

II. Méthodes de mesure des propriétés thermiques

La classification la plus naturelle consiste à considérer deux grandes catégories que sont les méthodes en régime permanent et celles en régime variable par Degiovanni en 1999 [3].

II.1. Méthode de mesure en régime permanent

II.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée (détermination de la conductivité)

C'est une méthode qui permet de mesurer la conductivité thermique des matériaux en régime permanent. Le principe de mesure de cette méthode consiste à maintenir une différence de température ΔT entre deux surfaces parallèles et planes entre lesquelles on place un échantillon. Pour cela, on met en contact l'une des faces de l'échantillon avec une plaque chauffante et l'autre avec une plaque refroidit par circulation d'un fluide provenant d'un bain thermostaté. Des fluxmètres et des thermocouples permettent de mesurer respectivement le flux de chaleur et la différence de température. L'objectif final est de déterminer la conductivité thermique de l'échantillon en reproduisant les conditions de transfert de chaleur entre deux plans parallèles et isotherme de Ponte et Klarsfeld en 2002 [4]. Le principe est illustré par la figure 2

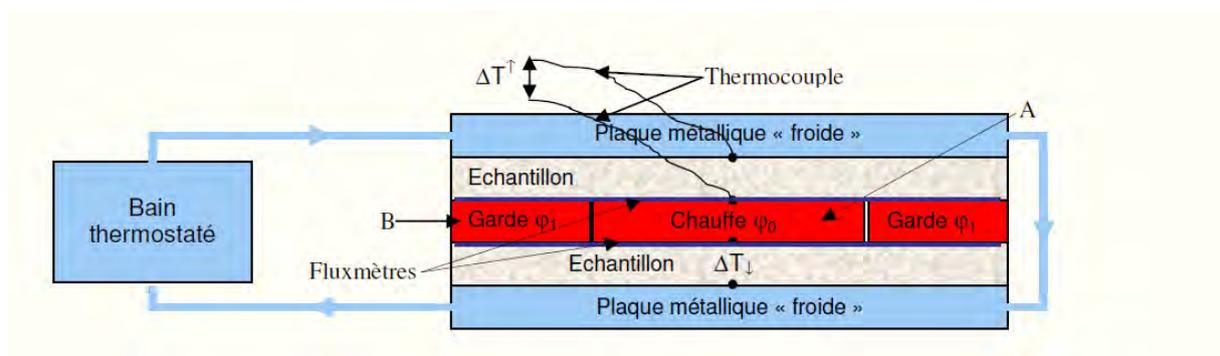


Figure 2: Mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée[1]

S'il n'y a pas pertes latérales de chaleur par convection, on obtient un transfert de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon.

Dans ces conditions, la résistance thermique se calcul par la formule suivante :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi} \quad (9)$$

En tenant compte de la résistance de contact de part et d'autre de l'échantillon, la relation (7) devient.

$$\frac{\Delta T}{\phi} = \frac{e}{\lambda} + 2R_c \quad (10)$$

R_c : Résistance thermique de contact, elle s'exprime en $m^2 K.W^{-1}$

ϕ : Densité du Flux de chaleur, elle s'exprime en $W.m^{-2}$

Dans la pratique, le flux de chaleur envoyé par les éléments chauffants de la zone de mesure (A) et ceux de la zone de garde (B) sont identiques, si les valeurs indiquées par les thermocouples placés en différents endroits de la surface arrière de l'échantillon présenter des différences. Cela est dû aux pertes latérales par convection qui rendent le champ de température bidirectionnel.

Pour apporter une solution à ce phénomène, on envoie un flux de chaleur supplémentaire dans la zone de garde pour compenser les pertes de chaleur par convection de telle sorte qu'on ait à nouveau la relation $T_1 = T_2$. On ainsi obtient un champ de température unidirectionnel au moins dans la zone de mesure de A, comme l'indique la figure.

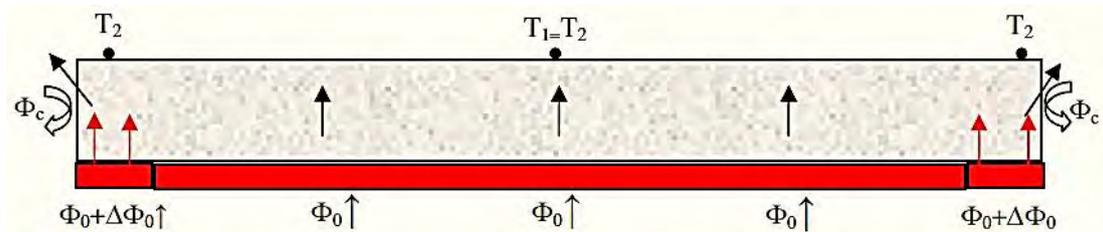


Figure 3: Champ thermique unidirectionnel dans le champ de mesure [1]

Pour fixer les limites d'application de cette méthode, il suffit d'imposer que l'erreur commise due en négligeant la valeur de la résistance de contact R_c sur la valeur de λ soit inférieure à un certain seuil de 5%. En considérant les deux faces, cette condition s'écrit :

$$2R_c < 0,005 \frac{e}{\lambda} \quad \text{Avec} \quad \frac{e}{\lambda} > 40R_c \quad (11)$$

Dans le cas des matériaux lisses (surfaces usinés), l'encadrement de la valeur de la résistance de contact R_c , $5.10^{-5} m^2 KW^{-1} < R_c < 2.10^{-4} m^2 KW^{-1}$ proposé par Jannot et al, (2009) permet

de déterminer le champ d'application de cette méthode pour ces types de matériaux .En respectant des conditions les plus défavorables ($R_c = 2.10^{-4} m^2 KW^{-1}$) [5], on obtient :

$$\frac{e}{\lambda} > 16.10^{-3} m^2 KW^{-1}$$

Ainsi, Si $\lambda=1 W.m^{-1}.K^{-1}$ cette condition conduit à $e_1 > 16mm$ et

Si $\lambda=2 W.m^{-1}.K^{-1}$ cette condition conduit à $e_2 > 32mm$

Dans le cas des matériaux comme le bois, il va y avoir une couche d'air d'épaisseur pouvant atteindre 0.2 millimètres. Avec : $\lambda_{air} = 0,25W.m^{-1}.K^{-1}$, on obtient

$$R_c = \frac{2.10^{-3}}{0,25} m^2 KW^{-1} \quad (12)$$

Soit une valeur numérique pour R_c chaque face et au total $16.10^{-3} m^2 KW^{-1}$

On obtient : $\frac{e}{\lambda} > 40 \times 16.10^{-3} m^2 KW^{-1}$ avec $0,5W.m^{-1}.K^{-1} < \lambda < 0,25W.m^{-1}.K^{-1}$

Si $\lambda = 0,5W.m^{-1}.K^{-1}$: cette condition conduit à : $e_1=32$ cm

Si $\lambda = 2,5W.m^{-1}.K^{-1}$: cette condition conduit à : $e_1=160$ cm

Conte tenue des résultats obtenus, nous pouvons conclure que cette méthode n'est pas adapté pour caractérisé nos matériaux qui ont une faible rugosité et ayant une conductivité thermique faible.

II.1.2. Méthode de la mi- plaque chaude (détermination de la conductivité)

C'est un dispositif qui permet de déterminer la conductivité thermique d'un matériau en régime permanent. Une mise au point d'une technique de mesure de la résistance thermique d'une plaque mince (de faible épaisseur) a été réalisée par Batsale et Degiovanni, (1994) [6]. Cependant, les résultats obtenus étaient basés sur un modèle 1D avec prise en compte des transferts latéraux convectifs par le modèle simplifié de l'ailette. Ce modèle a été remplacé par un modèle complet 3D pour obtenir une meilleure exactitude de la mesure par Jannot et al, en 2009, la figure 6 donne le schéma de principe du dispositif expérimental. [5]

L'élément chauffant va dissiper de la chaleur à travers les deux faces. Le flux $\phi_9 \uparrow$ dissipé vers la partie supérieure est mesuré par un élément Peltier étalonné en fluxmètre (figure 6).

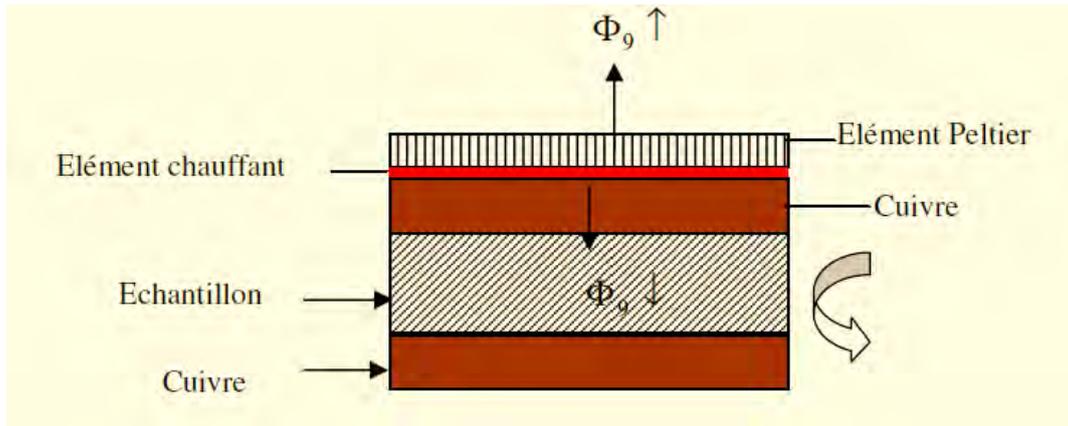


Figure 4: Schéma de principe du dispositif expérimental de la mi-plaque chaude [1]

On peut ajuster la tension de l'élément chauffant de sorte à annuler le flux $\phi_9 \uparrow$ et en déduire la valeur du flux par la relation $\phi_9 \downarrow = \phi - \phi_9 \uparrow$ avec :

$$\phi_9 = \frac{U^2}{R_e} \quad (13)$$

U : Tension électrique, elle s'exprime en *volt*

R_e : Résistance électrique, elle s'exprime en *ohm*

Pour cette configuration, la température de l'élément chauffant est quasiment égale à la température ambiante. Puisque le cuivre a une conductivité thermique, sa température au cœur est égale à la température de l'air ambiant, T_{air} il n'aura pas de convection latérale des éléments de cuivre situés entre l'échantillon et l'élément chauffant. Le système peut alors être davantage simplifié par la figure 5.

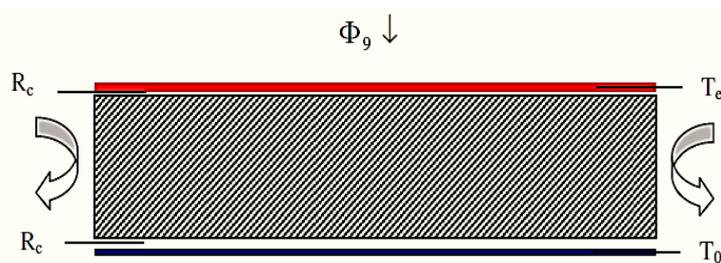


Figure 5: Schéma final du modèle simplifié [1]

Si le transfert restait unidirectionnel et qu'il n'y ait plus de résistance de contact, on pourrait estimer la conductivité thermique λ par :

$$\lambda = \frac{e\phi_0}{S\Delta T} \quad (14)$$

Avec $\Delta T = T - T_0$, T_0 est température ambiante du bain thermostaté ou du dispositif de Peltier de la partie inférieur. Mais cela n'étant pas il faut tenir en compte le modèle 3D, qui permettrait d'établir une relation de la forme $\lambda = f(e, \phi_0, R_c, h)$ en régime permanent.

Les résultats de la mesure sont donnés sous la forme d'un intervalle de valeur de $\lambda : \lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$

En conclusion, on peut dire que cette méthode permet de déterminer la conductivité thermique des matériaux isolants, mais présente des difficultés sur la durée de mesure, sur les conditions imposées aux matériaux étudiés, mais aussi sur la détermination de ces propriétés.

II.2. Méthode de mesure en régime transitoire

II.2.1. Méthode du fil chaud (détermination de la conductivité)

La méthode du fil chaud est une technique classique de mesure de la conductivité thermique en régime transitoire par Zhang et al, (1993). Elle a été utilisée ces dernières années pour caractériser de nombreux matériaux par Assael (2008) ; Tang et al, (2008) ; Wilson en 2008. On peut noter cependant que cette méthode n'est pas théoriquement applicable aux matériaux ayant une faible densité par Coquard et al, (2006) [7].

Le principe de la mesure consiste à placer un fil chaud entre les surfaces de deux échantillons à caractériser comme l'indique la figure 8. Lorsqu'un flux de chaleur lui est appliqué, on peut considérer que la direction de propagation de la chaleur est radiale pendant le temps que la perturbation n'a pas encore atteint les autres faces de l'échantillon (hypothèse du milieu semi-infini) [8].

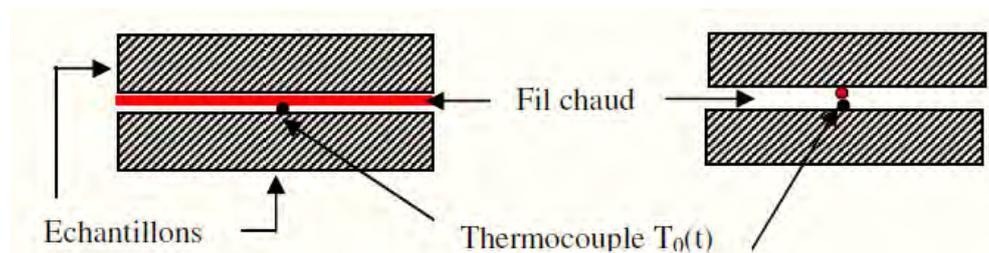


Figure 6: Schéma de principe de la méthode du fil chaud [1]

Dans le cadre d'une modélisation simple du phénomène, on considère les transferts de chaleur sont radiaux et l'échantillon est semi-infini. L'équation de la chaleur en coordonnées cylindrique s'écrit :

$$\left(\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

- Condition initiale :

$$-t = 0 \Rightarrow T(r, t) = T_0$$

- Condition aux limites :

$$-r = 0 \Rightarrow -\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = Q$$

$$-r \rightarrow \infty \Rightarrow T = T_0$$

r : Rayon du cylindre, il s'exprime en m

La solution de l'équation donne :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} E_i \left(\frac{r^2}{4at} \right) \quad (16)$$

Aux temps longs il vient :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \left(\frac{4a}{r_0^2 c} \right) \quad (17)$$

Le tracé de $T(r, t) - T_0$ en fonction de $\ln(t)$ est une droite de pente $\frac{Q}{4\pi\lambda}$ dont la détermination permet analytiquement d'en déduire la conductivité thermique λ .

Le principal inconvénient est que ce modèle n'est valable que si le milieu est semi-infini, il ne conviendrait donc pas pour la mesure de matériaux de faibles épaisseurs. Mais aussi présente une difficulté à concevoir un fil géométrie parfaitement cylindrique.

En conclusion cette méthode n'est pas adaptée pour l'étude des matériaux épais et de faibles densités.

II.2.2. Méthode Flash (détermination de la diffusivité)

C'est une technique qui permet d'estimer la diffusivité thermique des matériaux solides en régime transitoire. L'échantillon est sollicité thermiquement par l'absorption d'électrons ou de photons. L'application la plus remarquable de ces techniques est la méthode flash mise au point dans les années 60 [9].

Le principe de la méthode est de soumettre la face « avant » d'un échantillon à une impulsion thermique de très courte durée (que l'on assimile à une impulsion de Dirac d'énergie dans le temps) et d'enregistrer l'évolution de la température de la face 'arrière'. Un thermocouple en contact avec la face arrière permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir du moment où la face avant a reçu le flash [8].

L'analyse du thermogramme expérimental enregistré sur la face non irradiée permet de déterminer en utilisant des techniques de dépouillement déjà existantes et du temps de demi-montée $t_{1/2}$ (temps pour lequel $T = T_{\max} / 2$), la diffusivité thermique de l'échantillon.

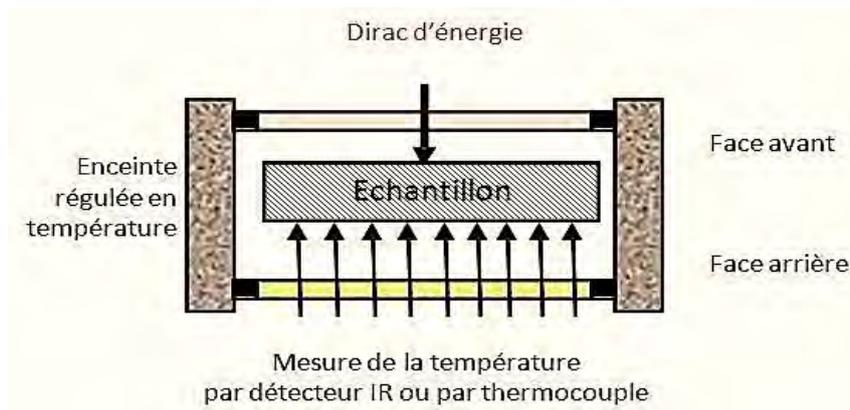


Figure 7: Schéma de principe de la méthode de flash

$$a = \frac{1,38e^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (18)$$

Le champ d'application d'une telle méthode est vaste, dans les applications les récentes on peut noter la caractérisation de fluide avec une modélisation basée sur les moments temporels [10].

- la caractérisation de polymères fondus entre 20 et 300 °C [11], technique pouvant être étendue à d'autres applications [12].

- la caractérisation des matériaux composites [13,14]

La méthode de flash est très utilisée dans le monde industriel, et fait l'objet de travaux importants. Pour autant, elle ne sera pas une méthode de base du travail présenté dans ce mémoire. En effet sa mise en œuvre expérimentale est relativement lourde.

II.2.3. Méthode du plan chaud asymétrique (détermination de l'effusivité et conductivité)

La méthode du plan chaud est initialement une technique de mesure de l'effusivité et de la conductivité thermique des matériaux en régime transitoire par Zhang et Degiovanni (1993) [15].

Le principe de la méthode consiste à insérer entre deux faces de l'échantillon à étudier une résistance chauffante de même section. L'élément chauffant envoie au travers du système initialement à l'équilibre thermique, un échelon de flux de densité Q .

L'élévation de température de la face chauffée permet après analyse, de remonter à l'effusivité et à la conductivité thermique du matériau. Le principe est illustré dans la figure 8.

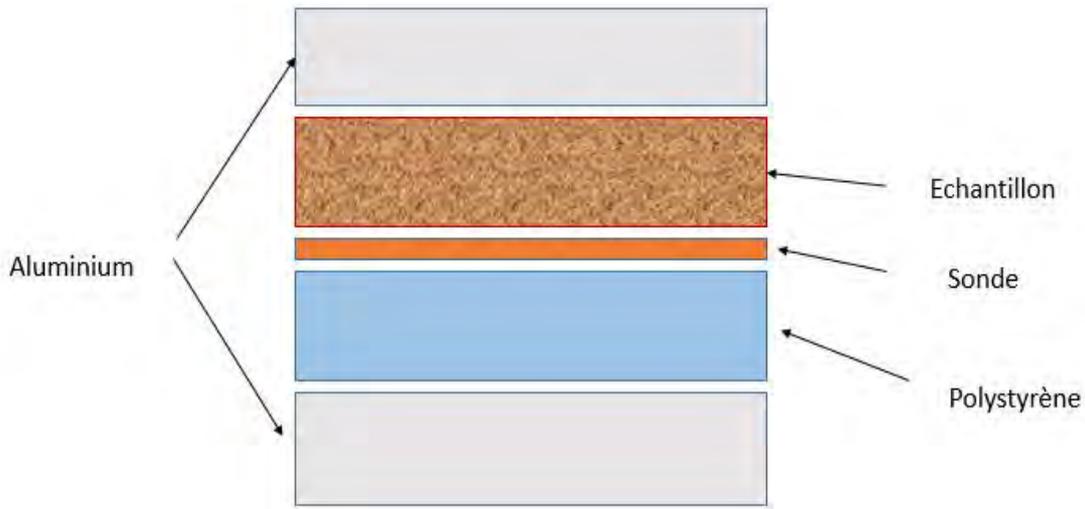


Figure 8 : Schéma du dispositif du plan chaud [8]

Si cette résistance chauffante délivre une quantité de Chaleur Q à l'échantillon, l'équation de la chaleur unidirectionnelle s'écrit alors :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

Une modélisation des transferts de chaleur supposés unidirectionnels dans l'échantillon semi-infini donne les conditions suivantes :

- Condition initiale

$$- \quad t = 0 \Rightarrow T(x,t) = T_0$$

- Condition aux limites

$$x = 0 \Rightarrow -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = Q$$

$$x \rightarrow \infty \Rightarrow T = T_0$$

Il vient la solution aux temps longs :

$$T(0,t) - T_0 = \frac{2Q}{\sqrt{\pi} \sqrt{\lambda \rho c}} \sqrt{t} \quad (20)$$

Une régression linéaire aux temps longs permet en connaissant la densité du flux de déterminer l'effusivité et la conductivité thermique du matériau étudié. Des perfectionnements dans ce domaine ont été apportés par adjonction de systèmes d'isolation performante. Ces derniers en font une méthode plus adaptée à la caractérisation de matériaux isolants. Des travaux récents [15, 16] ont mis en œuvre les conditions pour obtenir des résultats satisfaisants, notamment la nécessité d'une modélisation complète du système tenant compte des propriétés

thermophysiques de la sonde et de la résistance de contact entre l'élément chauffant et l'échantillon.

L'intérêt majeur de cette méthode est la détermination de deux propriétés du matériau

II.3. Choix de la méthode adaptée

Une étude des principales méthodes de caractérisation thermophysiques de matériaux permet de les classer en deux grandes catégories.

-La première catégorie regroupe les méthodes en régime permanent qui généralement durent très longtemps (des heures, voire des jours) que nous n'allons pas utiliser essentiellement pour les raisons suivantes :

La méthode de la plaque chaude gardée ainsi que celle de la mi-plaque chaude sont destinées à la caractérisation de matériaux de faible conductivité thermique mais rencontrent beaucoup de difficultés. Enfin, nous souhaitons étudier d'autres méthodes plus rapides et à faible coût.

-La deuxième catégorie concerne les méthodes en régime transitoire dont nous n'allons retenir que la méthode du plan chaud asymétrique pour des critères de coût et d'adaptabilité. Comme dans le cas précédent, nous n'allons pas utiliser les méthodes ci-après pour des raisons suivantes :

La méthode flash nécessite une métrologie fine (thermocouple en tellure de bismuth) et des éléments expérimentaux non disponibles au LEA (Batterie de condensateurs, lampes à éclats). La méthode du fil chaud est simple dans sa mise en œuvre mais, elle présente quelques difficultés : l'inertie et la géométrie du fil, mais aussi pour des matériaux très isolants, des forts gradients de température peuvent apparaître au sein du matériau et remettre en cause la linéarité du champ de température.

Finalement, notre choix se portera à priori sur la méthode du plan chaud asymétrique.

La première raison est que cette méthode est très simple et rapide (régime transitoire) et utilise des sondes à faible coût, mais aussi permet d'obtenir des résultats acceptables et caractériser totalement le matériau.

III. Présentation de quelques isolants thermiques utilisés

Pour améliorer et économiser de l'énergie, il est indispensable de mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. Pour cela nous allons citer les différents matériaux isolants les plus utilisés.

III.1. Isolants industriels

III.1.1. Laine de verre

La laine de verre est un produit commercialisé sous forme de rouleaux avec liant sans formaldéhyde de conductivité thermique $0,046 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, avec une masse volumique de l'ordre de $20 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Il est composé essentiellement de silice et verre recyclé de liant et du papier et de par-vapeur kraft dont est revêtue une face. Sa capacité thermique massique ou chaleur spécifique est de $1700 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ avec une diffusivité thermique égal à $0,58 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et une effusivité de $41 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ [2]. La figure 9 donne l'aspect de la laine.



Figure 9: Aspect de la laine de verre [2]

III.1.2. Fibre de bois

Isolant d'origine végétale (92 % de fibres de bois recyclées issues de forêt gérées durablement), produit de récupération de fibres de bois ou de déchets de sciure, il a une bonne efficacité thermique et acoustique. Sa conductivité thermique variant de $0,036$ à $0,050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, et sa diffusivité thermique est de $12 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Il possède une effusivité thermique de $116 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$, et une capacité calorifique de $2100 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [33], (voir figure 10).

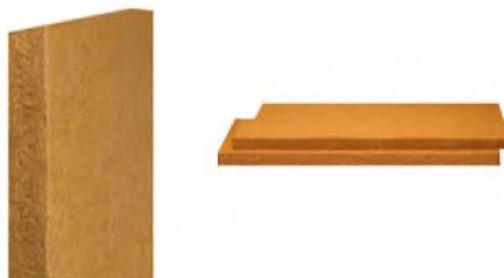


Figure 10: Aspect de la fibre de bois [33]

III.1.3 Mousse du polyuréthane

Les produits de polyuréthane se présentent sous forme de panneaux à bords droits pourvus éventuellement de rainures et de languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme de mousse

rigide en PUR/PIR et sont dotés d'un parement sur les deux faces. Les parements conditionnent en partie les propriétés isolantes. La mousse rigide de PIR/PUR résulte d'une réaction chimique exothermique de polyisocyanurates et de polyol sous l'effet d'agents expansifs. La conductivité thermique varie de $0,023$ à $0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, et sa diffusivité thermique de $63 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, avec une capacité spécifique de 1400 et une effusivité thermique de 38 [33].



Figure 11: Aspect du polyuréthane [33]

III.1.4. Contreplaqué

Le contreplaqué ou plus précisément panneau contreplaqué est un panneau à base de bois obtenue par collage de couches adjacentes à fils croisés. Sa résistance et sa légèreté en font un matériau idéal, (voir figure 12).

Les panneaux de contreplaqués sont utilisés pour leur stabilité en planéité et leurs performances d'isolation thermique. Sa conductivité thermique varie entre $0,11$ et $0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, avec une masse volumique de 300 à $600 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$. La figure ci-dessous nous donne l'aspect de la laine de verre [33].



Figure 12: Aspect du contreplaqué [33]

III.2. Isolants naturels

III.2.1. Gousse de mil

La gousse de mil est un déchet agricole disponible en abondance dans tout le territoire, notamment dans les zones agro-pastorales. Elle est de faible densité et son incorporation dans les autres matériaux a pour but d'obtenir un matériau plus léger et meilleur isolant thermique. . La gousse mil se présente sous forme d'inclusions comme défini dans la théorie de Maxwell. Cela permet d'envisager d'une façon relativement simple la modélisation des matériaux composites dont il est constitutif en partie [17]. La figure suivante donne son aspect



Figure 13: Aspect de la gousse de mil

III.2.3. Sciure de bois

La sciure de bois est un résidu résultant de la transformation du bois. Selon Meukam en 2004, la conductivité thermique de la sciure de bois se situe entre $0,06$ et $0,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, tandis que sa masse volumique oscille entre 1000 à $1200 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Ceci montre que la conductivité thermique du bois et de ses dérivés est relativement faible [18]. La figure 13 nous donne son aspect.



Figure 14: Aspect de la sciure de bois [2]

III.2.4. Fibre de coco

La fibre de coco ou coir est une fibre végétale, naturelle qui entoure et protège la noix de coco, fruit du cocotier. A l'extérieur de la noix sous une enveloppe lisse, de couleur vert clair ou orange lorsque le fruit n'est pas mûr, tirant sur le brun à maturité, une épaisse couche de fibres ligneuses. Elle assure aussi la flottabilité aux noix qui tombent dans l'eau, leur permettant d'aller se déposer sur des rivages lointains, pour la reproduction de l'espèce.



Figure 15: Aspect de la fibre de coco

III.2.4 Balles de riz

Les balles de riz non broyées sont des enveloppes de grains de riz à l'état brut. Au Sénégal, sa culture se pratique essentiellement au nord de la vallée du fleuve Sénégal et au sud, plus particulièrement en Casamance. L'observation au microscope électronique à balayage des cendres de balles de riz non broyées réalisé par Diallo en 2002 et Sow en 2008 a montré la nature poreuse de cet élément. Leur faible densité leur confère sans doute une faible conductivité thermique [19 ,20].

Conclusion

Suite à la présentation des propriétés thermiques et la classification des méthodes de mesure, notre choix c'est porté sur la méthode du plan chaud asymétrique basé sur une experimentation simples. Cette méthode permet de déterminer deux propriétés du matériau et d'accéder à d'autres par les relations théoriques déjà présentées. Cependant, en guise de valeuriser les déchets agricoles du point de vue de leur faible densité, notre réflexion porte sur deux matériaux locaux : la gousse de mil et la fibre de coco.

Dans la suite ce travail, nous proposerons une revue sur la généralité du séchage et le différentes types de séchoirs solaires.