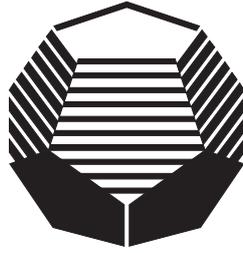
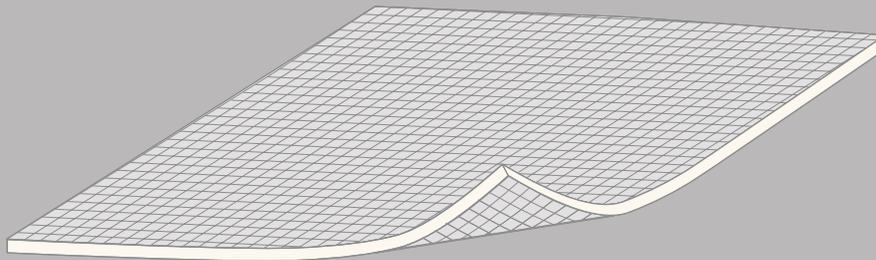


CSTC



UNE ÉDITION DU CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION



RAPPORT

PERFORMANCES
THERMIQUES INITIALES
DE PRODUITS MINCES
RÉFLÉCHISSANTS

Le présent rapport a été établi par :

Gilles Flamant, Division 'Energie et Climat', CSTC
Peter Wouters, Direction 'Développement et Valorisation', CSTC
Didier L'heureux, Département 'Physique du bâtiment et Equipements', CSTC

Jean-Marie Seynhaeve, expert scientifique, Unité THERM, Université catholique de Louvain

Philippe Ngendakumana, expert scientifique, Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège.

Outre le CSTC, l'étude a été menée en partenariat avec :

- ◆ le ministère de la Région wallonne, DGTRE (division de l'Energie)
- ◆ le Service public fédéral Economie, PME, Classes moyennes et Energie
- ◆ deux experts scientifiques : MM. Seynhaeve J.M (UCL) et Ngendakumana P. (ULg)
- ◆ trois fabricants de produits minces réfléchissants.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC, établissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Siège social : rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles



Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.



La reproduction ou la traduction, même partielle, du présent rapport n'est autorisée qu'avec le consentement écrit de l'éditeur responsable.

1	CONTEXTE ET ÉTENDUE DE L'ÉTUDE	4
2	RAPPEL THÉORIQUE DES MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR	6
3	CALCULS NORMATIFS	8
3.1	Résistance thermique d'une lame d'air	8
3.2	Résistances thermiques d'échange aux surfaces	10
4	CAMPAGNE DE MESURES	12
4.1	Description des produits testés	12
4.2	Mesures en laboratoire	12
4.2.1	Caractéristiques thermiques intrinsèques du produit	12
4.2.2	Performance thermique du produit associé à deux lames d'air non ventilées	13
4.3	Mesures en conditions extérieures réelles	16
4.3.1	Cellule d'essai extérieure PASLINK	16
4.3.2	Performance thermique et bilan thermique au niveau de chaque composant	17
4.3.3	Performance thermique d'un seul composant et bilan thermique au niveau de la cellule d'essai PASLINK	25
5	CONCLUSIONS	30
Annexe 1	Mesure de la résistance thermique d'un PMR, associés à deux lames d'air (NPL)	31
Annexe 2	Planning de l'étude	35



1 CONTEXTE ET ÉTENDUE DE L'ÉTUDE

Le CSTC ainsi que d'autres organismes, dont les pouvoirs publics, sont aujourd'hui confrontés à des demandes d'information en nombre croissant concernant les produits appelés communément 'produits minces réfléchissants' (PMR). Les pouvoirs publics, partenaires de cette étude, souhaitent des clarifications quant aux caractéristiques de ce type de produit, notamment en vue de l'application de la réglementation thermique en vigueur dans chaque Région du pays.

Une des missions du CSTC étant d'effectuer les recherches scientifiques et technologiques permettant d'informer au mieux le secteur de la construction de l'évolution des matériaux et techniques de mise en œuvre, le CSTC a été amené à proposer une étude sur les performances thermiques des PMR.

L'étude a permis de déterminer les performances thermiques de plusieurs de ces produits, principalement sur la base d'une campagne de mesures réalisées à la station expérimentale du CSTC.

Un produit mince réfléchissant est constitué, dans sa partie centrale, d'une mince couche de matériau (mousse plastique, film de polyéthylène emprisonnant des bulles d'air ou une matière fibreuse) recouverte sur une ou deux faces de feuilles réfléchissantes (feuilles d'aluminium ou films aluminisés). Certains produits sont de type multicouche, les couches étant séparées par des feuilles réfléchissantes intermédiaires. L'épaisseur totale est généralement comprise entre 5 et 30 mm.

Seules les performances thermiques des produits en période hivernale ont été étudiées. Les performances solaires (e.a. facteur solaire) de structures pourvues de PMR n'ont pas été considérées, pas plus que les autres caractéristiques, telles que la résistance à la diffusion de vapeur d'eau, l'isolation acoustique ou la réaction au feu.

Les performances thermiques ont été mesurées sur les produits dans leur état initial, c'est-à-dire tels qu'ils ont été fournis par les fabricants, et posés de façon idéale. L'influence des conditions d'utilisation et de mise en œuvre sur les performances thermiques des produits ainsi que l'effet de la dégradation possible des propriétés thermiques dans le temps n'ont pas été étudiés.

La méthodologie générale de l'étude ainsi qu'une proposition de procédure d'essai ont été présentées aux différents partenaires et ont été discutées avant le début de la campagne de mesures. Chaque partenaire (pouvoirs publics, experts scientifiques et fabricants) a eu la possibilité de formuler ses remarques. Celles-ci ont été intégrées dans le programme de travail lorsqu'elles ont fait l'objet d'un accord unanime entre les partenaires scientifiques de l'étude (les deux experts scientifiques et le CSTC).

La méthodologie retenue consistait à déterminer les performances thermiques des PMR, d'une part, sur la base de mesures en laboratoire (dans des conditions aux limites stationnaires) et, d'autre part, sur la base de mesures réalisées dans des cellules d'essai soumises à des conditions extérieures réelles (régime par essence non stationnaire). Les résultats de ces deux types de mesures ont été comparés entre eux ainsi qu'à des résultats de calculs réalisés conformément aux normes en vigueur.

L'annexe 2 (p. 35) fournit un aperçu général du planning de l'étude (tenue des principales réunions, périodes des essais, ...).

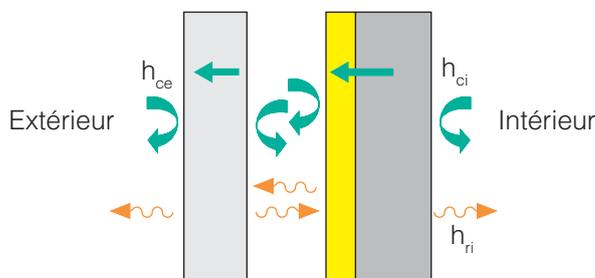


2 RAPPEL THÉORIQUE DES MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Le transfert de chaleur à travers une paroi de bâtiment s'opère principalement selon les trois modes suivants :

- ◆ la conduction
- ◆ la convection
- ◆ le rayonnement.

Fig. 1
Modes de transfert de la chaleur à travers une paroi.



h_{ci} : coefficient d'échange par convection interne
 h_{ce} : coefficient d'échange par convection externe
 h_{ri} : coefficient d'échange par rayonnement interne
 h_{re} : coefficient d'échange par rayonnement externe

REMARQUE TERMINOLOGIQUE

- ◆ Conduction
 - Transmission de chaleur au travers du matériau.
 - Quantité de chaleur transmise inversement proportionnelle à l'épaisseur du matériau et proportionnelle à sa conductivité thermique (λ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ainsi qu'à la différence de température entre ses deux faces.
- ◆ Convection
 - Transmission de chaleur d'un milieu liquide ou gazeux à un corps solide par déplacement relatif des particules du fluide à l'interface du solide.
 - Quantité de chaleur transmise proportionnelle au coefficient d'échange superficiel par convection (h_c en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) ainsi qu'à la différence de température entre l'ambiance et la surface de la paroi.
- ◆ Rayonnement
 - Transmission de chaleur d'un élément à un autre par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques.
 - Quantité de chaleur transmise entre la surface d'une paroi et celle des parois voisines, en fonction de la température, de l'émissivité de chacune des parois et du facteur de vue.

Le calcul de la résistance thermique totale d'une paroi doit prendre en compte les résistances thermiques correspondant aux différents modes de transmission de chaleur.

La résistance thermique totale d'une paroi (d'une ambiance intérieure à une ambiance extérieure) est égale à la somme des résistances thermiques des différentes couches (couche homogène, lame d'air, ...) constituant la paroi et des résistances thermiques d'échange de surface intérieure R_i et extérieure R_e , soit :

$$R_{\text{total}} = R_i + \dots + R_n + \dots + R_e \quad (2-1)$$

avec $R_i = \frac{1}{h_{ri} + h_{ci}}$

et $R_e = \frac{1}{h_{re} + h_{ce}}$ (*).

La résistance thermique R_n d'une couche homogène 'n' intérieure à la paroi est égale au quotient de l'épaisseur de la couche et de la conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) du matériau constituant la couche.

Dans une lame d'air, la chaleur est transmise non seulement par conduction/convection (à travers le milieu 'air'), mais également par rayonnement (échange de chaleur radiatif entre les deux surfaces en vis-à-vis). Le calcul de la résistance thermique d'une lame d'air est explicité au chapitre suivant.

Vu sa faible épaisseur, un PMR possède une résistance thermique intrinsèque faible. Pour pouvoir bénéficier de l'effet réfléchissant (basse émissivité) des couches superficielles, le produit doit être placé en vis-à-vis d'une ou, mieux, de deux lames d'air non ventilées. La basse émissivité des couches superficielles réfléchissantes du produit a pour effet de diminuer le transfert de chaleur par rayonnement et d'augmenter ainsi la résistance thermique de la ou des lame(s) d'air.

La figure 2 illustre, à titre d'exemple, deux cas possibles de structures pourvues d'un PMR.

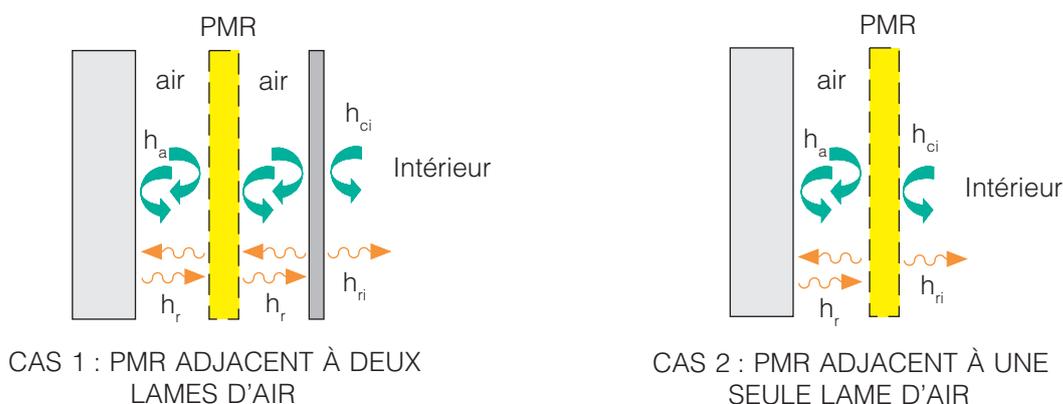


Fig. 2
Structures
pourvues
d'un PMR.

(*) Habituellement, le symbole 'h', représentant le coefficient d'échange, porte les indices 'c' et 'r' pour désigner le transfert par convection et rayonnement respectivement. Néanmoins, dans la norme EN ISO 6946 (voir chapitre 3), l'échange par conduction/convection à travers une lame d'air est représenté par le symbole h_a (et non h_c).



3 CALCULS NORMATIFS

La norme EN ISO 6946 [3] fournit une méthode de calcul de la résistance thermique des composants du bâtiment, y compris des lames d'air.

3.1 RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE LAME D'AIR

La norme EN ISO 6946 permet de déterminer la résistance thermique d'une lame d'air délimitée par deux surfaces (pouvant être à basse émissivité) parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction du flux thermique. Elle distingue la lame d'air non ventilée, faiblement ventilée ou fortement ventilée.

Selon les définitions données dans cette norme, une lame d'air possède une épaisseur au moins dix fois inférieure à chacune des deux autres dimensions (longueur et largeur) et n'est pas plus grande que 0,3 m. Une lame d'air non ventilée est une lame d'air dans laquelle il n'y a pas de disposition spécifique permettant l'écoulement de l'air qui la traverse.

Conformément à la norme, la résistance thermique R_g d'une lame d'air non ventilée est donnée par la relation :

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)} \quad (3-1)$$

où :

- h_r = le coefficient d'échange thermique par rayonnement
- h_a = le coefficient d'échange thermique par conduction/convection.

Le coefficient d'échange par rayonnement h_r est d'autant plus réduit que l'émissivité des surfaces en vis-à-vis (en contact avec la lame d'air) est faible. Il est donné par la relation :

$$h_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}) \quad (3-2)$$

où :

- T_m = la température moyenne de la lame d'air (en K)
- ε_1 et ε_2 = l'émissivité hémisphérique des surfaces délimitant la lame d'air
- σ = la constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

L'émissivité est un facteur variant de 0 à 1 qui caractérise le pouvoir réfléchissant de la surface dans l'infrarouge lointain. La couche externe réfléchissante du produit mince étant caractérisée par une basse émissivité, le coefficient d'échange par rayonnement sera donc faible.

La figure 3 (p. 9) montre la variation du coefficient d'échange par rayonnement h_r en fonction de la température moyenne T_m de la lame d'air pour deux valeurs différentes d'émissivité d'une des faces, l'autre face présentant une émissivité égale à 0,9 (valeur classique pour un matériau de construction usuel).

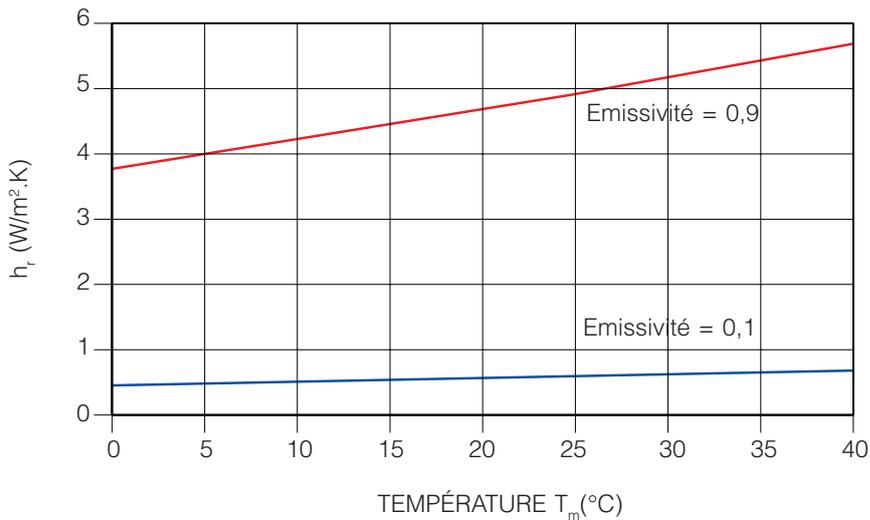


Fig. 3 Coefficient d'échange par rayonnement h_r en fonction de la température moyenne de la lame d'air (norme EN ISO 6946).

Le coefficient d'échange par conduction/convection h_a (figure 4) est exprimé dans la norme EN ISO 6946 comme une fonction de l'épaisseur de la lame d'air et du sens du flux thermique (horizontal, vertical ascendant ou vertical descendant). L'annexe B de cette norme présente les formules suivantes (où d est l'épaisseur de la lame d'air en mètre) :

- ◆ flux thermique horizontal : $h_a = \max (1,25; 0,025/d)$ (W.m⁻².K⁻¹) (3-3)
- ◆ flux thermique ascendant : $h_a = \max (1,95; 0,025/d)$ (W.m⁻².K⁻¹) (3-4)
- ◆ flux thermique descendant : $h_a = \max (0,12d^{-0,44}; 0,025/d)$ (W.m⁻².K⁻¹). (3-5)

Le coefficient d'échange h_a ne diminue plus au-dessus d'une épaisseur de lame d'air de ± 20 mm pour un flux thermique horizontal (lame d'air verticale) et au-dessus d'une épaisseur de 13 mm pour un flux thermique vertical ascendant (lame d'air horizontale). Il en ressort que, dans le cas d'un flux thermique horizontal ou vertical ascendant, la résistance thermique R_g d'une lame d'air non ventilée reste constante à partir de ces épaisseurs, pour des valeurs données de température et d'émissivité des surfaces délimitant la lame d'air.

La résistance thermique totale R_g d'une lame d'air non ventilée d'une épaisseur de 20 mm est représentée à la figure 5 (p. 10) en fonction de l'émissivité d'une des surfaces délimitant la lame d'air, l'autre surface ayant une émissivité de 0,9. La température moyenne de la cavité est de 10 °C (283 K).

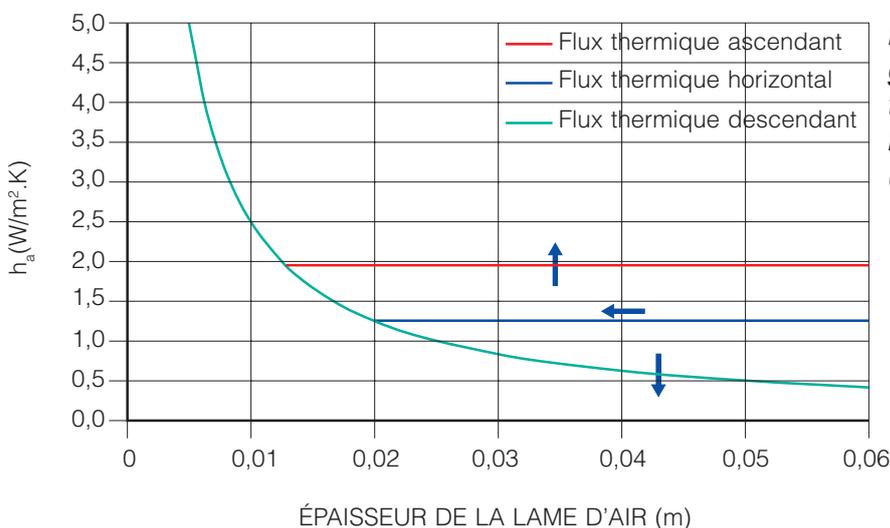
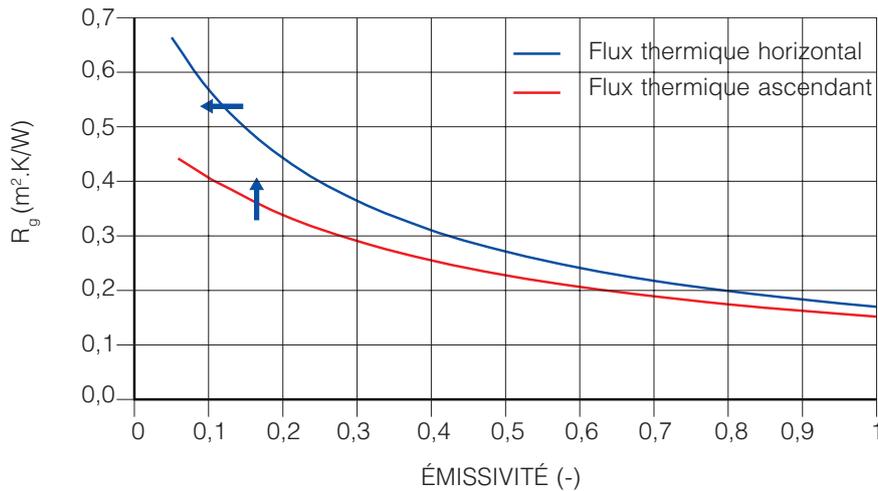


Fig. 4 Coefficient d'échange par conduction/convection h_a en fonction de l'épaisseur de la lame d'air (norme EN ISO 6946).

Fig. 5 Résistance thermique totale R_g d'une lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur en fonction de l'émissivité d'une des parois (norme EN ISO 6946) ($T_m = 10\text{ °C}$).



3.2 RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE AUX SURFACES

L'annexe A de la norme EN ISO 6946 mentionne les relations permettant de déterminer les résistances thermiques de surface R_i et R_e (voir aussi l'équation (2-1), p. 7).

La résistance thermique d'échange de surface R_i , entre la face intérieure d'une paroi et l'ambiance intérieure d'un espace, s'exprime par la relation :

$$R_i = \frac{1}{h_{ri} + h_{ci}} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K/W}) \quad (3-6)$$

L'échange par rayonnement est donné par l'équation :

$$h_{ri} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_m^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (3-7)$$

où :

- ε = l'émissivité de la face intérieure de la paroi
- σ = la constante de Stefan-Boltzmann
- T_m = la température moyenne entre la face intérieure de la paroi et les surfaces avoisinantes de l'espace.

Le coefficient d'échange superficiel par convection interne vaut :

- ◆ pour un flux thermique horizontal : $h_{ci} = 2,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- ◆ pour un flux thermique descendant : $h_{ci} = 0,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- ◆ pour un flux thermique ascendant : $h_{ci} = 5,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Dans les structures où le PMR est en vis-à-vis direct avec l'espace intérieur (voir exemple à la figure 2 – cas 2), le coefficient h_{ri} tel que calculé à l'aide de l'équation (3-7) est réduit en raison de la faible émissivité ε du produit. Par conséquent, la résistance thermique d'échange de surface intérieure R_i augmente (voir figure 6, p. 11).

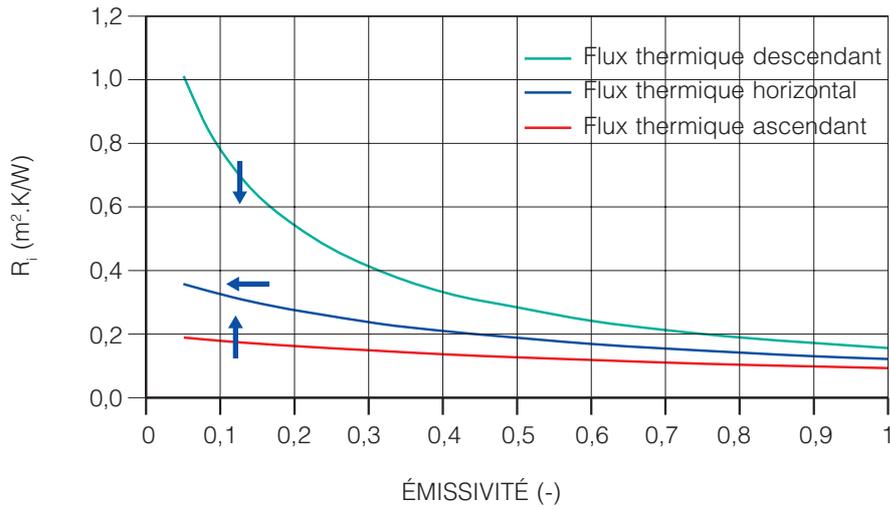


Fig. 6 Résistance thermique d'échange de surface intérieure R_i en fonction de l'émissivité de la face intérieure de la paroi (norme EN ISO 6946) ($T_m = 20 \text{ °C}$).



4 CAMPAGNE DE MESURES

4.1 DESCRIPTION DES PRODUITS TESTÉS

Il a été demandé à chaque fabricant de fournir, au choix, un (et un seul) PMR parmi la gamme de leurs produits. Les produits testés sont représentés par les lettres A, B et C. Ils sont de nature différente et sont décrits brièvement dans le tableau 1.

Tableau 1
Description des produits testés.

PRODUIT	ÉPAISSEUR	DESCRIPTION
A	± 7 mm	Mousse de polypropylène recouverte sur chaque face extérieure d'un film réflecteur
B	± 20 mm	Produit multicouche (ouate et mousse) entrecoupé par plusieurs films réflecteurs intermédiaires et recouvert également sur chaque face extérieure d'un film réflecteur
C	± 20 mm	Produit composé de deux couches dissociées de bulles d'air enfermées dans un film de polyéthylène, et recouvert sur chaque face extérieure d'un film réflecteur

4.2 MESURES EN LABORATOIRE

Les mesures en laboratoire permettent de déterminer les propriétés thermiques des produits en régime stationnaire. Deux types de mesures ont été réalisés :

- ◆ mesures portant sur le produit seul : détermination des caractéristiques thermiques intrinsèques du produit (voir § 4.2.1)
- ◆ mesures de la performance thermique du produit associé à deux lames d'air non ventilées (voir § 4.2.2).

4.2.1 CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES INTRINSÈQUES DU PRODUIT

Les propriétés thermiques intrinsèques du produit sont la résistance thermique du produit seul et l'émissivité de ses surfaces externes.

4.2.1.1 RÉSISTANCE THERMIQUE DU PRODUIT SEUL

La résistance thermique (de surface à surface) de chaque produit a été mesurée conformément à la norme EN 12667 par la méthode de la plaque chaude gardée et/ou par la méthode fluxmétrique [4]. Elle correspond à la somme des résistances thermiques des différentes couches constituant le produit, l'apport dû à la faible émissivité des feuilles réfléchissantes internes éventuelles étant compris dans la valeur de résistance thermique mesurée.

L'essai a consisté à placer le produit entre une plaque chaude maintenue en permanence à 15 °C et une plaque froide maintenue à 5 °C. Le flux thermique au travers du produit étant également mesuré, la résistance thermique est aisément déterminée.

Le tableau 2 donne les valeurs de la résistance thermique des différents produits concernés, mesurées à une température moyenne du produit égale à 10 °C. L'incertitude de mesure est indiquée entre parenthèses. L'épaisseur mentionnée a été mesurée selon la norme EN 823 [1] sous une charge de 50 Pa.

PRODUIT	ÉPAISSEUR (m)	R_{th} (à 10 °C) (m ² .K/W)	λ_{eq} (à 10 °C) (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
A	0,0075	0,205 (± 0,004)	0,0366
B	0,0188	0,602 (± 0,012)	0,0312
C	0,0192	0,469 (± 0,009)	0,0409

Tableau 2 Epaisseur mesurée et résistance thermique mesurée du produit seul.

Les PMR mesurés étant constitués de plusieurs couches, seule la notion de résistance thermique s'applique à ce type de produit. Cependant, de manière à faciliter la comparaison de la performance thermique des PMR par rapport à celle des matériaux d'isolation classiques, le tableau 2 mentionne à titre indicatif une valeur de conductivité thermique équivalente. Cette valeur correspond à la conductivité thermique d'un matériau homogène fictif qui aurait la même épaisseur et la même résistance thermique que le PMR mesuré.

4.2.1.2 EMISSIVITÉ

La mesure de l'émissivité des faces du produit a été réalisée dans un laboratoire extérieur, en l'occurrence au TNO (*Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek*), aux Pays-Bas.

L'appareil utilisé est un émissiomètre (modèle AE). Il permet la mesure de l'émissivité hémisphérique d'une surface à une température de 23 °C.

Les valeurs mesurées et l'incertitude de mesure sont indiquées au tableau 3 (p. 14). L'émissivité des deux faces de chaque produit a été mesurée. Les produits A et B présentent une émissivité similaire de chaque côté de l'échantillon. La valeur moyenne est donnée dans le tableau pour chaque produit. L'incertitude de mesure sur le produit C est élevée vu que l'émissivité variait considérablement d'une zone à l'autre de l'échantillon testé (*).

4.2.2 PERFORMANCE THERMIQUE DU PRODUIT ASSOCIÉ À DEUX LAMES D'AIR NON VENTILÉES

La résistance thermique de chaque produit associé à deux lames d'air non ventilées a été mesurée dans l'appareil à plaque chaude gardée. Cet appareil est conforme aux normes

(*) Le fabricant du produit C a transmis au CSTC un rapport d'essai du TNO datant de janvier 2002 mentionnant une valeur d'émissivité mesurée de 0,05 sur un produit qui serait, d'après le fabricant, de même type que celui testé dans le cadre de cette étude (les échantillons mesurés du produit étant néanmoins différents).

Tableau 3 Emissivité hémisphérique.

PRODUIT	ÉMISSIVITÉ (-)
A	0,06 (± 0,01)
B	0,18 (± 0,02)
C face recto	0,19 (± 0,11)
C face verso	0,16 (± 0,13)

EN 1946 [2] en vigueur, bien que la mesure d'un produit associé à deux lames d'air n'entre pas dans le champ d'application de ces normes.

4.2.2.1 DISPOSITIF DE MESURE

Le dispositif de mesure est représenté à la figure 7 (coupe verticale). Une lame d'air de 20 mm d'épaisseur a été ménagée de part et d'autre du PMR. Cette épaisseur a été choisie car elle correspond, selon la norme EN ISO 6946, à la résistance thermique maximale d'une lame d'air traversée par un flux thermique horizontal et vertical ascendant (voir § 3). Un fin cadre en bois a été placé en périphérie du poste d'essai, afin de maintenir cette épaisseur de 20 mm sur les bords. Certains produits étant souples, quelques cales très minces en balsa ont été disposées dans la lame d'air pour garantir une épaisseur constante de 20 mm sur toute la zone de mesure de l'appareil.

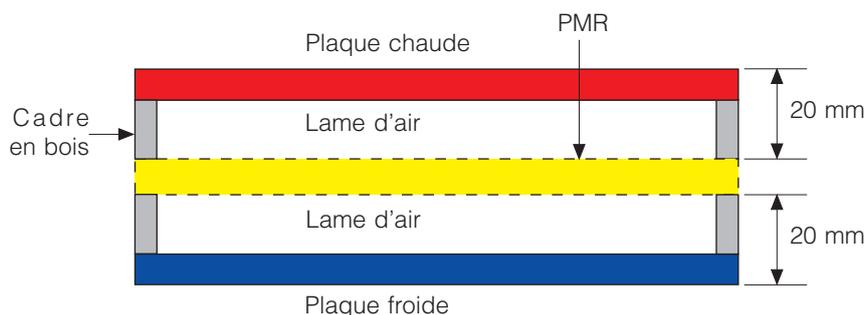
Les deux lames d'air sont non ventilées. L'étanchéité à l'air du composant a été réalisée avec soin (au moyen de bandes adhésives notamment).

Pour chaque produit, la résistance thermique totale (somme des résistances thermiques du PMR et des deux lames d'air non ventilées) a été mesurée dans le cas d'un flux thermique vertical descendant (plaque chaude au niveau supérieur et plaque froide au niveau inférieur) et d'un flux thermique vertical ascendant (plaque chaude au niveau inférieur et plaque froide au niveau supérieur).

4.2.2.2 CONDITIONS D'ESSAI

La plaque chaude a été maintenue à une température constante de 15 °C, tandis que la plaque froide a été maintenue à 5 °C. La différence de température vaut donc 10 K. La température moyenne du PMR est de 10 °C.

Fig. 7 Dispositif de mesure de la résistance thermique d'un PMR associé à deux lames d'air non ventilées.



4.2.2.3 RÉSULTATS DES MESURES

Le tableau 4 fournit les résultats de mesure de la résistance thermique totale de chaque produit associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur. Deux cas sont distingués : un flux thermique vertical ascendant et un flux thermique vertical descendant. L'incertitude sur le résultat est de l'ordre de 6 %.

PRODUIT	FLUX VERTICAL ASCENDANT	FLUX VERTICAL DESCENDANT
A	1,05 (± 0,06)	1,53 (± 0,09)
B	1,55 (± 0,09)	1,61 (± 0,10)
C	1,26 (± 0,08)	1,63 (± 0,10)

Tableau 4 Résistance thermique mesurée (en $m^2.K/W$) du produit associé à deux lames d'air non ventilées.

4.2.2.4 ESSAI RÉALISÉ DANS UN LABORATOIRE EXTÉRIEUR

Afin de disposer d'une certaine redondance dans les résultats et d'en améliorer la fiabilité, il a été demandé à un laboratoire extérieur de mesurer la résistance thermique d'un PMR associé à deux lames d'air non ventilées dans des conditions de température identiques à celles retenues par le CSTC.

Ainsi, il a été demandé au *National Physical Laboratory* (NPL), en Angleterre, de mesurer la résistance thermique du produit A associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur, le flux étant vertical descendant. La valeur de résistance thermique totale mesurée par le NPL est de $1,60 m^2.K/W \pm 4 \%$, à comparer avec la valeur de $1,53 m^2.K/W \pm 6 \%$ mesurée par le CSTC.

Soit un écart de 4 %, valeur du même ordre de grandeur que l'incertitude de mesure. Le rapport d'essai est fourni à l'annexe 1 (p. 31).

4.2.2.5 COMPARAISON ENTRE LES MESURES ET CALCULS NORMATIFS

Les valeurs mesurées de résistance thermique des différents produits associés à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur (voir tableau 4) ont été comparées avec les valeurs calculées selon la norme EN ISO 6946 dans les mêmes conditions de température. Ces calculs ont été réalisés en faisant usage des valeurs d'émissivité mesurées au TNO (voir tableau 3, p. 14) et des valeurs de résistance thermique intrinsèque des produits telles que mesurées au CSTC (tableau 2, p. 13).

La figure 8 (p. 16) schématise cette comparaison pour les produits A, B et C. Pour les produits A et B, l'écart moyen entre les valeurs de résistance thermique mesurées et les valeurs calculées selon la norme est de 4 %, les intervalles de confiance se chevauchant. Dans le cas du produit C, l'incertitude sur la valeur calculée est plus élevée du fait que l'émissivité des surfaces du produit n'a pas pu être mesurée avec précision.

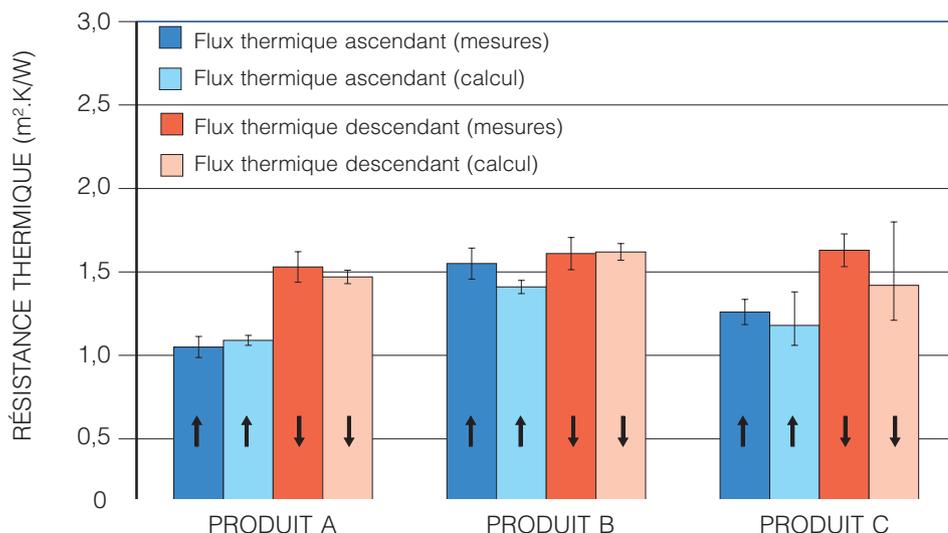


Fig. 8 Comparaison des valeurs mesurées (en laboratoire) et des valeurs calculées de la résistance thermique ($m^2.K/W$) du produit associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur.

4.3 MESURES EN CONDITIONS EXTÉRIEURES RÉELLES

4.3.1 CELLULE D'ESSAI EXTÉRIEURE PASLINK

L'utilisation d'une cellule d'essai PASLINK (figure 9) offre la possibilité de déterminer les performances thermiques et solaires des composants de façade du bâtiment dans des conditions extérieures réelles. Un système d'acquisition de données permet de réaliser un enregistrement en continu des conditions atmosphériques extérieures (température de l'air, humidité relative, rayonnement solaire incident, rayonnement infrarouge, etc.) et des conditions ambiantes intérieures au sein de la cellule.

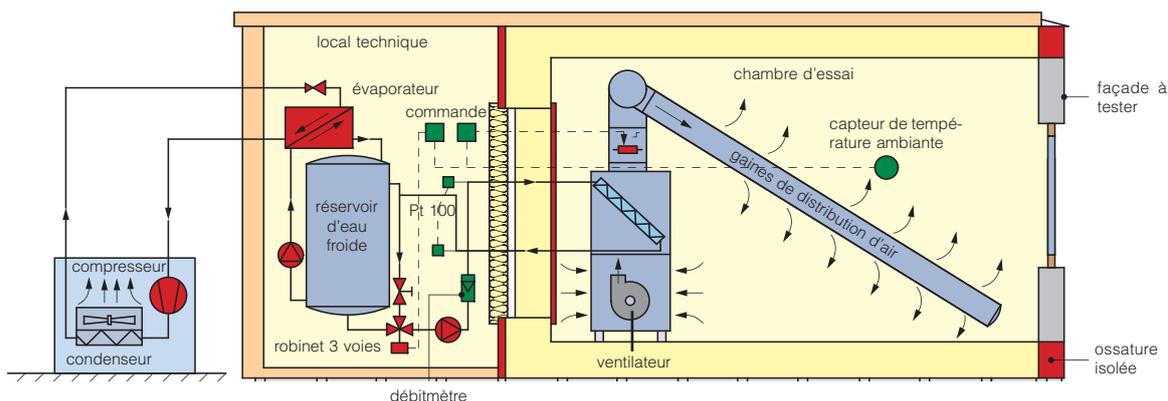
Une cellule d'essai PASLINK est composée de deux chambres et est enveloppée par une structure très bien isolée. La chambre la plus grande, appelée chambre d'essai, dispose d'une ouverture orientée au sud dans laquelle le composant à tester est placé. Les dimensions du composant testé peuvent atteindre 2,5 m sur 2,5 m. Le principal objectif de cet essai est de déterminer en conditions quasi réelles les valeurs U.A (caractéristique thermique, en W/K) et g.A (caractéristique solaire) du composant. La valeur U représente le coefficient de transmission thermique ($W.m^2.K^{-1}$), le symbole g le facteur solaire (-), alors que A (m^2) est l'aire de la surface du composant. Ces valeurs sont déterminées sur la base d'un bilan thermique au niveau de la chambre d'essai.

Fig. 9 Cellule d'essai extérieure PASLINK (essai sur un composant translucide).



Le fonctionnement de la cellule est similaire à celui d'un calorimètre, avec la possibilité d'obtenir une mesure précise des échanges de chaleur (gains et pertes) à travers le composant testé. La chambre d'essai est équipée d'un système de chauffage et de refroidissement (voir figure 10) permettant d'adapter la température de l'air dans la cellule à la valeur de consigne souhaitée.

Fig. 10 Schéma des deux chambres de la cellule d'essai PASLINK et des systèmes de chauffage et de refroidissement.



Dans le cas d'essais sur un composant opaque homogène, il est également possible de réaliser le bilan thermique du composant en plaçant des débitmètres sur sa surface intérieure : le coefficient de transmission thermique (ou la résistance thermique) du composant est déterminé sur la base du flux thermique mesuré et de la différence des températures mesurées des faces externes du composant.

Dans le cadre de cette étude, deux types d'essais ont été réalisés au sein des cellules PASLINK :

- ◆ mesure des propriétés thermiques de neuf composants différents : 7 composants comprenant des PMR et 2 composants à base de laine minérale; le bilan thermique est réalisé au niveau de chaque composant (voir § 4.3.2)
- ◆ mesure des propriétés thermiques d'un seul composant comprenant un PMR; le bilan thermique est réalisé au niveau de la chambre d'essai (voir § 4.3.3).

4.3.2 PERFORMANCE THERMIQUE ET BILAN THERMIQUE AU NIVEAU DE CHAQUE COMPOSANT

Au cours de cet essai, les performances thermiques d'isolation de diverses configurations incluant les PMR considérés dans cette étude ont été déterminées simultanément. Les performances de deux configurations comprenant un isolant classique (laine minérale) ont aussi été mesurées.

Etant donné que tous les composants testés sont soumis aux mêmes conditions extérieures (température, ensoleillement, etc.) et aux mêmes conditions intérieures (température de la cellule d'essai), leurs performances thermiques peuvent être directement comparées.

4.3.2.1 COMPOSANTS TESTÉS

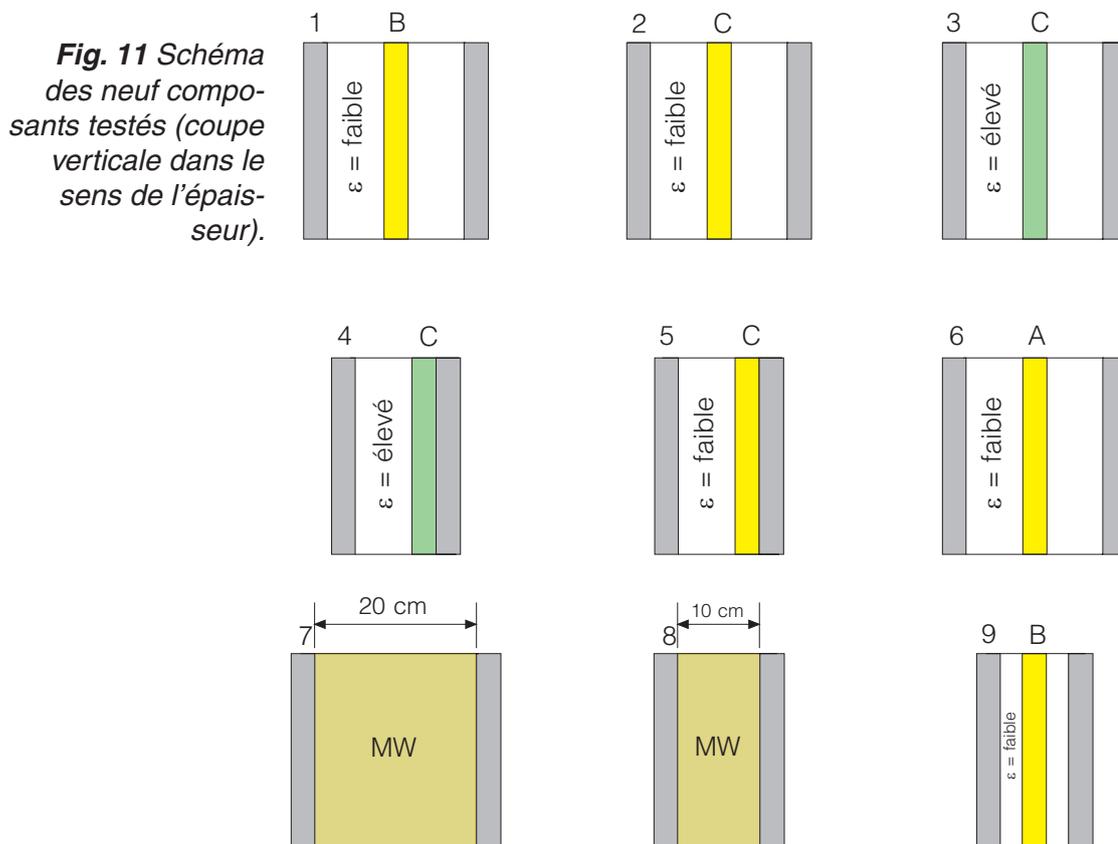
Neuf composants ont été disposés, en position verticale, dans l'ouverture orientée au sud de 2,5 m sur 2,5 m de la cellule d'essai PASLINK. Chaque composant présente des dimensions de l'ordre de 70 cm sur 70 cm. Une isolation thermique en polystyrène expansé de 8 cm de largeur est placée entre chaque composant.

La disposition exacte et la composition des neuf composants sont représentées de manière schématique à la figure 11 (dessin non à l'échelle). La description complète est donnée au tableau 5 (p. 19). Une photo des différents composants, prise de l'intérieur de la cellule d'essai, est reproduite à la figure 12 (p. 19).

Les faces externe et interne de chaque composant sont constituées d'un panneau en bois de 18 mm d'épaisseur. Ainsi, par exemple, le composant n° 2 est constitué des couches successives suivantes (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- ◆ panneau en bois de 18 mm d'épaisseur
- ◆ lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur
- ◆ PMR C de 19 mm d'épaisseur
- ◆ lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur
- ◆ panneau en bois de 18 mm d'épaisseur.

Pour les composants n° 3 et n° 4, les faces du PMR ont été peintes en noir, de manière à leur conférer une haute émissivité (de l'ordre de 0,9); l'effet spécifique de la feuille d'aluminium sur les performances thermiques du PMR peut ainsi être mis en évidence par comparaison.



4.3.2.2 DISPOSITIF DE MESURE

Sur chaque composant, les capteurs suivants ont été installés :

- ◆ débitmètre placé sur la face intérieure du panneau en bois intérieur, dans le but de mesurer le flux thermique à travers le composant
- ◆ thermocouples placés sur la face extérieure du panneau en bois intérieur et sur la face intérieure du panneau en bois extérieur, en vue de mesurer la température absolue en ces deux points et de déterminer la différence de température de part et d'autre du composant.



Fig. 12
Vue des neuf composants, prise de l'intérieur de la cellule PAS-LINK.

A partir de cette mesure du flux thermique et de cette différence de température, la résistance thermique du composant peut être déterminée (résistance thermique des panneaux de bois intérieur et extérieur exclue).

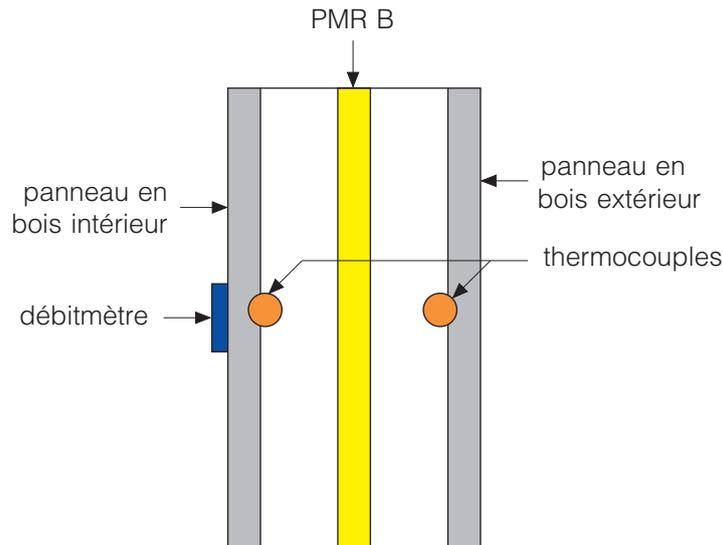
La figure 13 (p. 20) illustre le placement des capteurs sur le composant n° 1. Dans ce cas, la résistance thermique mesurée est la somme des résistances thermiques de la première lame d'air non ventilée de 20 mm, du PMR B et de la deuxième lame d'air non ventilée de 20 mm.

Pour certains composants, un thermocouple a également été placé sur la face intérieure du panneau en bois intérieur (du côté du débitmètre).

N°	PRODUIT	LAME(S) D'AIR	EMISSIVITÉ FACES PMR	COMMENTAIRE
1	PMR B	2 lames d'air de 20 mm chacune	telle que mesurée au § 4.2.1	–
2	PMR C	2 lames d'air de 20 mm chacune	telle que mesurée au § 4.2.1	–
3	PMR C	2 lames d'air de 20 mm chacune	$\varepsilon = \pm 0,9$	Faces du PMR peintes en noir
4	PMR C	1 lame d'air de 20 mm	$\varepsilon = \pm 0,9$	Faces du PMR peintes en noir
5	PMR C	1 lame d'air de 20 mm	telle que mesurée au § 4.2.1	–
6	PMR A	2 lames d'air de 20 mm chacune	telle que mesurée au § 4.2.1	–
7	Laine minérale (MW)	–	–	$\rho = 25 \text{ kg/m}^3$ (densité) $\lambda = 0,0322 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
8	Laine minérale (MW)	–	–	$\rho = 25 \text{ kg/m}^3$ (densité) $\lambda = 0,0322 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
9	PMR B	2 lames d'air de 10 mm chacune	telle que mesurée au § 4.2.1	–

Tableau 5
Description des composants installés dans la cellule PASLINK.

Fig. 13 Placement des capteurs sur le composant n° 1.



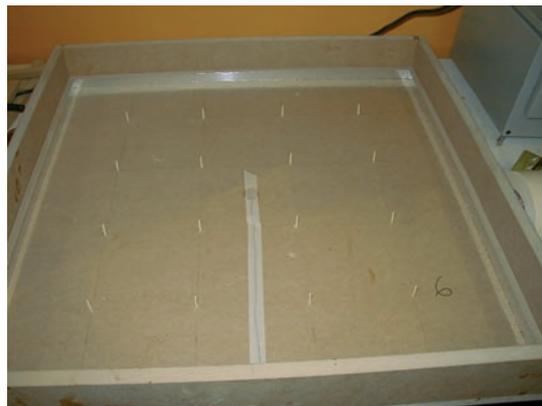
4.3.2.3 MONTAGE DES COMPOSANTS

Un fin cadre en bois a été disposé en périphérie du composant, de manière à maintenir sur les bords l'épaisseur souhaitée de la lame d'air (20 mm ou 10 mm selon les cas).

De plus, afin de maintenir une épaisseur constante de la lame sur toute la surface du composant, des petites cales de très faible section ($\pm 1 \text{ mm}^2$) ont été réparties de manière régulière sur toute la surface (voir photo de droite à la figure 14).

L'étanchéité à l'air du composant a été réalisée avec soin.

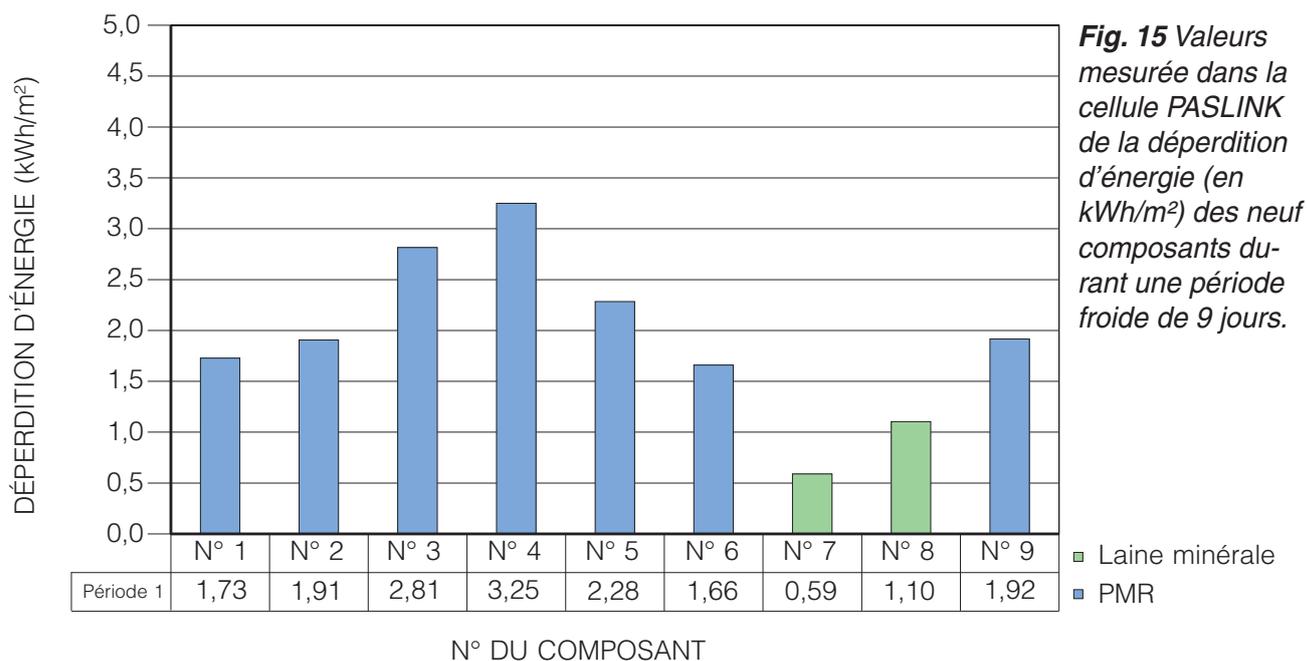
Fig. 14
Montage d'un des composants.



4.3.2.4 CONDITIONS D'ESSAI

Le monitoring a été réalisé en continu durant trois mois, entre janvier et mars 2004 inclus. Les différents composants ont été soumis aux conditions suivantes :

- ◆ température intérieure dans la cellule maintenue constamment entre 20 et 23 °C
- ◆ conditions extérieures réelles (température, ensoleillement, etc.).



4.3.2.5 RÉSULTATS DES MESURES

La figure 15 indique la déperdition d'énergie (obtenue en intégrant le flux thermique dans le temps) mesurée par m² de composant (en kWh/m²) pour une période froide d'une durée de 9 jours (du 22 au 30 janvier 2004), la température extérieure moyenne durant la période étant égale à 1 °C pour une température intérieure moyenne dans la cellule égale à 21 °C.

Les valeurs mesurées indiquées à la figure 15 représentent donc la quantité d'énergie par m² passant à travers chaque composant complet (panneaux de bois intérieur et extérieur inclus).

Les déperditions d'énergie des divers composants ont aussi été calculées durant d'autres périodes, caractérisées par des températures extérieures moyennes différentes (cf. tableau 6).

La figure 16 (p. 22) donne, pour ces quatre périodes de mesure, le ratio entre la déperdition d'énergie de chaque composant sur la période (en kWh/m²) et la déperdition d'énergie du composant n° 8 (en kWh/m²) sur cette même période; les ratios obtenus peuvent ainsi être comparés pour différentes périodes. Le graphique montre que la variation maximale de ce ratio entre les différentes périodes est de 5 %, quel que soit le composant.

PÉRIODE (NOMBRE DE JOURS)	TEMPÉRATURE INTÉRIEURE (°C)	TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE (°C)
1 (9 jours)	20,9	1,2
2 (14 jours)	20,5	2,1
3 (10 jours)	21,1	6,0
4 (5 jours)	22,6	12,5

Tableau 6
Périodes
de mesure.

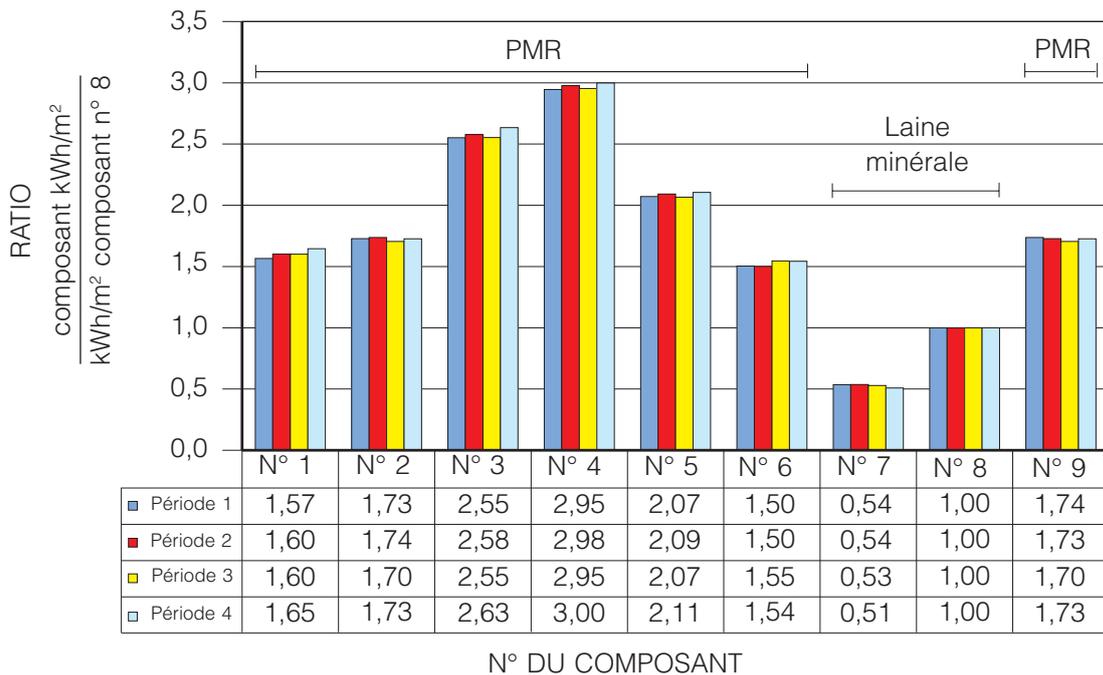


Fig. 16 Ratio entre la déperdition d'énergie de chaque composant et la déperdition d'énergie du composant n° 8 (kWh/m²).

Comme susmentionné, les résultats donnés aux figures 15 et 16 traduisent la performance d'isolation thermique du composant complet, panneaux de bois intérieur et extérieur compris. Ce qui est davantage intéressant à déterminer est la performance thermique de la partie du composant située entre les panneaux de bois intérieur et extérieur. Ainsi, pour le composant n° 1, l'objectif est de mesurer la performance thermique du PMR B associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm chacune (résistance thermique des panneaux de bois exclue).

Au vu des résultats de la figure 15, il convient de souligner que :

- ◆ la présence des panneaux de bois au niveau de chaque composant a pour effet de réduire les écarts existants entre les performances thermiques de la partie du composant située entre les panneaux de bois intérieur et extérieur
- ◆ la cellule d'essai présente une légère stratification de température (inférieure à 0,5 °C), ce qui engendre néanmoins une comparaison des valeurs de déperdition d'énergie sur une base non parfaitement identique.

C'est pourquoi, pour remédier à ces deux faits, la résistance thermique de chaque composant (résistance thermique des panneaux de bois intérieur et extérieur exclue) a été déterminée sur la base de la mesure du flux thermique passant à travers le composant et de la différence de température entre la face extérieure du panneau en bois intérieur et la face intérieure du panneau en bois extérieur (voir figure 13). Selon les composants, cette résistance thermique mesurée correspond à :

- ◆ la résistance thermique totale du PMR associé à deux lames d'air non ventilées pour les composants 1, 2, 3, 6 et 9
- ◆ la résistance thermique totale du PMR associé à une seule lame d'air non ventilée pour les composants 4 et 5
- ◆ la résistance thermique de la laine minérale pour les composants 7 et 8.

La résistance thermique est déterminée à l'aide de deux méthodes d'analyse :

- ◆ analyse par calcul de moyennes : le flux thermique à travers le composant et la différence de température de part et d'autre du composant sont moyennés sur une longue période (plusieurs jours) de manière à pouvoir déterminer la résistance thermique, nonobstant les conditions non stationnaires inhérentes aux conditions d'essai
- ◆ analyse dynamique au moyen de techniques d'identification : cette méthode permet de déterminer les caractéristiques thermiques (y compris dynamiques) de systèmes à partir de valeurs mesurées (voir § 4.3.3 pour plus d'informations).

En ce qui concerne l'essai réalisé sur les neuf composants dans la cellule PASLINK, les deux méthodes donnent des résultats quasi identiques (écart inférieur à 1 %) pour autant que la durée d'essai soit suffisamment longue.

La figure 17 indique les résistances thermiques obtenues à partir des mesures effectuées durant la période froide de neuf jours déjà considérée ci-avant (du 22 au 30 janvier 2004).

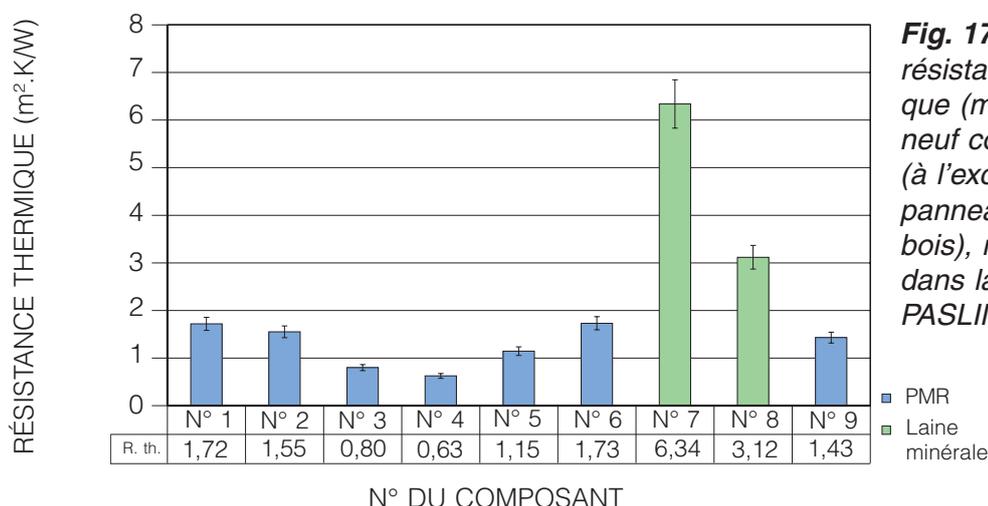


Fig. 17 Valeurs de résistance thermique ($m^2.K/W$) des neuf composants (à l'exclusion des panneaux de bois), mesurées dans la cellule PASLINK.

Ces résistances thermiques ont été également déterminées pour d'autres périodes, caractérisées par des températures extérieures moyennes différentes. L'analyse des résultats montre que les valeurs varient peu au cours de la saison de chauffe, quel que soit le composant. A titre d'exemple, le tableau 7 donne la résistance thermique du composant n° 1, mesurée pour quatre périodes différentes.

PÉRIODE (NOMBRE DE JOURS)	TEMPÉRATURE INTÉRIEURE (°C)	TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE (°C)	RÉSISTANCE THERMIQUE ($m^2.K/W$)
1 (9 jours)	20,9	1,2	1,72
2 (14 jours)	20,5	2,1	1,70
3 (10 jours)	21,1	6,0	1,70
4 (5 jours)	22,6	12,5	1,66

Tableau 7 Résistance thermique mesurée ($m^2/K/W$) sur le composant n° 1 (panneaux de bois exclus) durant quatre périodes différentes.

A partir des valeurs de résistance thermique indiquées à la figure 17, de la résistance thermique du panneau de bois, de sa chaleur spécifique et de sa masse volumique, il est possible de déterminer (par simulation) le flux thermique instantané (au cours de la période) traversant chaque composant testé, en tenant compte du comportement dynamique de ce dernier. Le logiciel VOLTRA [6] a été utilisé à cette fin. Il s'agit d'un logiciel de calcul du transfert de chaleur non stationnaire (simulation dynamique) en trois dimensions.

La figure 18 montre, pour le composant n° 2, les deux flux thermiques suivants, relatifs à la période froide de neuf jours déjà mentionnée (du 22 au 30 janvier 2004) :

- ◆ flux thermique mesuré, c'est-à-dire la valeur mesurée par le débitmètre placé sur la face intérieure du panneau de bois intérieur
- ◆ flux thermique simulé, c'est-à-dire le flux thermique traversant la face intérieure du panneau de bois intérieur, obtenu par simulation avec le logiciel VOLTRA. Les données d'entrée de la simulation sont, d'une part, les températures mesurées sur le composant n° 2 et, d'autre part, les propriétés de chaleur spécifique et de masse volumique du panneau de bois (pour tenir compte de la dynamique du système), la résistance thermique du panneau de bois ainsi que la résistance thermique de la combinaison 'PMR C + 2 lames d'air non ventilées' ($R = 1,55 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ – voir figure 17).

L'écart moyen entre les deux courbes représentant les valeurs mesurées et les valeurs simulées est de $0,1 \text{ W/m}^2$ pour la période indiquée. La connaissance de la résistance thermique de la combinaison 'PMR C + 2 lames d'air non ventilées' ($R = 1,55 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) ainsi que des propriétés thermiques du panneau de bois a suffi pour calculer, à 2 % près, le flux thermique instantané traversant le composant n° 2. La déperdition d'énergie totale obtenue par simulation sur la période considérée est égale à $1,91 \text{ kWh/m}^2$, soit la même valeur que celle qui a été mesurée.

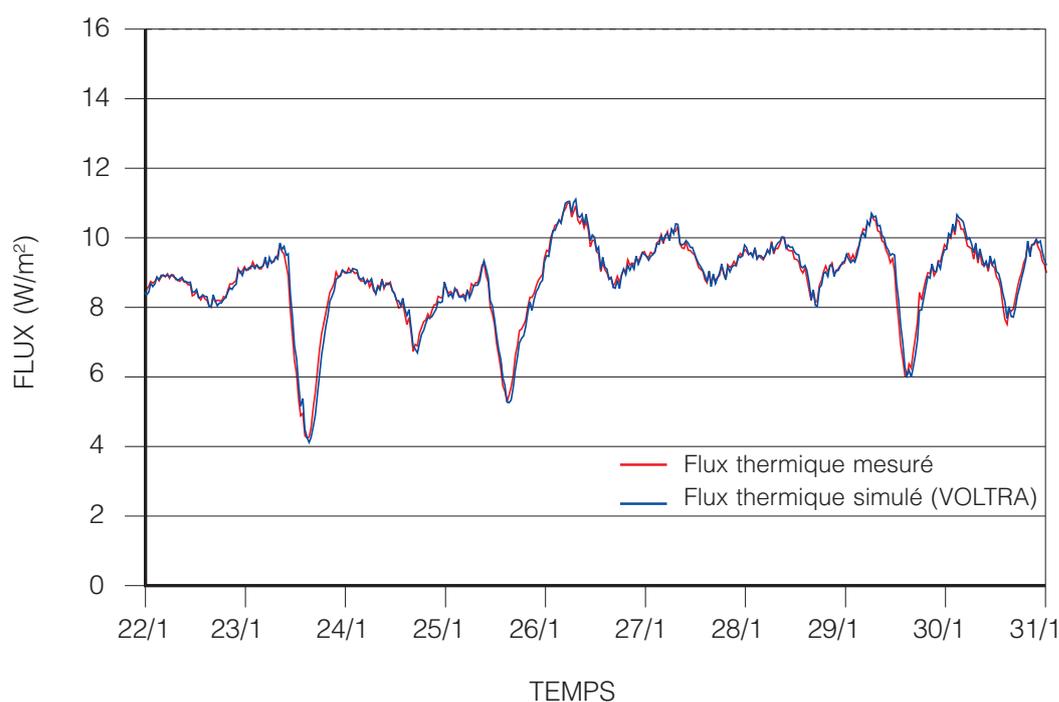


Fig. 18 Comparaison entre le flux thermique mesuré sur le composant n° 2 et le flux simulé par le logiciel VOLTRA pour le même composant.

4.3.2.6 COMPARAISON ENTRE LES MESURES ET LES CALCULS NORMATIFS

Les mesures de la résistance thermique des différents composants (panneaux de bois exclus) ont été comparées avec les valeurs calculées selon la norme EN ISO 6946 pour les mêmes conditions de température.

Ces calculs ont été réalisés en faisant usage des valeurs d'émissivité (mesurées au TNO – voir tableau 3) et des valeurs de résistance thermique intrinsèque des produits telles que mesurées au CSTC (voir tableau 2).

La figure 19 représente cette comparaison pour chaque composant. Dans le cas des composants n° 2 et n° 5, l'incertitude sur la valeur calculée est élevée du fait que l'émissivité des surfaces du produit C n'a pas pu être mesurée avec précision.

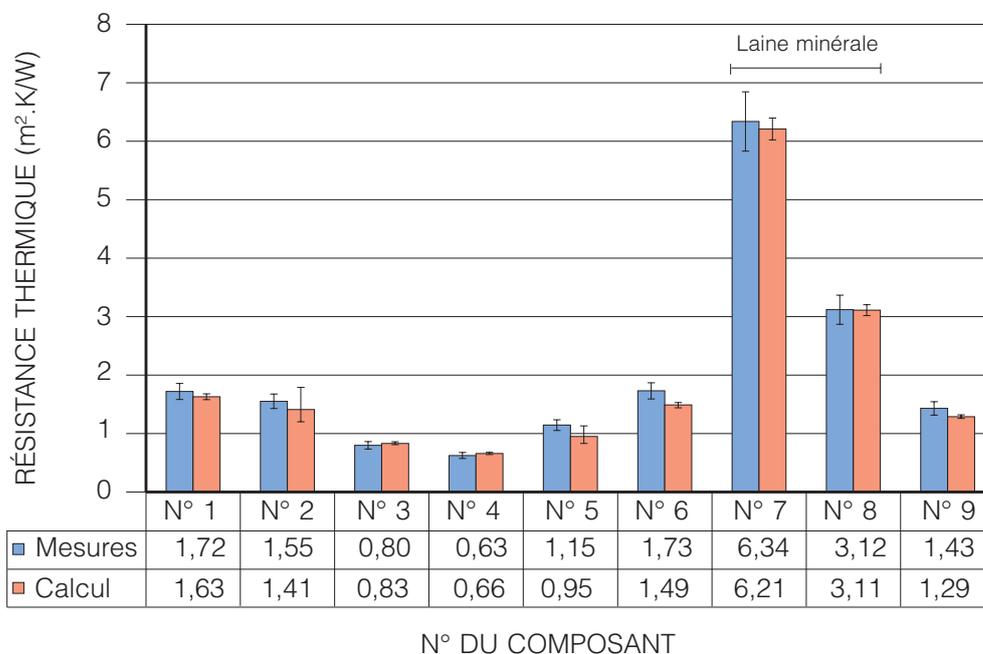


Fig. 19 Comparaison des valeurs mesurées (dans la cellule PASLINK) et des valeurs calculées de la résistance thermique ($m^2.K/W$) de chaque composant (à l'exclusion des panneaux de bois).

Pour les autres composants, la moyenne des écarts entre les valeurs de résistance thermique calculées selon la norme et les valeurs mesurées équivaut à $0,1 m^2.K/W$, les intervalles de confiance de la mesure et du calcul se chevauchant.

4.3.3 PERFORMANCE THERMIQUE D'UN SEUL COMPOSANT ET BILAN THERMIQUE AU NIVEAU DE LA CELLULE D'ESSAI PASLINK

Le but de cette deuxième campagne d'essais était de déterminer la performance thermique d'un seul composant incluant un des PMR considérés dans l'étude en réalisant cette fois-ci un bilan thermique au niveau de la cellule PASLINK.

Celle-ci est ainsi utilisée comme calorimètre (voir § 4.3.1).

4.3.3.1 COMPOSANT TESTÉ

Un composant unique de 2,5 m x 2,5 m a été placé en position verticale dans l'ouverture orientée au sud de la cellule PASLINK. Sa composition est identique à celle du composant n° 2 de l'essai PASLINK réalisé sur les neuf composants (voir tableau 5), soit :

- ◆ un panneau en bois de 18 mm d'épaisseur
- ◆ une lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur
- ◆ le PMR C
- ◆ une lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur
- ◆ un panneau en bois de 18 mm d'épaisseur.

La seule différence par rapport au composant n° 2 de l'essai précédent réside dans les dimensions du composant, puisque celui-ci présente dans cet essai des dimensions de 2,5 m x 2,5 m. Une vue du composant testé, prise de l'intérieur de la cellule d'essai est montrée à la figure 20.

4.3.3.2 DISPOSITIF DE MESURE

Les différentes grandeurs mesurées sont :

- ◆ les conditions atmosphériques extérieures : température et humidité relative de l'air, rayonnement solaire incident sur une surface verticale, etc.
- ◆ les conditions ambiantes intérieures : la température de l'air est mesurée en plusieurs points dans la cellule; la température des parois de la cellule est également mesurée
- ◆ la puissance de chauffage : le système de chauffage installé dans la cellule permet de maintenir la température à la valeur de consigne souhaitée; la puissance délivrée par ce système de chauffage a été mesurée en continu.



Fig. 20
Vue du composant unique testé, prise de l'intérieur de la cellule PASLINK.

De manière à disposer d'un maximum d'informations sur le comportement thermique du composant, plusieurs thermocouples ont été placés sur le composant même, en surface intérieure, en surface extérieure, mais également entre les différentes couches du composant. Enfin, des débitmètres ont été disposés sur la surface intérieure du composant.

4.3.3.3 MONTAGE DU COMPOSANT

Comme lors de l'essai précédent, de petites cales de très faible section (de l'ordre de 1 mm²) ont été réparties de manière régulière sur toute la surface en vue de maintenir une épaisseur constante de la lame d'air sur toute la superficie du composant. L'étanchéité à l'air du composant a été réalisée avec soin. Conformément aux recommandations du fabricant, une bande adhésive aluminisée a été utilisée afin de joindre les deux fragments de PMR nécessaires pour couvrir une superficie de 2,5 m sur 2,5 m.

4.3.3.4 CONDITIONS D'ESSAI

Les mesures ont été réalisées au cours de trois périodes, caractérisées par des régimes de température différents dans la cellule d'essai (tableau 8).

PÉRIODE	TEMPÉRATURE INTÉRIEURE	TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE	ÉCRAN SOLAIRE
Période 1 (15 jours)	Température constante = 22 °C	Température moyenne = 8 °C	Oui
Période 2 (12 jours)	Température constante = 29 °C	Température moyenne = 12 °C	Oui
Période 3 (13 jours)	Température non constante	Température moyenne = 12 °C	Non

Tableau 8
Conditions d'essai.

Durant les périodes de mesure 1 et 2, la température de l'air dans la cellule est maintenue constante (respectivement à 22 °C et 29 °C) grâce au système de chauffage installé. Le composant est protégé du rayonnement solaire incident par un écran opaque ventilé par de l'air extérieur, appelé 'boîte froide ventilée'.

Durant la période 3, une autre stratégie a été adoptée : différents échelons de puissance de chauffage injectée dans la cellule d'essai ont été imposés, de sorte que la température d'air de la cellule varie au cours de la période entre 20 et 35 °C. L'écran solaire a été enlevé.

4.3.3.5 RÉSULTATS DE MESURES

Un bilan thermique a été établi au niveau de la cellule d'essai pour les trois périodes de mesure considérées. La résistance thermique totale du composant testé a ainsi été déterminée à partir de la mesure de la température intérieure de la cellule, de la température extérieure (et de l'ensoleillement dans le cas de la période 3) et de la puissance délivrée par le système de chauffage. Il est à noter que, pour cet essai, la résistance thermique mesurée correspond à la résistance thermique totale du composant (de l'ambiance intérieure à l'ambiance extérieure), y compris les valeurs de la résistance thermique des panneaux de bois intérieur et extérieur et de la résistance thermique d'échange de surface R_i et R_e :

$$R_{\text{total}} = R_i + R_{\text{panneau}} + R_{\text{lame}} + R_{\text{PMR}} + R_{\text{lame}} + R_{\text{panneau}} + R_e \quad (4-1)$$

Afin de comparer les résultats de cet essai avec les mesures réalisées précédemment, la résistance thermique de la combinaison 'PMR + deux lames d'air non ventilées' a été déduite de l'équation (4-1) en soustrayant les résistances thermiques connues des panneaux de bois (valeurs mesurées) et les résistances thermiques d'échange de surface normalisées de la résistance R_{tot} .

La résistance thermique du composant a été déterminée à l'aide de deux méthodes :

- ◆ analyse par calcul de moyennes : la puissance de chauffage injectée dans la cellule et la différence de température entre l'intérieur de la cellule et l'extérieur ont été moyennées sur une longue période (plusieurs jours) de manière à déterminer la résistance thermique

moyenne du composant sur cette période. Cette méthode exige que le composant ne soit pas soumis à l'ensoleillement (pour ne pas fausser le bilan thermique – en effet, l'objectif est de déterminer la valeur de résistance thermique du composant et non son facteur solaire). Elle est donc valable uniquement pour les périodes de mesure 1 et 2 durant lesquelles un écran solaire était placé

- ◆ analyse dynamique au moyen de techniques d'identification : cette méthode permet de déterminer les caractéristiques thermiques (y compris dynamiques) de systèmes complexes à partir de diverses grandeurs mesurées. On peut ainsi identifier simultanément les caractéristiques thermiques (résistance et capacité thermiques) et solaire (facteur solaire) du composant testé. La méthode peut être appliquée aux trois périodes de mesure considérées. Le logiciel LORD [5] a été utilisé à cette fin.

La figure 21 donne les valeurs mesurées, dans la cellule PASLINK (par le biais d'un bilan thermique au niveau de la cellule), de la résistance thermique du PMR C associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur. Les deux méthodes d'analyse livrent des résultats quasi identiques (écart inférieur à 1 %). Les valeurs de résistance thermique mesurées durant les trois périodes différentes présentent un écart inférieur à 0,1 m².K/W (soit 6 %).

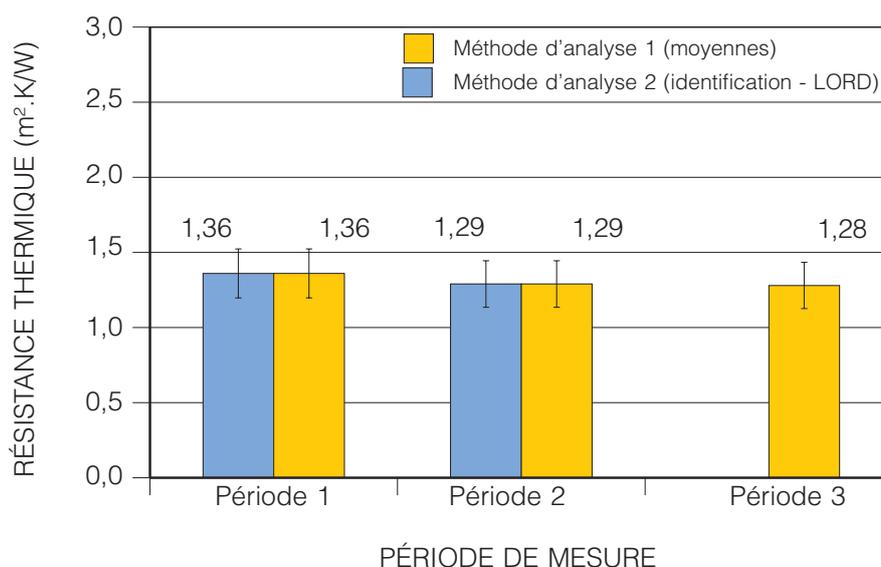


Fig. 21 Valeurs mesurées, dans la cellule PASLINK, de la résistance thermique (en m².K/W) du produit C associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur.

4.3.3.6 COMPARAISON DES MESURES

Il est intéressant de placer côte à côte les résultats obtenus sur le produit C par différentes méthodologies : mesure en laboratoire, mesure dans la cellule PASLINK avec les neuf composants (bilan au niveau du composant) et mesure dans la cellule PASLINK avec le composant unique (bilan au niveau de la cellule).

Il convient de rappeler que, pour ces trois types de mesure, les conditions d'essai ne sont pas identiques :

- ◆ les mesures PASLINK ont été réalisées sur le composant placé en position verticale, tandis que la mesure en laboratoire a été effectuée sur le composant en position horizontale
- ◆ les conditions de température sont légèrement différentes
- ◆ les dimensions du composant varient selon l'essai.

Malgré ces conditions d'essai différentes, l'écart sur la valeur mesurée de la résistance thermique est inférieur à 0,3 m².K/W.

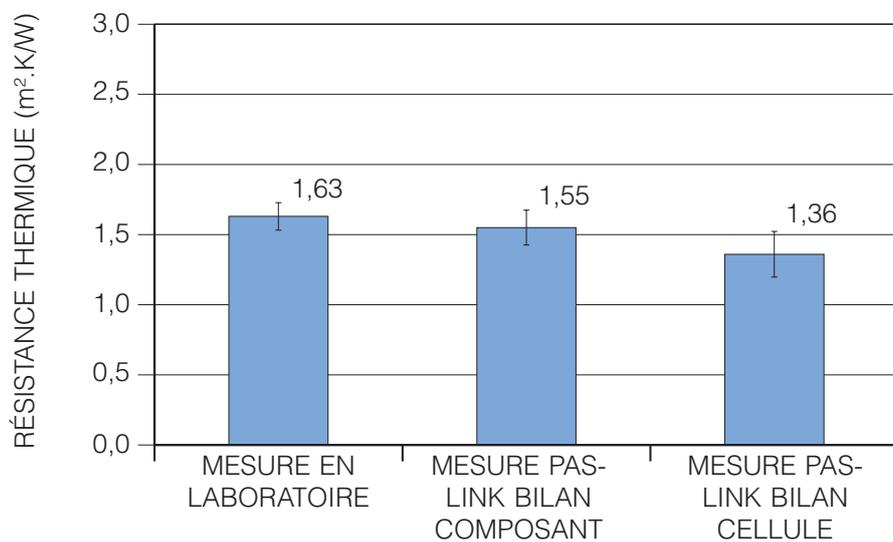


Fig. 22 Valeurs mesurées de la résistance thermique (en m².K/W) du produit C associé à 2 lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur selon différentes méthodologies.



5 CONCLUSIONS

Au cours de cette étude, les performances thermiques de trois produits minces réfléchissants (PMR) et d'un isolant traditionnel témoin ont été déterminées en période hivernale, principalement sur la base d'une campagne de mesure menée à la station expérimentale du CSTC.

Les performances thermiques ont été mesurées sur les différents produits dans leur état initial, c'est-à-dire tels qu'ils ont été fournis par les fabricants, et dans des conditions de pose idéales (lame d'air non ventilée et d'épaisseur constante, etc.), c'est-à-dire dans la situation la plus favorable.

Deux types de mesures ont été réalisés : des mesures en conditions de laboratoire et des mesures en conditions extérieures réelles.

Vu sa faible épaisseur, un PMR possède une résistance thermique intrinsèque peu élevée, les valeurs mesurées variant de 0,2 à 0,6 m².K/W selon le type de produit. Pour pouvoir bénéficier de l'effet réfléchissant des couches superficielles, le produit doit être placé en vis-à-vis d'une ou, mieux, de deux lames d'air non ventilées. Dans ces conditions, la valeur d'émissivité des faces externes du produit est un paramètre important, qui détermine la réduction du transfert de chaleur par rayonnement à travers la lame d'air. Les valeurs d'émissivité mesurées s'échelonnent de 0,05 à 0,20.

La résistance thermique totale mesurée de chaque produit associé à deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur varie de 1,0 à 1,7 m².K/W suivant le type de produit et le sens du flux thermique qui le traverse.

Les valeurs mesurées ont été comparées à des valeurs calculées conformément à la norme européenne EN ISO 6946. Celle-ci fournit une méthode de calcul de la résistance thermique des composants du bâtiment et traite le cas des lames d'air délimitées par une surface réfléchissante (à basse émissivité). L'écart moyen entre les valeurs de résistance thermique calculées selon la norme et les valeurs mesurées équivaut à 0,1 m².K/W, les intervalles de confiance de la mesure et du calcul se chevauchant.

MESURE DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE D'UN PMR, ASSO- CIÉ À DEUX LAMES D'AIR (NPL)

Cette annexe (p. 32, 33 et 34) comporte un rapport d'essai de l'Institut NPL relatif à la mesure de la résistance thermique d'un PMR associé à deux lames d'air.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Teddington Middlesex UK TW11 0LW Switchboard 020 8977 3222



Test Report

THERMAL RESISTANCE OF REFLECTIVE INSULATION BETWEEN AIR CAVITIES

FOR CSTC - WTCB - BBRI
Division of Building Physics & Indoor Climate
Av. P. Holoffe 21
1342 Limelette
Belgium

For the attention of Gilles Flamant.

IDENTIFICATION Authorised NPL quotation E04010511 signed and dated by Luc Carton on 4th March 2004, and customer's purchase order 070689 dated 4th March 2004. NPL specimen number LA289 was assigned to the specimen.

BASIS OF TEST NPL thermal conductivity measurement procedure QPDQM/B/421.

UNCERTAINTY The overall measurement uncertainty is estimated to be within $\pm 3.5\%$, based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%.

Reference: PP21/E04010511

Date of issue: 15 April 2004

Checked by: *CS Baines*

Signed:

Name: John Redgrove

Page 1 of 3

(Authorised Signatory)

for the Managing Director

This test report may not be reproduced other than in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director. It does not of itself impute to the subject of test any attributes beyond those shown by the data contained herein.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Continuation Sheet

OBJECTIVE

To measure the thermal resistance of a sample of thin reflective insulation between two air cavities, at a mean specimen temperature of 10 °C. The specimen to be prepared by NPL, from material supplied by the customer, to approximate lateral dimensions of 610 mm x 610 mm. The reflective insulation to have a nominal thickness of 7.49 mm and the air cavities to be 20 mm thick.

SPECIMEN PREPARATION

No conditioning was required prior to testing.

The reflective insulation was mounted between two balsa wood box frames to create 20 mm air cavities above and below. Balsa wood spacers were used between the frames to ensure the reflective insulation thickness of 7.49 mm was maintained during test.

MEASUREMENTS

The thermal resistance was measured using a precision single-sided 610 mm heat flow meter apparatus (NPL 610HFM – LaserComp FOX 600). In this apparatus the specimen is mounted horizontally with heat flow downwards, with lateral heat flow from the metering area minimised by additional edge guard heating. All the temperature, dimensional and heat flow measurements have traceability to national standards.

DATE OF LAST HEAT FLOW METER CALIBRATION CHECK

The heat flow meter calibration was checked on 9th March 2004 using glass fibre board (IRMM-440) reference material LA55 and LA56, and found to be within specification.

For measurements made with specimen thickness below 100 mm, a calibration is used that is based on NPL specimens LA55 and LA56, which are both 34.5 mm thick glass fibre board (IRMM-440 reference material) with thermal resistances at 20 °C of 0.912 m²·K/W and 0.914 m²·K/W respectively. LA55 and LA56 were calibrated in the NPL 610 mm guarded hot plate during May 1997 and are due to be recalibrated in May 2007. The calibration values are detailed in NPL Test Report QT03/01/96/016.

For measurements made with specimen thickness between 100 mm and 200 mm, a calibration is used that is based on NPL specimen LA3, which is 150 mm thick expanded polystyrene with thermal resistance at 20 °C of 3.92 m²·K/W. LA3 was last calibrated in the NPL 610 mm guarded hot plate during Oct 2001 and is due to be recalibrated in Oct 2011.

RESULTS

The results, including the specimen details, are shown on the following page.

Reference: PP21/E04010511

Page 2 of 3

Checked by: 

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Continuation Sheet

Sample description: Thin reflective insulation
 Sample name: Sample X
 Nominal thickness: 7.49 mm + two 20 mm air cavities

Information regarding the specimen and measurement is given below.

Specimen and Test Details	
NPL specimen number	LA289
Mean length x width /mm	612 x 613 *
Mean thickness during test /mm	47.47
Mass before test /kg	0.215 *
Mass after test /kg	0.215 *
Mean temperature difference /K	10.0
Mean density of heat flow rate /(W/m ²)	6.27
Laboratory temperature /°C	21
Laboratory relative humidity /%RH	36 to 38
Name of operator	A.J. Simpkin

* Refers to the reflective insulation only.

Thermal Resistance Result for LA289	
Date of measurement	29/03/04
Mean test temperature /°C	10.0
Thermal resistance /(m²·K/W)	1.60

Reference: PP21/E04010511

Page 3 of 3

Checked by:  

PLANNING DE L'ÉTUDE

Le tableau ci-dessous indique les dates-clés de cette étude et les événements correspondants.

DATES	EVÈNEMENTS CORRESPONDANTS
13 février 2003	1 ^{ère} réunion en présence de tous les partenaires, fabricants de PMR compris. Discussion du programme technique de l'étude portant sur la détermination des performances thermiques de PMR
15 juillet 2003	Réception par le CSTC du bon de commande du dernier fabricant
de septembre à décembre 2003	Essais à la plaque chaude gardée
de janvier à avril 2004	Essai dans la cellule PASLINK sur les neuf composants. Essai dans la cellule PASLINK sur le composant unique
17 juin 2004	2 ^e réunion en présence de tous les partenaires, fabricants de PMR compris. Présentation des résultats de l'étude (rapport préliminaire distribué en réunion)
20 août 2004	Date limite pour les réactions sur le rapport préliminaire
Octobre 2004	Traitement par le CSTC, en collaboration avec les deux experts scientifiques, des remarques formulées par les fabricants sur le rapport préliminaire
1 ^{er} novembre 2004	Envoi du rapport final à tous les partenaires de l'étude
24 novembre 2004	Date limite pour les réactions sur le rapport final
Début décembre 2004	Traitement par le CSTC, en collaboration avec les deux experts scientifiques, des remarques formulées par les fabricants sur le rapport final
11 décembre 2004	Mise à la disposition du rapport final

BIBLIOGRAPHIE

A. NORMES

1. Institut belge de normalisation
NBN EN 823 Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment. Détermination de l'épaisseur. Bruxelles, IBN, 1994.
2. Institut belge de normalisation
NBN EN 1946 Performance thermique des produits et composants pour le bâtiment. Critères particuliers pour l'évaluation des laboratoires mesurant les propriétés de transmission thermique. Bruxelles, IBN, 5 parties, 1999-2000.
3. Institut belge de normalisation
NBN EN ISO 6946 Composants et parois de bâtiments. Résistance thermique et coefficient de transmission thermique. Méthode de calcul. Bruxelles, IBN, 1996.
4. Institut belge de normalisation
NBN EN 12667 Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment. Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique. Produits de haute et moyenne résistance thermique. Bruxelles, IBN, 2001.

B. LOGICIELS

5. LORD 3.21, Logical R-Determination, Modelling and identification software for thermal systems, developed for PASLINK EEIG by O. Gutschker, 2003.
6. VOLTRA, program to calculate 3D & 2D transient heat transfer in objects described in a rectangular grid using the energy balance technique, version 4.0w, Physibel, 2003.

Editeur responsable : Carlo De Pauw
CSTC, Rue du Lombard 42
1000 Bruxelles



B R U X E L L E S

Siège social



Rue du Lombard 42
B-1000 Bruxelles

e-mail : info@bbri.be

Direction générale



02/502 66 90



02/502 81 80

Z A V E N T E M

Bureaux



Lozenberg n° 7
B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
(Zaventem)



02/716 42 11



02/725 32 12

Avis techniques - Communication - Qualité
Informatique appliquée construction
Techniques de planification
Développement & Valorisation

Publications



02/529 81 00



02/529 81 10

L I M E L E T T E

Station expérimentale



Avenue Pierre Holoffe 21
B-1342 Limelette



02/655 77 11



02/653 07 29

Recherche & Innovation
Laboratoires
Formation
Documentation
Bibliothèque