

Conception de parois multi-couches pour véhicules utilitaires isothermes

Design of multilayer wall for isothermal vehicle

Adrien FUENTES^{1*}, Patrick GLOUANNEC¹, Hervé NOEL¹

¹Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient

* (auteur correspondant : adrien.fuentes@univ-ubs.fr)

Résumé – L’exploitation de véhicules électrique dans les villes est appelée à se développer. Dans le cadre de ces travaux, on s’intéresse à l’isolation de véhicules de petits volumes essentiellement destinés au transport de produits alimentaires périssables conditionnés à une température d’environ 4°C. Des plaques planes de mousse de polyuréthane (PU) contenant différents taux de matériaux à changement de phase, ont été fabriquées pour cette étude. Après la caractérisation des matériaux et la validation d’un modèle numérique par des expérimentations, différents scénarios sont simulés.

Mots-clés : Transfert de chaleur, parois isolante, caractérisation, expérimentation, modélisation

Abstract – The use of electric vehicles in cities is set to grow. This work focuses on the insulation of small-volume vehicles mainly intended for the transport of perishable food products packaged at a temperature of about 4°C. Flat polyurethane (PU) foam panels containing different rates of phase change materials were manufactured for this study. After the characterization of the materials and the validation of a numerical model by experiments, different scenarios are simulated.

Keywords: Heat transfer, insulating walls, characterization, experiment, modeling

Nomenclature

MCP matériau à changement de phase
PU polyuréthane
 T température, °C
 h enthalpie, J.g⁻¹
 L chaleur de changement d’état, J.g⁻¹
cp capacité thermique massique, J.g⁻¹.K⁻¹
 e épaisseur, m
 E énergie, Wh.m⁻²

Symboles grecs

λ conductivité thermique, W.m⁻¹.K⁻¹
 ρ masse volumique, kg.m⁻³
 τ taux de MCP dans le composite, %
 φ densité de flux, W.m⁻²
Indices et exposants
 f fusion
 s solidification
 m massique

1. Introduction

L’exploitation de véhicules électriques pour la livraison urbaine de denrées périssables est appelée à fortement se développer dans les années à venir. Ce moyen de livraison permet de réduire les émissions carbonées liées au transport de produits alimentaires réfrigérés. Pour que ce scénario soit viable, il devient nécessaire de limiter l’usage du groupe frigorifique embarqué et de privilégier l’utilisation du stockage électrochimique (batteries) pour la motorisation du véhicule.

La réglementation Française concernant tous types de véhicules frigorifiques impose l’application des accords ATP (accord relatif aux transports internationaux de denrées périssables) pour la circulation [1]. Les niveaux d’isolations ne sont pas très ambitieux ce qui conduit à l’exploitation de groupes froid de forte puissance. Par ailleurs, Estrada-Flores et al. [2] ont mesurés de fortes disparités de conductance globale (0,93 à 1,24 W.m⁻².K⁻¹) sur des modèles identiques de véhicules.

Dans le cadre de ces travaux, on s'intéresse à l'isolation thermique de véhicules de petits volumes, essentiellement destinés au transport durant quelques heures de produits alimentaires réfrigérés. La contrainte est de concevoir des parois thermiquement optimales tout en ne pénalisant pas la masse et le volume utile du véhicule.

L'objet de cette communication est, dans un premier temps, de présenter les résultats de caractérisation thermophysique d'un composite isolant constitué d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) disposé dans une matrice polyuréthane (PU). Puis dans un second temps, les propriétés obtenues sont intégrées dans un modèle numérique, qui est ensuite utilisé pour évaluer la performance de différentes configurations de parois isolantes.

2. Matériel et techniques

Des plaques planes de mousse de polyuréthane contenant différents taux de microbilles de MCP ont été fabriquées. Ces plaques de surface 30x30 cm² et d'épaisseur 2 cm sont ensuite découpées en fonction du type de caractérisation. Plusieurs essais de mise en œuvre ont été réalisés avec des taux massiques de MCP de 40% et 50%, intégrés dans un mélange de polyol et d'isocyanate afin de réaliser des mousses composites.

2.1. Mesure de la capacité thermique

La faible taille des échantillons utilisés lors d'une mesure par DSC ne permet pas d'obtenir un volume représentatif du composite PU-MCP, notamment en raison de la potentielle inhomogénéité de dispersion du MCP dans la matrice PU. Une analyse par DSC du MCP pur a d'abord été réalisée à l'aide d'un micro-calorimètre (MDSC3-SETARAM) programmé pour suivre une plage de température comprise entre 0 à 22°C sous une vitesse de 0,05 K·min⁻¹. La masse de MCP pur utilisée pour cette caractérisation est de 117mg. Les résultats, présentés en fonction de la température (Figure 1), montrent clairement une hystérésis entre les phases de fusion et de solidification. Afin d'évaluer la chaleur latente et le taux de MCP à l'échelle d'une plaque composite PU-MCP, une expérimentation spécifique a donc été réalisée et est présentée par la suite.

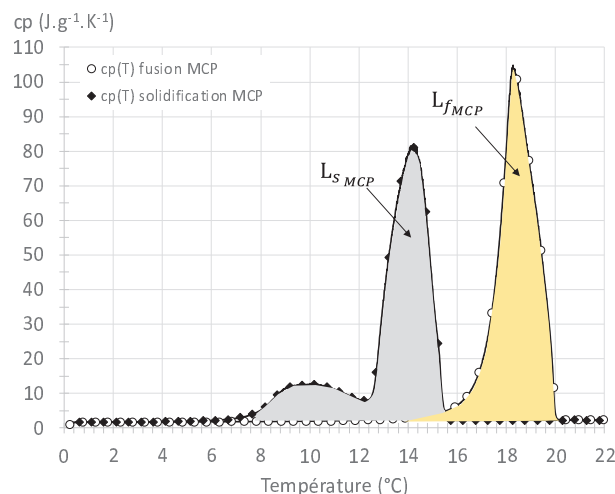


Figure 1 : Mesure par DSC du MCP pur

| τ_{MCP} théorique (%) | T_{pic} fusion (°C) | T_{pic} solidification (°C) | $L_{f_{MCP}}$ (J.g ⁻¹) | $L_{s_{MCP}}$ (J.g ⁻¹) |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 100 | 18,3 | 14,2 | 185,4 ± 9,3 | 186,4 ± 9,3 |

Tableau 1 : Taux de MCP théorique et mesuré pour 2 composites PU-MCP

2.2. Mesure des conductivités

La conductivité thermique apparente des différents matériaux a été mesurée sur une plage de température de -5 à 35°C , à l'aide d'un conductivimètre (NETZSCH HFM 436/3), et selon la norme ISO 8301. La faible rigidité de la mousse PU permet, au regard de l'effort de maintien appliqué aux échantillons, de négliger les potentielles résistances de contact. Les conductivités thermiques d'une mousse de PU pure et de deux plaques composites PU-MCP, chargées à $40\%_m$ et $50\%_m$, sont tracées en fonction de la température (Figure 2). On remarque d'une part, que l'ajout de MCP dans la mousse PU augmente sensiblement sa conductivité thermique. Cette valeur est environ 2 fois plus élevée pour les composites que pour la mousse de PU seule ; elle passe de $0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à environ $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. D'autre part, on observe une hausse de la conductivité thermique avec l'augmentation du taux de MCP. Elle croit de $11,5\%$ en moyenne lorsque le taux massique de MCP passe de $40\%_m$ à $50\%_m$.

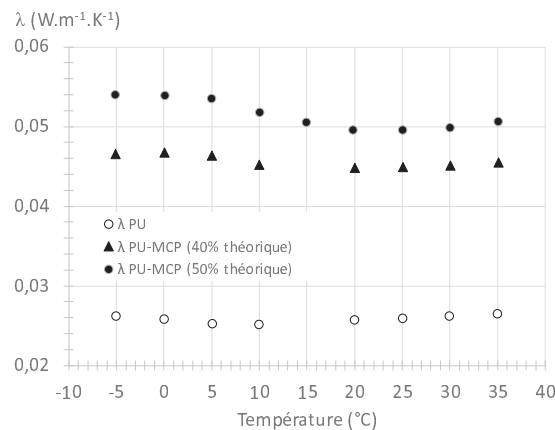


Figure 2 : Mesure de conductivité du PU et des 2 plaques de composites PU-MCP

2.3. Dispositif expérimental pour les tests

Un dispositif spécifique a été mis en place au laboratoire [3]-[4] afin de caractériser les transferts de chaleur à travers des plaques multicouches de taille significative (jusqu'à $15 \times 15 \text{ cm}^2$ de surface et 6 cm d'épaisseur). Ce dispositif consiste à placer l'échantillon à tester entre deux échangeurs à plaque isothermes, dont la température est contrôlée à l'aide de bains thermostatés. Par ailleurs, afin de minimiser les pertes thermiques avec l'ambiance, les faces latérales de l'échantillon testé sont isolées par 4 cm de PU. Un schéma du dispositif est présenté dans la Figure 3.

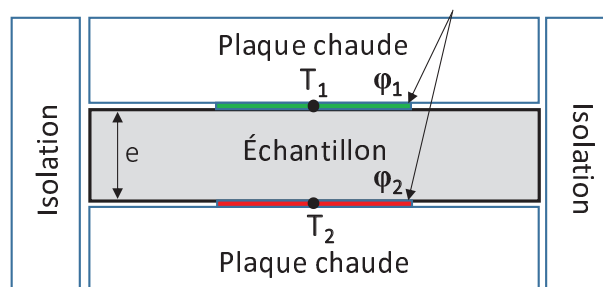


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental de plaques chaudes gardées

Afin d'observer la réponse thermique de la plaque testée, l'expérimentation a été instrumentée avec des thermocouples de type K disposés au centre de chaque face de la paroi testée (T_1 et T_2). De plus, la densité de flux de chaleur traversant chaque face de l'échantillon est mesurée à l'aide de deux fluxmètres (Captec) de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. L'épaisseur des fluxmètres est de $0,4 \text{ mm}$ et leur incertitude de mesure est évaluée à 5% .

Le banc d'essai a été utilisé afin de déterminer la chaleur latente des plaques de composite PU-MCP. Pour cela, la chaleur stockée ou libérée par les plaques de composites, entre deux états d'équilibre (2°C et 30°C) a été mesurée (Figure 4).

La chaleur nécessaire pour changer d'état le MCP contenu dans le composite est alors calculée en intégrant la variation de flux de chaleur à ces bornes entre les deux états d'équilibre (1). Une fois l'enthalpie de changement d'état $L_{f_{PU-MCP}}$ (ou $L_{s_{PU-MCP}}$) connue, il est alors possible de calculer le taux de MCP $\tau_{f_{MCP}}$ (ou $\tau_{s_{MCP}}$) contenu dans la plaque de composite (2). Δh_{PU} correspond ici à la variation d'enthalpie du PU seul, durant la phase de changement d'état du MCP.

Pour un des composites (40%_{om}), les résultats conduisent à des taux massiques de MCP de $33,9 \pm 4,6\%$ et $36,6 \pm 4,6\%$, calculés respectivement durant la phase de fusion et de solidification. Aux incertitudes de mesure près, ces valeurs sont proches de la valeur théorique donnée par le fabricant. Ce constat est également observé pour l'autre composite testé (Tableau 2). Une loi de mélange (3) permet d'obtenir l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température (Figure 5).

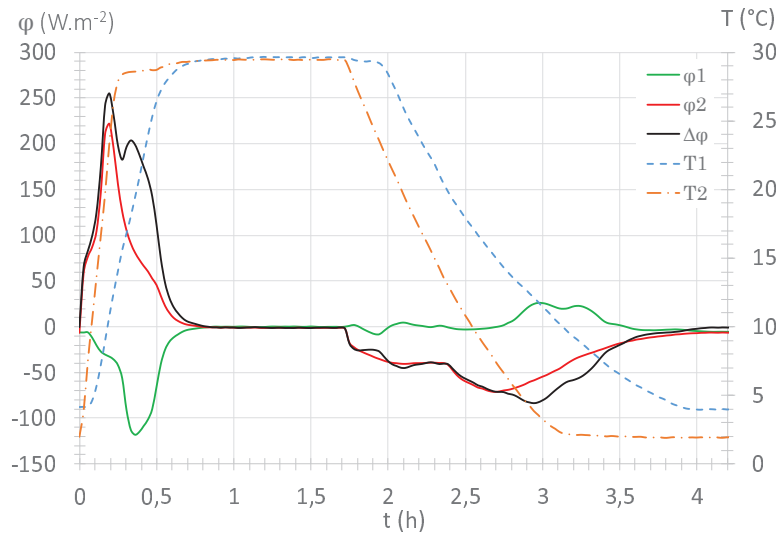


Figure 4 : Densités de flux de chaleur et températures mesurés aux bornes d'une paroi du composite PU-MCP (cas 40%_{om} théorique de MCP)

$$L_{f_{PU-MCP}} = \frac{1}{\rho e} \int (\phi_1 + \phi_2) dt \quad (1)$$

$$\tau_{f_{MCP}} = \frac{L_{f_{PU-MCP}} - \Delta h_{PU}}{L_{f_{MCP}} - \Delta h_{PU}} \quad (2)$$

| τ_{MCP} théorique (%) | $L_{f_{PU-MCP}}$ | $L_{s_{PU-MCP}}$ | $\tau_{f_{MCP}}$ (%) | $\tau_{s_{MCP}}$ (%) |
|----------------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| 40 | $62,9 \pm 11,6$ | $68,2 \pm 12$ | $33,9 \pm 4,6$ | $36,6 \pm 4,6$ |
| 50 | $79,1 \pm 14,1$ | $80,9 \pm 14,3$ | $42,6 \pm 5,5$ | $43,4 \pm 5,4$ |

Tableau 2 : Taux de MCP mesuré pour 2 composites PU-MCP lors des phases de fusion et solidification, comparé au taux de MCP théorique

$$h_{PU-MCP}(T) = (1 - \tau_{MCP}) h_{PU}(T) + \tau_{MCP} h_{MCP}(T) \quad (3)$$

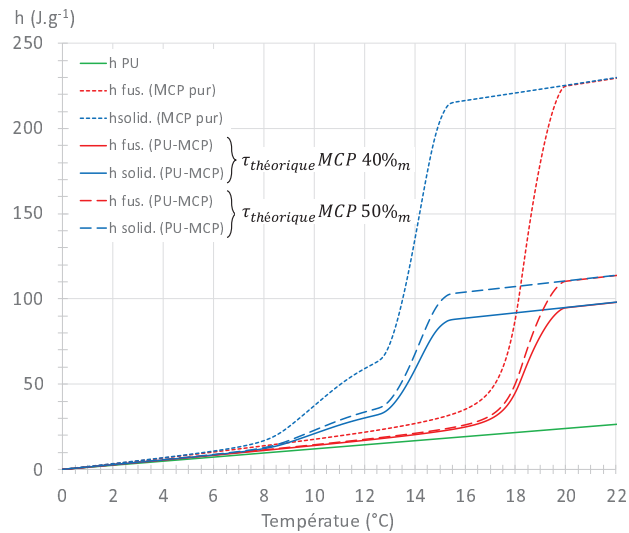


Figure 5 : Enthalpie en fonction de la température pour le PU, le MCP pur et pour deux composites PU-MCP (40%_m et 50%_m théorique)

3. Modèle numérique

Le modèle numérique proposé est validé ici à l'aide d'une comparaison expérimentale/numérique. La simulation numérique est réalisée à l'aide de COMSOL Multiphysics®. Le dispositif employé est le même que celui présenté en §2.3. L'évolution des températures T_1 et T_2 est basée sur un scénario d'utilisation diurne du véhicule. Ce scénario de 24h est composé de trois étapes décrites dans la Figure 6.

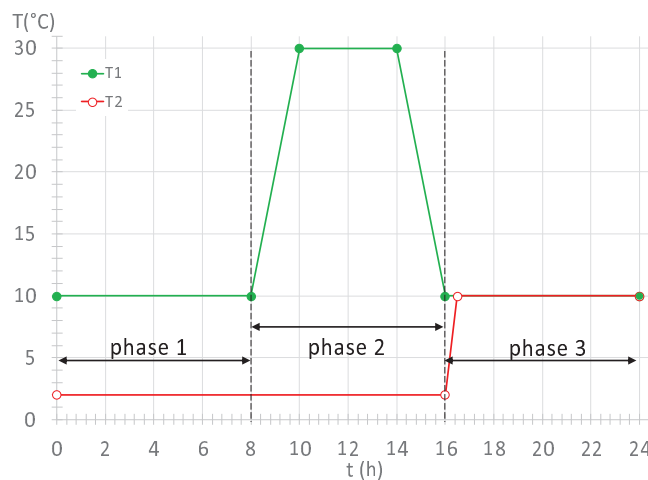


Figure 6 : Températures imposées à chaque face de la paroi isolante lors du scénario de « véhicule frigorifique »

La phase 1 correspond au refroidissement de l'enceinte isotherme du véhicule réalisée durant la nuit. Au cours de cette étape, une face de la paroi composite (T_1) est fixée à 10°C (température extérieure : garage) et la seconde (T_2) à 2 °C (température intérieure du véhicule). Ces températures sont imposées à la paroi pendant 8h.

La phase 2 correspond à la période de livraison des marchandises (période diurne). On considère que la température extérieure (T_1) augmente progressivement de 10 °C à 30 °C en 2h (début de journée). Cette température reste ensuite à 30°C pendant 4h et ensuite diminue progressivement de 30 °C à 10 °C en 2h (fin de journée). Pendant toute cette période de jour, la température de la face intérieure (T_2) est imposée à 2 °C.

Enfin, la troisième étape correspond à l'arrêt du véhicule réfrigéré et à sa période de stockage dans le garage (ouverture des portes). Ainsi, les deux faces de la paroi sont amenées à 10 °C, puis laissées à cette température pendant 8 h. À la fin de cette période un nouveau cycle commence.

3.1. Équations constitutives

On considère un problème de transfert de chaleur monodimensionnel (Figure 7), en formulation enthalpique (4). Les domaines sont maillés avec des éléments d'ordre 1 et un raffinement de maillage est considéré aux abords des frontières. Les propriétés thermiques du composite PU-MCP utilisés dans le modèle sont celles qui ont été caractérisées précédemment en fonction de la température. On applique des conditions de Dirichlet aux bornes de l'échantillon (5)-(6), basées sur les mesures expérimentales de T_1 et T_2 .

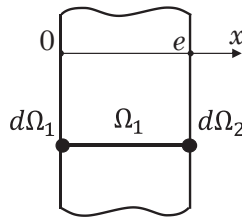


Figure 7 : Géométrie considérée

$$x \in \Omega_1 \quad \rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda(T) \vec{\nabla} T) \quad (4)$$

$$x \in d\Omega_1 \quad T = T_1(t) \quad (5)$$

$$x \in d\Omega_2 \quad T = T_2(t) \quad (6)$$

La Figure 8 présente une comparaison numérique/expérimentale, des densités de flux de chaleur de chaque face du composite PU-MCP chargé à 50%_m théorique. On remarque qu'excepté lors des brusques variations de températures, le modèle prédit correctement les densités de flux de chaleur sur chaque face du composite. En particulier, les densités de flux de chaleur sont correctement simulées lors des périodes de chauffage (entre la 11^{ème} et 13^{ème}h), mais aussi de refroidissement (entre la 17^{ème} et la 19^{ème}h), ceci montre que le changement de phase du composite est bien pris en compte dans le modèle.

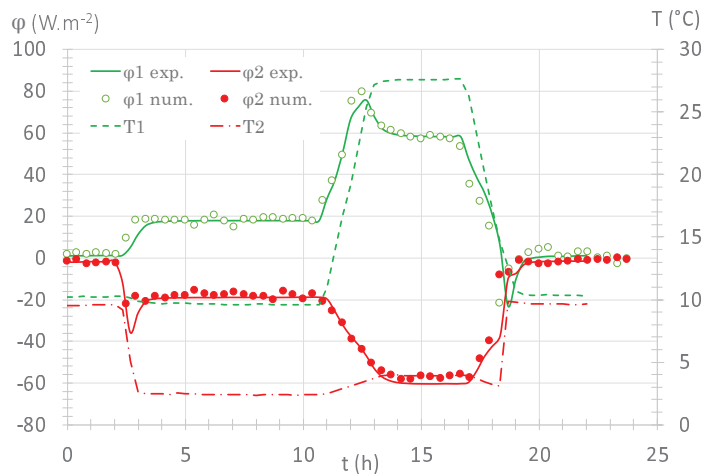


Figure 8 : Scénario d'un véhicule frigorifique : réponse thermique simulée et expérimentale du composite PU-MCP (50%_m théorique)

4. Étude de configurations multicouche

Après avoir vérifié la bonne prédiction du modèle numérique, celui-ci est utilisé pour évaluer le comportement thermique de plusieurs configurations multicouches. Une plaque isolante multicouches constituée d'une plaque de PU-MCP (composite chargé à 50%_m théorique), prise en sandwich par deux couches de PU est étudiée (Figure 9).

Les configurations étudiées sont comparées selon leur performances, notamment en calculant l'énergie (7) traversant la surface $d\Omega_2$ durant la période de livraison (Figure 6 – phase 2).

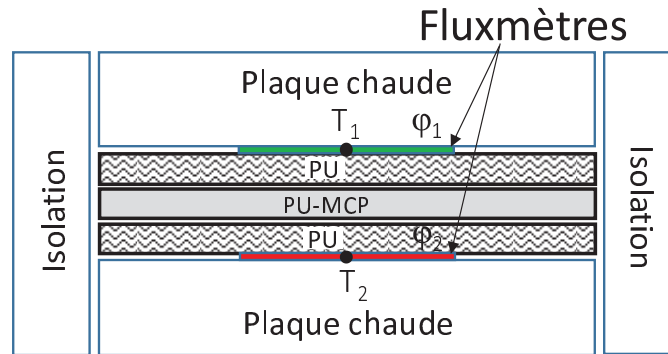


Figure 9 : Schéma du dispositif expérimental des plaques chaudes gardées utilisé pour l'étude de parois multicouches

$$\begin{cases} x \in d\Omega_2 \\ t \in [\text{phase 2}] \end{cases} \quad E = \int \varphi_2 dt \quad (7)$$

4.1. Configurations étudiées

Les cas d'étude présentés ici correspondent à une étude numérique d'une paroi multicouche menée avec un composite PU-MCP chargé à 50%_m théorique (Tableau 3).

On observe une valeur plus élevée de l'énergie introduite dans le véhicule lorsque le composite PU-MCP se trouve éloigné de la surface extérieure (cas 1 et 2). Il est également constaté que les configurations de 3 à 6 permettent de réduire la quantité de chaleur transmise de 0,3 à 4,2%, en comparaison avec le cas de référence.

Ces constats, observés également dans d'autres travaux [5]-[7], mettent en avant l'importance d'optimiser la position et l'épaisseur de la couche de composite PU-MCP au sein de cette paroi multicouche, afin de notamment réduire – pour cette application – les apports thermiques venant de l'extérieur durant la phase de livraison. L'optimisation de ces paramètres fait l'objet d'un travail en cours.

| Configuration | Couche 1 (int. Véhicule) | Couche 2 | Couche 3 (ext. Véhicule) |
|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| 1 | 1 cm PU | 2 cm PU-MCP | 3 cm PU |
| 2 | 2 cm PU | 2 cm PU-MCP | 2 cm PU |
| 3 | 3 cm PU | 2 cm PU-MCP | 1 cm PU |
| 4 | 3 cm PU | 1,5 cm PU-MCP | 1,5 cm PU |
| 5 | 4 cm PU | 1,5 cm PU-MCP | 0,5 cm PU |
| 6 | 3.5 cm PU | 2cm PU-MCP | 0,5 cm PU |
| Ref | 6 cm PU | - | - |

Tableau 3 : Compositions étudiées numériquement

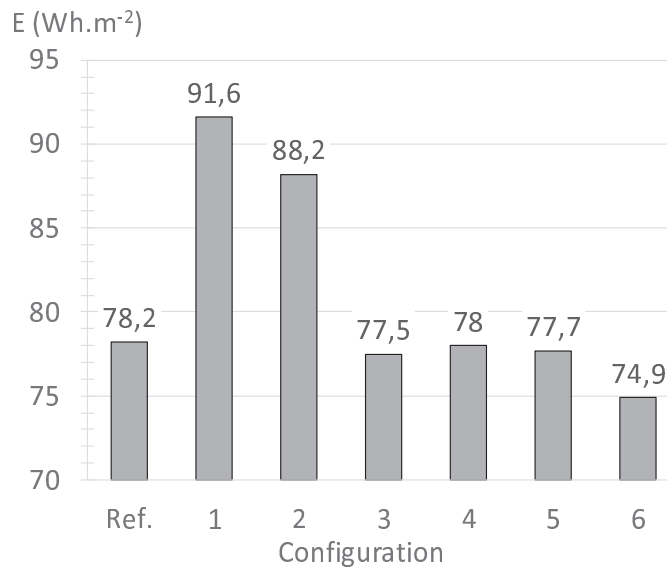


Figure 10 : Énergie traversant la surface $d\Omega_2$ durant la période de livraison (phase 2)

5. Conclusion

Par le biais de cette communication on a montré la démarche et les moyens mis en œuvre pour travailler sur la conception de parois thermiquement performantes dédiées aux véhicules de livraison de produits réfrigérés. Après avoir vérifié la bonne prédiction du modèle numérique à l'aide d'une confrontation expérimental/numérique, l'étude de différentes configurations de parois multicouche a permis de mettre en avant l'importance de l'épaisseur et de la position du composite PU-MCP dans l'objectif de réduire l'énergie introduite dans le véhicule durant une tournée de livraison.

Références

- [1] Mashud Ahmed, Oliver Meade, Mario A. Medina, Reducing heat transfer across the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 51 (2010), 383–392.
- [2] S. Estrada-Flores, A. Eddy, Thermal performance indicators for refrigerated road vehicles, *International Journal of Refrigeration*, 29 (2006), 889-898
- [3] P. Glouannec, B. Michel, G. Delamarre, Y. Grohens, Experimental and numerical study of heat transfer across insulation wall of a refrigerated integral panel van, *Applied Thermal Engineering*, 73 (2014), 196-204
- [4] B. Michel, P. Glouannec, A. Fuentes, P. Chauvelon, Experimental and numerical study of insulation walls containing a composite layer of PU-PCM and dedicated to refrigerated vehicle, *Applied Thermal Engineering*, 116 (2017), 382-391
- [5] Kuznik, F., et al., Optimization of a Phase Change Material Wallboard for Building Use, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 1291-1298.
- [6] Zhou, D., et al., Parametric analysis of influencing factors in Phase Change Material Wallboard (PCMWB), *Appl. Energ.* 119 (2014) 33-42.
- [7] Sambou, V., et al., Thermal Optimization of Multilayered Walls using Genetic Algorithm, *Energ. Buildings* 41 (2009) 1031-1036