

Impact de la connaissance des propriétés thermophysiques dans les simulations incendie : exemple des difficultés de mesure de la conductivité thermique du balsa en température.

Damien MARQUIS^{1,*}, Vincent SCOARNEC², Bruno HAY², Jacques HAMEURY², Carine CHIVAS-JOLY¹

Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE),

¹ Direction des Essais – *Pôle Energie Environnement & Combustion*

² Direction Métrologie Scientifique et Industrielle - *Pôle Photonique-Energétique*

29 Avenue Roger Hennequin – 78197 Trappes Cedex.

* (auteur correspondant : damien.marquis@lne.fr)

Résumé - Après avoir placé la démarche dans son contexte, cet article présente les résultats des mesures de conductivité thermique du balsa en fonction de la température, obtenues avec un conductimètre de référence métrologique de type plaque chaude gardée développé au LNE. Les limites de la technique de mesure pour ce type de matériaux sont exposées.

1. Introduction

La modélisation numérique de la décomposition thermique des matériaux hétérogènes au cours d'un incendie est particulièrement délicate en raison des processus physico-chimiques mis en jeu. Elle nécessite de connaître les principales propriétés thermophysiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, enthalpie et propriétés radiatives) des matériaux, sur une large plage de température ainsi que leurs processus de décomposition thermique.

Pour modéliser le comportement thermique de matériaux hétérogènes en utilisant un "code de calcul incendie", on se réfère la plupart du temps à des propriétés effectives, c'est-à-dire apparentes à une certaine échelle d'observation. La méthode consiste à remplacer le milieu complexe composé de solide, de gaz et de liquide par un milieu homogène aux propriétés globales équivalentes. La conductivité thermique des matériaux hétérogènes, est alors définie comme celle d'une région homogène équivalente qui, pour un écart donné de température, autorise le transfert du même flux de chaleur. Dans le cas où le matériau est par ailleurs anisotrope, tel que le balsa, la conductivité thermique s'écrit sous forme d'un tenseur symétrique k_{ij} . En règle générale, l'anisotropie structurelle du bois est traitée au sein des codes numériques de façon simple, en définissant uniquement deux conductivités thermiques : l'une dans le sens des fibres dite *harmonique* et l'autre, perpendiculaire au sens des fibres dite *arithmétique*. Le problème actuel est de mesurer ces propriétés lors du processus de dégradation.

En fait, très peu d'installations expérimentales ont été conçues pour la réalisation de mesures de conductivité thermique sur le domaine de température rencontré en condition d'incendie [23°C-1000°C]. Aucune technique de mesure n'est à l'heure actuelle réellement fiable pour les hautes températures. En règle générale les données de propriétés thermophysiques des matériaux ne sont disponibles qu'à température ambiante dans la littérature. Il est parfois possible de trouver des mesures dans un intervalle de température plus ou moins étroit suivant les propriétés de décomposition du matériau en fonction de la température. Néanmoins, cet intervalle de température ne couvre pas l'intégralité du domaine de l'incendie. De plus, peu d'études ont été réalisées pour évaluer correctement les incertitudes de mesures à haute température et les conditions de mesure adéquates restent encore à définir suivant le type de matériau à caractériser et leur condition d'application.

L'objectif de cet article est d'expliquer les difficultés rencontrées pour déterminer les propriétés thermophysiques de matériaux pour des températures proches de leur température de dégradation, condition préalable à la modélisation numérique de leur décomposition thermique. Il présente en particulier les mesures de conductivité thermique *harmonique* d'un balsa en utilisant un conductimètre de référence métrologique de type plaque chaude gardée haute température (PCG). Cette nouvelle installation développée au LNE, a été conçue suivant une adaptation de la norme ISO 8302 [1] pour répondre à des besoins industriels. Cette installation a été qualifiée avec un niveau d'incertitude relative de 5 à 10 % en fonction de la géométrie et de la conductivité thermique du matériau. La PCG mise au point au LNE est dimensionnée pour couvrir une plage de conductivité thermique assez large comprise entre 0,02 et 5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [2] et pour une gamme de température de 23 à 700°C. Ce dispositif expérimental et la méthode de mesure sont présentés. Les résultats obtenus en fonction de la température pour du balsa et les sources d'incertitudes associées sont détaillés et quantifiés. Très peu de valeurs de conductivités thermiques sont actuellement disponibles dans la littérature. Les seules valeurs disponibles proviennent d'ouvrages de compilation [3-6], ou de documentations commerciales [7] et concernent exclusivement la conductivité thermique arithmétique [8]. Toutes les mesures sur la conductivité harmoniques sont effectués à température ambiante [9]. Les résultats sont analysés et les limites de la technique de mesure pour ce type de matériau sont exposées.

2. Matériau

Originaire d'Amérique du Sud, principalement d'Equateur, le balsa ou *Ochroma pyramidal* [10-11] est un bois particulièrement léger appartenant à la famille des *bombacacées*. Présent dans de nombreux secteurs (aéronautique, maritime...), il est généralement utilisé comme âme de panneaux sandwichs. Il se présente sous la forme d'un assemblage d'éléments de balsa de masses volumiques différentes collés les uns aux autres. Dans le cas de la présente étude, le fournisseur indique une variabilité de $\pm 30\%$ par rapport à une masse volumique nominale de $150\text{ kg}.m^{-3}$. L'épaisseur des échantillons est de 40 mm.

3. Installation de mesure

Les méthodes de mesure de conductivité thermique sont nombreuses [12]. Les techniques les plus utilisées et les mieux maîtrisées sont les méthodes en régime stationnaire de type *plaque chaude gardée* (PCG) ou *fluxmétrique*, dont il existe de nombreuses variantes. Malgré une croissance de l'usage des méthodes transitoires depuis ces vingt dernières années, la PCG reste reconnue comme étant la méthode de mesure de référence pour les matériaux isolants.

3.1. Principe de mesure

La PCG est une méthode en régime stationnaire qui a comme principe de reproduire dans une installation de dimensions finies, le transfert de chaleur qui aurait lieu à travers une plaque infinie limitée par deux plans parallèles isothermes : un plan "chaud" et l'autre "froid". Plusieurs configurations de mesure sont possibles, la plus courante étant la *configuration à deux éprouvettes*, décrite ci-après.

Le principe consiste à réchauffer par effet Joule une plaque métallique (plaque chaude) située entre deux éprouvettes identiques en contact vers l'extérieur avec une plaque froide. La puissance électrique dissipée par effet Joule dans la plaque chaude se répartit alors en deux parties égales et pour éviter les pertes thermiques aux bords des éprouvettes, elles sont placées dans une enceinte contrôlée en température et humidité. Le terme de plaque chaude gardée

vient du fait que pour éviter les fuites latérales à travers la plaque chaude elle-même, la zone centrale de cette plaque (zone de mesure) est séparée de la partie périphérique (appelée zone de garde) par un déjoint (coupure thermique). Cette zone est régulée thermiquement de sorte que sa température soit identique à celle de la zone de mesure. Après établissement d'un régime stationnaire de part et d'autre de la plaque chaude gardée, le flux surfacique est déterminé à partir de la mesure de la puissance électrique dissipée dans la zone de mesure de la plaque chaude (flux thermique ϕ) et de la surface de la zone de mesure A . Dans ces conditions et compte tenu des soins apportés à la conception du montage, les effets de bords sont négligeables et modèle monodimensionnel est vérifié. En appliquant la loi de Fourier, il est alors possible de quantifier la conductivité thermique équivalente k suivant l'équation (1) :

$$k = \frac{\phi \cdot L}{2 \cdot A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

où k est conductivité thermique, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), L l'épaisseur de l'échantillon (m), A la surface de l'échantillon (m^2), ΔT la variation de températures ($^{\circ}C$) et ϕ le flux thermique (W)

3.2. Adaptation de la plaque chaude aux températures élevées

L'installation développée au LNE [12] et illustrée sur la figure 1, est basée sur les recommandations des normes ISO 8302 [1] et EN 12667 [13].

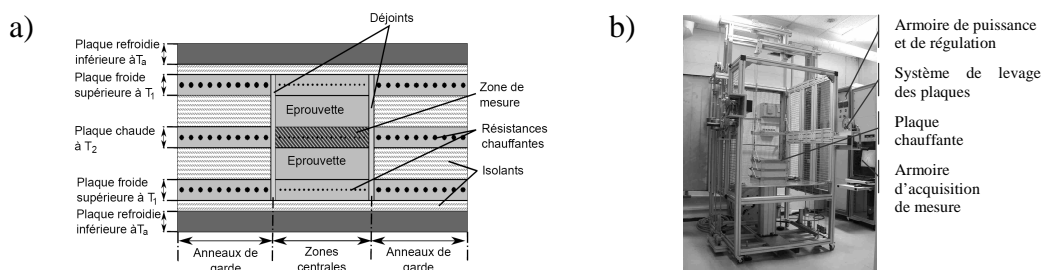


Figure 1 : Plaque chaude gardée haute température à deux éprouvettes développée au LNE. a) Plan de coupe. b) Photo de l'installation générale

Le LNE a choisi une configuration d'éprouvettes carrées de dimensions $100 \times 100 \text{ mm}^2$ dont l'épaisseur peut varier de 10 à 100 mm. Le choix de cette taille d'éprouvettes, relativement petite, présente l'intérêt d'avoir une meilleure maîtrise de la planéité des faces ; les résistances de contact pourront ainsi être réduites. Les mesures de conductivité thermique à basse température sont généralement faites avec des éprouvettes continues couvrant toute la surface des plaques chauffantes (zone de mesure et anneaux de garde). Le dispositif "haute température" du LNE utilise une zone de mesure de taille et de géométrie identiques à celles des éprouvettes afin de fournir un flux de mesure plus important. De plus, cette configuration permet de prolonger le déjoint sur la périphérie des éprouvettes et donc de réduire d'avantage les flux parasites avec les anneaux de garde [14].

4. Résultats et discussion

Les mesures de conductivité thermique ont été réalisées sur les éprouvettes conditionnées au moins 15 jours dans un environnement régulé à $(23 \pm 3)^{\circ}C$ et $(50 \pm 5) \% \text{ HR}$. Les mesures sont effectuées à trois températures moyennes : $(25 \pm 0.4)^{\circ}C$, $(90 \pm 0.4)^{\circ}C$ et $(150 \pm 0.4)^{\circ}C$. Ces températures sont légèrement inférieures à la température de dévolatilisation¹

¹ La dévolatilisation est un processus complexe qui transforme la phase solide en un milieu gazeux combustibles.

du balsa ($\sim 190^\circ\text{C}$) [15]. Cette remarque sera expliquée plus en détail par la suite. L'écart de température imposé entre les faces des éprouvettes est de $(15,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Le régime de flux stationnaire menant à l'évaluation de la conductivité thermique est atteint au bout de 6 heures par niveau de température. Les résultats expérimentaux obtenus pour le balsa en fonction de la température et de la masse volumique (à 23°C) sont reportés sur la figure 2.

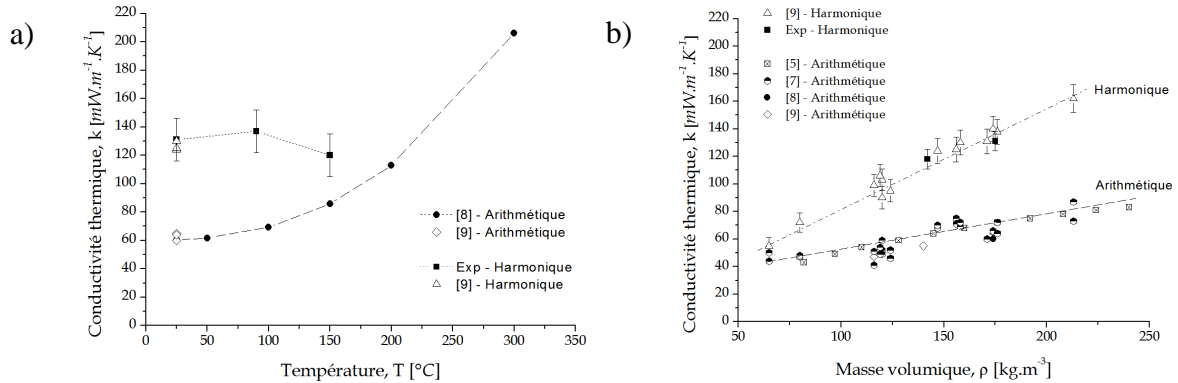


Figure 2 : Conductivités thermiques harmoniques et arithmétiques efficaces du balsa en fonction a) de la température et b) de la masse volumique à température ambiante (b). Les valeurs sont comparées à la littérature [5,7-9].

Les mesures sont comparées aux principales valeurs arithmétiques et harmoniques de la littérature [5-7-9]. La figure 2.a met en évidence que les valeurs du LNE correspondent parfaitement aux résultats de Carré [9] à température ambiante. En outre, l'orientation de fibre a une influence sur la réponse thermique du matériau. Il apparaît que la conductivité thermique dans la direction des fibres (harmonique) est nettement supérieure à celle perpendiculaire (arithmétique) et évolue de façon différente en température. Lattimer [8] prévoit, en effet, une augmentation de la conductivité thermique arithmétique du balsa, lorsqu'il est soumis à une hausse de température jusqu'à 300°C , bien qu'il précise que le matériau commence à se dégrader à partir de 200°C . Dans notre cas, la valeur de la conductivité thermique harmonique effective augmente puis diminue. Rappelons que nos mesures sont restées bornées à la température de dévolatilisation. Des analyses enthalpiques réalisées sur ce matériau révèlent qu'une réaction endothermique se produit à 81°C . Ce résultat peut expliquer en partie l'augmentation de la conductivité thermique. La diminution de la valeur semble, quant à elle, liée à la déshydratation du balsa.

Par ailleurs, la figure 2.b reporte que la conductivité thermique dépend fortement de la masse volumique normale. La variation est quasi linéaire et la dispersion des valeurs expérimentales autour de la droite moyenne est relativement faible. Selon Carré [9] cette dispersion est liée à la notion de conductivité arithmétique qui ne correspond pas à la structure du matériau. Il serait nécessaire d'évaluer la conductivité dans une direction radiale et tangentielle, or d'après [5] les valeurs seraient légèrement différentes.

En somme, l'évaluation de la conductivité thermique est relativement difficile compte tenu de caractère fortement hétérogène du balsa : les résultats pouvant varier fortement d'une masse volumique à l'autre. L'analyse du phénomène nécessiterait une étude statistique de la répartition des hétérogénéités du matériau. Toutefois, cette étude sort du cadre de ce travail.

5. Limites de la mesure en température

Les mesures de conductivité thermique par plaque chaude gardée aux températures élevées sont reconnues pour être difficiles à maîtriser. En effet, toutes les intercomparisons

internationales réalisées à ce jour, montrent des résultats de mesure très dispersés, pouvant aller jusqu'à 15 % d'écart entre les différents laboratoires [14].

Dans le cas des matériaux polymères en général et du balsa en particulier, le champ d'application de cette technique de mesure devient très limitée [1]. En effet, au-delà de la température de décomposition thermique, la dévolatilisation de ces types de matériaux, liée par exemple à des réactions thermo-oxydatives, conduit à un réarrangement moléculaire (carbonisation) et à une variation dimensionnelle (dilatation) des éprouvettes, comme l'illustre la figure 3. La carbonisation surfacique réduit le transfert de chaleur au sein du matériau, biaisant du coup la mesure de conductivité thermique. La dévolatilisation génère en effet un gradient de conductivité thermique au sein du matériau. De fait, le terme « conductivité thermique efficace » n'a plus aucun sens physique car la nature du matériau est altérée en profondeur.

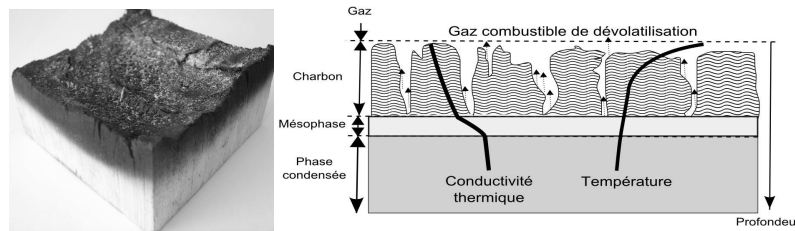


Figure 3 : Dégradation du balsa lorsqu'il est exposé à des températures supérieures à sa température de dévolatilisation [15].

Par ailleurs, le processus de dégradation et la dilatation de l'éprouvette entraînent une perte de contact avec les plaques. Ces défauts introduisent des résistances thermiques de contact non régulièrement réparties, liées à l'emprisonnement d'une lame d'air ou de gaz. L'erreur de mesure de conductivité thermique qui en résulte est alors directement liée à l'imprécision des mesures de température. En effet, cette mesure est généralement réalisée à l'aide de capteurs de température directement insérés dans les plaques chauffantes. Celle-ci intègre une chute de température parasite provenant de l'interface plaque-éprouvette. En outre, les résistances thermiques de contact peuvent conduire à une distorsion des lignes de flux de chaleur et par conséquent à des gradients de températures latéraux en surface des échantillons, biaisant alors la valeur de conductivité thermique efficace mesurée [14]. A l'issue de cette analyse, les mesures mettent donc en évidence que la température maximale de mesure est bornée par les caractéristiques physico-chimiques des matériaux (oxydation et distorsions mécaniques).

A cela il faut ajouter l'erreur liée à la contribution du rayonnement des plaques à hautes températures. Le balsa étant considéré comme un milieu semi-transparent absorbant, émettant et diffusant, il est le siège de plusieurs mécanismes thermiques : la conduction thermique dans la phase solide, la conduction thermique due aux gaz qui occupent les pores, et le rayonnement thermique qui en se propageant dans l'air interagit avec la phase solide. Le rayonnement des plaques et son transfert au sein du matériau influencent les valeurs de conductivité thermique obtenues ; si bien que ces valeurs ne reflètent plus réellement celles du matériau en situation d'incendie. En théorie, il serait nécessaire de soustraire la contribution radiative dans le matériau pour évaluer uniquement la conductivité thermique phonique du solide et des gaz. Cette analyse nécessite à la fois une caractérisation des propriétés radiatives du balsa et une résolution numérique des transferts de chaleur couplés conduction/rayonnement dans un milieu semi-transparent anisotrope.

D'autres sources d'erreurs peuvent nuire à la qualité de la mesure à haute température : 1) la mesure du gradient de température au travers de l'éprouvette. En effet, il n'existe pas de capteurs très fiables de petites dimensions pour les températures supérieures à 400 °C ; 2) Les défauts d'uniformité de température sur les faces des éprouvettes sont plus élevés du fait de la

conception des systèmes de chauffage fonctionnant à haute température ; 3) Les flux parasites sont plus importants en raison de l'accroissement des échanges par rayonnement à hautes températures ; 4) Il est particulièrement difficile de construire des plaques chauffantes de grandes dimensions qui conservent des bonnes planéités à haute température.

L'ensemble de ces limites permet d'expliquer les difficultés rencontrées lors de la mesure en température de la conductivité thermique des matériaux en général et du balsa en particulier par plaque chaude gardée.

6. Conclusion

Cet article présente les mesures de conductivité thermique *harmonique* du balsa à partir d'un conductimètre de référence métrologique de type PCG haute température. Les résultats ont été obtenus jusqu'à une température légèrement inférieures à la température de dévolatilisation du balsa (190 °C). Ils montrent que l'orientation et la masse volumique ont une forte influence sur le résultat. A l'issue de cette analyse, les limites de la technique de mesure pour ce type de matériau ont été exposées, démontrant les difficultés pour obtenir des données d'entrée fiables pour une simulation incendie.

Références

- [1] ISO 8302, Thermal insulation – Determination of steady state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus, 1991
- [2] B. Hay, J. Hameury, J.-R. Filtz, and R. Morice, *High Temp.s-High Press*, 2010;39 (3):181-208.
- [3] P.L. Villermoz, M. Laurent, *Technique de l'ingénieur*, **K420**, 1-29
- [4] Y. Raznjevic, Tables et diagrammes thermodynamiques, Eyrolles, 1970.
- [5] C.W. Robert, *CRC Handbook of chemistry and physics*, Boca Raton, CRC Press 68^e edt, 1988.
- [6] S Touloukian C.Y. Co, *Thermophysical properties of matter*, New York, Plenum Press 1972
- [7] Alcan, Baltek , <http://www.fichier-pdf.fr/2009/12/30/fat6rzx/baltek-structural-balsa-sb100-sl.pdf>
- [8] B.Y. Lattimer, J. Ouellette, J. Trelles, *Fire and material* 2011:**35**(1),1-19
- [9] P. Carre & R. Le gall, *Rev. Gen. Term.* 1990:**29**(340),211-215
- [10] V.L. Tagarielli, V.S. Deshpande, N.A. Feck, C. Chen, *Int J. of Mech. Sci.*, 2005:**47**,666-686.
- [11] K.E. Easterling, R. Harryson, L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Proc. R. Soc. Lond*, 1982:**383**(1784),31-41.
- [12] V. Scoarnec, J. Hameury, B. Hay, J.R. Filtz, 14^e Congrès int. de métrologie Paris, France, 22-25 Juin 2009,
- [13] NF EN 12667, Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods, 2001.
- [14] D R Salmon, R P Tye and N Lockmuller, *Measurement Science and Technology*, 20 (2009).
- [15] Marquis D. *Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Nantes*. 2010.

Remerciements

Les auteurs remercient le pôle de compétitivité EMC2, la région Pays de la Loire ainsi que la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services et la Délégation Générale de l'Armement pour leur soutien financier à la réalisation du projet MP08, cadre de ce travail.