

## VARIATION DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DU BOIS EN FONCTION DE L'HUMIDITE

J. Faouel\*, F. Mzali, A. Jemni, S. Ben Nasrallah  
Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques, Ecole Nationale  
d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn ElJazzar, 5019 Monastir, Tunisie  
[faoueljihen@yahoo.fr](mailto:faoueljihen@yahoo.fr)

### RESUME

On se propose dans ce travail d'étudier la variation des diffusivités thermiques du bois, dans deux différentes directions anatomiques, en fonction de son humidité. La première partie consiste à une conception optimale de l'expérience qui permettra de déterminer les conditions optimales de l'expérience pour une meilleure identification des diffusivités axiale et radiale et du nombre de Biot. La deuxième partie consiste à une étude expérimentale basée sur la méthode flash. Elle consiste à mesurer, chaque fois où on varie l'humidité de l'échantillon, sa réponse en température à une excitation thermique de courte durée. La technique d'identification des paramètres est basée sur la minimisation de l'écart entre les signaux théoriques et expérimentaux en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

### NOMENCLATURE

$a_x$	diffusivité thermique axiale	(m <sup>2</sup> /s)
$a_z$	diffusivité thermique radiale	(m <sup>2</sup> /s)
Bi	nombre de Biot	
e	épaisseur de l'échantillon	(m)
L	longueur de l'échantillon	(m)
l	largeur de l'échantillon	(m)
x, y, z	coordonnées de l'espace	
X	matrice de sensibilité	

### 1. INTRODUCTION

De nos jours le bois est utilisé dans plusieurs secteurs qui exigent de bonnes propriétés d'isolation. Grâce à sa basse conductivité thermique et à sa rigidité, il présente un grand intérêt d'utilisation dans plusieurs domaines technologiques et industriels. La connaissance de ses propriétés thermo-physiques est d'une importance majeure pour la compréhension de son comportement vis-à-vis des contraintes qui lui sont imposées lors de son utilisation. Certaines recherches ont été orientées vers la caractérisation de ce matériau possédant une structure assez complexe. TenWolde et al. [1] s'intéressaient à la détermination de la conductivité et la diffusivité thermiques et la chaleur spécifique des échantillons de différents types de bois et des matériaux à base de bois. Ils ont remarqué que les deux premières propriétés varient avec l'humidité des échantillons. Steinhagen [2] a préparé une revue bibliographique où il a présenté les propriétés thermiques (conductivité et diffusivité thermiques et chaleur spécifique) de différents types de bois (pin, chêne, bouleau...) dans ses différentes directions anatomiques. Il a remarqué que la composante tangentielle de la conductivité thermique est légèrement inférieure à la composante radiale d'un rapport de 0.9 à 0.95. Alors que la composante longitudinale est supérieure à celle radiale d'un coefficient variant entre 2 et 3

selon le type et l'humidité de l'échantillon. De même pour la diffusivité thermique vue que la chaleur spécifique est indépendante de la direction choisie. Gu [3] a développé un modèle bidimensionnel de conduction transitoire permettant de déterminer les composantes radiales et tangentielle de la conductivité thermique des échantillons en bois. Nabhani [4] a remarqué que la chaleur spécifique ainsi que la densité varient en fonction de l'humidité de l'échantillon.

Une première partie de ce papier est consacrée à la compréhension de la structure interne du bois permettant l'interprétation des résultats obtenus. Une deuxième partie consiste à représenter le modèle mathématique utilisé. On passe par la suite à la conception optimale de l'expérience qui permet de fixer les conditions optimales de l'expérience. Enfin une étude expérimentale nous permettra de déterminer les diffusivités thermiques axiale et radiale et le nombre de Biot d'un échantillon en hêtre pour deux humidités différentes en utilisant une technique inverse basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

## 2. STRUCTURE DU BOIS

Le bois est un matériau hétérogène étant donné qu'il est constitué d'éléments de nature et de forme variés (les cellules) ; anisotrope, puisqu'il n'a pas les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. En effet on considère trois directions de base : la direction axiale ou longitudinale, la direction tangentielle et la direction radiale. Et enfin c'est un matériau hygroscopique c'est-à-dire qu'il est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction des conditions de l'air dans lesquels il est placé. Trois directions anatomiques principales du bois sont considérées. La direction axiale ou longitudinale qui est la direction parallèle au grain, sur la longueur de l'arbre. La direction radiale perpendiculaire au grain, le long du rayon de l'arbre. Et la direction tangentielle perpendiculaire au grain, tangente à chaque anneau de croissance. La structure anatomique du bois est différente dans ces trois directions ce qui cause l'anisotropie du bois [5].

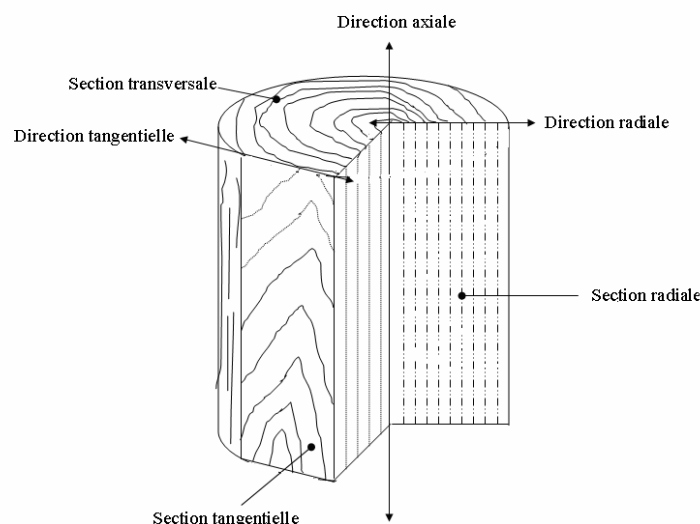


Figure 1. Les différentes directions anatomiques du bois.

L'anisotropie du bois est due d'une part à l'orientation des fibres et d'autre part à la saison de développement des cellules. Pour les bois tendres, les cellules développées en printemps ont une croissance rapide et une densité faible avec des cavités larges et des parois minces. Alors

que celles développées en d'autres périodes sont de densité importante et sont caractérisées par des cavités plus petites et par des parois épaisses [6].

Le bois contient généralement une certaine quantité d'eau, l'humidité d'un échantillon de bois est définie comme étant le rapport de la masse d'eau qu'il renferme à sa masse anhydre, elle s'exprime en pourcentage [5] :

$$H(\%) = \frac{M_H - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

Avec  $M_0$  est la masse anhydre et  $M_H$  est la masse de l'échantillon à l'humidité  $H$ .

### 3. PROBLEME DIRECT

On considère un échantillon parallélépipédique anisotrope dont une partie de sa face avant, délimitée par les positions  $x=\beta_1$  et  $x=\beta_2$ , est soumise à une impulsion de chaleur. Les faces latérales sont supposées isolées et les deux autres échangent de la chaleur avec l'ambiance (Figure 2).

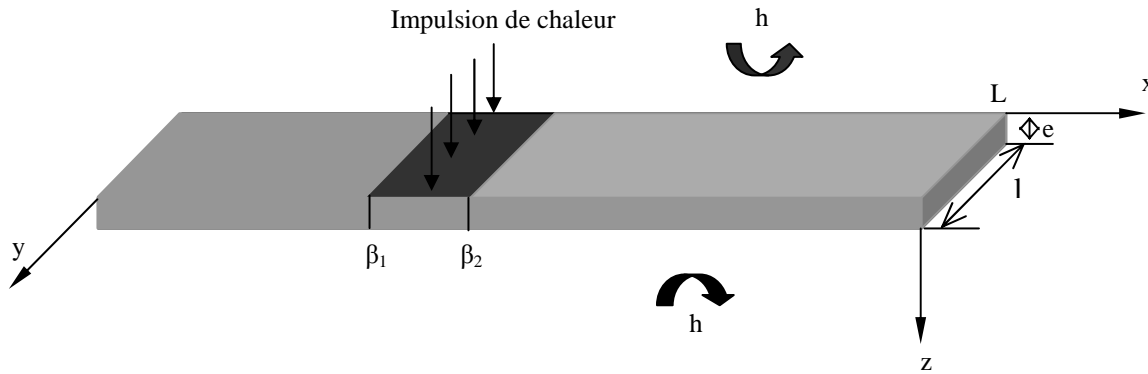


Figure 2. Schéma de principe.

La distribution de température au sein d'un tel milieu est donnée par Philippi [7] :

$$T(x, z, t) = \frac{q}{\rho c e} \left[ \frac{\beta_2 - \beta_1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha_n \beta_2) - \sin(\alpha_n \beta_1)}{\alpha_n} \cos(\alpha_n x) \exp(-a_x \alpha_n^2 t) \right] \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v_n \left[ 2v_n \cos\left(2v_n \left(1 - \frac{z}{e}\right)\right) + Bi \sin\left(2v_n \left(1 - \frac{z}{e}\right)\right) \right]}{4v_n (1 + Bi) \sin(2v_n) + (4v_n^2 - Bi^2 - 2Bi) \cos(2v_n)} \exp\left[-a_z \left(\frac{2v_n}{e}\right)^2 t\right] \right\} \quad (2)$$

Avec  $Bi = \frac{he}{\lambda_z}$  est le nombre de Biot,  $a_z = \frac{\lambda_z}{\rho c}$  et  $a_x = \frac{\lambda_x}{\rho c}$  sont les diffusivités thermiques

respectivement radiale et axiale,  $\alpha_n = \frac{n\pi}{L}$  et  $v_n$  est la  $n^{\text{ième}}$  racine des équations transcendentes

$$\begin{cases} \frac{Bi}{2} - v_n \operatorname{tg}(v_n) = 0 & n \text{ pair} \\ \frac{Bi}{2} + v_n \operatorname{cotg}(v_n) = 0 & n \text{ impair} \end{cases}$$

Les paramètres inconnus sont : la diffusivité axiale  $a_x$ , la diffusivité radiale  $a_z$ , le nombre de Biot  $Bi$  et le terme  $q/(\rho c e)$ . Si nous considérons la température réduite ( $T/T_{\max}$ ), le nombre de paramètres sera réduit à trois ( $a_x$ ,  $a_z$  et  $Bi$ ) étant donné que la sensibilité de  $q/(\rho c e)$  devienne nulle. Donc dans la suite du travail nous considérons la température réduite, d'où les paramètres à considérer pour l'identification sont la diffusivité axiale  $a_x$ , la diffusivité radiale  $a_z$  et le nombre de Biot  $Bi$ .

#### 4. PROBLEME INVERSE

Une étude de sensibilité a été menée pour déterminer les conditions optimales de l'expérience. Pour cela nous avons analysé les critères d'optimalité basés sur la matrice d'information  $X^T X$  (déterminant, nombre de conditionnement et valeur propre minimale).

Une valeur importante du déterminant de  $X^T X$  désigne que les valeurs des coefficients de sensibilité sont assez importantes et que les paramètres ne sont pas corrélés. La maximisation de ce critère permet la minimisation de la région de confiance des paramètres estimés. Cette région de confiance pourrait avoir une forme allongée si la variance de l'un des paramètres est importante par rapport aux autres. D'où la nécessité d'étudier un autre critère qui est le nombre de conditionnement qui pourrait être considéré comme étant le rapport entre la plus grande et la plus petite valeur propre de  $X^T X$ . Plus la valeur de ce critère est proche de l'unité, plus le problème est bien posé. La minimisation du nombre de conditionnement permet d'optimiser la forme de l'hyper-volume de la région de confiance. Parfois on ajoute un troisième critère d'optimalité qui consiste à maximiser la plus petite valeur propre de la matrice  $X^T X$  ce qui permet de minimiser l'écart entre les variances des différents paramètres.

Dans ce qui suit, nous allons choisir la position optimale de la sonde de température. Pour cela, la variation du déterminant, du nombre de conditionnement et de la valeur propre minimale de  $X^T X$  pour différentes position de la sonde de mesure de la température ainsi que l'incertitude sur l'estimation des trois paramètres considérés dans cette étude est présentée dans la figure 3.

On constate que l'estimation de  $a_z$  et du  $Bi$  est favorisée si la sonde est placée sous la partie excitée. En effet dans cette partie ( $10\text{mm} < x < 20\text{mm}$ ), leurs incertitudes sont minimales. Par contre l'incertitude relative à  $a_x$  présente de faibles valeurs si la sonde est placée, sur la face opposée, dans une position proche de la zone excitée. Par conséquent à partir d'une seule mesure, il est difficile d'estimer les trois paramètres simultanément avec une bonne précision. Pour améliorer les résultats, nous avons choisi d'utiliser deux sondes de mesure, l'une sous la zone excitée et l'autre proche de la zone excitée.

L'incertitude relative sur l'estimation du paramètre  $P_j$  est donnée par la relation suivante [8] :

$$e_j = \frac{2.576 \sigma_{P_j}}{P_j} \quad (3)$$

Avec  $\sigma_{P_j} = (V_{jj})^{1/2}$

Où  $V$  est la matrice de variance-covariance donnée par :  $V = (X^T X)^{-1} \sigma^2$

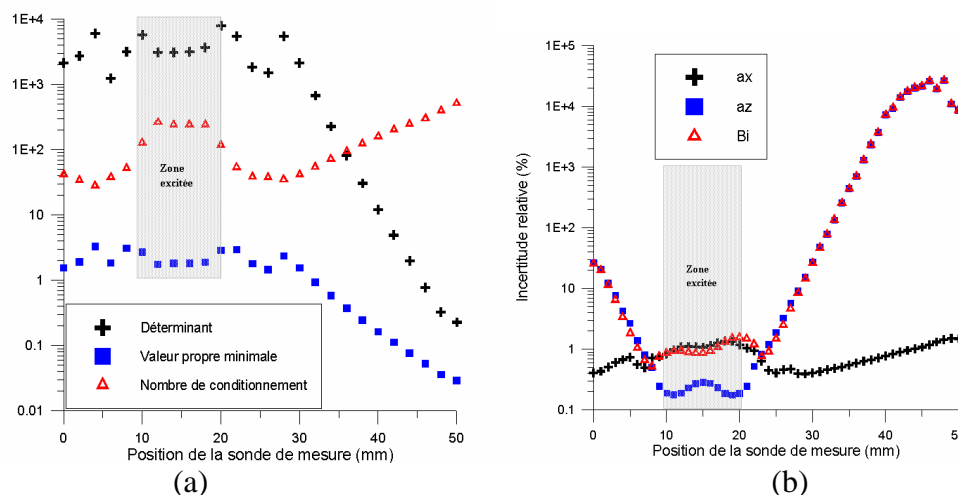


Figure 3. Effet de la position de la sonde de mesure de la température sur l'identification.  
( $e=2\text{mm}$ ,  $\beta_1=10\text{mm}$ ,  $\beta_2=20\text{mm}$ ,  $\sigma=10^{-2}$ )

### 5. MESURE DES DIFFUSIVITES DIRECTIONNELLES DU BOIS

Pour valider l'étude précédente, nous avons effectué une mesure expérimentale sur un échantillon rectangulaire en hêtre de longueur 50mm et d'épaisseur 5mm, excité de manière non uniforme sur sa face avant (entre  $\beta_1=20\text{mm}$  et  $\beta_2=40\text{mm}$ ). L'évolution de la température de la face arrière est mesurée à l'aide de deux sondes en platine l'une est placée sous la zone excitée ( $x_1=30\text{mm}$ ) et l'autre est proche de cette zone ( $x_2=9\text{mm}$ ). Elles sont reliées à une carte d'acquisition connectée à son tour à un micro-ordinateur permettant le traitement des données (figure 4).

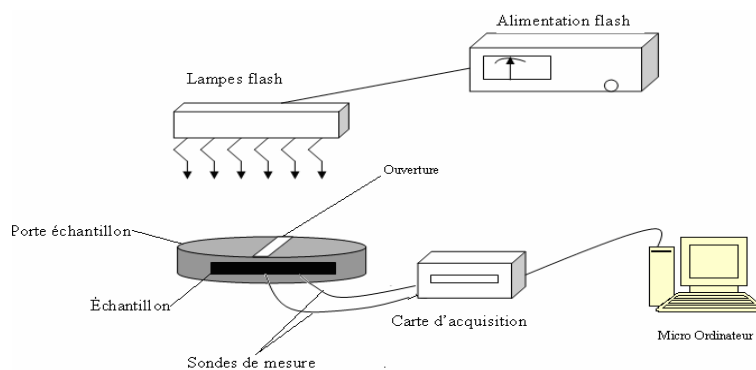


Figure 4. Schéma du dispositif expérimental.

Tableau 1 : Résultats de l'identification des paramètres pour deux humidités différentes

paramètres	H=14%		H=51%	
	Valeur estimée	Incertitude (%)	Valeur estimée	Incertitude (%)
$a_x$	$64.30 \cdot 10^{-8}$	0.28	$104.27 \cdot 10^{-8}$	0.23
$a_z$	$9.22 \cdot 10^{-8}$	0.16	$6.74 \cdot 10^{-8}$	0.10
Bi	0.43	0.38	0.51	0.27

Les diffusivités thermiques axiale et radiale et le nombre de Biot sont estimés pour deux valeurs de l'humidité de l'échantillon, la première valeur (14%) est sous le point de saturation

des fibres et l'autre (51%) dépasse ce point qui est généralement atteint pour une humidité de 30%. On remarque que la diffusivité axiale ( $a_x$ ) augmente sensiblement avec l'augmentation de la valeur de l'humidité alors que la diffusivité thermique radiale ( $a_z$ ) diminue légèrement. Ce résultat pourrait être expliqué par le fait que la variation de la conductivité thermique dans la direction axiale est plus importante que celle de la chaleur spécifique. Contrairement à la conductivité radiale dont l'augmentation est inférieure à celle de la chaleur spécifique.

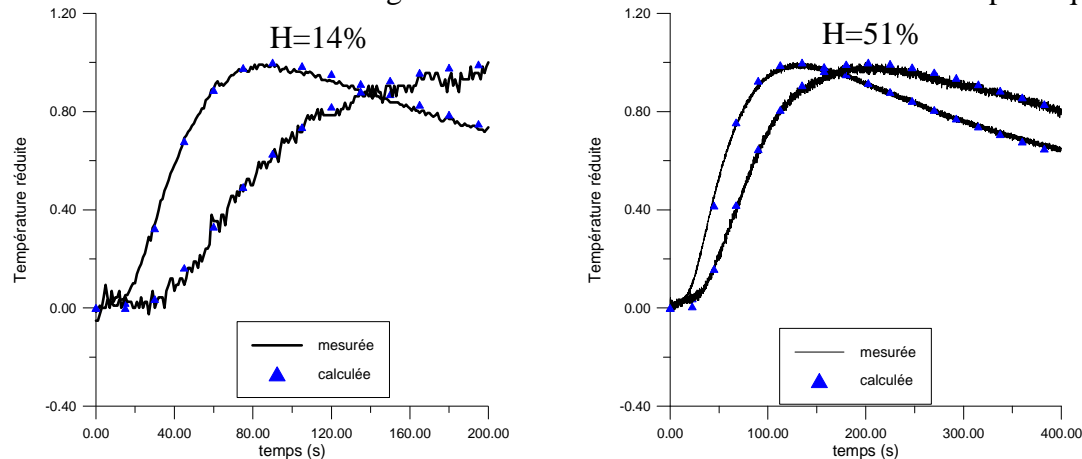


Figure 5 : Comparaison entre les thermogrammes théoriques et expérimentaux.

## 6. CONCLUSION

Dans ce travail une conception optimale de l'expérience nous a permis d'effectuer des mesures expérimentales qui ont abouti à l'estimation des diffusivités thermiques axiale et radiale d'un échantillon en hêtre pour deux valeurs différentes de l'humidité de l'échantillon. Nous avons remarqué que la diffusivité thermique axiale augmente avec l'humidité contrairement à la diffusivité thermique radiale qui diminue légèrement en augmentant l'humidité de l'échantillon.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A. TenWolde, J. D. McNatt, L. Krahn, 1988, Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings, U. S. Department of Agriculture, *Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin*.
2. Steinhagen H. P., 1977, Thermal conductive properties of wood, green or dry, from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $100^{\circ}\text{C}$  : A literature review, *U. S. Government Printing Office*.
3. Hongmei Gu, 2001, Structure two-dimensional anisotropic transient heat conduction model for wood, Doctorat de philosophie, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia*.
4. M. Nabhani, 2007, Application d'un modèle de transfert de masse et de chaleur au séchage à haute température: détermination expérimentale des paramètres du modèle et sa validation, Doctorat de philosophie, *Université de Laval*.
5. D. Aléon, P. Chanrion, G. Négrié, J. Perez, O. Snieg, 1990, Séchage du bois, Guide pratique, *Centre Technique du Bois et de l'Ameublement*.
6. H. Gu, J. F. Hunt, 2004, Two dimensional finite heat transfer models for softwood, 7<sup>th</sup> *Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, Nanjing, China, 21 Octobre-2 Novembre*.
7. I. Philippi, 1994, Mesure sans contact de diffusivité thermique de plaques minces en mouvement uniforme, Thèse de Doctorat, *Institut National Polytechnique de Lorraine*.
8. F. Mzali, L. Sassi, A. Jemni, S. Ben Nasrallah, 2003/2004, Parameter estimation of orthotropic solids with uncertainty in the sensor position: use of Levenberg-Marquardt and conjugate gradient methods, *High Temperatures- High Pressures*, 35/36, pp. 281-288.