

METHODE DU CHAMP THERMIQUE EN REGIME STATIONNAIRE UNE METHODE ADAPTEE A LA MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

ALLOGNON E., VIANOU A. et FANNOU J.-L.

Laboratoire d'Etudes et Recherches en Techniques Industrielles (LERTI)
Ecole Polytechnique Universitaire d'Abomey-Calavi (EPAC)

(Reçu le 07 juin 2004 ; Révisé le 12 septembre 2005 ; Accepté le 25 octobre 2005)

RESUME

Le champ thermique en régime stationnaire peut être déterminé analytiquement dans le cas particulier des matériaux considérés globalement homogènes, isotropes et plans, soumis à un gradient de température. L'exploitation de la forme particulière de cette solution, dans le cas d'assemblage avec un matériau de référence de conductivité connue, permet de développer un protocole expérimental de mesure de la conductivité thermique des matériaux faiblement conducteurs de la chaleur et en particulier les matériaux de construction.

La méthode a été validée avec le méthacrylate de méthyle considéré comme matériau de référence parmi les isolants thermiques.

L'étude expérimentale porte sur les matériaux de construction: terre stabilisée à 4, 8 et 12 % de ciment, mortier de ciment et argile cuite. Les résultats encourageants obtenus permettent d'envisager la mise en place d'un banc systématique de mesure de conductivité des matériaux locaux de construction.

Mots clés : Méthodes expérimentales, propriétés thermophysiques, conductivité thermique, champ thermique, matériaux homogènes isotropes.

ABSTRACT

In this paper, are described a series of experiments which are conducted on an experiment set up based on "thermal field method" for the determination of thermal conductivity in isotropic material. The results are based on experimental studies on finite plane isotropic sample of building materials.

Key words: Experimental method, thermal properties, thermal conductivity, thermal fields.

INTRODUCTION

L'absence dans la littérature des données sur les propriétés thermophysiques des matériaux locaux de construction en climat tropical, ne permet pas leur utilisation massive afin d'espérer un confort thermique dans l'habitat.

Pour optimiser les transferts énergétiques dans les parois d'une habitation, une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques s'impose en ce qui concerne les matériaux constitutifs des parois du bâtiment. Au nombre de ces paramètres thermophysiques, on peut noter pour le régime permanent la conductivité thermique et la capacité calorifique.

La conduction thermique est caractérisée par un transfert de chaleur avec support matériel mais sans

déplacement de matière. La mesure du coefficient de conductivité thermique est assez délicate, elle nécessite une longue durée d'expérimentation et une régulation précise de différents paramètres.

Généralement, pour ces méthodes, il faut d'abord déterminer le flux ou le champ thermique à partir des mesures de variation de température en différents points du matériau étudié et ce, selon les domaines de températures prédéfinis [1]. La mise en œuvre de ces méthodes présente des difficultés plus ou moins grandes d'une méthode à l'autre. La précision des mesures dépend de la technique utilisée et de la qualité du dispositif.

Le laboratoire d'Etudes et Recherches en Techniques Industrielles (LERTI) de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (UAC) a mis au point un dispositif

expérimental qui s'appuie sur la "Méthode du Champ Thermique en Régime Stationnaire" et qui permet des mesures assez précises de la conductivité thermique des matériaux de construction [2] et [3].

1. METHODE DU CHAMP THERMIQUE EN REGIME STATIONNAIRE

1.1 Principe de la méthode

Un système de deux échantillons plans accolés de dimensions identiques comme l'indique la figure 1 (Modèle mathématique), est soumis à un gradient de température sur les deux grandes faces extérieures. Un système d'isolation est appliqué sur les faces latérales comme le montre la figure 2. Si l'un des matériaux est choisi comme matériau de référence de conductivité λ_0 , la connaissance du champ thermique en régime permanent dans l'éprouvette permet de remonter à la conductivité λ_x du matériau testé.

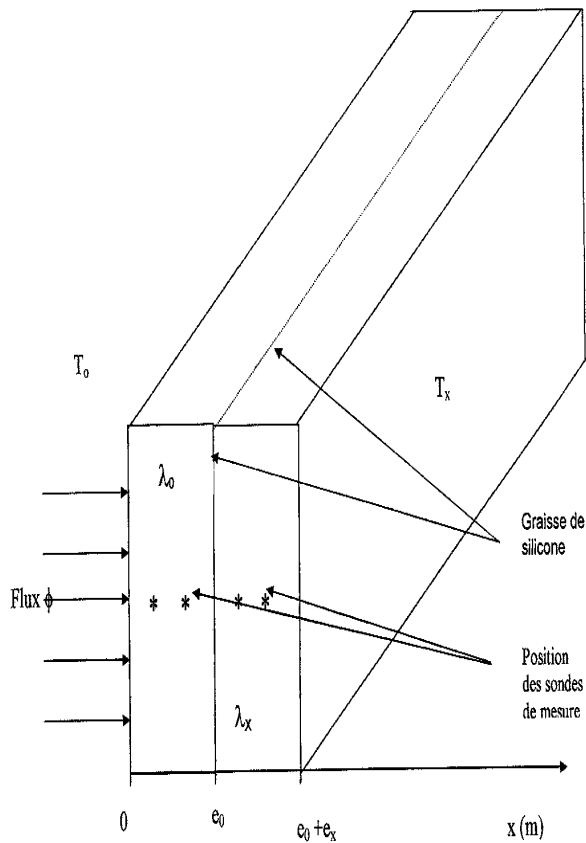


Figure 1 : Schéma du modèle mathématique



Figure 2 : Photo des éprouvettes isolées avec de la laine de verre.

2.2 Les hypothèses de base et équations du problème

Pour réaliser la modélisation théorique de ce problème, un certain nombre d'hypothèses ont été formulées :

- le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel,
- les températures T_1 de la face ($x = 0$) et T_2 de la face ($x = e_0 + e_x$) sont imposées,
- les faces latérales de l'échantillon sont isolées,
- chaque matériau représente un milieu homogène, isotrope et dont la conductivité thermique est pratiquement indépendante de la température.

Selon ces hypothèses, les transferts de chaleur sont régis par les équations suivantes :

- pour le matériau de référence

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} = 0 & \text{avec } T_0(x, t=0) = T_1 \\ T_0(x, t > 0) = T_0(x) \\ -\lambda \frac{\partial T_0}{\partial x} = \phi & \text{pour } 0 \leq x \leq e_0 \end{cases} \quad (1)$$

ϕ étant la densité de flux à travers le matériau de référence en régime permanent. Elle est définie d'après la loi de Fourier par l'équation (2) :

$$\phi = -\lambda \frac{\partial T_0}{\partial x} \quad (2)$$

Méthode du champ thermique en régime stationnaire une méthode adaptée à la mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction.

$$\vec{\varphi} = -\lambda_0 \text{grad}T_0 = -\lambda_x \text{grad}T_x \quad (2)$$

- pour le matériau étudié

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} = 0 \quad \text{avec } T_x(e_0 + e_x, t) = T_2 \\ T_x(x, t) = T_x(x) \\ -\lambda_x \frac{\partial T_x}{\partial x} = \varphi \end{array} \right. \quad (3)$$

pour $e_0 \leq x \leq e_0 + e_x$

Les solutions analytiques de ces systèmes d'équations se présentent comme suit :

$$T_0(x) = -\frac{\varphi}{\lambda_0}x + T_1 \quad \text{pour } 0 \leq x \leq e_0 \quad (4)$$

$$T_x(x) = -\frac{\varphi}{\lambda_x} [x - (e_0 + e_x)] + T_2 \quad (5)$$

pour $e_0 \leq x \leq e_0 + e_x$

Les expressions (4) et (5) représentent respectivement les champs thermiques à l'intérieur du matériau de référence et du matériau étudié.

Les thermogrammes topologiques sont des droites. P_0 et P_x sont les coefficients directeurs respectifs des thermogrammes du matériau de référence et du matériau étudié. Ils ont respectivement pour expression :

$$P_0 = -\frac{\varphi}{\lambda_0} = \frac{T_0(e_0) - T_1}{e_0} \quad (6)$$

$$P_x = -\frac{\varphi}{\lambda_x} = \left[\frac{T_2 - T_x(x)}{(e_0 + e_x) - x} \right] \quad (7)$$

En régime stationnaire, le flux est le même à travers les matériaux soit :

$$P_0 = P_x \quad (8)$$

La connaissance de la conductivité thermique λ_0 du matériau de référence permet de déterminer la valeur λ_x du matériau testé.

Si P_0 est connu on déduit P_x de la relation (7) soit :

$$\lambda_x = \lambda_0 \frac{P_0}{P_x} \quad (9)$$

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est constitué d'une plaque chauffante, d'un dispositif de circulation d'eau et d'une chaîne de mesure des températures, comme l'indique la photo de la figure 3.

- La plaque chauffante, du type PZ 2860 SR est munie d'un régulateur de puissance 10 à 100 % et d'un thermostat.

- Le dispositif de circulation de fluide est constitué d'un bain thermoélectrique : le S. LAUDA qui fixe la température du fluide avec une résolution de 0.1 ° C et une précision absolue supérieure à 0.2 % de la valeur indiquée.

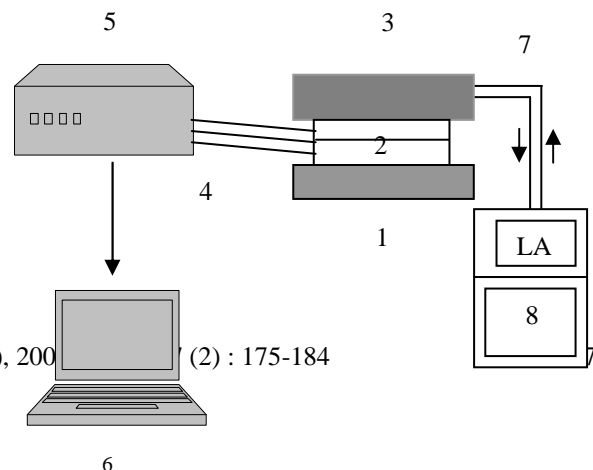
- La chaîne d'acquisition des données comporte :
*une centrale de mesure de température (le CONSORT T 851) dont la résolution est de 0.1 ° C et la précision de 0.1%.

* Un micro-ordinateur et ses accessoires

L'ordinateur est relié à la centrale de mesure qui assure l'acquisition des données comme le montre la figure 4 ci- dessous.



Figure 3 : Photo du dispositif expérimental



1. Plaque chauffant l'éprouvette jusqu'à la température T_1
2. Eprouvette testée
3. Plaque de conduite de fluide : maintient la face à la température T_2
4. Thermocouples de mesure
5. Centrale de mesure de la température
6. Micro-ordinateur
7. Tuyau de conduite d'eau chauffée à la température réglée T_2
8. Bain thermostaté de fluide à la température T_2 .

- Les échantillons de matériaux sont confectionnés à partir des moules de dimensions établies selon les normes du génie civil [4].

Les deux matériaux de forme plane et ayant la même surface à l'interface, sont collés avec la graisse de silicone. Le matériau de référence utilisé est le méthacrylate de méthyle.

Les faces latérales sont isolées avec le polystyrène ou la laine de verre. Des trous d'un millimètre de diamètre sont percés en différents points du matériau et destinés à recevoir les sondes de mesure, ce que montre la figure 2.

Nous avons utilisé le mode opératoire suivant :

l'éprouvette étant placée sur la plaque chauffante par sa face $x = 0$, on impose sur la face ($e_0 + e_x$) une température T_2 grâce au circulateur de fluide. Enfin on ferme le circuit de la plaque chauffante afin de chauffer la face ($x = 0$) jusqu'à la température T_1 . Tous les thermocouples de type K sont reliés à une centrale de mesure disposant de 16 (seize) canaux de mesure qui affiche les valeurs des températures au dixième.

La centrale de mesure permet de lire automatiquement la valeur des températures sur les canaux choisis, à intervalle de temps programmé à l'avance par l'opérateur.

Elle dispose par ailleurs d'une sortie RS232 qui est reliée à l'ordinateur.

Dès que le régime stationnaire est atteint au bout de six à sept heures de temps, on enregistre les différentes températures en des points du matériau.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le traitement des données notamment le tracé graphique des courbes donnant le champ thermique $T = f(x)$, la droite de régression et le calcul de la conductivité, se fait sur l'ordinateur grâce à l'exploitation du logiciel "Easyplot".

a) Validation de la méthode

Afin de valider le dispositif expérimental, il a été mis à la place du matériau de conductivité inconnu, un échantillon de Plexiglas de même surface de base mais d'épaisseur différente.

Les deux matériaux utilisés étant de même nature, il suffit de vérifier l'égalité des coefficients directeurs P_0 et P_x des deux champs thermiques.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau I. Les figures 5 représentent les thermogrammes topologiques des mesures de validation, c'est-à-dire que chaque courbe représente le champ thermique dans le matériau plexiglas dans les différentes éprouvettes comme l'indiquent les figures 5a ; 5b ; 5c ; 5d.

b) Exploitation de la méthode : application à la mesure de la conductivité de quelques matériaux locaux de construction

Afin de nous assurer avant tout de la reproductibilité des résultats, chaque matériau ou éprouvette a fait l'objet de plusieurs mesures espacées dans le temps de plusieurs semaines. Nous avons effectué des essais en modifiant, soit les dimensions caractéristiques, soit les températures imposées.

Vu l'influence de l'humidité sur la conductivité thermique, nous avons choisi d'effectuer les mesures sur les matériaux à l'état sec.

- Echantillon d'argile cuite

La figure 8 représente le thermogramme obtenu pour l'argile cuite dans la phase du régime stationnaire pour $T_1 = 60^\circ \text{C}$ et $T_2 = 41,2^\circ \text{C}$. Les dimensions caractéristiques sont $L = 14\text{cm}$; $l = 14\text{cm}$; $e = 10\text{cm}$.

- Echantillon de terre stabilisée à 12 %

Nos essais ont fourni d'excellents résultats puisque les valeurs de conductivité mesurées pour des éprouvettes de différentes dimensions ont donné pratiquement les mêmes résultats. La figure 7 montre le thermogramme obtenu pour un échantillon de terre stabilisée à 12 % de dimensions $L = 14\text{cm}$; $l = 14\text{cm}$ et $e = 10\text{cm}$. Les principaux résultats sont consignés dans les tableaux II.

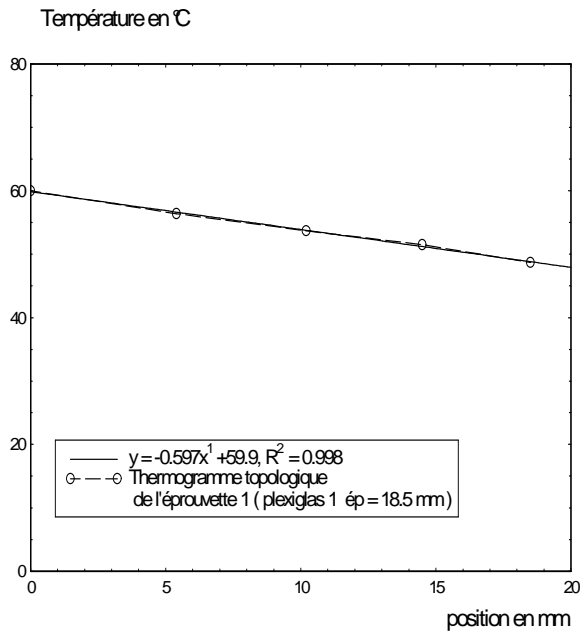


Figure 5a : Champ thermique dans le matériau 1 de l'éprouvette 1

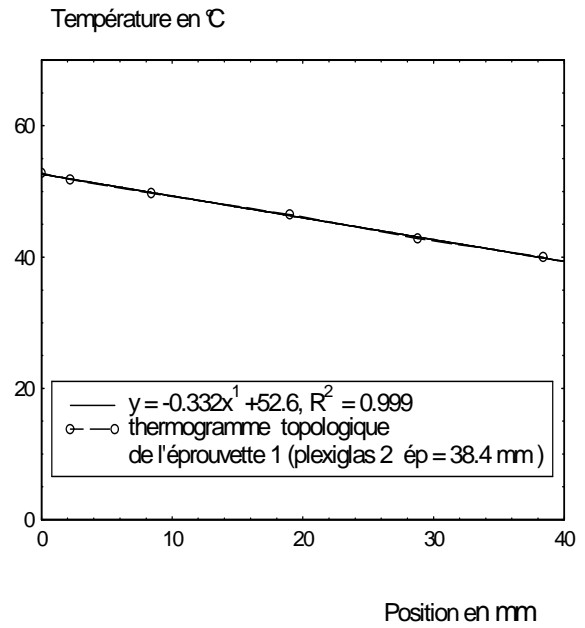


Figure 5b : Champ thermique dans le matériau 2 de l'éprouvette 1

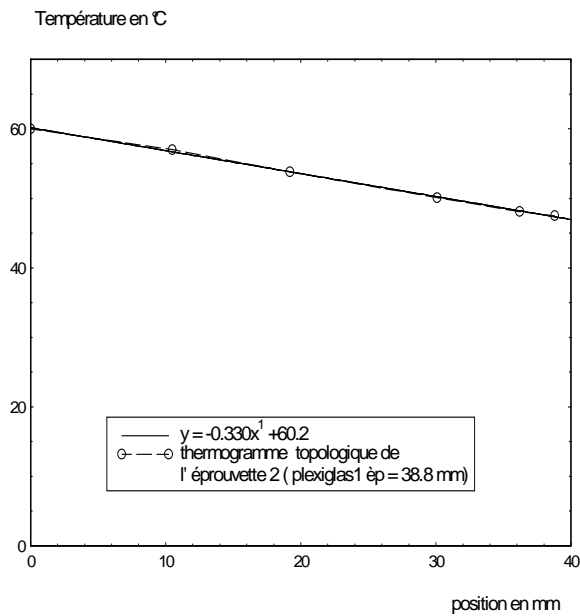


Figure 5c : Champ thermique dans le matériau 1 de l'éprouvette 2

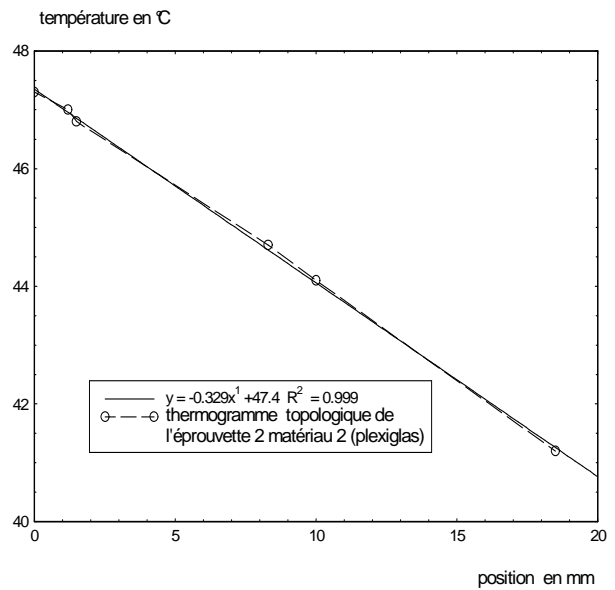


Figure 5d : Champ thermique dans le matériau 2 de l'éprouvette 2

Figures 5 : Thermogrammes des mesures de validations sur le plexiglas

Tableau I : Résultats expérimentaux obtenus avec le plexiglas
(Récapitulatif des résultats de validation)

	Dimensions des éprouvettes en plexiglas (mm)	Températures imposées en °C	Corrélation Droite de régression R	Conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$	
				Référence [4]	Moyenne sur 4 enregistrements
Eprouvette 1	Matériau 1 $e_1 = 18.5$ mm L = 40 mm l = 19.6mm	$T_1 = 60.7$ $T_2 = 39.8$	0.998	0.184	0.185
	Matériau 2 $e_2 = 38.4$ mm L = 40 mm l = 19.6 mm	$T_1 = 60.7$ $T_2 = 39.8$	0.999		
Eprouvette 2	Matériau 1 $e_1 = 38.8$ mm L = 40 mm l = 19.6 mm	$T_1 = 60$ $T_2 = 41.2$	0.999	0.184	0.183
	Matériau 2 $e_2 = 18.5$ mm L = 40 mm l = 19.6 mm	$T_1 = 60$ $T_2 = 41.2$	0.999		

Tableau II : Résultats des mesures de la conductivité de quelques matériaux locaux
(Récapitulatif des résultats des mesures de la conductivité de quelques matériaux locaux)

Dimensions des éprouvettes	Températures imposées	Pente P en Km^{-1}	Corrélation Droite de régression R^2	Conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$ Moyenne sur 4 enregistrements
Matériau Terre stabilisée à 4 % de ciment	$T_1 = 60.7$ °C $T_2 = 39.8$ °C	- 0.131	0.992	0.68
Matériau Terre stabilisée à 8 % de ciment	$T_1 = 60$ °C $T_2 = 41.2$ °C	- 0.0995	0.999	0.95
Matériau Terre stabilisée à 12 % de ciment	$T_1 = 60$ °C $T_2 = 41.2$ °C	- 0.0805	0.998	1.034
Matériau argile cuite	$T_1 = 60$ °C $T_2 = 41.2$ °C	- 0.0937	0.997	0.96
Mortier de ciment au sable de mer	$T_1 = 62$ °C $T_2 = 42.5$ °C	- 0.1024	0.9906	1.166
Mortier de ciment au sable de dune	$T_1 = 60$ °C $T_2 = 40$ °C	- 0.2283	0.9936	1.140

- Thermogrammes de quelques matériaux locaux

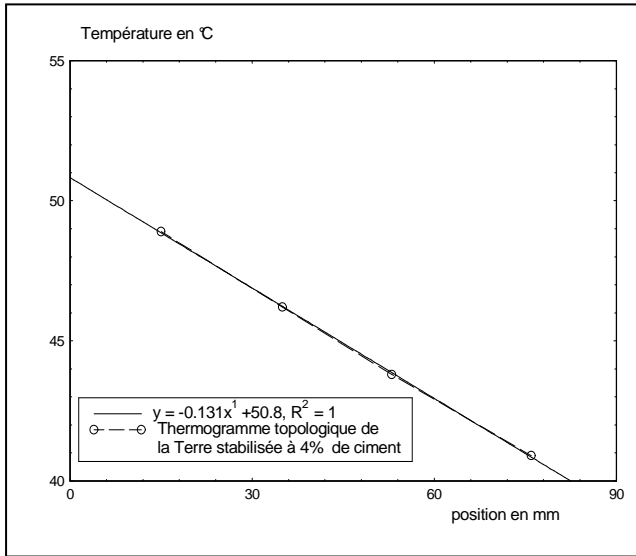


Figure 6 : Thermogramme de la terre stabilisée à 4% de ciment ; L = 14 cm, l = 14 cm, e = 10 cm

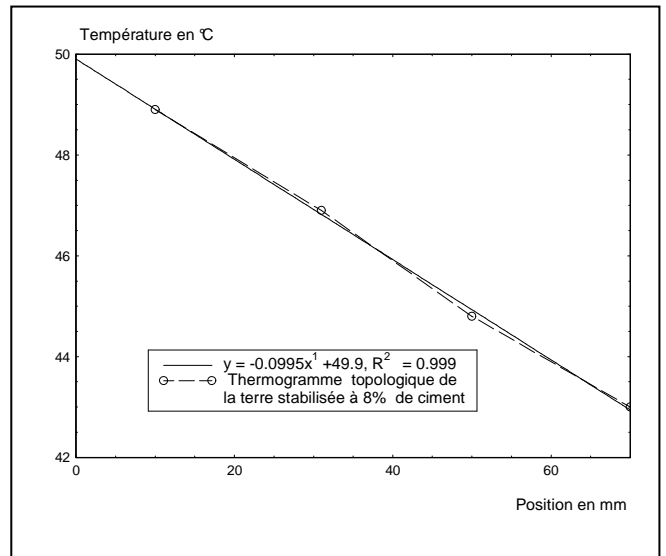


Figure 7 : Thermogramme de la terre stabilisée à 8% de ciment ; L = 14 cm, l = 14 cm, e = 10 cm

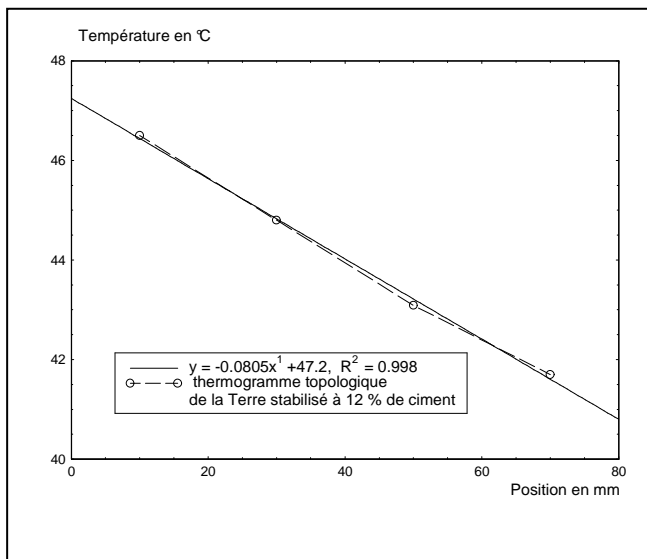


Figure 8 : Thermogramme de la terre à 12% de ciment ; L = 14 cm, l = 14 cm, e = 10 cm

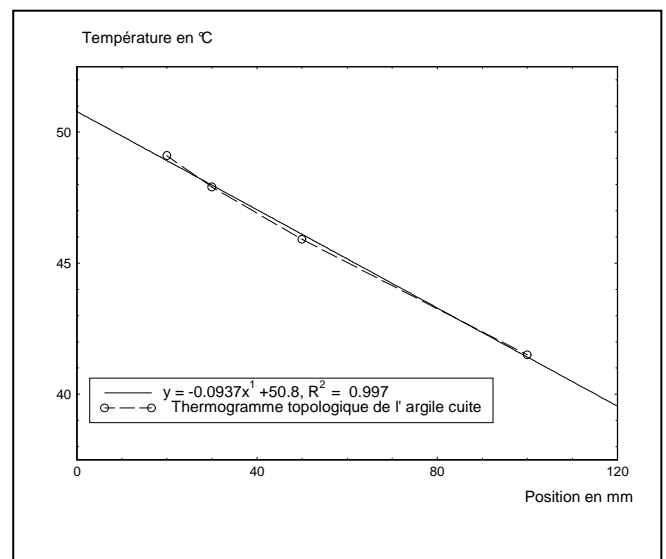


Figure 9 : Thermogramme de l'argile cuite
L = 14 cm, l = 14 cm, e = 10 cm

4.3. Détermination de la résistance thermique

A partir des courbes expérimentales, il s'agit de tracer les droites de régression des fonctions linéaires de champ thermique. Les températures T_a et T_b au niveau

des jonctions, obtenues par extrapolation permettent de juger de la qualité de l'instrumentation. Si T_a est sensiblement égale à T_b , l'expérience est bonne et si T_a est différente de T_b , l'instrumentation est à rejeter.

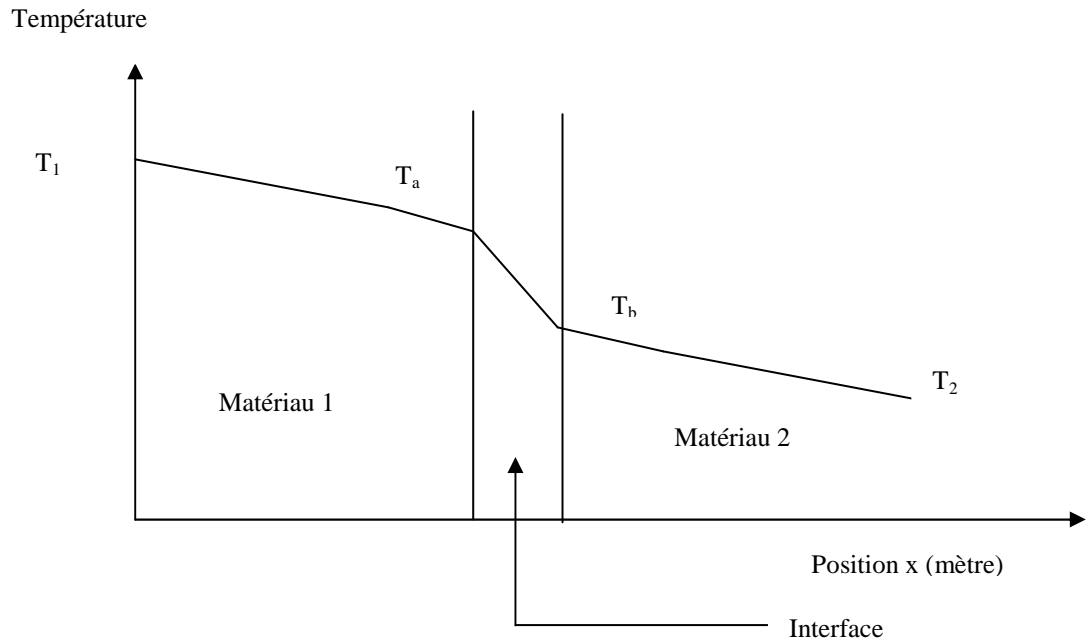


Figure 10 : Champ thermique dans l'éprouvette

Connaissant T_a et T_b , on peut évaluer la résistance thermique de contact de l'interface :

$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0}$ est connu à moins de 4 % [8]

4.4 Précision sur λ

Selon la relation 9 on a :

$$\lambda_x = \lambda_0 \frac{P_0}{P_x}$$

D'après les relations 6 et 7 on a :

$$\lambda_x = \lambda_0 \frac{[T_0(e_0) - T_1] \times [(e_0 + e_x) - x]}{[T_2 - T_x(x)] \times e_0} \quad (12)$$

$$\left| \frac{\Delta\lambda_x}{\lambda_x} \right| = \left| \frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} \right| + \left| \frac{\Delta[T_0(e_0) - T_1]}{T_0(e_0) - T_1} \right| +$$

$$\left| \frac{\Delta[T_2 - T_x(x)]}{T_2 - T_x(x)} \right| + \left| \frac{\Delta[(e_0 + e_x) - x]}{(e_0 + e_x) - x} \right|$$

$$\left| \frac{\Delta\lambda_x}{\lambda_x} \right| = \left| \frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} \right| + 2 \frac{\Delta T}{T_0(e_0) - T_1} + 2 \frac{\Delta T}{T_2 - T_x(x)}$$

$$+ 2 \frac{\Delta e}{(e_0 + e_x) - x} + \frac{\Delta e_0}{e_0} \quad (13)$$

On a : $\Delta T = 0.1^\circ\text{C}$ et $\Delta e_0 = \Delta e_x = 0.1\text{mm}$ et

On obtient en définitive les précisions suivantes regroupées dans le tableau III :

Tableau III : Précisions sur les résultats de mesure

Matériaux testés	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ (%)
Terre stabilisée à 4 %	7.7
Terre stabilisée à 8 %	8.7
Terre stabilisée à 12 %	8.9
Argile cuite	8.3

CONCLUSION

La connaissance des paramètres thermophysiques du matériau ayant servi à construire une paroi, est une étape très importante si l'on veut optimiser les transferts énergétiques dans les habitations. Ce qui

faciliterait une modélisation rapide de ces transferts. Mise à part leur principe, les méthodes expérimentales de mesures de la conductivité thermique se distinguent entre elles par l'investissement financier qu'elles nécessitent, leur facilité de mise en oeuvre, leur degré d'automatisation, leur précision et leur rapidité à fournir des résultats.

Il n'existe pas de méthode universelle pouvant donner avec précision, la mesure de la conductivité thermique de n'importe quel matériau dans tous les domaines de température. La méthode du champ thermique en régime stationnaire que nous avons exposée dans cet

article, présente selon les hypothèses simplificatrices, un niveau de réalisme plus ou moins grand. Cette méthode utilise un dispositif assez simple dont la mise en oeuvre se prête bien à des mesures entièrement gérées par un système programmable d'acquisition des données. On constate qu'elle fournit des résultats reproductibles, la rapidité des mesures rend également cette méthode intéressante. En effet, en dehors du temps mis pour atteindre le régime stationnaire, la lecture des résultats de mesure et le traitement des données s'effectuent en moins de 20 minutes.

NOMENCLATURE

T :	température en	K
T ₀ :	température dans le matériau de référence en	K
T _x :	température dans le matériau testé en	K
T ₁ :	température imposée sur la face x = 0	K
T ₂ :	température imposée sur la face x = e ₀ + e _x en	K
e :	épaisseur en	m
e ₀ :	épaisseur dans le matériau de référence en	m
e _x :	épaisseur dans le matériau de référence en	m
S :	surface en	m ²
P :	Coefficient directeur de la droite de régression linéaire en	Km ⁻¹
R :	Résistance thermique en	KW ⁻¹

Symboles grecs

λ :	conductivité thermique en	Wm ⁻¹ K ⁻¹
λ_{\square} :	conductivité thermique du matériau de référence en	Wm ⁻¹ K ⁻¹
λ_x :	conductivité thermique du matériau testé en	Wm ⁻¹ K ⁻¹
\square :	flux thermique en	W
\square :	densité de flux de chaleur en	Wm ⁻²

Indices

0 :	relatif au matériau de référence
-------	----------------------------------

x :	relatif au matériau testé
1 :	relatif à la face $x = 0$ du matériau de référence
2 :	relatif à la face $x = e_0 + e_x$ du matériau testé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. VIANOU A., 1994.- *Etude de la méthode du régime régulier pour la mesure de la diffusivité thermique des matériaux faiblement conducteurs de la chaleur*. Thèse de doc. de l'Univ. d'Evry Val d'Essone.
2. ALLOGNON E., 2003.- *Contribution à la détermination des paramètres thermophysiques des matériaux locaux de construction au Bénin*. Rapport partiel de thèse, Univ. d'Abomey-Calavi.
3. FANNOU J.-L., 2002.- *Contribution à la mesure de la conductivité thermique des matériaux locaux de construction*. Rapport de stage de D.E.A, Univ. d'Abomey-Calavi.
4. PONSOT R., 1989.- *Contribution à l'étude du comportement hygrothermique des matériaux locaux de construction en région dakaroise*. Thèse de Doc. Univ. Paris XII.
5. YEZOU R., 1978.- *Contribution à l'étude des propriétés thermophysiques des matériaux de construction cohérents et non cohérents*. Thèse de Doc. Ingénieur, I.N.S.A de Lyon.
6. BASTIAN G., 1990.- *Etude dynamique des paramètres des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein d'un mortier en régime hygroscopique*. Thèse de Doc. de l'Univ. de Nantes, Paris.
7. CARSLAW H. S. and JAEGER J.C., 1959.- *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press, Oxford 2nd ed.
8. CONTE M., GIRARDEY A., BILODEAU P. et BEAULIEU R., 1986.- *Métrologie thermique*. Les Editions le Griffon d'Argile.
9. MENGUY G., *Mesure des caractéristiques thermophysiques des matériaux*. Fiches techniques, Univ. Claude Bernard Lyon (France).
10. MARECHAL J. C. et BRIGNOL, 1963.- *Détermination expérimentale des coefficients de transmission thermique*. *Annales ITBTP*.
11. FOURNOL A., 1955.- *La chambre thermique de la station expérimentale de Champ-sur-Marne*. *Cahiers du CSTB*, n° 216.
12. DEGIOVANNI A., 1975.- *Contribution à l'étude de la diffusivité thermique*. Thèse de Doc. ès Science, Lyon.
13. MARECHAL J. C. et DEVISME J. M., 1978.- *Diffusivité thermique des matériaux de construction: méthode de signal périodique*. *Annales I.T.B.T.P.*, N° 357.
14. VERNOTTE P., 1956.- *Calcul numérique. Calcul physique. Application à la thermophysique*. *Public. Scient. et Techn. du Ministère de l'air*, N° 139.
15. MARTINET J., 1990.- *Thermocinétique approfondie. Technique et documentation*, Paris.
16. PERRIN B., 1985.- *Etude des transferts couplés de chaleur et de masse des matériaux poreux consolidés non saturés en génie civil*. Thèse de Doc. de l'Univ. Paul Sabatier de Toulouse.
17. LAURENT J.-P., 1986.- *Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d'outils de mesure "in situ" des paramètres thermiques. Application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre*. Thèse de Doc. de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
18. TCHEHOUALI A. D., 2002.- *Contribution à la valorisation de la sciure de bois tropicaux: mise au point et caractérisation de matériaux ciment-sciure*. Thèse de Doc. de l'Univ. d'Abomey-Calavi.