

Sensibilité de la diffusivité thermique d'échantillons d'argiles cuites ou crues de différentes provenances.

Thermal diffusivity sensibilities of clays or bricks from different origins.

André DONNOT*, Jean-Louis TANGUIER, Riad BENELMIR

Laboratoire Etude Recherche sur le Matériau Bois

Campus Aiguillettes- BP 70239- 54506 Vandoeuvre lès Nancy

*(auteur correspondant : andre.donnot@univ-lorraine.fr)

Résumé – La diffusivité thermique est un élément clef lors de l'étude du comportement thermique dynamique d'une paroi. Elle est étudiée ici sur trois argiles différentes ayant subies ou pas une cuisson. Nos résultats montrent que la nature des argiles et leur cuisson ne sont pas les paramètres clefs pour la capacité thermique volumique des produits.

Mots clefs : propriétés thermiques des argiles, conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité calorifique.

Abstract Thermal diffusivity is a key element in the study of the dynamic thermal behaviour of a wall, is studied here for three different clays having undergone or not firing. Our results show that the nature of the clays and their firing are not determinant parameters for the volume thermal capacity of the products.

Keywords: Clay's thermal properties of clays, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity.

Nomenclature

| | | |
|----|---|--|
| a | diffusivité thermique, $\text{.mm}^2\text{s}^{-1}$ | |
| Cp | capacité thermique massique, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | <i>Symboles grecs</i> |
| d | diamètre intérieur, mm | λ conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. |
| D | diamètre extérieur, mm | ρ masse volumique, kg.m^{-3} |
| E | effusivité thermique, $\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ | |
| H | hauteur, mm | <i>Indice et exposants</i> |
| m | masse, g | ∞ ambiante |
| P | puissance, W | Alu aluminium |
| R | rayon, mm | Arg argile |
| R | résistance thermique, $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ | C rayon interne cylindre argile |
| T | temps, s | ech échantillon |
| T | température, °C | élec électrique |
| V | volume, m^3 | ext extérieur |

hum humide
int intérieur
isol isolant
per permanent

PVC polychlorure de vinyle
R rayon externe cylindre argile
Sec sèche

1. Introduction

Dans les calculs de simulation thermique dynamique (STD), la diffusivité thermique, $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, permet le calcul des amortissements et des déphasages thermiques. Elle dépend de la capacité thermique volumique, $(\rho \cdot C_p)$ et de la conductivité thermique, λ . Dans la bibliographie beaucoup de résultats lient ρ et λ mais personne ne s'est intéressé à la mesure de la sensibilité de a en fonction de la nature de l'argile ou de sa cuisson éventuelle.

Après une description de l'appareillage et du protocole de fabrication des échantillons, nous nous intéresserons à l'importance de la composition des argiles sur la diffusivité thermique, les paramètres humidité, pression de compactage, granulométrie étant quant à eux fixés. Seul le paramètre diffusivité a été choisi car en thermique du bâtiment, il est déterminant pour ce qui concerne le déphasage et l'amortissement thermique qui sont tous deux des grandeurs clefs utilisées pour les calculs de STD

Appareillage

Notre appareil (figure 1) est dérivé de celui de Carlson [2]. Une masse d'argile est préparée pour faire un cylindre compact ($H \sim 70$ mm ; $D_{ext} \sim 40$ ou 60 mm environ). La pression de compactage est en général de 20 ± 1 bar, elle est gardée pendant 10 à 15 min de façon à permettre la relaxation totale de l'éprouvette. Pour un échantillon cuit, le cylindre est alors séché à l'air libre 72h puis à l'étuve à 105°C pendant 48h. Le cylindre subit alors une cuisson à la température maximale de 1050°C durant 3h avec un programme toujours identique. A l'issue, l'échantillon est mesuré au pied à coulisse. Ces grandeurs permettent de calculer la masse volumique apparente à environ 6% près. L'échantillon va ensuite être percé sur son axe au moyen d'un foret de 6,2 mm, de façon à ce que la cartouche (6,4 mm de diamètre) soit insérée au plus près afin de supprimer toute résistance thermique de contact.

Pour un échantillon d'argile crue, au moment du pressage, nous plaçons au centre du moule un tube en aluminium de 1 mm d'épaisseur et 10 mm de diamètre extérieur.

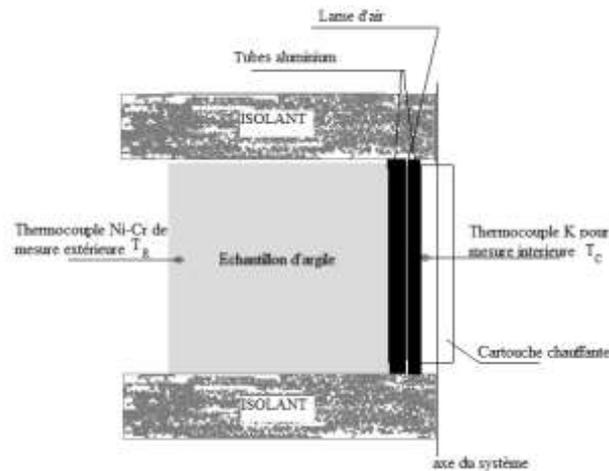


Figure 1 : schéma de l'appareillage utilisé pour les argiles crues. Pour les argiles cuites, il n'y a que le tube d'aluminium intérieur.

L'échantillon subit alors la même compression que les échantillons cuits. Dès qu'il est démoulé, il est utilisé pour faire les mesures thermiques. La cartouche chauffante est alors insérée dans le tube d'aluminium en force pour annuler la résistance de contact. On alimente la cartouche en courant électrique à tension constante durant tout l'essai. Les mesures se font en continu avec un voltmètre et un ampèremètre intégrés dans le montage (figure 1), la précision est de $\pm 0,1V$ et $\pm 0,05A$ ce qui donne avec nos valeurs une erreur d'environ 0,5 % sur les puissances.

Les grandeurs physiques sont calculées à partir de l'évolution de T_C et T_R , nous tenons compte d'une résistance thermique interfaciale $R_c = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ K.W}^{-1}$ dans le cas des argiles cuites. Pour les argiles crues, elle est de $R_c = 1.45 \text{ K.W}^{-1}$ et provient du film d'air de 0.05 mm entre les deux tubes d'aluminium. L'effusivité thermique de l'aluminium ($E_{Alu} = 23400 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$) et celle des argiles ($E_{arg} \sim 948 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$) nous amène à assimiler la température de contact de l'argile à celle du tube en aluminium.

L'analyse de la courbe expérimentale donnant T_C et T_R au cours du temps détermine le début du régime permanent (température constante en moyenne pendant au moins 3h).

Comme Carlson [2] nous pouvons en déduire la valeur de la conductivité thermique:

Résistance thermique des argiles :

$$R_{arg} = \frac{T_{C,per} - T_{R,per}}{P_{elec}} - R_c \quad (1)$$

A partir de R_{arg} on peut alors déduire :

$$\lambda_{arg} = \ln\left(\frac{D}{d}\right) / (2\pi H R_{arg}) \quad (2)$$

A partir du même essai on peut calculer la capacité calorifique massique. La conservation de l'énergie appliquée au système donne en termes de puissance :

$$P_{elec} = \rho C p \int_V \left(\frac{dT_V}{dt} \right) dV + S h(t) (T_{p_{ext}}(t) - T_{\infty}) \quad (3)$$

dans laquelle $h(t)$ est le calcul du coefficient d'échange par convection et rayonnement entre la surface de l'échantillon et le milieu ambiant. Il se calcule en utilisant les relations classiques du transfert convectif – radiatif [3]. Une correction Cor (4) est toutefois apportée par rapport à ces grandeurs car nos cylindres ne sont pas infiniment longs et sont compris entre deux blocs de dimensions extérieures supérieures au diamètre de nos cylindres. Ce facteur vaut couramment 0,95.

$$Cor = \frac{P_{elec}}{h_{per} S (T_{P_{per}} - T_{\infty})} \quad (4)$$

Si l'on intègre (3) entre l'instant initial où tout est à température T_{∞} et un instant Δt après l'obtention du régime permanent cette équation devient :

$$\int_0^{\Delta t} P_{elec} dt = \rho C p (\overline{T_{ech}} - T_{\infty}) + S \int_0^{\Delta t} h(t) (T_{P_{ext}} - T_{\infty}) dt \quad (5)$$

dans laquelle :

$$\overline{T_{ech}} = \frac{1}{\vartheta} \int_{\vartheta} T d\vartheta \quad (6)$$

est la température moyenne de l'échantillon durant le régime permanent et S la surface latérale de l'échantillon.

L'échantillon (figure 1) étant inséré entre deux parallélépipèdes d'isolant, ($\lambda_{isol}=0.04 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$) de 8 cm d'épaisseur et de section 100 cm^2 , la résistance thermique aux extrémité atteint 200 K.W^{-1} , elle est environ 240 fois plus grande que la résistance thermique latérale de l'échantillon ($0,8 \text{ K.W}^{-1}$). Nous négligeons donc les fuites thermiques par les extrémités. En conséquence, la température de l'échantillon est considérée comme constante sur toute sa longueur, des mesures sur échantillons donnent un écart de température $< 1^{\circ}\text{C}$ entre le plan médian et les extrémités. Le profil de température est alors donné par [3] :

$$T(r) = T_C + (T_R - T_C) \frac{\text{Ln}\left(\frac{2r}{a}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (7)$$

Puisque le flux est purement radial et que la densité de puissance de la cartouche est uniforme l'équation (7) utilisée dans (6) permet de calculer $\overline{T_{ech}}$. Cp est obtenu par:

$$Cp = \frac{\int_0^{\Delta t} \{(P_{elec} - S h(t) (T_{p_{ext}} - T_{\infty}))\} dt}{\rho (\overline{T_{ech}} - T_{\infty})} \quad (8)$$

En absence de moyen réel de mesure de cette grandeur, nous évaluons l'erreur maximale à 5%.

Remarque : lors du refroidissement de l'échantillon, s'il est impossible de calculer λ_{arg} à partir des mesures, il est toutefois possible d'adapter les mesures de Cp à cette phase.

Pour les échantillons d'argiles humides, le bilan doit faire intervenir l'évaporation de l'eau, l'équation (8) devient alors :

$$Cp = \frac{\int_0^{\Delta t} \{(P_{elec} - Sh(t)(T_{pext} - T_{\infty})\} dt - (m_{hum} - m_{sec})L}{\rho(T_{ech} - T_{\infty})} \quad (9)$$

Dans laquelle $L=2433 \text{ kJ.kg}^{-1}$ est la chaleur latente d'évaporation de l'eau.

Afin de vérifier notre appareillage, nous l'avons testé avec des échantillons de PVC dont les caractéristiques sont connues ($Cp_{PVC}=1 \text{ kJ.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{PVC}=0.2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Les résultats sont donnés dans le tableau 1 pour différentes puissances et deux tailles d'échantillons. Le tableau donne $\lambda_{PVC}=0,22 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 4,6% près donc dans l'intervalle de mesure du fabricant et $Cp_{PVC}=0,99 \text{ kJ.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 2% très près de la valeur du fabricant. Ceci valide nos mesures aussi bien par rapport aux deux tailles d'échantillon que pour la gamme de puissances électriques utilisées.

| | P_{elec} | D_{ext} | H | m | ρ | λ | Cp |
|-------------|------------|-----------|------|-----|------------|-----------|------|
| hantillon 1 | 2,67 | 70,4 | 73,1 | 413 | 1480 | 0,21 | 0,98 |
| | 0 | | | | | | 1,01 |
| | 3,321 | | | | | 0,21 | 1,02 |
| hantillon 2 | 3,38 | 40 | 70 | 123 | 1440 | 0,22 | 0,96 |
| | 0 | | | | | | 0,98 |
| | | | | | moyenne | 0,21 | 0,99 |
| | | | | | Ecart type | 0,01 | 0,02 |

Tableau 1 : Validation de la méthode par des mesures faites sur du PVC .

Cette méthodologie est ensuite appliquée à trois types d'argiles :

- a) Argile de Zogbodomey, une argile béninoise constituée de kaolinite 30-40% et de 20-30% de quartz, le résidu étant d'autres argiles en mélange. Cette argile subissant très bien notre cycle de cuisson.

- b) Argile de Sémé Podji, une argile béninois contenant 20-30% de kaolinite, 50-60% de quartz avec une teneur en matière organique de 10-15%. Cette argile se cuit difficilement selon notre cycle de cuisson.
- c) Argile de Xeuilley d'origine française proche de Nancy dont la composition minérale est kaolinite 10-20% ; quartz 50-60%, aragonite 20-30% ce qui la rend difficilement apte à subir le cycle de cuisson.

2. Résultats

Les valeurs moyennes et les écart type des mesures sont données dans le tableau 2. L'écart type des mesures pour la masse volumique et la capacité calorifique reste proche des valeurs des erreurs de mesures estimées (respectivement 6 et 5%) alors que pour la conductivité thermique, l'écart type atteint systématiquement une valeur de 40%-50% de la moyenne soit une valeur 15 fois supérieure à celle des erreurs de mesure. Nous en concluons que la masse volumique et la capacité calorifique dépendent peu de la nature des argiles, en accord avec [4] pour les argiles crues lorsqu'elles sont fabriquées avec une humidité initiale correspondant au maximum de masse volumique du produit sec. Ce qui conforte les conclusions de [5]. La cuisson n'a pas non plus d'effet mesurable sur ces deux grandeurs.

Les conductivités thermiques présentent globalement un grand écart-type qui traduit un effet beaucoup plus important des paramètres de mise en œuvre sur cette grandeur. En effet les argiles crues ont une valeur moyenne de $0.49 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et les argiles cuites de $0.64 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ valeurs significativement différentes. Ces valeurs semblent plus faibles que celles de la référence [6] qui sont plus proches de $0.92 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. A l'intérieur d'une famille d'argile cuite ou crue, il est par contre très difficile de faire des distinctions, nous en concluons que la nature des argiles intervient peu sur la valeur de la conductivité thermique lorsque l'humidité de fabrication est égale à celle donnant la masse volumique la plus élevée sur le produit sec.

| Type d'échantillon | | ρ | λ | C_p |
|---------------------|-------------------------|--------|-----------|-------|
| Toutes argiles (32) | Moyenne | 1600 | 0,66 | 0,82 |
| | Ecart-type en % moyenne | 7,6% | 52,6% | 16,7% |
| Argiles crues (8) | Moyenne | 1690 | 0,49 | 0,81 |
| | Ecart-type en % moyenne | 7.2% | 25,3% | 20,7% |

| | | | | |
|------------------------|-------------------------|-------|--------|--------|
| Argile Sémé Podji (4) | Moyenne | 1630 | 0,64 | 0,99 |
| | Ecartype en % moyenne | 7% | 43% | 6% |
| Argile Zogbodomey (4) | Moyenne | 1690 | 0,5 | 0,72 |
| | Ecartype en % moyenne | 2% | 36% | 14% |
| Argiles cuites (24) | Moyenne | 1610 | 0,70 | 0,83 |
| | Ecart-type en % moyenne | 7,8% | 53,3% | 16,0% |
| Argile Sémé Podji (6) | Moyenne (6) | 1640 | 0,79 | 0,93 |
| | Ecart-type en % moyenne | 12,7% | 38,4% | 6,3% |
| Argile Zogbodomey (14) | Moyenne (14) | 1600 | 0,67 | 0,80 |
| | Ecart-type en % moyenne | 14,1% | 37,5% | 12,8% |
| Argile Xeuilley (4) | Moyenne (4) | 1670 | 0,75 | 0,69 |
| | Ecart-type en % moyenne | 6,07% | 16,87% | 10,62% |

Tableau 2 : Influence de la nature de l'argile et de sa cuisson sur les erreurs . (x) =x mesures, le nombre d'échantillons total

La diffusivité thermique, $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, étant la grandeur thermique déterminante lorsque l'on s'intéresse au comportement dynamique d'un bâtiment, nous avons représenté figures 2 et 3 comment elle varie en fonction de ses grandeurs de base λ et (ρC_p) .

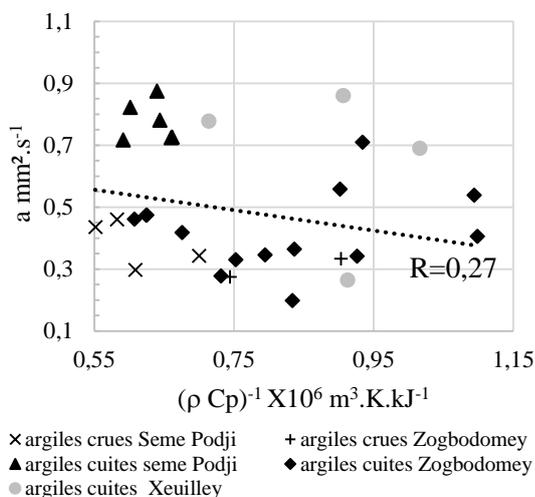


Figure 2 : Evolution de la diffusivité thermique en fonction de $1/\rho * C_p$.

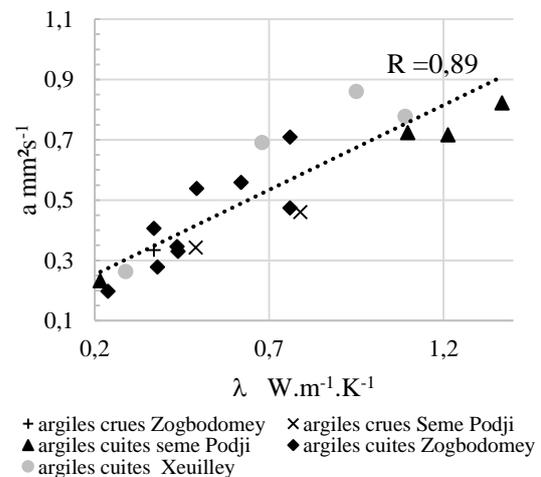


Figure 3 : conductivité thermique et diffusivité thermique.

La figure 2 montre une dispersion des points très supérieure à celle des erreurs de mesures. Cette dispersion est toutefois plus grande pour les mesures des argiles cuites que pour celles des argiles crues, ces dernières étant toutes sous la droite des moindres carrés. Pour les argiles cuites, la dispersion ne permet pas de tirer des conclusions, par contre il semble que pour les argiles crues, lorsque la capacité thermique volumique augmente la diffusivité diminue.

Pour la conductivité thermique, la régression linéaire présente un excellent coefficient de corrélation à $R=0,89$ et les tables de Bravais donnent une probabilité de plus 99% pour que cette corrélation soit vraie. Ceci traduit que la nature de l'argile ou sa cuisson n'ont pas d'effet important sur a .

Conclusion

Nos mesures montrent qu'il existe un lien direct entre la conductivité thermique et la diffusivité thermique, lien qui n'existe pas avec la masse volumique ou la capacité thermique. et qu'en conséquence la mesure de l'une devrait pouvoir suffire à prédire une valeur suffisamment précise de l'autre sans avoir à préparer deux échantillons.

Pour les simulations STD la grandeur thermique la plus importante à connaître est la conductivité thermique car la diffusivité donc l'amortissement thermique et le déphasage lui seront directement liés.

Références

- [1] Valorisation de rebuts de bouteilles en verre et de cendres de bois dans la fabrication de briques en argile cuite. G Milohin, nov 05/11/2019. Thèse université Lorraine – Abomey Calvi.
- [2] J. D. Carlson, R. Bhardwaj, P. E. Phelan, K. E. Kaloush, J. S. Golden, Determining Thermal Conductivity of Paving Materials Using Cylindrical Sample Geometry, Journal of materials in civil engineering, 22(2), February 2010, pp 186-195
- [3] Y Janot, A Degiovanni, Mesures des propriétés thermiques des matériaux, édition ISTE 2018, pp 97-129.
- [4] C Pompeo, C Gueret. Conductivité thermique des matériaux, éd CSTB, Th-U 2, déc 2000.
- [5] P Cosenza, R Ghérin, A Tabbagh, Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modeling, European Journal of Soil Science, 54(3), September 2003, pp 581-588.
- [6] N Zhang, Z Wang, Review of soil thermal conductivity and predictive models, International journal of thermal science, Volume 117, July 2017, pp 172-183

Remerciements

Nos plus vifs remerciements à nos partenaires Béninois pour ce travail : V Gbaguidi, M Anjorin et M Gibigaye et à la doctorante G Milohin.

Mes remerciements à E. MARTIN sans lequel aucun moulage n'aurait été possible.