

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DE L'INFLUENCE DES MATÉRIAUX FIBREUX ORGANIQUES SUR LA PERFORMANCE THERMIQUE DE PRODUITS MINCES RÉFLECTEURS

Lazaros Elias MAVROMATIDIS*, **, Mohamed EL MANKIBI,
Pierre MICHEL**, Mat SANTAMOURIS*****

*Architect Engineer of the NTUA, Grant holder of the "Alexander S. Onassis" public benefit foundation.
Adresse actuelle : Laboratoire MAP-Aria UMR CNRS/MCC 3495, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture
de Lyon, 3 rue Maurice Audin, BP 170, 69512 VAULX-EN-VELIN Cedex, France
e-mail : lazarosmavr@hotmail.com ; lazaros.mavromatidis@aria.archi.fr

**Université de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Département Génie Civil et Bâtiment,
CNRS FRE 3237, Laboratoire des Sciences de l'Habitat,
3 rue Maurice Audin, 69518 VAULX-EN-VELIN Cedex, France

***National Kapodistrian University of Athens, Physics Department Group Building Environmental Research,
Panepistimioupolis, Building Physics 5,15784, ATHENS, ZOGRAFOU, Greece

Nomenclature

R résistance thermique [$m^2 K W^{-1}$]
 S surface de l'échantillon [m^2]
 ΔT différence de température de surface [K]
 T température [K]
 t temps [sec]
 Q c capacité Thermique Volumétrique [$J/(m^3 K)$]
 k conductivité Thermique [$W/(K m)$]
 x la coordonnée spatiale à travers l'épaisseur d'isolation [m]
 q_r le flux radiant total en W/m^2 où $q_r = F^+ - F^-$
 F^+, F^- les flux radiants incidents qui se développent respectivement vers le côté chaud et le côté froid du matériau [W/m^2]

l longueur de chaque section [m]
 f la fraction volumique des fibres
 R rayon d'une fibre [m]
 h_o, h_i coefficients de transfert de chaleur équivalente par convection et par rayonnement aux limites [$W/(K m^2)$]

Symboles grecs

Φ flux mesuré qui traverse la paroi [W]
 Δx distance entre les interfaces des volumes finis [m]
 δx distance entre les points de grille [m]
 ε émissivité
 β coefficient d'absorption [m^{-1}]
 σ constante de Stefan-Boltzmann [$5,6704 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$]

1. INTRODUCTION

L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, les émissions de CO₂, la pollution des eaux et de la terre sont les impacts de l'évolution technologique et industrielle dans notre vie quotidienne (Rotari, 2008). Les phénomènes écologiques indésirables causés par la pollution ont évolué jusqu'à une ampleur qu'on ne peut plus négliger (Chabot, 2009). Face au réchauffement climatique et à la croissante nécessité de trouver des énergies de substitution au pétrole, la volonté de réduire les consommations énergétiques n'a jamais été aussi grande (Chabot, 2009). Avec deux cinquièmes de l'énergie finale consommée et un quart des émissions de CO₂, le parc des bâtiments constitue une cible prioritaire pour des actions d'économie d'énergie.

L'isolation thermique des bâtiments constitue à l'évidence un des éléments clés de cette maîtrise des consommations d'énergie des bâtiments, qu'il s'agisse de l'enveloppe des constructions neuves ou d'actions de réhabilitation des bâtiments existants (Chabot, 2009). La performance thermique obtenue dépend du matériau (ou du produit) lui-même, des principes de mise en œuvre au regard de la conception du bâtiment, de la qualité même de la mise en œuvre, de l'évolution dans le temps des caractéristiques du matériau ou du produit comme de leur sensibilité à différents paramètres physiques ou climatiques (Rotari, 2008). Les isolants actuels permettent d'ores et déjà d'atteindre les niveaux d'isolation nécessaires à condition qu'ils bénéficient d'une conception et d'une mise en œuvre soignée (Chabot, 2009). Cependant, il existe toujours des points singuliers comme les ponts thermiques, les entrées d'air parasites ou les défauts de mise en œuvre qui peuvent constituer une part non négligeable des déperditions (Figure 1).

De nos jours, le marché du bâtiment est caractérisé par l'existence de différents systèmes d'isolation thermique dont les matériaux sont d'origine organique (laine de bois, liège, paille, chanvre technique) et / ou inorganiques (mousse de verre, verres et fibres minérales). L'apparition de tels matériaux isolants a conduit à un développement d'un axe de recherche spécifique. Le but principal des recherches scientifiques dans ce domaine est l'analyse et le test des propriétés réelles des matériaux d'isolation et des différents systèmes d'isolation (Khedari et al., 2004 ; Li et al., 2006 ; Al-Ajlan, 2006 ; Swinton et al., 2006 ; Skujans et al., 2007 ; Lim et al., 2007 ; Rasmussen et al., 2007 ; Harvey, 2007 ; Bouchair, 2008 ; Sambou et al., 2008 ; Xamán et al., 2009 ; Wei et al., 2009 ; Pavlík et al., 2009). Il y a quelques années, un nouveau type de matériau isolant, employé déjà dès 1960 dans les applications aérospa-

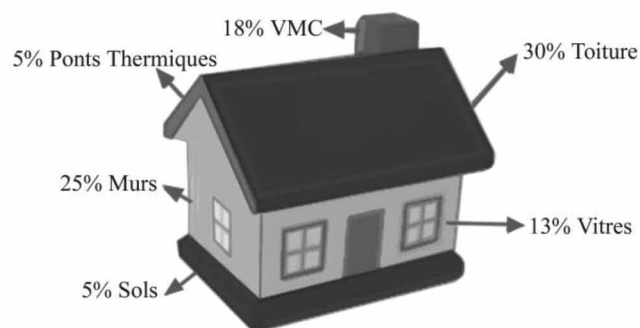


Figure 1 : Représentation schématique des déperditions de chaleur d'une maison (source : ADEME).

tiales, est maintenant apparu sur le marché du secteur de bâtiment: les Produits Minces Réfléchissants ou Réflecteurs (PMR) (Figure 2). Appelé parfois abusivement isolants minces, ces matériaux occupent une place de plus en plus importante et concurrencent de plus en plus les isolants traditionnels dits classiques. Selon leurs fabricants, ces matériaux auraient des performances thermiques aussi bonnes, voire meilleures que les isolants classiques (Rotari, 2008 ; Chabot, 2009).

La plupart des matériaux isolants fibreux utilisés dans le domaine du bâtiment constituent une seule couche d'isolation et fonctionnent par abaissement de la conduction thermique et du transfert de chaleur par convection. Selon quelques recherches, ils ne sont pas efficaces lorsqu'il s'agit de réduire les pertes par rayonnement (Qashou et al. 2009). Au contraire, les PMR peuvent être composés de nombreuses couches des matériaux organiques; il s'agit de laine de bois de haute résistance enduit des couches de lin ou de chanvre technique. Les surfaces à faible émissivité peuvent être efficaces dans la réduction de transfert de chaleur radiante (Rotari, 2008 ; Chabot, 2009).

De plus, des recherches antérieures sur ces matériaux ont montré que le rayonnement infrarouge pourrait être un mode important de transfert de chaleur au sein des isolants en fibre de haute porosité thermique même à des basses températures (Ning Du et al 2008; Bo-Ming Zhang et al 2008). C'est pourquoi l'utilisation de matériaux réfléchissants en combinaison avec des fibres organiques, dans des applications du bâtiment semble être une option intéressante pour l'amélioration de l'isolation des bâtiments afin de réduire la consommation d'énergie des constructions, en augmentant l'inertie et la résistance thermique de l'enveloppe.

Sachant donc que les surfaces à faible émissivité qui sont utilisés au sein des PMR semblent être efficaces quant à la réduction de transfert de chaleur par rayonnement -puis-

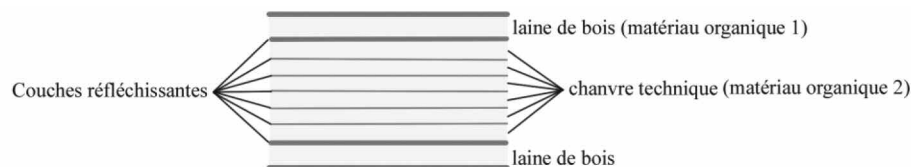


Figure 2 : Représentation schématique de la géométrie du PMR étudié dans le cadre de cette communication.

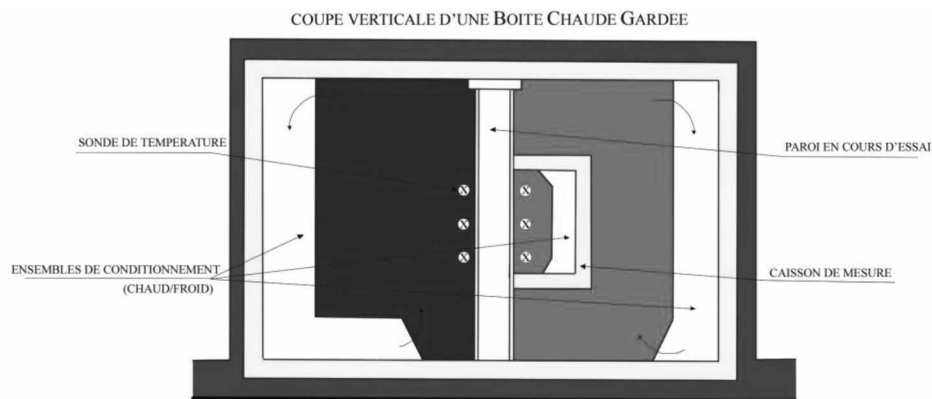


Figure 3 : Dispositif expérimental et schéma de principe du dispositif « Boîte Chaude ».

ces produits travaillent en tant que barrières radiantes- on pense actuellement que l'utilisation des PMR pourrait réduire la consommation d'énergie dans le domaine du bâtiment en raison du fait que les barrières radiantes inhibent le transfert de chaleur par rayonnement thermique (Eames, 2009).

Cependant, il est nécessaire d'examiner en détail à quel point la masse volumique et la porosité des fibres organiques peuvent influencer la capacité d'un PMR à réduire l'énergie thermique qui peut aussi être transférée par conduction ou convection.

2. OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Etant donné que les produits multicouches réflecteurs (PMR), apparus sur le marché français depuis quelques années, font aujourd'hui l'objet d'un débat scientifique et technologique portant sur leurs performances thermiques, qui trouve sa source dans la difficulté à définir des modalités de caractérisation de leurs performances réelles, cette communication présente les résultats des études que nous avons effectuées dans le but de caractériser l'influence de la capacité thermique volumétrique et de la porosité des matériaux organiques qui constituent les couches intermédiaires d'un PMR sur la résistance thermique d'un complexe isolant (Mavromatidis et al., 2011).

Ce travail de recherche a débuté en utilisant un dispositif expérimental de type boîte chaude gardée, afin de caractériser quelques produits actuellement disponibles sur le marché de l'isolation. Après cette première phase une modélisation analytique et numérique des phénomènes de transfert thermique dans les PMR a été effectuée. L'objectif initialement visé était de disposer d'un modèle numérique permettant d'accélérer la phase d'optimisation des produits en réservant les tests expérimentaux -lourds et coûteux en temps- aux opérations de calibration.

Plus particulièrement, ce travail de modélisation numérique a été basé sur la description physique des phénomènes de transfert de chaleur. L'évaluation du modèle numérique a été réalisée selon une confrontation avec les données expérimentales obtenues en utilisant une plateforme expérimentale du type boîte chaude gardée. Les avantages principaux de notre modèle numérique présenté ici sont :

- La façon dont nous avons défini les conditions aux limites.
- Même si le modèle est adapté au problème particulier en raison de la flexibilité du logiciel, ce dernier peut être facilement utilisé afin de simuler n'importe quelle configuration.

Après la validation du modèle numérique, un plan des simulations factoriel a été établi afin d'obtenir une fonction mathématique qui traduit l'influence de la capacité thermique volumétrique et de la porosité des matériaux organiques intermédiaires sur la résistance thermique du complexe isolant.

Les modèles mathématiques dérivés sont des outils nécessaires pour comprendre l'effet de différents paramètres et de leurs interactions sur la résistance thermique d'une paroi composite comprenant un PMR. L'analyse du modèle statistique dérivé permet notamment de prédire la capacité thermique volumétrique et la porosité optimales concernant les couches intermédiaires d'un PMR qui sont composées en utilisant des matériaux organiques.

3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

3.1. Mesures dans une Boîte Chaude Gardée

Le principe d'une Boîte Chaude Gardée consiste à placer l'échantillon dont on souhaite mesurer la résistance thermique globale entre une enceinte chaude, dotée d'une résistance chauffante entouré d'un anneau de garde thermique, et une enceinte froide équipée d'un groupe froid thermodynamique (Figure 3). Les tests sont menés en régime permanent établi sur une durée suffisante pour déterminer une valeur stable de la résistance thermique. Un écart de température supérieur ou égal à 20 °C est imposé entre les deux enceintes du dispositif. Cet équipement est conçu pour maîtriser les pertes thermiques, et en particulier les risques de ponts thermiques en ayant une surface effective de mesure de 1.7 x 1.7 m. La mesure des températures permet de déterminer par calcul la résistance thermique de l'échantillon testé en employant la relation $R = (S \cdot \Delta T) / \Phi$ (Jung et al., 2006 ; Mavromatidis et al., 2011).

Cet outil d'expérimentation est validé selon la norme ISO 8990 / 1994 (F) : « Une propriété ne peut être caractéristique d'un matériau, d'un produit ou d'un système que si les résultats d'une série de mesurages effectués sur un certain nombre d'éprouvettes provenant de plusieurs échantillons assurent une reproductibilité suffisante ». On voit qu'afin de déterminer les propriétés de transmission thermique de notre produit, on doit absolument passer par une expérimentation qui peut nous assurer que les conditions limites seront entièrement maîtrisées, reproductibles, et fideles à un usage réel (Jung, 2005).

Conformément à la norme « NF EN ISO 8990 », 120 capteurs PT 100 avec une résolution de 0,1 °C « norme IEC classe B » (voir figure 4) ont été installés sur l'échantillon et dans les différents caissons (Jung ; El Mankibi ; Michel, 2006). Deux résistances chauffantes ont été installées dans le caisson de mesure (80 W) et dans le caisson de garde (250 W). Quatre ventilateurs ont aussi été installés dans le caisson de garde afin d'homogénéiser les températures d'air. Pour qu'on puisse s'affranchir des problèmes que poserait le courant alternatif lors de la mesure des puissances de chauffage, une source de courant continu (0-220 V) pilotée par une tension 0-5 V a été intégrée au dispositif. La mesure de la puissance de chauffage injectée dans le caisson de mesure se fait par un convertisseur de puissance (0-150W) d'une précision égale à 0,25% de la pleine échelle (Figure 4).

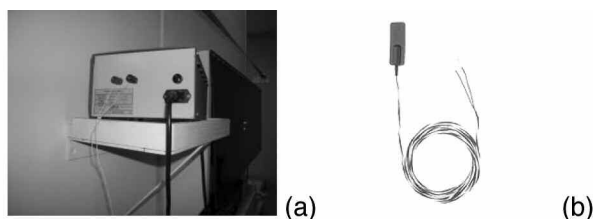


Figure 4 : (a) Convertisseur de puissance et son câblage ; (b) Capteur de température de surface PT 100.

La figure ci-dessous montre le dispositif expérimental en place. L'échantillon testé est de dimensions 3,00 m x 3,00 m, et son épaisseur totale peut atteindre environ 0,80 m. La surface de mesure est quant à elle des dimensions 1,70 m x 1,70 m. La mesure des températures de surface, nécessaire à la détermination de la résistance thermique, devant être réalisée en régime permanent établi, chaque séquence de mesure requiert un retour à la stabilité après chaque intervention sur ou autour du dispositif (Figure 5).

En conclusion, d'après les lois de la physique les propriétés de transmission thermique dépendent de la paroi considérée, des températures ambiantes de part et d'autre de cette dernière, des vitesses d'air à sa surface, de l'humidité relative ou encore du sens du transfert thermique (Jung et al., 2006). Dans chaque cas donc il devient très difficile d'identifier le rôle joué par chaque mode de transfert, car chacun a différentes influences selon le milieu et les conditions limites auxquelles est soumis le composant (Jung, 2005).

Dans ce cadre, l'expérience de la boîte chaude gardée vise à palier à ces difficultés en tentant de déterminer la quantité de chaleur globale transmise au travers de l'échantillon testé, sans prendre en considération les modes individuels



Figure 5 : (a) Etat actuel de la boîte chaude gardée du Laboratoire des Sciences de l'Habitat (fermée) ; (b) Rouleau du PMR mesuré.

de transfert (Jung et al., 2006). En effet, cette configuration correspond à une situation réelle et plausible dans le domaine d'utilisation de l'échantillon testé (Jung, 2005). Ainsi, selon Jung (2005), les propriétés déterminées d'un matériau ou d'un système ne pourraient en effet être jugées utiles que si la mesure de la transmission thermique en régime stationnaire est représentative de son usage et de son application réelle. Dans notre cas, compte tenu de la nature non-linéaire de ce problème et en raison de la présence de multiples facteurs qui influent sur les phénomènes de transfert de chaleur et les bruits intrinsèques existant dans les données de mesure, la convergence du problème est acceptable. Cependant la création d'un modèle de transfert de chaleur spécialisé aux produits multicouches et l'isolation est resté une nécessité à cette étape de la recherche scientifique.

3.2. Description de la mise en œuvre d'un PMR

L'installation de la boîte chaude gardée est délicate et on doit porter une grande attention à la mise en œuvre de l'échantillon dans la boîte (Jung, 2005). Selon la littérature, il est souligné que la chose la plus importante pendant la mise en œuvre des produits réfléchissants est de bien les nettoyer (Rotari, 2008). Il faut que le produit soit bien exempt de poussière, puisque celle-ci diminue beaucoup



Figure 6 : Construction de l'échantillon avant de le poser dans la Boîte Chaude Gardée.

ses performances. Donc, avant de commencer la pose dans la boîte chaude on essaie dans un premier temps d'éliminer la poussière de la chambre, dans la mesure où cela est possible (Chabot, 2009).

En deuxième phase donc, on a construit avec des tasseaux un système d'horizontales et verticales. La construction des tasseaux dépend chaque fois de la configuration qu'on a choisi à tester. Dans notre cas, on a fixé un cadre avec des dimensions 300 cm x 120 cm (dimension du rouleau du matériau réfléchissant). On a déroulé et agrafé l'isolant sur les tasseaux en exerçant une légère tension. Ensuite on a posé les lés des PMR avec un recouvrement de 50 mm (Rotari, 2008). On a joint le recouvrement de chaque lé avec le ruban adhésif dont l'émissivité est proche à celle du produit réfléchissant. On a déroulé l'isolant horizontalement et verticalement (afin de tester les deux différentes méthodes de pose du produit) sur l'enceinte qu'on vient de construire en commençant par le bas vers le haut. On a agrafé l'isolant entre les chevrons. On a collé aux jonctions un ruban adhésif (ruban adhésif aluminium 75 mm). Avant l'application du ruban adhésif nous avons nettoyé les jonctions et lissé avec un chiffon sec et propre. Cependant, nous avons respecté une lame d'air d'une épaisseur de 3 cm de chaque côté du matériau. Comme on vient de décrire et d'expliquer auparavant, d'après la bibliographie, les PMR nécessitent l'existence d'une lame d'air de chaque côté, puisque le mécanisme d'isolation dynamique est basé sur la réaction de couches réfléchissantes avec l'air. Et bien sûr, les tasseaux (contre-liteaux) sont une section appropriée à l'épaisseur du produit pour garder une lame d'air suffisante entre l'isolant et sa couverture (Figure 6).

D'après notre étude bibliographique à propos du comportement réel des matériaux réfléchissants dans différentes configurations réelles d'utilisation et étant donné la problématique de notre recherche portant sur la caractérisation des phénomènes de transfert de chaleur au sein des matériaux minces intégrant des couches réfléchissantes, on a défini un protocole expérimental de caractérisation des isolants, afin de vérifier in situ les propriétés des matériaux constitutifs des isolants multicouches. On a utilisé diverses configurations pour mesurer l'efficacité des matériaux réfléchissants dans différentes situations. Les échantillons en dimensions adaptées au dispositif expérimental, reproduisent le principe de mise en œuvre des PMR en situation réelle, c'est-à-dire fixés sur tasseaux entre deux lames

d'air. Un écart de température supérieur ou égal à 20 °C est imposé entre les deux enceintes du dispositif.

Afin de poser donc un produit PMR dans la boîte chaude gardée, nous avons besoin de :

- 9 capteurs de température à chaque côté ($2 \times 9 = 18$ capteurs au total).
- 1 fluxmètre.
- Divers échantillons des PMR fournis par différents fabricants.

L'échantillon PMR qui est ici étudié, est composé de sept feuilles réfléchissantes séparées par des couches d'isolation en matériaux organiques. L'émissivité de chaque feuille enduite d'aluminium a été respectivement mesurée égale à 0,2 pour les feuilles extérieures et 0,15 pour les feuilles intérieures. Les six couches isolantes intérieures d'épaisseur de 1 mm sont à base de chanvre technique, tandis que les deux couches fibreuses extérieures d'épaisseur de 2 mm sont à base de laine de bois de haute résistance enduit des couches de lin (voir aussi Figure 2). Le PMR a été posé dans la boîte chaude en ayant deux lames d'air d'une épaisseur égale à 3 cm aux deux côtés.

4. ÉTUDE NUMÉRIQUE

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la modélisation des matériaux à la fois optiquement épais et optiquement minces. C'est pourquoi l'équation de la conservation de l'énergie (Ozisik, 1973) est transformé (Ning Du et al 2008; Daryabeigi 2002) en utilisant l'approximation à deux flux (Milne - Eddington approximation) :

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_r}{\partial x} \quad q_r = (F^+ - F^-) \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial (F^+ - F^-)}{\partial x} \end{aligned} \quad [1]$$

Afin de résoudre cette équation, deux conditions aux limites et un état initial sont nécessaires. Un profil de température linéaire à travers l'épaisseur de la paroi a été pris à l'instant $t = 0$ qui est la condition initiale du problème $[T(x, 0) = T_{t=0}(x)]$. Les conditions aux limites sur les limites chaude et froide du complexe d'isolation sont les suivantes (Mavromatidis et al., 2011) :

$$\begin{aligned} h_0 (T_1(t) - T_{x=0}(t)) &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \\ h_i (T_{x=L}(t) - T_N(t)) &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} \end{aligned} \quad [2]$$

Le coefficient de transfert de chaleur prend en compte le transfert de chaleur entre les limites du complexe d'isolation et l'air ambiant $T_f(t)$ et $T_N(t)$ à la fois par convection et rayonnement. La 1^{re} limite du complexe (limite chaude) est désignée par 0, alors que la 2^e limite (limite froide) est notée L, tandis que $T_f(t)$ sont les valeurs de la température de l'air mesurée dans la chambre chaude de la boîte chaude

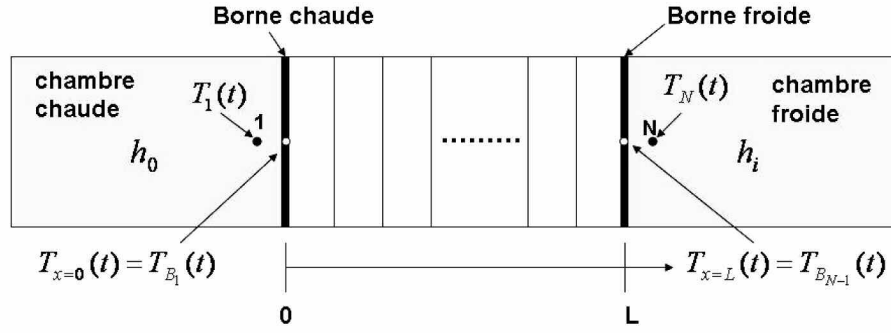


Figure 7 : Une représentation schématique du domaine du modèle.

gardée et $T_N(t)$ sont les valeurs de la température de l'air mesurée dans la chambre froide de la boîte chaude (Mavromatidis et al., 2011). Finalement, on compare les résultats simulés avec les valeurs des températures surfaciques $T_{x=0}(t)$ et $T_{x=L}(t)$ mesurées aux interfaces de la paroi-épreuve (Figure 7).

L'avantage d'utiliser l'approximation à deux flux est que, même si les isolants fibreux organiques typiques couramment utilisés sont d'habitude optiquement épais, le modèle présenté ici ne se limite pas aux matériaux optiquement minces ou épais (Daryabeigi 2002). Pour cette raison l'approximation à deux flux est considérée comme une technique appropriée pour les couches isolantes fibreuses utilisées au sein des PMR extrêmement minces, qui ne tombent pas dans la catégorie des matériaux optiquement épais. Cette méthode a été récemment utilisée, entre autres, par Daryabeigi (2002), Ning Du et al (2008), Bai Dan et Fan Xu-Ji (2007), Zhang et al (2008) afin de calculer le transfert de chaleur par rayonnement au sein des isolants fibreux, tandis que la même méthode a été utilisée par Daryabeigi (2001) et Zhao et al (2009) pour calculer le transfert de chaleur par rayonnement au sein des isolants fibreux soumis à des conditions de chauffage aérodynamique. Donc, selon Ning Du et al (2008) l'atténuation du flux de rayonnement est donné par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^+}{\partial x} &= -\beta F^+ + \beta \sigma T^4(x) \\ \frac{\partial F^-}{\partial x} &= +\beta F^- - \beta \sigma T^4(x) \end{aligned} \quad [3]$$

Une représentation du système multicouche composé de N sections (blocs de rayonnement / radiation blocks) est illustrée par la figure 8. Chacune de ces sections est formée par le matériau isolant au sein du PMR et les deux feuilles réfléchissantes adjacentes, tandis que chaque section se subdivise encore en couches isothermes optiquement minces (volumes de contrôle / control volumes). Les feuilles réfléchissantes travaillent en tant que barrières radiantes et c'est pourquoi elles imposent des conditions aux limites pour le schéma de rayonnement dans la partie intérieure du produit multicouche (Mavromatidis et al., 2011).

Ainsi, des conditions radiatives limites appropriées pour les flux radiatifs avant et arrière sont obtenues à partir des bilans à l'avant ($x = 0$) et à l'arrière ($x = l$) de chaque section :

$$F^+(0) = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 + (1 - \varepsilon_1) F^-(0) \quad [4]$$

$$F^-(l) = \varepsilon_2 \sigma T_2^4(l) + (1 - \varepsilon_2) F^+(l)$$

où les indices 1, 2 se réfèrent aux surfaces limites quand $x=0$ et $x=l$. L'intégration des équations (3) sur un volume de contrôle $[B_{j-1}, B_j]$ a abouti à l'équation suivante concernant respectivement les flux radiatifs qui se développent en avant et en arrière :

$$(F^+)_j = \left[\frac{2 - \beta_j \Delta x_j}{2 + \beta_j \Delta x_j} \right] (F^+)_{j-1} + \left[\frac{2 \beta_j \sigma \Delta x_j}{2 + \beta_j \Delta x_j} \right] T^4(x_j) \quad [5.a]$$

$$(F^-)_{j-1} = \left[\frac{2 - \beta_j \Delta x_j}{2 + \beta_j \Delta x_j} \right] (F^-)_j + \left[\frac{2 \beta_j \sigma \Delta x_j}{2 + \beta_j \Delta x_j} \right] T^4(x_j) \quad [5.b]$$

Au début des itérations, le $F^-(0)$ initial est choisi arbitrairement, et en utilisant l'équation (4) le $F^+(0)$ est calculé. Ensuite, la relation (5.a) est appliquée pour calculer toutes les valeurs de F^+ . Une fois que le $F^+(l)$ est obtenu, le $F^-(l)$ est calculé en utilisant l'équation (4). Puis, l'équation (5.b) est appliquée pour calculer toutes les valeurs de F^- . Une fois la période d'itération terminée, la valeur $F^-(0)$ est mise à jour. Si la différence des valeurs calculée et initiale de $F^-(0)$ est inférieure à un résidu égal à 10^{-6} le processus d'itération est arrêté (Mavromatidis et al., 2011). Sinon, la valeur $F^-(0)$ actualisée est utilisée pour démarrer une nouvelle période d'itération (Mavromatidis et al., 2011). La distribution temporelle de la température dans le domaine isolant, en employant la technique des volumes finis (Patankar, 1980), est donc :

$$T_j^{n+1} = \left\{ \frac{k_{B_j}}{(\delta x)_j} T_{j+1}^n + \frac{k_{B_{j-1}}}{(\delta x)_{j-1}} T_{j-1}^n - \left(\frac{k_{B_j}}{(\delta x)_j} + \frac{k_{B_{j-1}}}{(\delta x)_{j-1}} \right) T_j^n \right\} \quad [6]$$

$$\frac{\Delta t}{\rho_j c_j \Delta x_j} + \left[(F^+ - F^-)_{j-1} - (F^+ - F^-)_j \right] \frac{\Delta t}{\rho_j c_j \Delta x_j} + T_j^n$$

où l'indice j représente les valeurs qui correspondent au $j^{\text{ème}}$ point de grille qui est le centre du $j^{\text{ème}}$ volume de contrôle et l'exposant n représente le pas temporel actuel. L'espace entre les nœuds est uniforme dans toutes les régions des couches fibreuses limitées soit par deux couches réfléchissantes soit par une couche réfléchissante et une surface solide d'un autre matériau. Cependant l'espace entre les nœuds peut varier entre différentes couches (dans cette étude $\delta x = 0.5 \text{ mm}$ ou 1.0 mm) en fonction de la nature et la géométrie de chaque couche isolante.

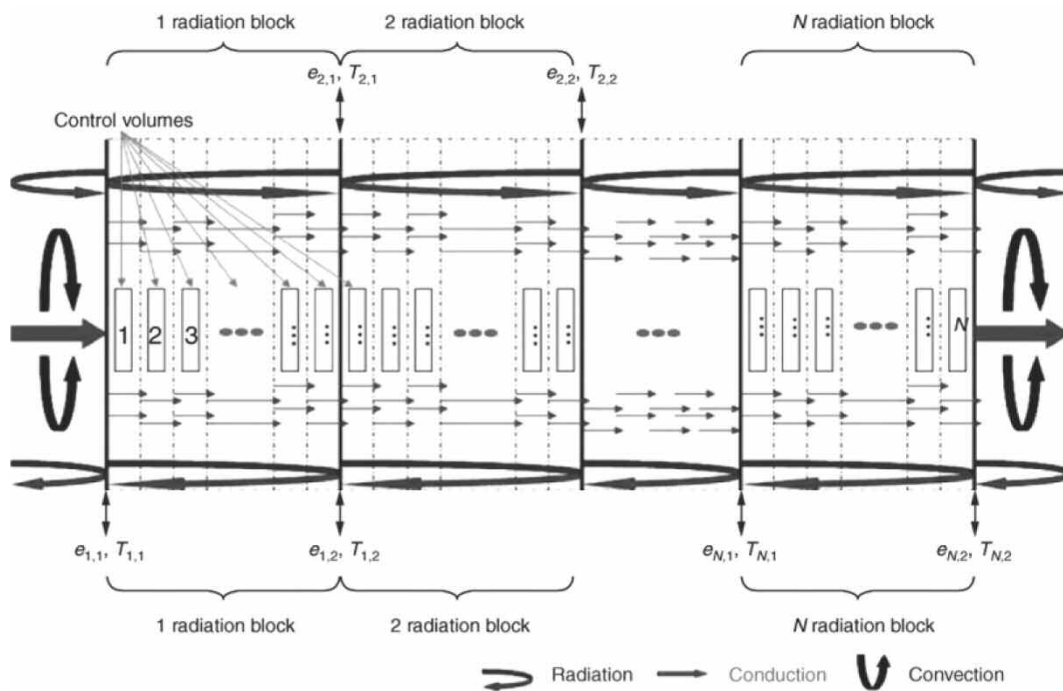


Figure 8: Division d'un PMR en N sections (radiation blocks) (source Mavromatidis et al, 2010).

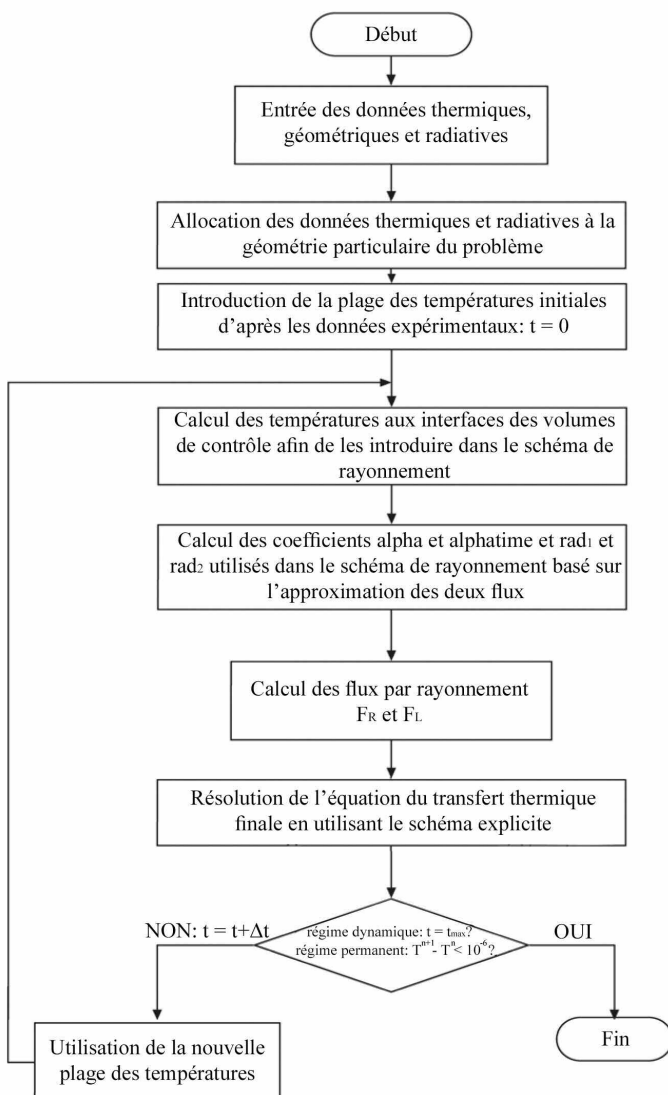


Figure 9 : Organigramme de l'algorithme utilisé pour la résolution des équations.

Finalement, le pas temporel est 0.125 sec , et satisfait le critère de stabilité pour le schéma explicite (Mavromatidis et al., 2011).

Afin de simuler les tests tels qu'ils sont mentionnés ci-dessus, à la fois en régime permanent et régime transitoire, une distribution linéaire des variations de la température initiale a été assumée dans toute l'épaisseur de la paroi isolante entre les températures mesurées aux côtés chaud et froid du complexe d'isolation, tandis que les températures mesurées à partir de la chambre chaude et froide ont été appliquées en tant que conditions aux limites (Mavromatidis et al., 2011).

L'organigramme de l'algorithme est présenté à la Figure 9. L'évaluation du modèle a été basée sur la comparaison point par point entre les valeurs de la température aux deux limites du complexe d'isolation calculées par le modèle et les mesures expérimentales (pour les détails sur la validation du modèle voir Mavromatidis et al, 2010).

L'outil numérique ainsi obtenu a été utilisé dans le cadre de l'étude présentée ici pour évaluer l'intérêt de différentes solutions d'optimisation des produits, notamment à propos de la capacité thermique volumétrique et de la porosité de couches constituées à base de matériaux organiques.

5. PLAN FACTORIEL DE SIMULATION

Après avoir validé (Figure 10) le modèle numérique -en conformité avec les données expérimentales de la boîte chaude gardée- deux plans de simulations ont été mis en place afin d'évaluer le meilleur équilibre entre les valeurs de la capacité thermique volumétrique et de la porosité des deux matériaux organiques utilisés en tant que couches intermédiaires. Après cette phase de simulation nous pourrions être en mesure d'obtenir une expression mathématique de l'influence de la capacité thermique volumétrique

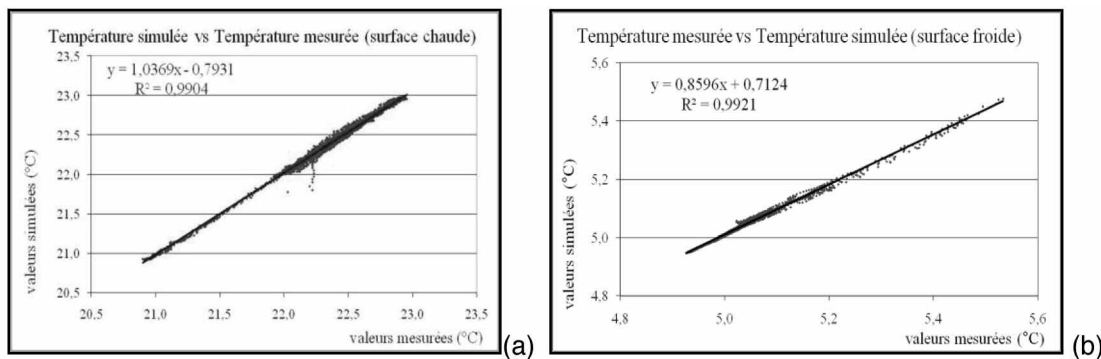


Figure 10 : Comparaison des valeurs simulées et mesurées des températures surfaciques $T_{x=0}(t)$ [chaude] et $T_{x=L}(t)$ [froide] mesurées aux interfaces de la paroi-éprouvette. L'équation de la droite de régression et le carré du coefficient de corrélation linéaire sont également présentés.

et de la porosité des matériaux organiques intermédiaires sur la résistance thermique équivalente du complexe isolant. Considérant les deux variables que nous avons besoin d'évaluer à chaque cas (premier cas capacité thermique volumétrique, deuxième cas porosité), deux plans factoriels complets 2^2 (deux facteurs à deux niveaux) ont été utilisés pour évaluer l'influence de deux niveaux différents pour chaque variable sur la performance isolante du complexe.

Selon Montgomery (1996) une telle conception factorielle à deux niveaux exige un nombre minimum de tests pour chaque variable. Compte tenu du fait que les réponses attendues (la résistance thermique du complexe isolant) ne varient pas de façon linéaire avec les variables sélectionnées (premier cas capacité thermique volumétrique, deuxième cas porosité) et considérant que tous les facteurs de contrôle sont quantitatifs, afin de permettre la quantification de la prédiction des réponses, un plan central composite a été choisie, où la réponse pourrait être modélisée de manière quadratique (Romero-Villafranca et al., 2007).

Nous avons commencé cette étude en employant des plans factoriels de simulation basiques, néanmoins nous avons rejeté les plus simplifiés, car nous avons obtenu une valeur résiduelle très élevée au cours de la procédure de validation statistique. Sachant la nature physique du problème, cette observation statistique était attendue, étant donné le rôle clé de la capacité thermique volumétrique et de la porosité des matériaux organiques intermédiaires sur la résistance thermique de tels systèmes d'isolation multicouche.

Pour cette raison, afin d'inclure l'influence sensible de ces paramètres sur la résistance thermique nominale de l'immeuble, nous avons converti pour chaque cas l'équation générale, présenté entre autres par Box et Jones (1990), Lucas (1994) ou Myers et al., (1997) :

$$R(Y/x) = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i + \sum_{i=1}^2 b_{i,i} x_i^2 + \sum_{i,j=i+1}^2 b_{ij} x_i x_j \quad [7]$$

où x_i ($i=1,2$) est le niveau du facteur de contrôle i (premier cas capacité thermique volumétrique, deuxième cas porosité). En outre, afin d'éliminer les bruits possibles nous avons limité l'utilisation des modèles à une zone circonscrite par des valeurs codées correspondantes aux limites $-a$, $+a$ (Lucas, 1994). Les paramètres ont été soigneusement sélectionnés pour constituer un plan factoriel composite, où l'effet de chaque facteur est évalué à trois niveaux

différents (deux pour l'étude et l'autre pour la validation du modèle statistique) correspondants aux valeurs codifiées $-1, 0, +1$ (Figures 11, 12).

Pour tous les différents scénarios de simulation tous les autres paramètres qui influent sur la résistance thermique, comme l'émissivité thermique etc, ont été fixés égaux aux valeurs mesurées, car le but de cette étude paramétrique est l'évaluation de l'influence de la capacité thermique volumétrique et de la porosité des matériaux organiques intermédiaires sur la résistance thermique d'un complexe isolant. L'outil NEMRODW a été utilisé pour l'analyse statistique des résultats.

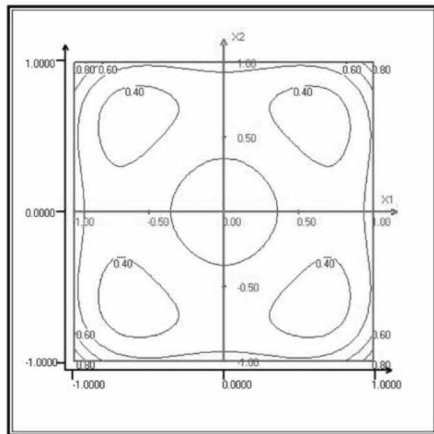
6. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

En considérant la dimension multicouche du problème, on comprend qu'il est pratiquement impossible de calculer numériquement toutes les solutions possibles avec diverses combinaisons des capacités thermiques volumétriques et porosités à chaque couche de matériau organique fibreux. L'étude paramétrique a donc été faite selon le plan factoriel des simulations mentionné ci-dessus.

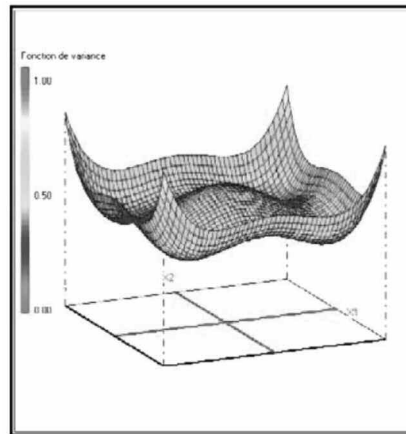
6.1. Etude de l'influence de la capacité thermique volumétrique des matériaux organiques intermédiaires sur la résistance thermique d'un PMR

Les résistances simulées et calculées à partir du modèle statistique sont respectivement résumées dans les tableaux 1 et 2. Nous avons simulé 9 combinaisons de différentes capacités thermiques volumétriques concernant les deux types des matériaux organiques qui participaient au complexe isolant en tant que couches intermédiaires pour obtenir un modèle factoriel. Les résistances thermiques simulées en régime permanent ont été calculées en utilisant la relation : $R = (S \cdot \Delta T) / \Phi$.

Les résultats du modèle statistique dérivé préparés dans cette étude, et les résidus sont donnés dans le tableau 3 (figures 13, 14). Seulement 9 simulations (figures 15) ont été réalisées, pour obtenir le modèle statistique, tandis que les courbes iso paramétriques pourraient être obtenues à partir des six premiers tests. En outre, la réduction du nombre de simulations nous permet de générer un modèle statistique adéquat qui peut donner des prédictions via une procédure d'estimation encadrée.

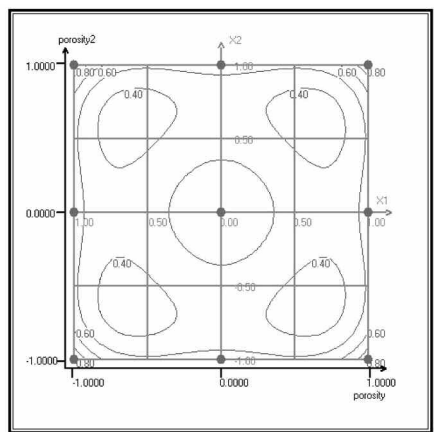


(a)

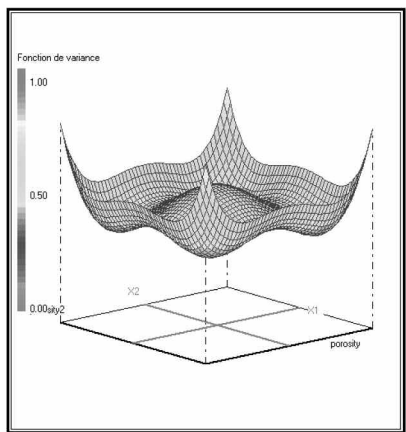


(b)

Figure 11 : Variation de la fonction de variance dans le plan capacité thermique volumétrique 1 et capacité thermique volumétrique 2 ; a) étude graphique en 2D, b) étude graphique en 3D.



(a)



(b)

Figure 12 : Variation de la fonction de variance dans le plan porosité 1-et porosité 2 ; a) étude graphique en 2D, b) étude graphique en 3D.

N° Simulation	X_0	X_1	X_2	X_{1-1}	X_{2-2}	X_{1-2}	R simulée en Km^2W^{-1}
1	1	-1	-1	1	1	1	2.3294046
2	1	1	-1	1	1	-1	2.2416156
3	1	-1	1	1	1	-1	2.2864454
4	1	1	1	1	1	1	2.1751982
5	1	-1	0	1	0	0	2.3162706
6	1	1	0	1	0	0	2.1985594
7	1	0	-1	0	1	0	2.3041029
8	1	0	1	0	1	0	2.2234212
9	1	0	0	0	0	0	2.2620500

Tableau 1 : Matrice des effets du modèle où le niveau -1 représente une capacité thermique volumétrique de $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, le niveau 0 représente une capacité thermique volumétrique de $160 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ et le niveau 1 représente une capacité thermique volumétrique de $300 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ concernant les matériaux organiques intermédiaires.

Réponse	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Centre
Résistance R	2.2596742	0.0539366	2.1751982	2.3294046	2.2523014

Tableau 2 : Résumé des résultats du modèle numérique et l'écart type.

La précision du modèle statistique a été déterminée en comparant les valeurs simulées obtenues et les valeurs de la résistance statistiquement prédites avec différentes valeurs de capacité thermique volumétrique pour les matériaux organiques aux limites et au centre du domaine de simulation (Figure 14).

Comme il a été montré à partir des différents scénarios de simulation, la résistance thermique maximale a été calculée lorsque les deux matériaux organiques qui participent à la construction du complexe isolant en tant que couches intermédiaires ont une capacité thermique volumétrique égale à $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, comme le montre la figure 15.

<i>N° simulation</i>	<i>R simulée</i>	<i>R calculée statistiquement</i>	<i>Résidu</i>
1	2.3294046	2.33687581	-0.00747121
2	2.2416156	2.24302243	-0.00140683
3	2.2864454	2.28525210	0.00119325
4	2.1751982	2.16794057	0.00725763
5	2.3162706	2.30999264	0.00627796
6	2.1985594	2.20441019	-0.00585079
7	2.3041029	2.29522486	0.00887804
8	2.2234212	2.23187208	-0.00845088
9	2.2620500	2.26247716	-0.00042716

Tableau 3 : Table des résidus : la réponse Y_1 - R (résistance).

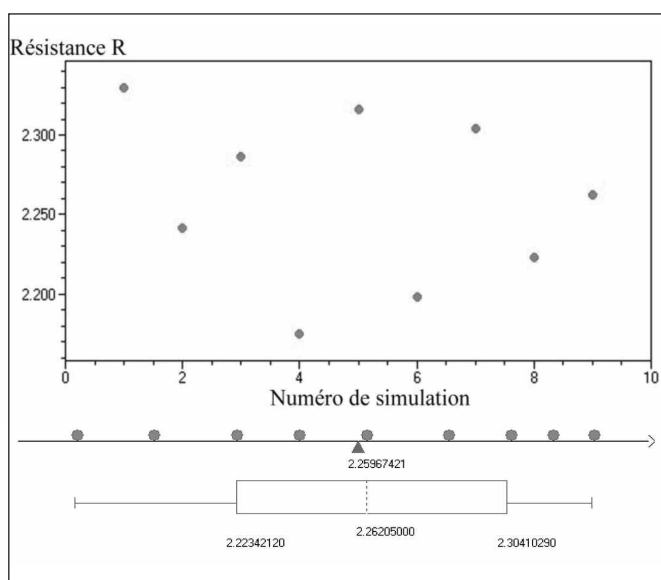


Figure 13 : La distribution statistique des réponses du modèle statistique dans le domaine de la simulation.

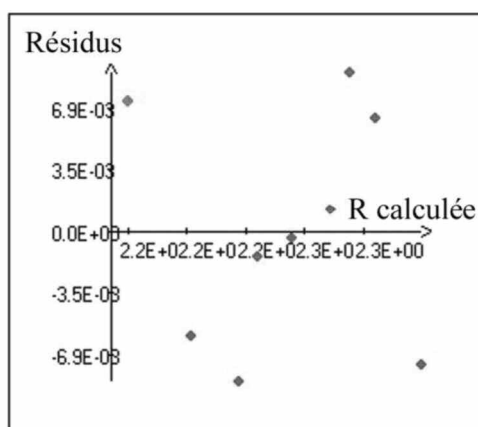


Figure 14 : Distribution des résidus.

En outre, nous avons exprimé mathématiquement (figures 16, 17), la résistance thermique globale d'une paroi composite, y compris le PMR avec les caractéristiques géométriques mentionnées dans le chapitre précédent en fonction de la capacité thermique volumétrique des matériaux organiques qui sont utilisés aux couches intermédiaires suivant la relation :

$$R = 2.26247716 - 0.05279123 d_1 - 0.03167639 d_2 - 0.00527574 d_1 d_1 + 0.00107131 d_2 d_2 - 0.00586454 d_1 d_2$$

L'application de tels modèles statistiques dans le processus d'aide à la décision pour le choix des matériaux organiques avec des capacités thermiques volumétriques optimaux, afin d'obtenir une résistance thermique d'une paroi composite maximale, est illustrée par les courbes iso paramétriques suivantes (figures 16 et 17). En outre, il en résulte que la résistance thermique maximale de l'ensemble est obtenue lorsque les capacités thermiques volumétriques des deux matériaux organiques sont égales à 20 kJm⁻³K.

6.2. Etude de l'influence de la porosité des matériaux organiques intermédiaires sur la résistance thermique d'un PMR

Les résistances simulées et calculées à partir du modèle statistique sont respectivement résumées dans les tableaux 4 et 5. Pour obtenir un modèle factoriel, nous avons simulé 9 combinaisons de différentes porosités, en gardant toujours constantes les valeurs optimaux de la capacité thermique volumétrique des produits organiques (20 kJm⁻³K⁻¹, 20 kJm⁻³K⁻¹), tels qu'on les avait calculés lors de l'étude paramétrique focalisée uniquement sur la capacité thermique volumétrique à propos des deux types des matériaux organiques qui participaient au complexe isolant en tant que couches intermédiaires. Les résistances thermiques simulées en régime permanent ont été calculées en utilisant la relation : $R = (S \cdot \Delta T) / \Phi$. Les résultats du modèle statistique dérivé et les résidus sont donnés dans le tableau 6 (figures 18, 19). Seulement 9 simulations (figures 20) ont été réalisées afin d'obtenir le modèle statistique, tandis que les courbes iso paramétriques pourraient être obtenues à partir des six premiers tests. En outre, la réduction du nombre de simulations nous a permis de générer un modèle statistique adéquat qui peut donner des prédictions via une procédure d'estimation encadrée en fonction de la porosité des matériaux organiques intermédiaires.

Comme dans l'étude de l'influence de la capacité thermique volumétrique, la précision du modèle statistique a été déterminée en comparant les valeurs simulées obtenues et les valeurs de la résistance statistiquement prédites avec différents valeurs de capacité thermique volumétrique pour les matériaux organiques aux limites et au centre du domaine de simulation (Figure 19).

Comme il a été montré à partir des différents scénarios de simulation (figures 20 et 21), la résistance thermique maximale a été calculée pour une combinaison des porosités 0.675-0.95 respectivement pour les deux matériaux organiques qui participent à la construction du complexe isolant en tant que couches intermédiaires et ont une capacité

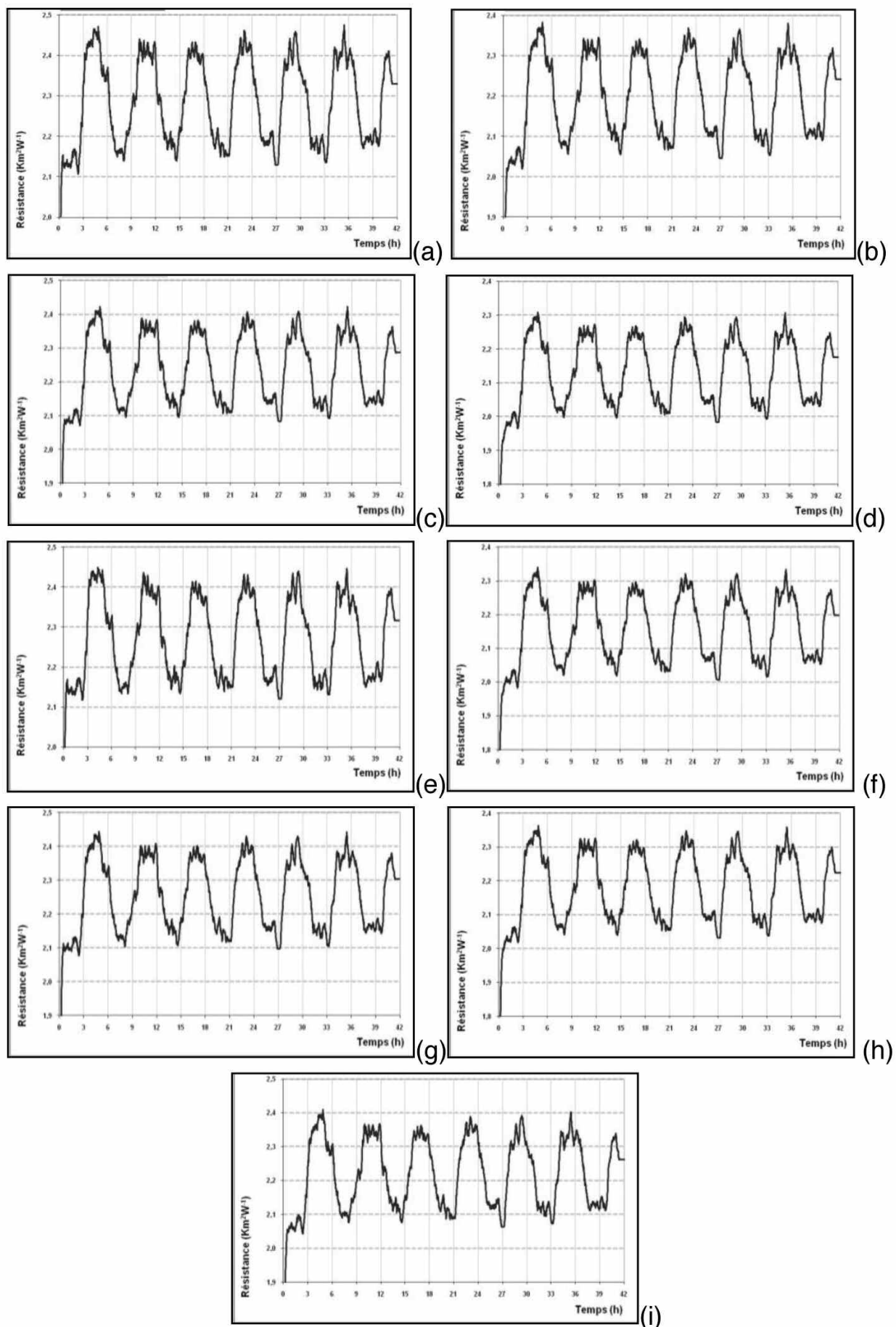
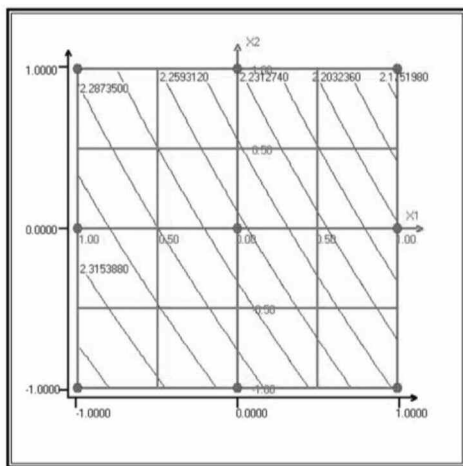
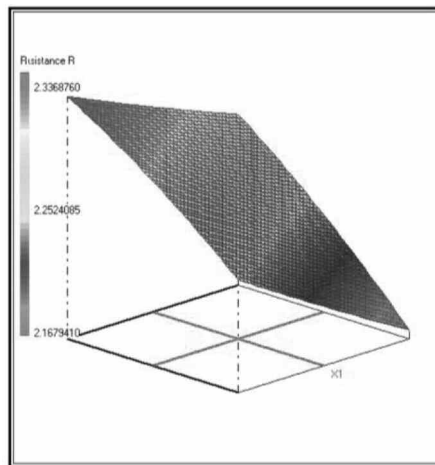


Figure 15 : Résistance thermique simulée / variation de la capacité thermique volumétrique des couches intermédiaires composées par des matériaux organiques ; (a) Scénario de simulation N°1; (b) Scénario de simulation N°2; (c) Scénario de simulation N°3; (d) Scénario de simulation N°4; (e) Scénario de simulation N°5; (f) Scénario de simulation N°6; (g) Scénario de simulation N°7; (h) Scénario de simulation N°8; (i) Scénario de simulation N°9.



(a)



(b)

Figure 16 : Variation de la réponse / Résistance R dans le plan : capacité thermique volumétrique 1, capacité thermique volumétrique 2 ; (a) étude graphique en 2D, (b) étude graphique en 3D.

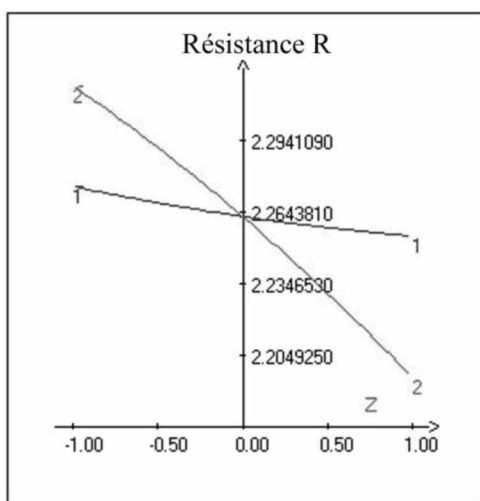


Figure 17 : Analyse canonique au centre du domaine / Courbure de l'équation canonique.

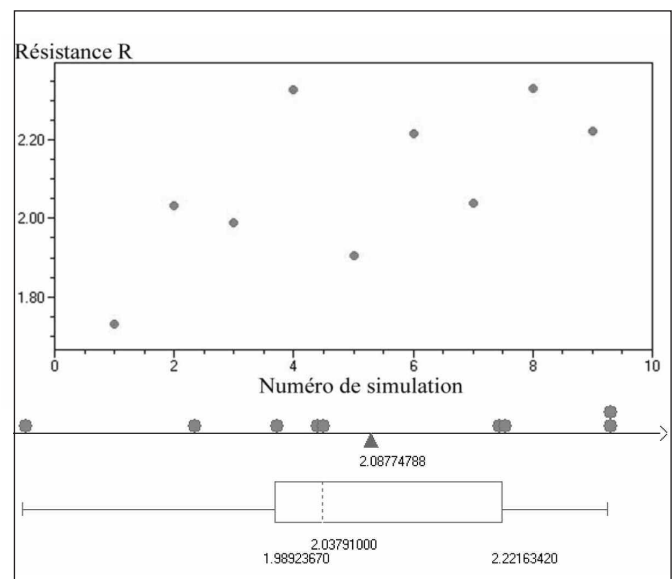


Figure 18 : La distribution statistique des réponses du modèle statistique dans le domaine de la simulation.

N° Simulation	X_0	X_1	X_2	X_{1-1}	X_{2-2}	X_{1-2}	R simulée en Km^2W^{-1}
1	1	-1	-1	1	1	1	1.7319050
2	1	1	-1	1	1	-1	2.0317000
3	1	-1	1	1	1	-1	1.9892367
4	1	1	1	1	1	1	2.3262822
5	1	-1	0	1	0	0	1.9055213
6	1	1	0	1	0	0	2.2165763
7	1	0	-1	0	1	0	2.0379100
8	1	0	1	0	1	0	2.3289651
9	1	0	0	0	0	0	2.2216342

Tableau 4 : Matrice des effets du modèle où le niveau -1 représente une porosité de 0.40, le niveau 0 représente une porosité de 0.675 et le niveau 1 représente une porosité de 0.95 concernant les matériaux organiques intermédiaires.

Réponse	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Centre
Résistance R	2.0877478	0.2014841	1.7319050	2.3289651	2.0304350

Tableau 5 : Résumé des résultats du modèle numérique et l'écart type.

<i>N° simulation</i>	<i>R simulée</i>	<i>R calculée statistiquement</i>	<i>Résidu</i>
1	1.7319050	1.73095743	0.00094757
2	2.0317000	2.02829734	0.00340266
3	1.9892367	1.99332184	-0.00408514
4	2.3262822	2.32791230	-0.00163006
5	1.9055213	1.90238373	0.00313757
6	2.2165763	2.21834892	-0.00177260
7	2.0379100	2.04226023	-0.00435023
8	2.3289651	2.32324992	0.00571520
9	2.2216342	2.22299917	-0.00136497

Tableau 6 : Table des résidus: la réponse Y_1 - R (résistance).

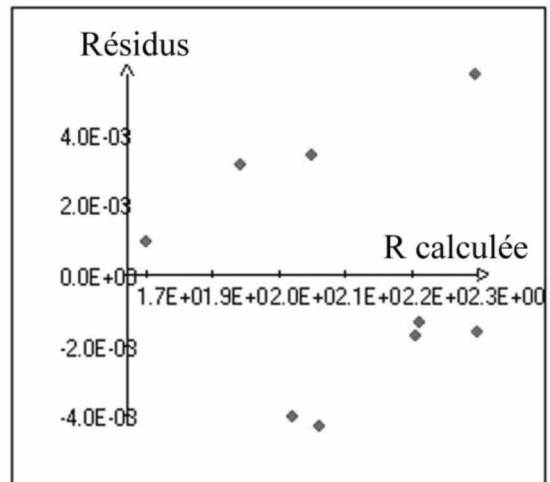
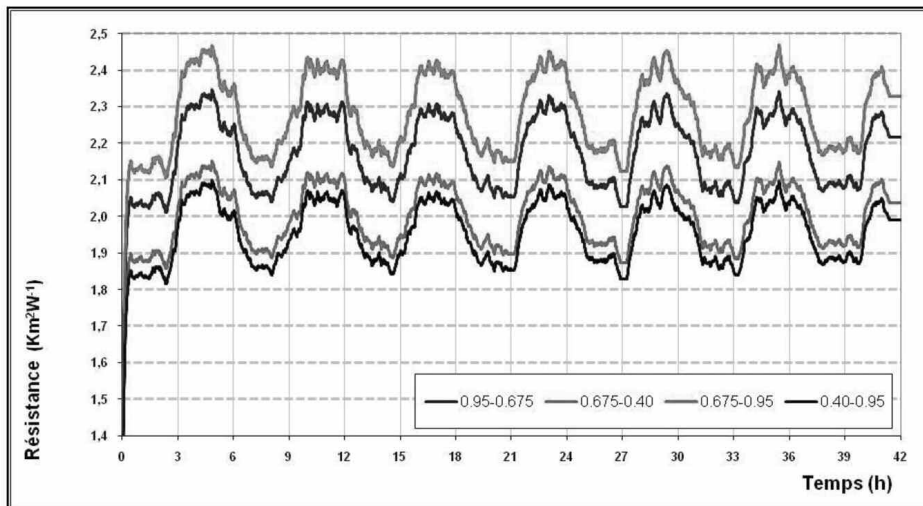
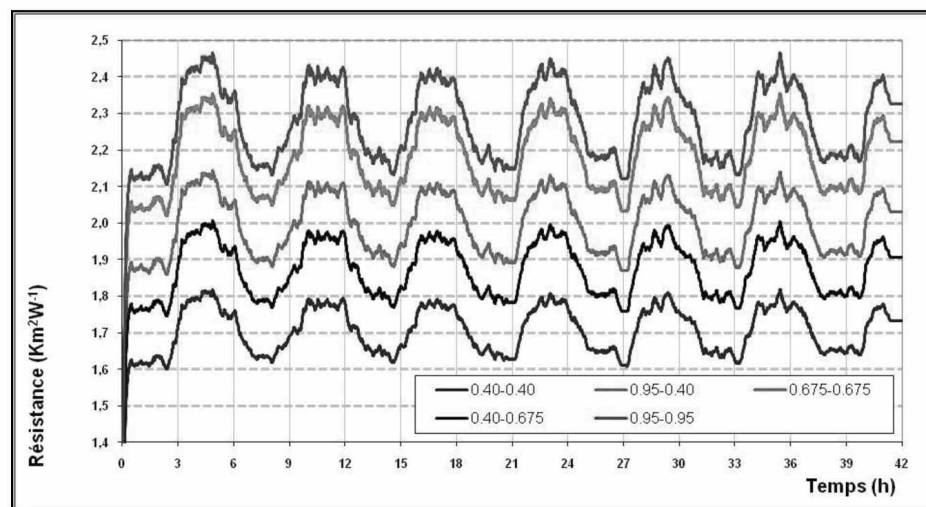


Figure 19 : Distribution des résidus.



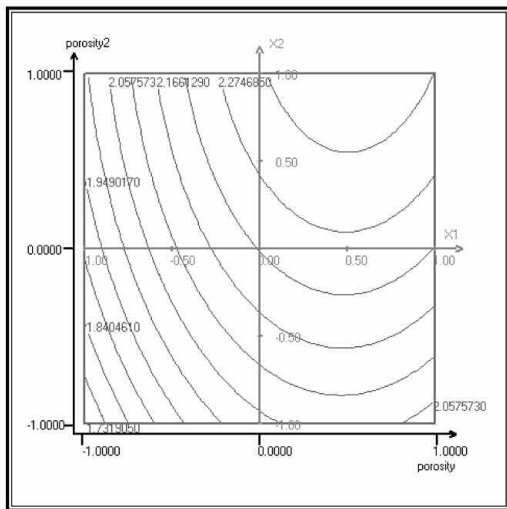
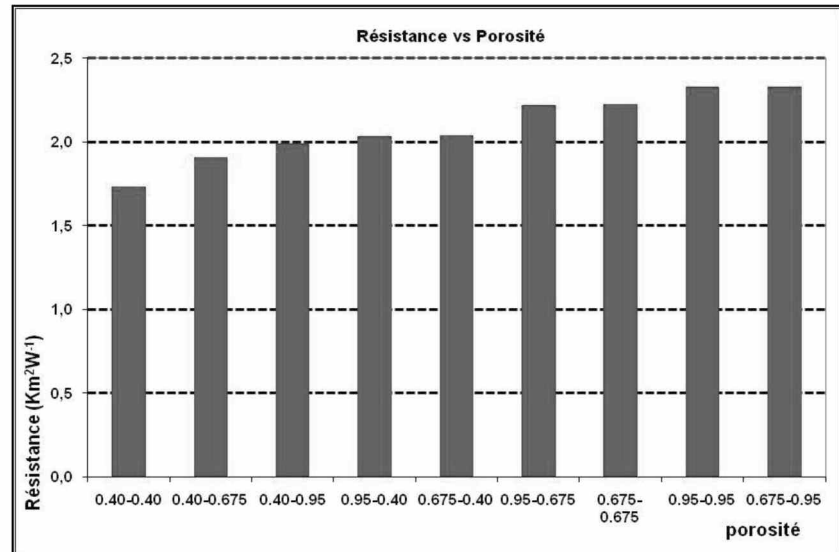
(a)



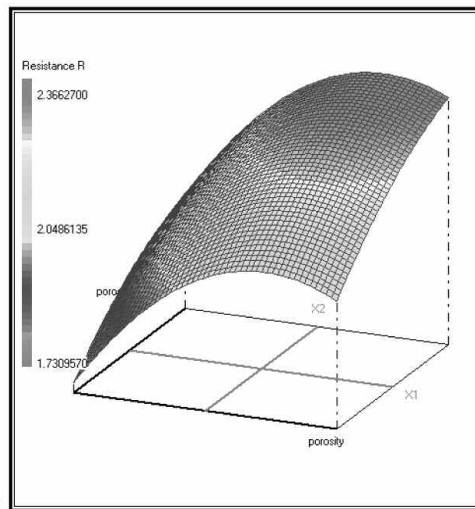
(b)

Figure 20 : Résistance thermique simulée / variation de la porosité des couches intermédiaires composées par des matériaux organiques ; (a), (b) résultats résumés.

Figure 21 : Evolution de la Résistance thermique simulée en fonction de la porosité des matériaux organiques.



(a)



(b)

Figure 22 : Variation de la réponse / Résistance R dans le plan : porosité 1, porosité 2 ; (a) étude graphique en 2D, (b) étude graphique en 3D.

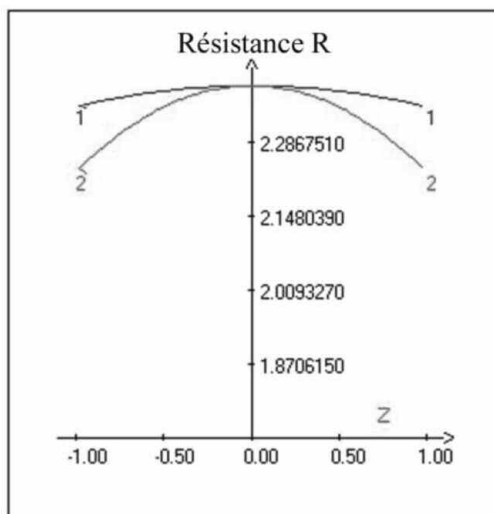


Figure 23 : Analyse canonique au centre du domaine / Courbure de l'équation canonique.

thermique volumétrique égale à $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, comme il est montré au chapitre précédent.

En outre, nous avons exprimé mathématiquement (figures 22, 23), la résistance thermique globale d'une paroi com-

posite, y compris le PMR avec les caractéristiques géométriques mentionnées dans le chapitre précédent en fonction de la porosité des matériaux organiques qui sont utilisés aux couches intermédiaires suivant la relation :

$$R = 2.22299917 + 0.15798259 p_1 + 0.14049484 p_2 - 0.16263285 p_1 p_1 - 0.04024410 p_2 p_2 + 0.00931264 p_1 p_2$$

Comme auparavant, l'application d'un tel modèle statistique, qui est illustrée par les courbes iso paramétriques suivantes nous a aidés dans le choix des matériaux organiques avec des porosités optimaux, afin d'obtenir le maximum de la résistance thermique d'une paroi composite (figures 22, 23). En outre, il en résulte que la résistance thermique maximale de l'ensemble est obtenue lorsque les porosités des deux matériaux organiques sont respectivement égales à 0.675-0.95 pour les deux produits organiques intermédiaires.

7. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats des simulations présentées dans cette communication sont compatibles avec une étude similaire fait par Ning Du et al (2007) sur la porosité des ouates fibreuses

non uniformes. Dans cette étude de Ning Du et al (2007), la porosité globale d'un échantillon multicouche a été maintenue constante (fixé à une valeur donnée) afin de voir si le changement de la distribution de la porosité sans modifier la valeur de la porosité globale peut augmenter ou diminuer la résistance totale. Les conclusions de cette étude se résument comme suit.

En considérant que nous avons 2 différents matériaux qui composent le complexe isolant avec une porosité d'une petite valeur p_1 et une porosité d'une grande valeur p_2 et qui ont une porosité moyenne p^* , Ning Du et al (2007) ont étudié le comportement thermique de ces deux matériaux. Ils ont conclu qu'il existe un minimum local de la résistance thermique quand la *porosité = porosité moyenne*. En revanche, l'augmentation de la différence entre les porosités p_1 , p_2 et la porosité moyenne p^* augmente dans un premier temps la résistance thermique globale à 2 points maximaux locaux qui sont de chaque côté de p^* . La raison en est que l'une des deux valeurs est proche de 1, en introduisant considérablement une grande quantité de rayonnement. Les valeurs p_1 et p_2 représentent la porosité optimale de la première et la deuxième couche de la nappe fibreuse. Puis la résistance thermique globale diminue rapidement. Pour une porosité moyenne très grande et proche de 1 le rayonnement devient grand. Ainsi, le minimum local qui illustre la liaison entre la résistance thermique et la porosité moyenne disparaît et la valeur optimale de la porosité est très proche de p^* . Les résultats des simulations présentés dans cette communication sont entièrement en accord avec les résultats de l'étude précédente de Ning Du et al. (2008) mentionnée ci-dessus, puisque les valeurs les plus élevées de la résistance thermique globale ont été atteintes aux simulations N° 4 et N° 8 où la porosité des matériaux organiques intermédiaires était comme suit:

Simulation N°4 $p_1 = p_2 = p^* = 0,95$

Simulation N°8 $p_1 = 0,675, p_2 = 0,95$ et $p^* = 0,78$

En revanche, la résistance thermique du matériau est moins dépendante de la capacité thermique volumétrique que la porosité. Néanmoins, nous voyons qu'il y a même une faible dépendance de la résistance thermique à la capacité thermique volumétrique de chaque matériau organique intermédiaire. D'après nos résultats, nous voyons que la plus grande résistance a été calculée pour le complexe qui avait une capacité thermique volumétrique moyenne de $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$. On a également observé une dépendance de la résistance thermique à la capacité thermique volumétrique du matériau organique adjacent à la partie chaude de l'endroit où se passe la transmission thermique. Ceci est illustré par le fait que la deuxième plus grande résistance totale a été obtenue dans la combinaison dans laquelle nous avons eu une capacité thermique volumétrique égale à $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ pour la matière organique qui constituait les couches externes et $160 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ pour la matière organique qui constituait les couches internes. La combinaison qui a donné la troisième meilleure résistance thermique incluait des couches des matériaux organiques extérieures d'une capacité thermique volumétrique égale à $160 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ et des couches des matériaux organiques extérieures d'une capacité thermique volumétrique égale à $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$. Une capacité thermique volumétrique

faible au point d'entrée de la chaleur dans le complexe isolant a comme conséquence une moindre masse thermique et donc le matériau émet moins de quantité d'énergie sous forme de rayonnement infrarouge et pour cela la capacité d'isolation et de résistance thermique sont augmentées. Ceci s'explique aussi par l'enquête de Daryabeigi (2002) qui a conclu que le plus important mode de transfert de chaleur au point d'entrée du flux thermique dans un matériau fibreux est le rayonnement infrarouge. La même conclusion est tirée par les résultats de nos simulations. Par exemple, la simulation N°3 ($20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, $300 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$) donne une valeur de résistance thermique plus élevée que la simulation N°2 ($300 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$).

8. CONCLUSIONS

Cette étude présentée dans cette communication vise à fournir des indications sur les avantages des isolants multicouches dans les applications des bâtiments et surtout sur l'influence des matériaux organiques utilisés en tant que couches intermédiaires sur la résistance thermique globale des PMR. Pour cette raison, une approche numérique a été développée afin de déterminer la meilleure combinaison des valeurs de la capacité thermique volumétrique et de la porosité des matériaux organiques intermédiaires afin d'obtenir une résistance thermique maximale. La modélisation numérique présentée ici prend notamment en compte les échanges conductifs au sein des différents matériaux (selon leur nature), les échanges convectifs aux surfaces extérieures et les échanges radiatifs qui sont particulièrement modélisés en utilisant la méthode de l'approximation à deux flux. Le schéma de rayonnement a été basé sur l'approximation à deux flux, afin de modéliser les matériaux organiques fibreux à la fois optiquement épais et optiquement minces. L'équation de transfert de chaleur a été résolue explicitement pour un mur composite incluant un PMR composé par deux différents matériaux organiques respectivement utilisés pour les couches intermédiaires à la fois extérieures et intérieures. Ensuite, deux plans factoriels de simulations ont été mis en place afin de découvrir d'abord le meilleur équilibre entre les différentes valeurs de capacité thermique volumétrique et ensuite de porosité des deux matériaux organiques utilisés en tant que couches intermédiaires. Il a été résulté que la résistance thermique maximale du complexe a été calculée quand on employait des matériaux organiques intermédiaires d'une capacité thermique volumétrique moyenne de $20 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ainsi que la condition optimale de la porosité était $p_1 = 0,675$, $p_2 = 0,95$ et $p^* = 0,78$ pour les matériaux organiques respectivement utilisés aux couches extérieures et intérieures.

Le premier auteur tient à remercier la fondation "Alexandros S. Onassis" pour le soutien financier au cours de ses études de doctorat. Anna BYKALYUK, doctorante au CETHIL de l'INSA de Lyon, est aussi remerciée pour sa contribution à la construction des plans des simulations et à la maîtrise du logiciel NEMRODW. Enfin le premier auteur remercie du fond du coeur Hervé LEQUAY, responsable scientifique du laboratoire MAP-ARIA, pour la relecture attentive de ce document et ses corrections linguistiques.

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Ajlan SA. 2006. "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique", *Applied Thermal Engineering* 26: 2184-91.
- Bai, D., Fan, X.J., 2007. "On the combined heat transfer in the multilayer non-gray porous fibrous insulation", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 104: 326 – 341.
- Bouchair A. 2008. "Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation", *Building and Environment* 43: 1603-18.
- Box, G.E.P., Jones, S., 1990. *Designing products that are robust to environment. Report 56 Center for Quality and Productivity Improvement, University of Wisconsin-Madison.*
- Chabot D., 2009. *Matériaux réfléchissants: Analyse de sensibilité, Master présenté devant l'ENTPE dans le cadre du Master MEGA – Spécialité Génie Civil.*
- Daryabeigi, K., 2001. "Thermal analysis and design of multi-layer insulation for re-entry aerodynamic heating", Paper presented at the *35th AIAA Thermophysics Conference, Anaheim, USA. AIAA paper 2001 – 2834.*
- Daryabeigi, K., 2002. "Heat Transfer in High-Temperature Fibrous Insulation", Paper presented at the *8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 24-26 June 2002, St. Louis, AIAA paper 2002–3332.*
- Eames P. 2009. *Multi-foil insulation. BD2768ISBN: 978-1-4098-1512-9: Department for Communities and Local Government.*
- Georgantopoulou, G.C., Tsangaris, S. 2007. "Block, mesh refinement of incompressible flows in curvilinear domains", *Applied Mathematical Modeling* 31: 2136-48.
- Harvey LDD. 2007. "Net climatic impact of solid foam insulation produced with halocarbon and non-halocarbon blowing agents", *Building and Environment* 42: 2860-79.
- Jung O. 2005. *Definition of a steady state thermal transmission properties' experimental apparatus - The guarded hot box test method (In French). Master thesis thesis. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon.*
- Jung, O., El Mankibi, M., Michel, P., 2006. "Conception of a guarded hot box", *4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings (EPIC)*, Lyon, France, 20-22 November.
- Khedari J, Nankongnab N, Hirunlabh J, Teekasap S. 2004. "New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir", *Building and Environment* 39: 59-65.
- Li P, Cheng H. 2006. "Thermal analysis and performance study for multilayer perforated insulation material used in space", *Applied Thermal Engineering* 26 2020-6.
- Lim TK, Axcell BP, Cotton MA. 2007. "Single-phase heat transfer in the high temperature multiple porous insulation", *Applied Thermal Engineering* 27: 1352-62.
- Lucas, J.M., 1994. "Achieving a robust process using response surface methodology", *J. Qual. Technol.* 26, 248–260.
- Mavromatidis, L., Michel, P., El Mankibi, M., Santamouris, M., 2010a. "Investigation of the contribution of multifoil insulation in the reduction of energy consumption of buildings", *9th Pan-Hellenic Geographical Conference*, Athens, Greece, 4 - 6 November 2010.
- Mavromatidis, L., Michel, P., El Mankibi, M., Santamouris, M., 2010b. "Study on transient heat transfer through multilayer thermal insulation: Numerical analysis and experimental investigation", *Building Simulation*, Vol. 3 No 4, pp. 279-294, doi:10.1007/s12273-010-0018-z.
- Mavromatidis, L., Michel, P., El Mankibi, M., Santamouris, M., 2011. "Phénomènes de transfert thermique dans les Produits Multicouches Réflecteurs (PMR) : une étude numérique et expérimentale", *Congrès français de Thermique 2011 organisé par la Société Française de Thermique*, Perpignan, France, 24-27 Mai 2011.
- Montgomery, D.C., 1996. *Design and Analysis of Experiments*, 4th ed., Wiley, New York, 704 p.
- Myers, R.H., Kim, Y., Griffiths, K.L., 1997. "Response surface methods and the use of noise variables", *J. Qual. Technol.* 29, 429–440.
- LPRAI Company, NEMRODW software for design of experiments, 40 boulevard Icard, 13010 Marseille, France 2007.
- Ning, D., Jintu, F., Huijun, W., 2008. "Optimum porosity of fibrous porous materials for thermal insulation", *Fibers and Polymers*, 9 (1): 27-33, doi: 10.1007/s12221-008-0005-5.
- Ozicik, M.N., 1973. *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection*, John Wiley & Sons, Inc.
- Patankar, S., 1980. *Computation of conduction and duct flow heat transfer*, Hemisphere, New York, page 45, 1980.
- Pavlik Z, Cerny R. 2009. "Hygrothermal performance study of an innovative interior thermal insulation system", *Applied Thermal Engineering* 29: 1941-6.
- Qashou I, Tafreshi VH, Pourdeyhimi B. 2009. "An Investigation of the Radiative Heat Transfer through Nonwoven Fibrous Materials", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics/Special Issue: modelling* 4: 9-15.
- Rasmussen TV, Nicolajsen A. 2007. "Assessment of the performance of organic and mineral-based insulation products used in exterior walls and attics in dwellings", *Building and Environment* 42: 829-39.
- Romero-Villafranca, R., Zúnica, L., Romero- Zúnica, R., 2007. "Ds- optimal experimental plans for robust parameter design", *Journal of Statistical Planning and Inference* 137, 1488-1495.
- Rotari D., 2008. *Matériaux réfléchissants: Echanges radiatifs GLO, Master présenté devant l'ENTPE dans le cadre du Master MEGA – Spécialité Génie Civil.*
- Sambou V, Lartigue B, Monchoux F, Adj M. 2008. "Theoretical and experimental study of heat transfer through a vertical partitioned enclosure: application to the optimization of the thermal resistance", *Applied Thermal Engineering* 28: 488-98.
- Skujans J, Vulans A, Iljins U, Aboltins A. 2007. "Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum", *Applied Thermal Engineering* 27: 1219-24.
- Swinton MC, Maref W, Bomberg MT, Kumaran MK, Normandin N. 2006. "In situ performance evaluation of spray polyurethane foam in the exterior insulation basement system (EIBS)", *Building and Environment* 41: 1872-80.
- Wei W, Li X, Wang R, Li Y. 2009. "Effects of structure and shape on thermal performance of perforated multilayer insulation blankets", *Applied Thermal Engineering* 29 1264-6.
- Xamán J, Lira L, Arce J. 2009. "Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus", *Applied Thermal Engineering* 29: 617-23.
- Zhang, B.M., Zhao, S.Y., He, X.D., 2008. "Experimental and theoretical studies on high-temperature thermal properties of fibrous insulation", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 109: 1309 – 1324.
- Zhao, S.Y., Zhang, B.M., Du, S.Y., 2009. "Probabilistic modeling of transient heat transfer and assessment of thermal reliability of fibrous insulation under aerodynamic heating conditions". *International Journal of Thermal Sciences*, 48: 1302 – 1310.