

## Conception optimale du système de stockage : application à une planche à clous

### 5.1 Introduction

---

Le chapitre précédent a permis d'établir les propriétés matériaux et les propriétés fonctionnelles nécessaires pour satisfaire la puissance de décharge de 2 kW. Au fil de ce chapitre nous nous proposons d'expliquer, à travers un exemple concret de matériau architecturé, une planche à clous, comment atteindre cet objectif.

Une des principales conclusions du chapitre précédent est la faible fraction de volume de matrice conductrice nécessaire pour satisfaire le besoin en conductivité équivalente. Ce point permet d'envisager des solutions architecturales de construction simple telles que des plaques sandwichs contenant en leur cœur des mousses, des nids d'abeilles ou des clous imprégnés de *MCP*. Cette dernière solution architecturale a été sélectionnée pour réaliser une étude expérimentale et numérique de la conductivité équivalente d'un matériau architecturé.

La section 5.2 présente la conception de la solution architecturale "planche à clous".

La section 5.3 présente le banc expérimental utilisé pour la détermination de la conductivité équivalente de la plaque architecturée, déduite de mesures de flux de chaleur traversant la plaque architecturée.

La section 5.4 présente un modèle numérique développé pour calculer la conductivité équivalente de la plaque composite. Ce modèle est basé sur un calcul par éléments finis et validé par les résultats obtenus lors de la caractérisation expérimentale.

L'autre point important retenu du chapitre précédent est la nécessité des ailettes. Dans la section 5.5 une étude de dimensionnement d'ailettes est faite afin d'augmenter le coefficient de convection sur les surfaces d'échange des plaques sandwichs. Le design du système est donc modifié en ce qui concerne les surfaces des plaques sandwichs.

## 5.2 Exemple concret de matériau architecturé : la planche à clous

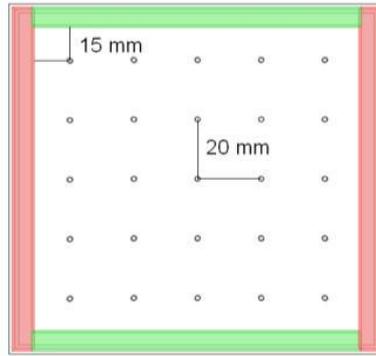
La conductivité à obtenir pour le matériau architecturé étant relativement faible (de l'ordre de 1 W/m K), des architectures simples peuvent être envisagées, comme l'utilisation de clous traversant une plaque du type "sandwich" contenant du *MCP* à cœur (figures 5.1 et 5.2).

Le prototype est constitué de deux parties avec des fonctions très distinctes : un conteneur (confinement) et un cœur stockeur d'énergie (stockage). D'une part, le conteneur est conçu avec deux plaques métalliques (Dural ou 2017) de 5 mm d'épaisseur constituant les surfaces d'échange thermique (dimensions de surfaces : 280 x 280 mm<sup>2</sup>) entre l'air traversant le système de stockage et le cœur stockeur d'énergie de la plaque. Quatre barres latérales en plexiglas (PMMA) de 32 mm d'épaisseur sont nécessaires pour confiner entièrement le cœur. La plaque architecturée a donc une épaisseur totale de 42 mm. Ces pièces sont assemblées par collage, en utilisant de la colle polyuréthane flexible et l'étanchéité du conteneur est faite avec du silicone.

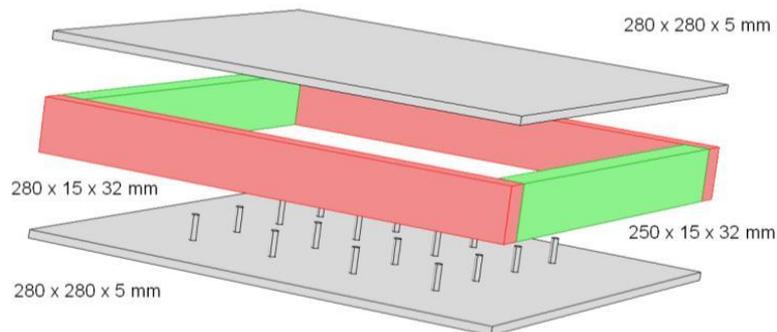
Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Temp. fusion	$T_f$	41	°C
Chaleur spécifique	$C_p$	1.8	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Chaleur latente	$H$	147	$\text{kJ kg}^{-1}$
Masse volumique	$\rho$	760	$\text{kg m}^{-3}$
Conductivité	$\lambda$	0.18	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

TABLEAU 5.1 – Propriétés de la paraffine utilisée comme matériau actif

D'autre part, le cœur est constitué de deux composants: un composant actif pour le stockage (le *MCP*) et un composant métallique pour augmenter la conductivité. En ce qui concerne la partie active, le *MCP* choisi a été la paraffine RT-42. Le volume de paraffine contenu dans le prototype est de 250 x 250 x 32 mm<sup>3</sup> et les propriétés thermiques du matériau actif sont données au tableau 5.1. Pour la matrice conductrice, les clous sont assemblés sur une des deux surfaces d'échange. Des trous sont percés sur la plaque métallique pour venir insérer les clous. L'assemblage clous/plaque est réalisé par collage en utilisant de la colle type "SuperGlue". Les clous sont aussi en Dural ou 2017 ayant les dimensions suivantes : un diamètre de 4 mm et une longueur de 30 mm. La quantité de clous introduits est de 144 distribués selon la figure 5.1a (l'assemblage clous/plaque peut être visualisé sur la figure 5.2a).



(a) Espacement entre les clous métalliques

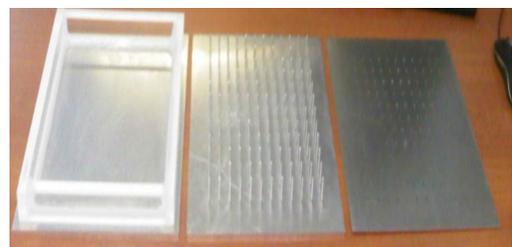


(b) Dimensions du prototype planche à clous

FIGURE 5.1 – Schéma du prototype "planche à clous". Dimensions et espacement entre les clous.



(a) Détail du cœur de la planche contenant des clous



(b) Éléments d'assemblage du prototype "planche à clous"

FIGURE 5.2 – Conception du prototype "planche à clous".

## 5.3 Caractérisation de la conductivité équivalente de la planche à clous

---

La conductivité équivalente de la plaque architecturée est déduite des mesures de flux de chaleur traversant la plaque. Ces mesures fluxmétriques ont été réalisées au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (*CSTB*) à Grenoble, grâce à un banc échangeur (figure 5.3b) qui permet d'étudier non seulement le flux de chaleur traversant la plaque, mais aussi la cinétique de stockage des *MCP* [5]. Ce banc expérimental est décrit dans la section 5.3.1. La section suivante 5.3.2 présente les résultats obtenus en terme de flux de chaleur et le calcul de la conductivité équivalente de la plaque architecturée.

### 5.3.1 Description du banc expérimental

Le banc expérimental est constitué de deux échangeurs dans lesquels circule de l'eau régulée en température. La régulation de la température d'eau est réalisée grâce à deux bains thermostatés. Ces échangeurs viennent prendre en sandwich l'échantillon à caractériser, imposant les températures à la surface du composant (figure 5.3a). Pour la mesure de flux traversant l'échantillon, des fluxmètres (Marque : CAPTEC, Type : T intégré, Sensibilité :  $3 \text{ mV}/\text{W.m}^2$  pour un capteur de  $1 \text{ cm}^2$ ) sont répartis sur les surfaces d'échange (figures 5.4a et 5.4b). Ces fluxmètres sont équipés de thermocouples afin de connaître aussi les températures à l'endroit des mesures de flux.

Le nombre total de fluxmètres par surface d'échange de l'échantillon est de 3. Pour éviter un écrasement des capteurs par les échangeurs, ils sont protégés par une fine couche de néoprène placée entre l'échangeur et l'échantillon. Aussi, pour éviter des pertes thermiques, les autres faces de l'échantillon sont isolées par au moins 15 cm d'épaisseur de polystyrène extrudé. Une centrale d'acquisition assure la numérisation et l'enregistrement des mesures.

Le principe de mesure consiste à imposer des températures en surface ( $T_1$  face percée et  $T_2$  face pleine) pour créer un gradient de température et mesurer le flux de chaleur traversant la plaque en régime permanent. Certaines propriétés du *MCP* pouvant évoluer avec la température, les mesures ont été réalisées à l'état solide et à l'état liquide.

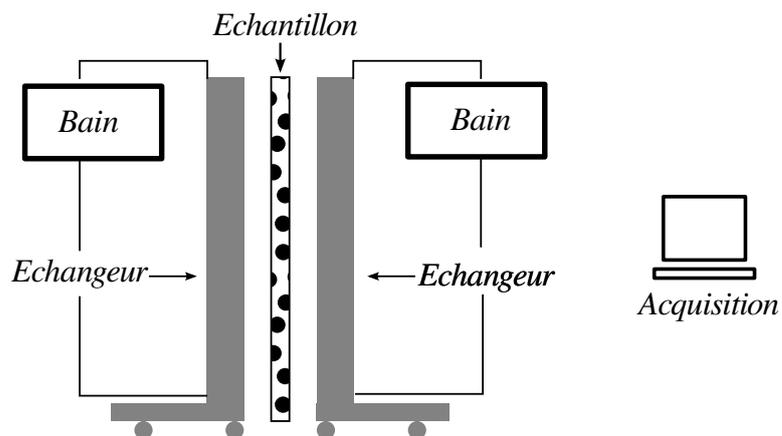
Les protocoles de mesure établis sont les suivants :

Mesure avec le MCP à l'état solide :

- 1<sup>er</sup> cas :  $T_1 = 10 \text{ °C}$  et  $T_2 = 30 \text{ °C}$
- 2<sup>me</sup> cas :  $T_1 = 20 \text{ °C}$  et  $T_2 = 30 \text{ °C}$

Mesure avec le MCP à l'état liquide :

- 3<sup>me</sup> cas :  $T_1 = 45 \text{ °C}$  et  $T_2 = 55 \text{ °C}$
- 4<sup>me</sup> cas :  $T_1 = 50 \text{ °C}$  et  $T_2 = 60 \text{ °C}$

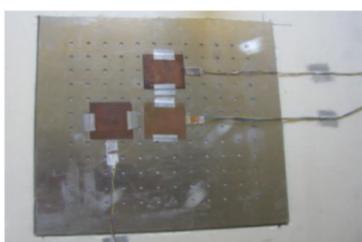


(a) Schéma de l'expérimentation

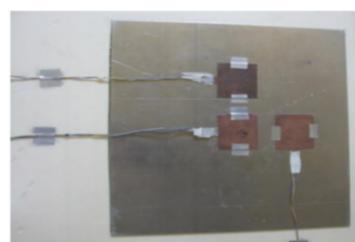


(b) Le banc expérimental en fonctionnement

FIGURE 5.3 – Banc d'expérimentation pour les mesures fluxmétriques sur la planche à clous contenant du MCP



(a) Fluxmètres sur la face percée



(b) Fluxmètres sur la face pleine

FIGURE 5.4 – Installation des fluxmètres sur les surfaces d'échange de la planche à clous

Mesure	1	2	3	4
Flux moyen (W/m <sup>2</sup> )	150.1 ± 2.7	77.1 ± 2.3	165.2 ± 4.1	165.2 ± 5.4
T <sub>1</sub> moyenne (°C)	28.2 ± 0.1	29.1 ± 0.1	53.1 ± 0.2	58.0 ± 0.2
T <sub>2</sub> moyenne (°C)	11.8 ± 0.1	20.7 ± 0.1	46.7 ± 0.2	51.7 ± 0.2

TABLEAU 5.2 – Résultats obtenus lors de la campagne de mesures. Valeurs moyennées pour tous les capteurs

Mesure	1	2	3	4
R <sub>moy</sub> (m <sup>2</sup> K/W)	0.110 ± 0.004	0.109 ± 0.004	0.039 ± 0.001	0.038 ± 0.002
λ <sub>moy</sub> (W/m K)	0.382 ± 0.014	0.387 ± 0.014	1.081 ± 0.013	1.091 ± 0.044

TABLEAU 5.3 – Conductivité équivalente obtenue avec les flux de chaleur mesurés

### 5.3.2 Résultats des mesures fluxmétriques

Les mesures de flux de chaleur sont résumées dans le tableau 5.2. Les valeurs obtenues sont moyennées sur tous les capteurs installés. De même, les températures mesurées sur les surfaces d'échange sont moyennées.

Les données obtenues permettent de déduire la conductivité équivalente. Dans un premier temps la résistance thermique de l'échantillon est calculée :

$$R_{moy} = \frac{T_{1moy} - T_{2moy}}{\phi_{moy}} \quad (5.1) \quad R_{centre} = \frac{T_{1moy} - T_{2moy}}{\phi_{centre}} \quad (5.2)$$

La moyenne des températures est effectuée sur une période de trente minutes. Les incertitudes sur la résistance thermique sont :

$$\Delta R_{moy} = R_{moy} \frac{\Delta \phi_{moy}}{\phi_{moy}} \quad (5.3) \quad \Delta R_{centre} = R_{centre} \frac{\Delta \phi_{centre}}{\phi_{centre}} \quad (5.4)$$

Enfin, la conductivité équivalente homogène peut être déduite grâce à l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{e_{totale}}{R_{moy}} \quad (5.5) \quad \Delta \lambda = \lambda \frac{\Delta R_{moy}}{R_{moy}} \quad (5.6)$$

Les résultats des calculs de conductivité équivalente sont résumés au tableau 5.3. Il peut être distingué clairement une grande disparité entre les mesures réalisées à l'état solide (mesures 1 et 2) et à l'état liquide (mesures 3 et 4). Si on considère une conductivité à l'état solide (λ<sub>s</sub>) de 0.39 W/m K et une conductivité à l'état liquide (λ<sub>l</sub>) de 1.08 W/m K, la différence entre les deux mesures est de 0.69 W/m K, ce qui correspond à 64 % de la conductivité liquide λ<sub>l</sub>. Dans la littérature, la différence de conductivité entre les

deux états est de l'ordre de 0.05 W/mK pour les paraffines. Deux explications sont envisagées pour ces résultats discordants. La première est la présence du phénomène de convection à l'état liquide. En effet, lors des mesures effectuées, l'échantillon est positionné verticalement dans le banc expérimental (position imposée par le banc de mesure). Cette position peut favoriser ce phénomène et augmenter ainsi le transfert de chaleur à l'intérieur de la plaque à cause de la diminution de la résistance thermique équivalente de la plaque. La deuxième explication est un phénomène présent lors de la solidification du *MCP* pour cette architecture. Une fois le *MCP* solidifié, il est constaté que de l'air est emprisonné autour des clous. L'air est connu pour ses propriétés isolantes dues à sa très faible conductivité. Il n'est pas donc étonnant que l'air présent autour des clous dans l'échantillon dégrade de manière importante la fonction de la matrice conductrice.

Pour avoir une idée plus claire sur les résultats obtenus lors de la campagne de caractérisation, un calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis a été réalisé dans la section suivante 5.4.

### 5.3.3 Conclusions

Cette section a présenté le banc expérimental utilisé pour la caractérisation de la conductivité équivalente du matériau architecturé dit "planche à clous". Les résultats obtenus montrent une grande disparité de la conductivité en fonction de l'état du cœur de l'échantillon : solide ou liquide. La différence entre les mesures est de 64 % de la conductivité liquide. Deux explications sont proposées pour l'écart de conductivité trouvé : le phénomène de convection lors de la mesure à l'état liquide et la présence d'air autour des clous emprisonné par le *MCP* à l'état solide. La section suivante (section 5.4) présente une analyse numérique de la conductivité équivalente pour clarifier cet écart de mesure.

## 5.4 Analyse numérique de la conductivité équivalente

---

Pour l'analyse numérique de la conductivité équivalente de la planche à clous, le logiciel *Abaqus 6.11* [2] avec le solveur *Standart* (solveur avec un schéma d'intégration implicite) a été utilisé. Le protocole d'expérimentation en régime permanent a été simulé afin de comparer la conductivité équivalente numérique et expérimentale (les mêmes conditions limites sont utilisées : températures imposées sur les surfaces d'échange). De plus, un calcul analytique utilisant des modèles de conductivité équivalente a été ajouté à la comparaison.

La méthode utilisée pour l'analyse numérique est la méthode des éléments finis. Cette méthode permet de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles (EDP). La fonction étudiée est définie sur un domaine qui comporte des conditions aux limites garantissant l'existence et l'unicité de la solution.

Conditions	Symbole	Valeur	Unité
Temp. Face clous	$T_1$	20	°C
Temp. Face pleine	$T_2$	30	°C
Matériau stockeur	RT-42	$\lambda = 0.18$	W/m K
Matériau conducteur	Dural	$\lambda = 140$	W/m K

TABLEAU 5.4 – Conditions de simulations à l'état solide. Étude en régime permanent et propriétés constantes et homogènes.



(a) Coupe de la planche à clous. Les points noirs correspondent aux clous installés.

(b) Simplification d'étude : Motif final correspondant à 1/4 d'une zone avec 4 clous.

FIGURE 5.5 – Domaine d'étude pour l'analyse numérique de la conductivité équivalente de la planche à clous

La présence de différentes symétries dans l'échantillon a permis de simplifier l'étude et d'établir un motif caractéristique minimal à analyser. Dans le plan  $(x,y)$ , ce motif est constitué d'un quart de clou et de *MCP* (figure 5.5b). Suivant l'épaisseur (axe  $z$ ), toutes les parties de la plaque ont été prises en compte (conteneur, partie architecturée et *MCP* résiduel). Une étude de dépendance au maillage de la simulation a été effectuée afin d'obtenir un résultat fiable (figure 5.6). Le critère dont on analyse la convergence est le flux de chaleur.

Le champ de température obtenu est présenté figure 5.7. Le flux de chaleur est transporté principalement par les clous, confirmant sa fonction de matrice conductrice. Le flux de chaleur obtenu est de 0.0228 W. Ceci implique une conductivité équivalente de 0.95 W/m K. Cette valeur obtenue est plus proche de la mesure à l'état liquide, la différence étant de l'ordre de 10 % avec celle-ci. L'hypothèse concernant l'impact isolant de l'air autour des clous se confirme. La mesure à l'état solide présente un écart très important avec le résultat numérique.

L'écart entre la mesure expérimentale à l'état liquide et le résultat numérique peut être expliqué par le phénomène de convection non considéré lors des simulations numériques. Comme nous l'avons déjà précisé, le fait d'avoir positionné l'échantillon de manière verticale favorise la convection. Pour réduire ce phénomène il est conseillé de réaliser les mesures expérimentales en positionnant l'échantillon à l'horizontale.

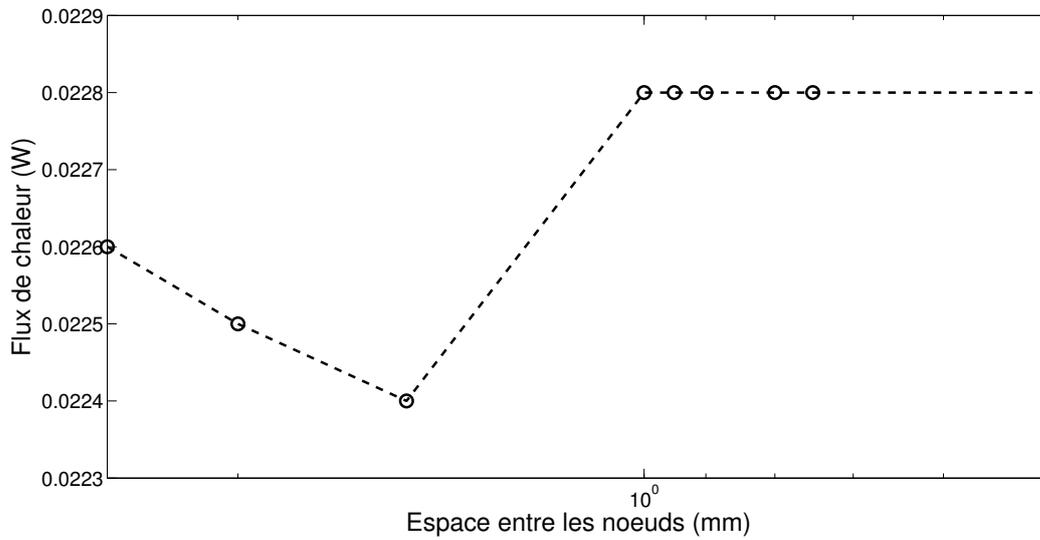


FIGURE 5.6 – Analyse de la convergence des résultats numériques de flux de chaleur pour un motif de la planche à clous. Convergence atteinte pour une valeur de flux de chaleur de 0.0228 W

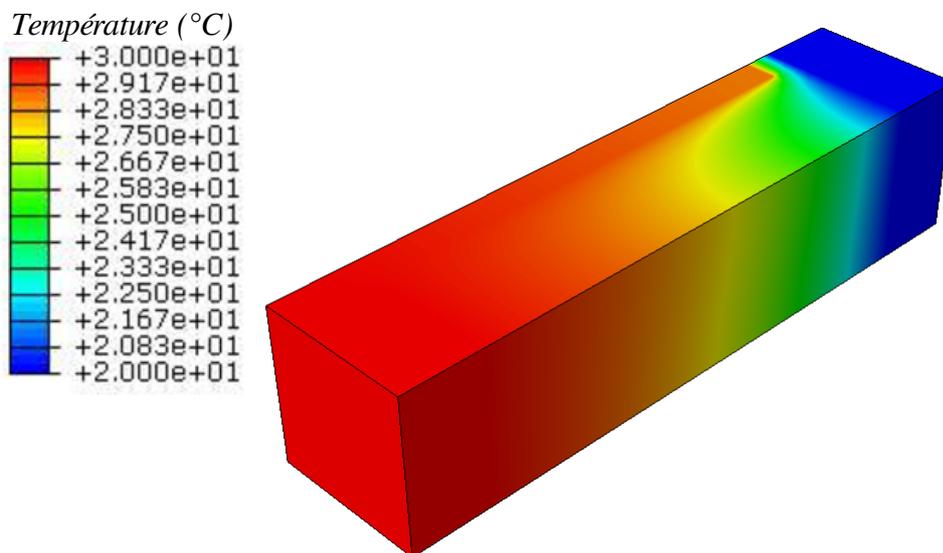
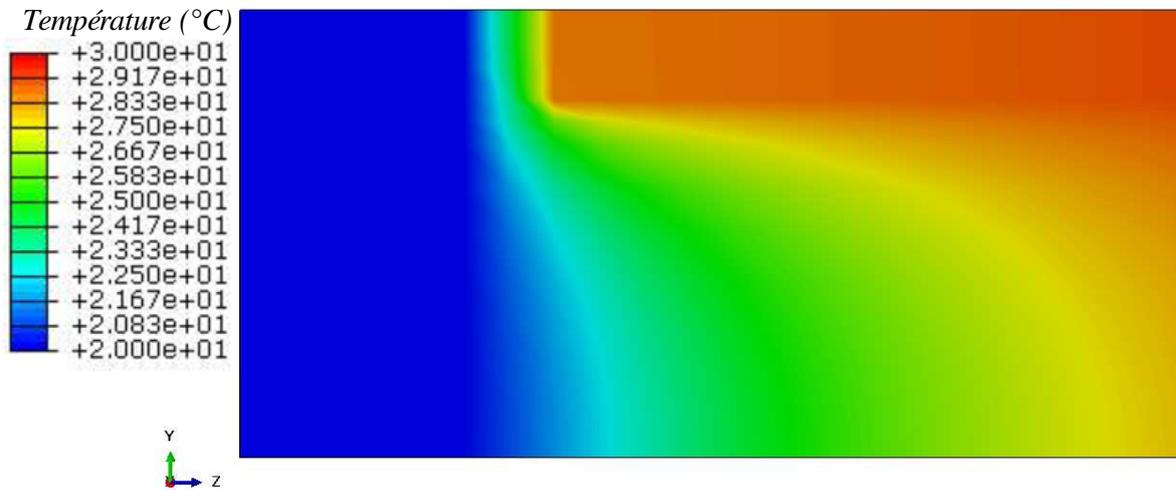
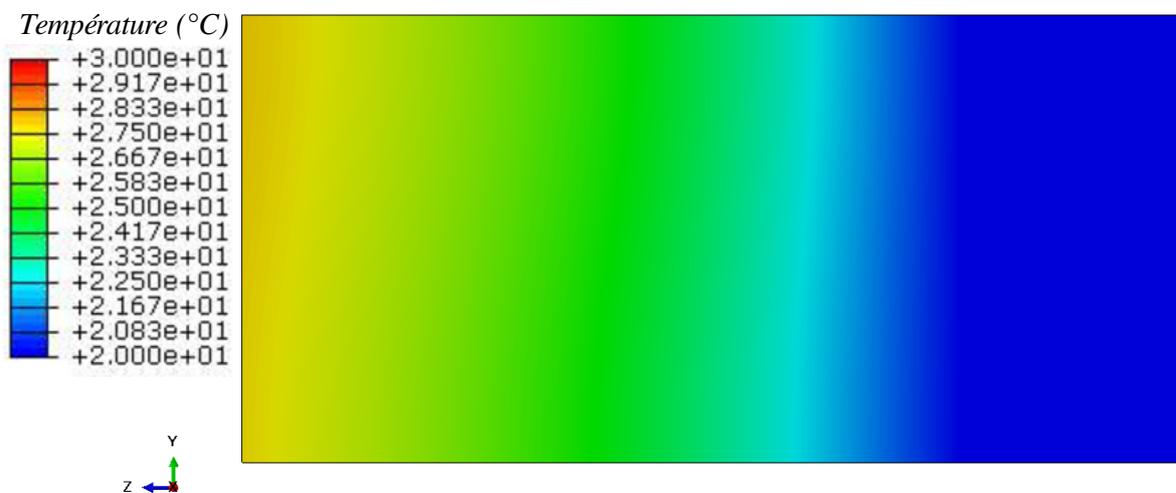


FIGURE 5.7 – Distribution de température dans un motif élémentaire d'étude de la planche à clous. Étude en régime permanent, les température sur les surfaces d'échange sont imposées ( $T_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$  (rouge),  $T_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (bleu)).

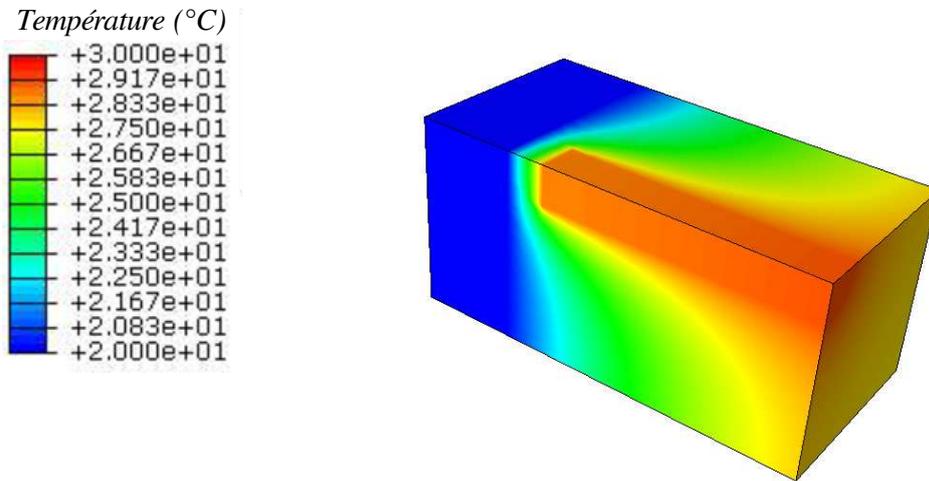


(a) Vue latérale du motif côté clous. La chaleur transportée par le clous favorise le réchauffement de la plaque. Le clou ne traversant pas complètement la plaque, il est constaté que la quantité restante de *MCP* joue un rôle d'isolant.

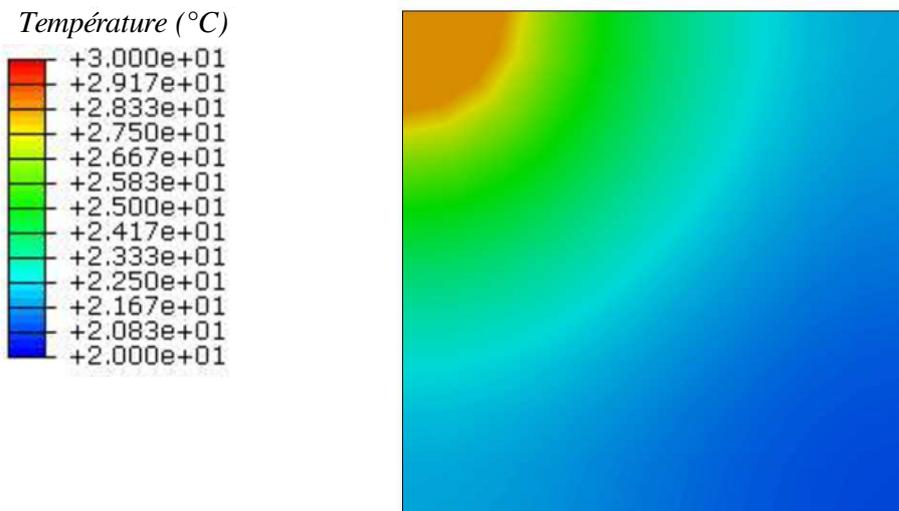


(b) Vue latérale du côté opposé. La distribution de température est plus uniforme.

FIGURE 5.8 – Influence de la matrice conductrice (clous) sur le champ de température en vues latérales du motif élémentaire d'étude.



(a) Coupe du motif élémentaire d'étude, vue en 3D. Dans cette image, le clou est mis en évidence. Le transport de chaleur est assuré quasi totalement par la matrice conductrice.



(b) Coupe transversale de motif élémentaire d'étude. La distribution de température est circulaire à partir de la surface latérale du clou.

FIGURE 5.9 – Coupes du motif élémentaire d'étude

En dernier lieu, une étude analytique des transferts thermiques dans la planche à clous a été faite. Ce calcul est basé sur un modèle à résistance équivalente par analogie électrique.

Le motif étudié a été divisée en 3 parties distinctes : le conteneur (les deux plaques en *Dural*), la partie architecturée (clous + *MCP*) et une partie de *MCP* résiduel (couche d'approximativement 5 mm). La résistance équivalente du motif est alors égale à la somme des résistances de chaque partie (résistances en série) :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (5.7)$$

- $R_1$  et  $R_4$  résistances thermiques du conteneur métallique (négligée).
- $R_2$  résistance thermique de la partie architecturée (clous + *MCP*)
- $R_3$  résistance thermique de la partie *MCP* seul

Les résistances thermiques du conteneur ( $R_1$  et  $R_4$ ) et du *MCP* seul ( $R_3$ ) sont les suivantes :

$$R_4 = \frac{e_c}{\lambda_{alu} \cdot S} \quad (5.8) \quad R_3 = \frac{e_{mcp}}{\lambda_{mcp} \cdot S} \quad (5.9)$$

La section qui correspond à la partie architecturée a été considérée comme une association de résistances en parallèle. Analytiquement on a :

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{clous}} + \frac{1}{R_{2mcp}} \quad (5.10) \quad \frac{\lambda_2 \cdot S}{e_2} = \frac{\lambda_c \cdot S_c}{e_c} + \frac{\lambda_{mcp} \cdot S_{mcp}}{e_{mcp}} \quad (5.11)$$

L'épaisseur étant la même pour les *MCP* et les clous ( $e_2 = e_c = e_{mcp}$ ), l'expression précédente peut être simplifiée :

$$\lambda_2 = \lambda_c \cdot \frac{S_c}{S} + \lambda_{mcp} \cdot \frac{S_{mcp}}{S} \quad (5.12)$$

La conductivité équivalente de la partie architecturée est numériquement :

$$\lambda_2 = 140 \times 144 \times \frac{\pi \cdot 2^2}{250 \times 250} + 0.18 \times \left(1 - 144 \times \frac{\pi \cdot 2^2}{250 \times 250}\right) \quad (5.13)$$

$$\lambda_2 = 4.23W/m.K \quad (5.14)$$

La conductivité équivalente du motif est alors calculée en sachant que  $S_T = S_c = S_{mcp} = S_2$  :

$$\frac{e_T}{\lambda_T \cdot S_T} = \frac{e_{mcp}}{\lambda_{mcp} \cdot S_{mcp}} + \frac{e_2}{\lambda_2 \cdot S_2} \quad (5.15) \quad \lambda_T = 1.03W/m.K \quad (5.16)$$

La conductivité équivalente analytique calculée à partir d'une analogie électrique pour des résistances thermiques est inférieure à la valeur expérimentale obtenue à l'état liquide, mais très proche de celle-ci. La différence entre les deux résultats est de 5 %. Ce résultat analytique n'est pas loin non plus du résultat numérique (5 % de différence). Une bonne concordance entre les différentes méthodes utilisées est alors trouvée. Pour affiner la précision, une prise en compte du phénomène de convection est alors nécessaire (surtout pour le modèle numérique).

En conclusion, ce calcul analytique peut être utilisé pour déterminer la conductivité équivalente d'un matériau architecturé ayant cette configuration (matrice conductrice : clous). Ce calcul a été validé par mesure expérimentale et comparé avec des résultats numériques. Tous les résultats concordent avec un écart de  $\pm 0.08$  W/m K.

### Cas de l'Heneicosane

Nous utilisons donc la formulation analytique pour déterminer la conductivité équivalente d'une planche à clous contenant de l'Heneicosane. La conductivité de l'Heneicosane est de 0.2 W/m K, valeur très proche de la conductivité du RT-42. La conductivité équivalente de la planche à clous contenant ce *MCP* est de :

$$\lambda_{eq} = 1 \text{ W/m K} \quad (5.17)$$

La planche à clous contenant le meilleur MCP potentiel a une conductivité équivalente de 1 W/m K. Cette valeur permet de satisfaire l'objectif exprimé à la section 4.3.5. Ce matériau architecturé est alors une solution envisageable en termes de conductivité équivalente. Cependant, comme déjà vu auparavant, une conductivité équivalente plus élevée ne suffit pas. Pour répondre à nos objectifs et contraintes, le coefficient de convection du système doit aussi être amélioré. Ce point sera traité dans la section suivante.

## 5.5 Utilisation des ailettes

---

Les ailettes sont utilisées afin d'augmenter le transfert de chaleur entre l'air et les surfaces lisses des plaques architecturées. Les ailettes sont considérées comme des extensions des surfaces d'échange et l'analyse de leur efficacité nécessite la détermination du flux de chaleur associé à celles-ci.

Dans le chapitre précédent (chapitre 4, section 4.3.6) a été défini le coefficient de convection nécessaire pour satisfaire nos objectifs pour les surfaces lisses de la plaque composite :  $h_c = 30$  W/m<sup>2</sup> K. Les ailettes sont donc dimensionnées afin de satisfaire cette valeur. Les points clés de la conception des ailettes sont donc : la géométrie (épaisseur, largeur, longueur) et le nombre d'ailettes.

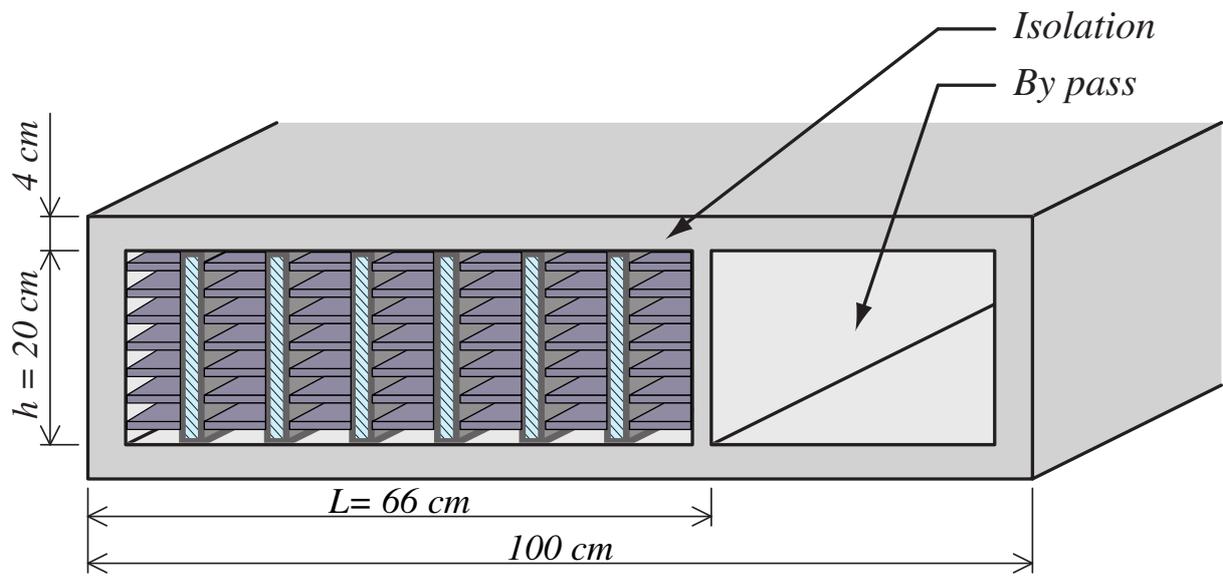


FIGURE 5.10 – Système de stockage avec des ailettes sur les surfaces d'échange des plaques architecturées

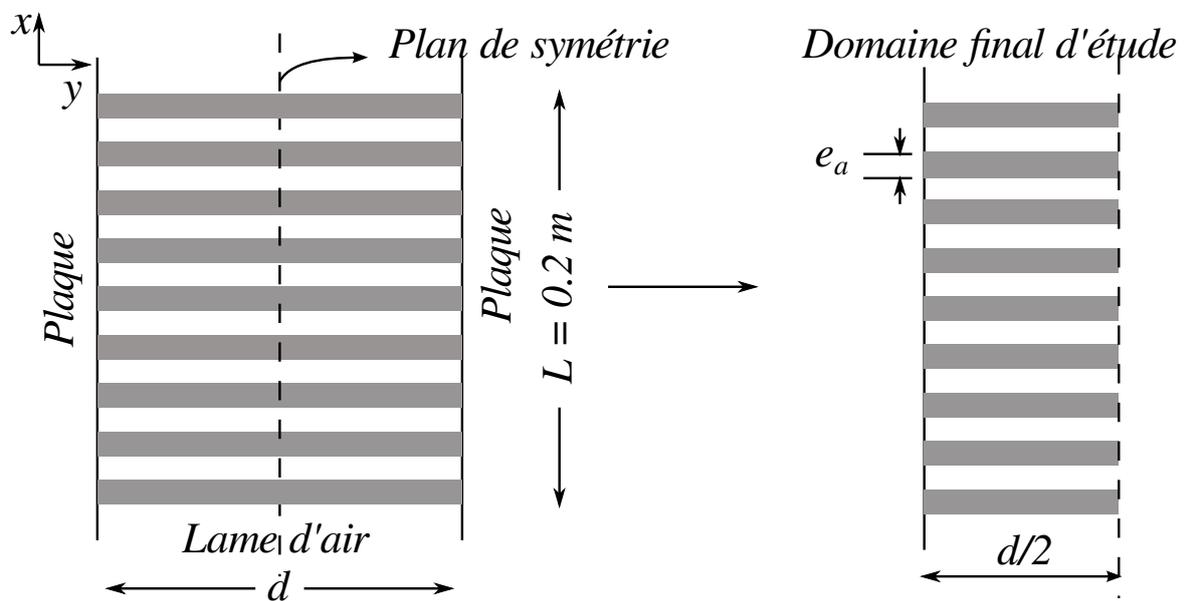


FIGURE 5.11 – Analyse des ailettes. Domaine d'étude

Le schéma itératif de recherche d'une configuration avec ailettes dont le transfert de chaleur serait équivalent à celui d'une surface lisse ( $S_1$ ) avec un coefficient d'échange de  $30 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $h_1$ ) est le suivant :

1. Définition de la géométrie des ailettes :

- définition de l'épaisseur de l'ailette (les autres paramètres étant fixés par les dimensions du système)
- définition du nombre ( $N_{ail}$ ) d'ailettes à intégrer dans les lames d'air du système

2. Calcul du coefficient d'échange pour cette configuration avec ailettes :

- calcul du débit entre les ailettes, déduction de la vitesse d'air

$$debit_a = \frac{debit_{lamme-air}}{(N_{ailettes} + 1)} \quad (5.18) \quad v = \frac{debit_a}{S_{transv.-entre-ailettes}} \quad (5.19)$$

- calcul du nombre de *Reynolds* à partir de la vitesse d'air entre les ailettes. Détermination du type d'écoulement : turbulent ou laminaire.

$$Re_{D_h} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5.20) \quad D_h = \frac{4A_{transv}}{P_{erim.}} \quad (5.21)$$

- calcul du nombre de *Nusselt* (dépend du type d'écoulement, utilisation de la corrélation de *Colburn* dans le cas turbulent) et déduction du coefficient de convection

$$Nu_D = 0.023 Re_{D_h}^{4/5} Pr^{1/3} \quad (5.22) \quad h_{ail} = \frac{\lambda}{D_h} Nu_D \quad (5.23)$$

3. Calcul de l'efficacité d'une ailette

- Hypothèses : Conduction unidirectionnelle (suivant  $\vec{y}$ ) ; régime permanent ; conductivité constante et homogène ; transfert radiatif négligé ; pas de génération d'énergie interne ; domaine d'étude : moitié d'une ailette (symétries).
- En appliquant le théorème de la conservation de l'énergie pour le domaine d'étude d'une demi ailette :

$$\varphi_{cond}(y) \cdot S_{Transv} = \varphi_{cond}(y + dy) \cdot S_{Transv} + h(T(y) - T_a) p dy \quad (5.24)$$

$$\frac{d\varphi}{dy} = \frac{hp}{S_{transv}} (T_a - T(y)) \quad (5.25)$$

$$-\lambda \frac{d^2 T}{dy^2} - \frac{hp}{S_{transv}} (T_a - T(y)) = 0 \quad (5.26)$$

Pour simplifier le problème on introduit

$$\theta(y) = T(y) - T_a \quad (5.27)$$

$$z = \sqrt{\frac{hp}{\lambda S_{Transv}}} \quad (5.28)$$

L'expression finale est donc :

$$\frac{d^2 \theta}{dy^2} - z^2 \theta = 0 \quad (5.29)$$

La résolution de cette équation permet de connaître la distribution de la température le long de l'ailette (voir [50]). La solution de l'équation différentielle est du type :

$$\theta = Ae^{(zy)} - Be^{(-zy)} \quad (5.30)$$

Les conditions limites imposent :

$$\varphi(y = d/2) = 0 \quad (5.31)$$

$$T(y = 0) = T_b \quad (5.32)$$

d'où

$$A = Be^{(-2zd/2)} \quad (5.33)$$

$$B = \frac{T_b - T_a}{1 + e^{-2zd/2}} \quad (5.34)$$

La température est donc connue le long de l'ailette. Le flux de chaleur sortant de l'ailette peut donc être déterminé. On déduit alors l'efficacité de l'ailette :

$$\eta_f = \frac{\tanh(zd/2)}{zd/2} \quad (5.35)$$

4. Calcul de la surface totale d'échange incluant les ailettes et la base restante de la surface de la plaque composite.

$$S_T = N_{ail} S_{sail} + S_b \quad (5.36)$$

5. Calcul de l'efficacité globale de la surface d'échange

$$\eta_0 = 1 - \frac{N_{ail} S_{sail}}{S_T} (1 - \eta_f) \quad (5.37)$$

6. Comparaison de la nouvelle configuration  $(h_{ail}, S_T, \eta_0)$  par rapport au cahier de charges  $(h_1, S_1)$ .

Ce calcul itératif permet de définir un couple (Épaisseur ailette, Nombre d'ailettes) permettant le transfert de chaleur nécessaire. Pour le système de stockage étudié ( $l = 2$  m,  $L = 0.2$  m,  $e_T = 0.66$  m) le couple solution proposé est le suivant : 3 mm d'épaisseur et 20 unités/m. L'écoulement reste en régime turbulent avec cette configuration.

## 5.6 Conclusions

---

Ce chapitre a été consacré à la conception d'un matériau architecturé contenant du *MCP* et à une optimisation du design du système de stockage afin de répondre aux besoins exprimés lors du chapitre précédent.

La première partie de ce chapitre correspond à la conception du matériau architecturé choisi. La valeur de conductivité mise en évidence lors du chapitre précédent a permis l'utilisation d'une architecture simple. Des clous traversant le cœur d'une plaque sandwich contenant du *MCP* ont été utilisés comme matrice conductrice. La caractérisation de cette plaque architecturée a permis de dégager deux résultats principaux :

- une forte disparité entre les résultats obtenus pour la conductivité thermique équivalente à l'état solide (0.39 W/m K) et à l'état liquide (1.08 W/m K) ;
- si les mesures à l'état liquide se confirment, la solution répondra effectivement aux cahiers des charges ( $\lambda_{souhaite} = 1$  W/m K).

Afin de comprendre les résultats de la caractérisation une étude numérique a été réalisée par la méthode des éléments finis. La conductivité obtenue numériquement est de 0.95 W/m.K. Ces résultats ont permis de confirmer les hypothèses faites lors de l'analyse des résultats de caractérisation : de l'air est encapsulé autour des clous par le *MCP* lors de la solidification de celui-ci, réduisant la conductivité équivalente du matériau architecturé ; de plus, un phénomène de convection est présent lors des mesures à l'état liquide (phénomène non pris en compte lors des simulations numériques). Enfin, le calcul analytique par analogie électrique a été validé par les mesures expérimentales et les résultats numériques. Ce calcul a été utilisé pour confirmer la conductivité équivalente du matériau architecturé contenant de l'Heneicosane: 1 W/m K. Le matériaux proposé répond effectivement au cahier des charges établi.

La deuxième partie du chapitre a proposé une modification des surfaces d'échange de la plaque architecturée pour augmenter le coefficient de convection du système. Une méthode

itérative de calcul proposant un couple (nombre d'ailettes, géométrie d'ailettes) est mis en œuvre. La solution proposée consiste en 20 unités/m d'ailettes de 3 mm d'épaisseur pour le système étudié.

En conclusion, les modifications apportées au système en termes de matériau et design permettent de répondre aux objectifs établis précédemment.