 2.2. Influence des composants de la sonde TP02 d'Hukseflux®

Blackwell a défini un rapport L/D (cf. §1.1) minimum de 25 afin de réduire les pertes dans le sens axial de la sonde, on constate (figure 8) que pour un rapport L/D=25 dès 300s, les pertes de chaleur sont importantes en partie haute (base) de la sonde et en partie basse. Par contre, pour un L/D=100 (comme pour la TP02) et pour 1500s, les pertes de chaleur sont très faibles. De plus, le fait d'avoir un fil chaud uniquement sur les 2/3 de la longueur de la sonde évite les pertes axiales vers l'extrémité basse de la sonde. Nous pouvons cependant nous interroger sur la pertinence d'utiliser de l'acier inoxydable pour réaliser la base de la sonde (partie haute), il aurait été préférable d'utiliser un matériau plus isolant thermiquement. Pour réduire l'influence de ces pertes en partie haute, nous suggérons de contrôler la température à partir de la mesure de la PT1000 afin de ne pas dépasser une augmentation de 1°C. En ce qui concerne le matériau composant la couche extérieure de la sonde à l'interface sonde-matériau, Hukseflux® a choisi d'utiliser l'acier inoxydable. Ce métal présente la plus faible diffusivité thermique des matériaux testés ce qui induit une très forte augmentation de la température en surface de la sonde. Nous avons constaté comme Laurent [10] que le fait d'utiliser du Nickel permettrait de réduire l'importance de la sigmoïde (figure 9).

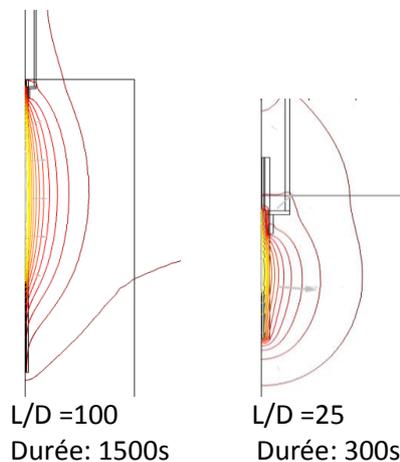


Figure 8: Influence du ratio L/D

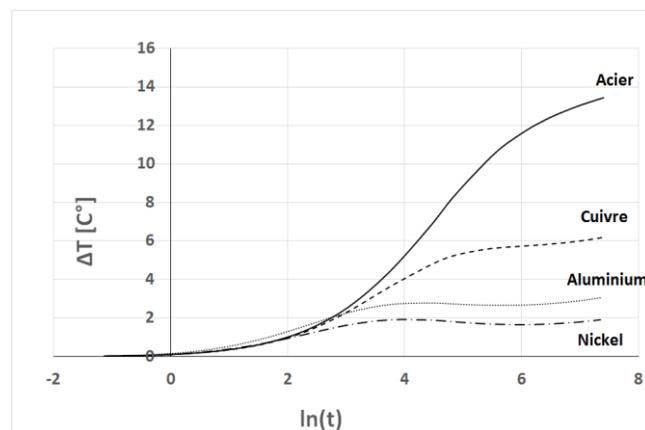


Figure 9: Métal en surface extérieure de la sonde

## 2.3. Influence du flux émis par la sonde

Le flux émis par la sonde a une influence importante sur la forme sigmoïdale (figure 10) et sur l'augmentation de température. Pour éviter les transferts radiatifs dans la laine de verre, il est important de maintenir une augmentation de température inférieure à 5°C et donc d'appliquer un flux maximal de 0.5 W.m<sup>-1</sup>.

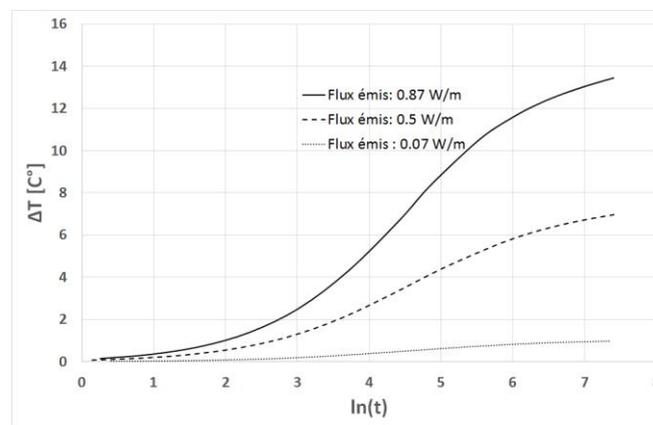


Figure 10 : Influence du flux émis par la sonde

## 2.4. Résistance de contact

La résistance de contact a été étudiée en introduisant des épaisseurs de lame d'air de 0 mm (pas de résistance de contact), 1 mm et 2 mm. On constate (figure 11) que la résistance de contact a une influence sur la cinétique et donc sur la conductivité thermique. Pourtant la résistance de contact n'intervient dans la relation (4) pour déterminer la conductivité thermique. Certains auteurs [1] ont calculé la conductivité pour différentes portions de courbe. Si on reprend cette méthode, on constate qu'aux temps longs ( $5.6 < \ln(t) < 7.4$ ), la pente de la cinétique semble constante (figure 10) quelle que soit la résistance de contact. Après calcul (tableau 4), on observe cependant que cette pente ne permet pas d'obtenir une conductivité proche de l'Avis Technique de l'isolant ( $\lambda = 0.035 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  considérée comme valeur de référence). Par contre, le calcul effectué sur la totalité de la cinétique ( $0 < \ln(t) < 7.4$ ) permet d'obtenir une valeur plus cohérente validant ainsi la préconisation d'Hukseflux. Comme Laurent l'avait constaté auparavant lors d'essais expérimentaux, nous observons qu'il est préférable pour les matériaux isolants de maintenir autour de la sonde une épaisseur d'air et donc ne pas rechercher le contact parfait. Cette observation n'est sans doute valable que si on se place dans l'approximation aux temps longs.

Temps de calcul	Conductivité en $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ pour différentes épaisseur de la lame d'air (mm)		
	0 (mm)	1 (mm)	2 (mm)
$0 < \ln(t) < 7.4$	$\lambda = 0.040$	$\lambda = 0.035$	$\lambda = 0.034$
$5.6 < \ln(t) < 7.4$	$\lambda = 0.049$	$\lambda = 0.049$	$\lambda = 0.049$

Tableau 4: Conductivité thermique

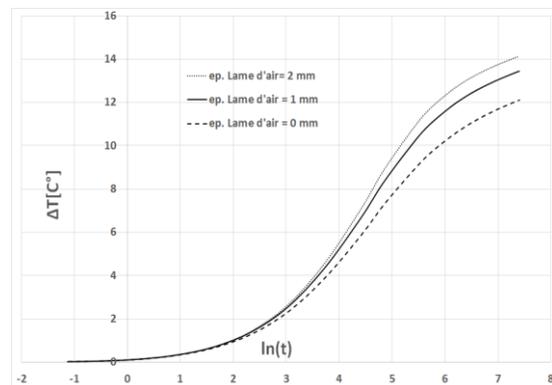


Figure 11: Effet de l'épaisseur de la lame d'air

## 2.5. Influence des caractéristiques thermiques des matériaux

Nous avons, dans un premier temps, fait varier la conductivité thermique de la laine de verre sans modifier les autres valeurs des caractéristiques de la base de données de Comsol®. Plus la conductivité est faible (figure 12) et plus la forme sigmoïdale de la cinétique est marquée. Cette constatation est plus évidente à partir de la conductivité de  $0.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ . Nous avons ensuite fait varier la chaleur massique de la laine de verre sans modifier les autres caractéristiques à nouveau. Même constatation que pour la conductivité, plus la chaleur massique est faible (figure 13) et plus la forme sigmoïdale est marquée. La capacité d'environ  $800 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$  de la laine de verre situe ce matériau dans une zone où la forme sigmoïdale apparaît visuellement plus marquée. On observe que les changements de chaleur massique engendrent de plus faibles variations de températures (en ordonnée sur les courbes) que dans le cas de l'étude de la conductivité.

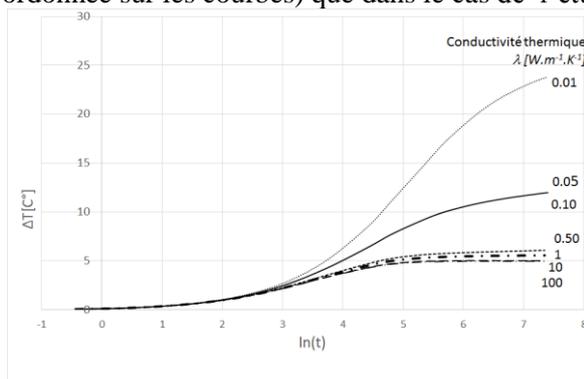


Figure 12 : influence de la conductivité

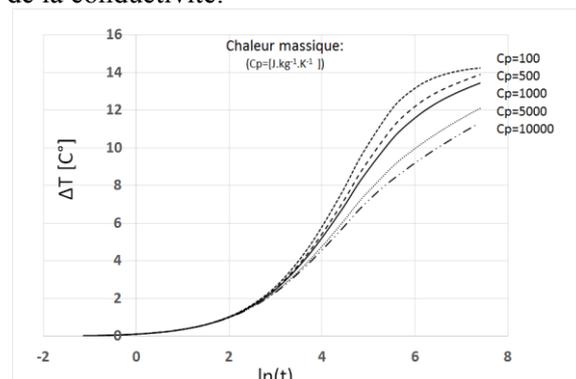


Figure 13 : influence de la capacité thermique

### 3. Conclusion

Appliquer la relation issue de l'approximation aux temps longs (équation 4) afin de déterminer la conductivité thermique nécessite que la cinétique expérimentale représentant la variation de la température en fonction du logarithme du temps soit linéaire. La cinétique est parfaitement linéaire pour le glycérol (un fluide) mais à mesure que le matériau étudié est poreux et présente une résistance de contact importante, la méthode de détermination devient sujette à discussion pour sa forme sigmoïdale. Nous avons observé qu'il est important de maintenir une variation de la température à la jonction chaude inférieure à 5 °C environ. Un flux maximal de  $0.5 \text{ W.m}^{-1}$  satisfait cette condition mais cette valeur est impossible à produire avec l'interface de contrôle associée à la TP02 d'Hukseflux qui se limite à un flux minimal de  $0.87 \text{ W.m}^{-1}$ . Pour la réalisation de la sonde, il serait important d'utiliser une surface extérieure de sonde en nickel et non en l'acier comme pour la TP02, de respecter un rapport Longueur/Diamètre de 100 et de choisir un matériau plus isolant thermiquement que l'acier pour réaliser la base (partie haute) de la sonde.

### Références

- [1] B. Pilkington, S. Grove, "Thermal conductivity probe length to radius ratio problem when measuring building insulation materials", *Const. and Build. Materials*, Vol.35, pp 531–546, 2012
- [2] D.A DeVries, A.J Peck, "On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils", *Aust. J. Phys.*, Vol.11, pp 255-270, 1958
- [3] G Achard, J.J Roux, J.C Sublet, "Description d'une sonde de mesure des caractéristiques thermiques des couches superficielles du sol. Résultats d'une campagne de mesures", *Revue générale de thermique*, N° 267, 1984
- [4] B. Jones, "Thermal conductivity probe: development of method and application to a coarse granular medium", *J. Phys. E Sci. Instrum.*, Vol.21, pp 832–839, 1988.
- [5] J. H. Blackwell, "The axial flow error in the thermal conductivity probe", *Can. J. Phys.*, Vol. 34, pp. 412-417, 1956
- [6] B. Vos, "Analysis of thermal-probe measurements using an iterative method to give sample conductivity and diffusivity data", *Appl. Sci. Res.*, pp 425–438, 1955.
- [7] A.Testu, "Caractérisation thermique dans les milieux granulaires, caractérisation à cœur et en proche paroi", thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005
- [8] E.S. Huetter, N.I. Koemle, G. Kargl and E. Kaufmann, "Determination of the effective thermal conductivity of granular materials under varying pressure condition", *journal of geophysical research*, Vol.113, ref. E 12004, 2008.
- [9] B. Ruet, H. Humaish, L. Marmoret, H. Béji, "Assessment of thermal probe technique for determination of effective conductivity of building insulation materials", *European Conference on Thermophysical Properties (ECTP)*, Porto, 2014
- [10] J.P Laurent, "Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires", thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1986

### Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la société Hukseflux® pour l'assistance apportée durant l'étude et à Campus France – Irak pour le financement des travaux de thèse d'H. Humaish.