



Etudes financées par l'ADEME dans le cadre du PREBAT

Résistance thermique des parois intégrant des produits minces réfléchissants

AVERTISSEMENT

Dans le cadre d'un Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Energie dans le Bâtiment (PREBAT), l'Etat français a financé via l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) deux études de Recherche concernant les produits minces réfléchissants ; l'une réalisée par le CNRS et la société KDB, l'autre réalisée par l'Ecole des Mines de Paris et le CSTB. Ainsi, par convention, l'ADEME a financé la réalisation d'une étude par le CSTB et l'Ecole des Mines de Paris sur les « méthodes d'évaluation et performances thermiques des produits réfléchissants (hiver et été) ». Les résultats des deux études ayant convergé scientifiquement ont donné lieu à une communication commune CNRS, Ecole des Mines de Paris et CSTB dans le cadre des journées du PREBAT d'Aix les Bains le 21 mars 2007. Plus récemment, l'ADEME a autorisé et validé la communication du rapport d'avancement d'étude du CSTB du 13 juin 2007. De même, l'ADEME a autorisé et validé la présente communication dans la mesure où les méthodes d'essais et les résultats de mesure qui y sont exposés sont par nature définitifs. Enfin, il convient de souligner que le contenu de ces communications a pour objectif de faire progresser la connaissance dans le domaine considéré et que l'étude a été réalisée indépendamment de tout intérêt commercial et que par conséquent ni ses auteurs ni l'ADEME ne sauraient être tenus responsables de toute utilisation qui pourrait en être faite.

François PENOT, LET ENSMA
Nada CHAMI, Assaad ZOUGHAIB, Denis CLODIC, CEP Mines Paris
Salem FARKH, Bernard ABRAHAM, CSTB

Cette publication présente les premiers résultats des deux projets PREBAT évaluant la résistance thermique des parois intégrant des produits minces réfléchissants.

Dans un premier temps, l'ensemble des normes de mesures et de calculs disponibles sont passées en revue.

Ensuite, une méthode de mesure originale développée au LET a permis de déterminer la résistance thermique globale d'une paroi constituée d'un produit réfléchissant et deux lames d'air. Le dispositif de mesure consiste en un cube chauffant, entouré des parois à étudier elles-mêmes intégrées dans une enveloppe. La connaissance en régime permanent du flux thermique et la mesure des températures aux parois interne et externe permettent de remonter à la résistance thermique des parois étudiées. Ce dispositif a permis de déterminer l'ordre de grandeur de la résistance thermique de différentes configurations et de déterminer l'efficacité d'isolation de produits minces réfléchissants en les comparant à une situation théorique de référence sans rayonnement ni convection.

L'orientation de la paroi, son inclinaison et les propriétés de la face réfléchissante jouent un rôle significatif sur la valeur de la résistance thermique de la paroi dont l'ordre de grandeur a été déterminé expérimentalement. Dans une troisième partie, une modélisation détaillée de la paroi est effectuée. Cette modélisation a permis de déterminer la résistance thermique dans la majorité des situations rencontrées dans le bâtiment.

Enfin, des essais comparatifs in situ ont été réalisés pour vérifier qu'ils sont bien en ligne avec les méthodes conventionnelles normalisées. Ces essais consistent à comparer les consommations d'énergie en conditions climatiques réelles, entre deux cellules identiques dont l'une est isolée avec un complexe constitué d'un Produit Mince Réfléchissant de 2 cm d'épaisseur et de deux lames d'air non ventilées telle que l'ensemble fasse 20 cm

d'épaisseur (cellule A) et l'autre avec un isolant traditionnel de 20 cm d'épaisseur (cellule B). Les résultats démontrent que la cellule A consomme deux fois plus d'énergie que la cellule B pour une même température intérieure et ceci pour les mêmes conditions climatiques extérieures. Compte-tenu des déperditions par les autres parois (sol, porte), par les ponts thermiques et par renouvellement d'air, cet écart de consommation confirme l'ordre de grandeur des résultats obtenus selon des méthodes normalisées.

Il a été démontré qu'en période froide, et **dans les conditions les plus favorables**, la résistance thermique maximale d'un Produit Mince Réfléchissant courant de 2 cm d'épaisseur avec deux lames d'air adjacentes, ne peut pas dépasser $2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. En conclusion, les résultats des différentes approches convergent entre eux et avec ceux obtenus par l'application des normes existantes reconnues, notamment les résultats des essais à la boîte chaude gardée ou calibrée avec un écart de 5% environ sur la résistance thermique de la paroi entre la simulation numérique et les normes européennes.

1. Contexte et enjeux

Les enjeux énergétiques et climatiques nécessitent de connaître les performances effectives des produits minces réfléchissants (PMR) d'une part et de leur contribution à la limitation des flux sur l'ensemble des parois, qu'il s'agisse des conditions hivernales ou d'été.

Compte tenu des informations contradictoires qui ont circulé depuis les années 90 autour de la performance thermique des parois intégrant des PMR, L'ADEME a décidé de mandater à travers le programme PREBAT 2005, deux équipes pour travailler sur le sujet afin d'apporter une réponse scientifique à la caractérisation des complexes intégrant ces produits.

La première équipe est composée de l'Ecole des Mines de Paris, et du CSTB. Le CNRS de Poitiers fait partie de la deuxième équipe avec un industriel de produit réfléchissant 'KDB isolation' et le CNRS de Montpellier. Ces deux équipes ont mené des travaux en parallèle pour actualiser les connaissances acquises, analyser les besoins et apporter des compléments d'information.

Ce document fait un point d'avancement de leurs principaux travaux de recherche menés en 2006.

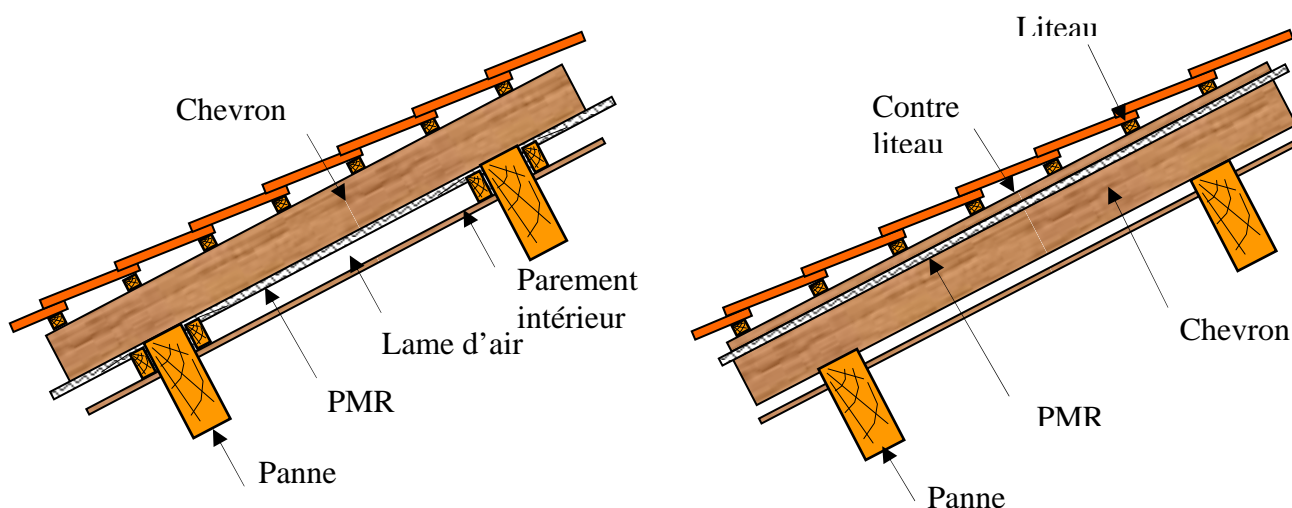
1.1 Définition et mise en œuvre d'un produit mince réfléchissant

Un produit mince réfléchissant est constitué, dans sa partie centrale, d'un matériau recouvert de feuilles réfléchissantes (feuilles d'aluminium ou films aluminisés). L'épaisseur totale est généralement comprise entre 5 et 30 mm. Il existe deux grandes familles de produits réfléchissants : les produits à bulles (film de polyéthylène emprisonnant des bulles d'air) et les produits multicouches (mousse plastique, ou une matière fibreuse en plusieurs couches séparées par des feuilles réfléchissantes intermédiaires).

La contribution des PMR à l'isolation thermique des parois est étroitement liée à la mise en œuvre du produit sur le chantier et notamment l'aménagement ou pas d'une (ou de deux) lame(s) d'air adjacente(s) au produit. En effet, la présence des lames d'air permet aux feuilles réfléchissantes de réduire les échanges radiatifs dans le volume d'air améliorant ainsi la résistance thermique totale de la paroi. En contact avec un autre matériau solide la feuille réfléchissante n'opère plus par rayonnement et le flux thermique traverse par conduction.

Les PMR sont couramment utilisés en rampants de toiture et en plafond, parfois en murs et en plancher bas lourd ou léger et plus rarement sous chape flottante.

En rampant le PMR peut être posé soit par-dessous les chevrons soit par-dessus aménageant ainsi une ou deux lames d'air de part et d'autre du produit.



Par-dessous les chevrons

Par-dessus les chevrons

Figure 1 - Mise en œuvre des PMR en rampant de toiture

En mur le PMR est généralement posé entre tasseaux en bois aménageant deux lames d'air adjacentes au produit.

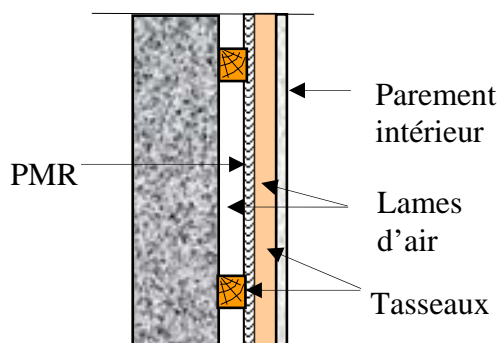


Figure 2 – Mise en œuvre des PMR en mur (cas avec deux lames d'air)

En plancher léger à ossature bois le produit peut être placé sur ou sous les solives selon le type du plancher.

Sous chape flottante le PMR est pris entre la dalle et la chape. Aucune lame d'air n'est aménagée à proximité du produit.

1.2 Méthodes de caractérisation, état des lieux

1.2.1 Evaluation technique

Les performances en œuvre (in situ pour chaque bâtiment) sont définies :

- Au niveau français dans les Avis Techniques qui tiennent compte du vieillissement prévisible, comme pour tout produit de bâtiment, et des conditions de mise en œuvre, notamment si les lames d'air en contact avec les produits sont ventilées ou non. Dix Avis Techniques ont été formulés jusqu'en 2006, dont un concernant la thermique d'été et la diminution des apports solaires par une couverture. Depuis le mois de février 2007, les performances thermiques intrinsèques et d'aptitude à l'emploi des PMR peuvent être certifiées par L'ACERMI (Association pour la Certification des Matériaux Isolants : www.acermi.com)

- Au niveau européen la détermination de la résistance thermique des parois intégrant un PMR s'effectue selon les normes présentées ci-après. Concernant les produits Il sera prochainement possible de délivrer des Agréments Techniques Européens contenant les principales caractéristiques thermiques utiles pour les calculs, notamment la résistance thermique intrinsèque du produit et l'émissivité des faces externes.

1.2.2 Normalisation et règles de calcul

Il existe depuis le milieu des années 90 des normes européennes pour la détermination de la résistance thermique des parois opaques dans le bâtiment. Ces normes de calcul et de mesure, n'ont pas été spécialement développées pour les produits réfléchissants, mais elles sont tout à fait adaptées à ces produits puisqu'elles tiennent bien compte des trois modes de transfert thermiques à travers les parois, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement.

Les normes reconnues permettant de déterminer, par calcul et/ou par mesure les résistances thermiques des parois intégrant des produits réfléchissants et/ou des produits eux-mêmes, sont présentées brièvement dans les paragraphes ci-après.

a Normes de calcul des résistances thermiques de parois

NF EN ISO 6946

La résistance thermique des parois intégrant des produits réfléchissants peut être calculée selon la norme commune européenne et internationale (CEN/ISO) : NF EN ISO 6946 :

Composants et éléments de bâtiment – Résistance thermique et coefficient de transmission thermique – Méthode de calcul.

Cette norme donne les méthodes de calcul des parois opaques des bâtiments, lames d'air compris avec ou sans couche à basse émissivité. Elle a été initialement publiée en novembre 1996. Actuellement elle est en cours de révision à l'ISO. La dernière version disponible date de mars 2006. Elle permet une meilleure prise en compte de l'effet du gradient thermique et de la perméabilité à l'air sur la résistance thermique de la lame. Le vote formel est prévu début 2007.

NF EN ISO 10211

Le calcul des ponts thermiques dus aux dispositifs de fixation mécanique linéaires et ponctuels du produit peut se faire selon la norme NF EN ISO 10211, parties 1 et 2: Ponts thermiques dans les bâtiments – Calcul des températures superficielles et des flux thermiques.

Cette norme est également en cours de révision à l'ISO. La nouvelle version regroupe les deux parties en une seule norme intitulée 'calcul détaillé'. Elle a été initialement publiée en 1995. La dernière version disponible date du 6 septembre 2006. Le vote formel est prévu début 2007.

Règles Th-U

Au niveau national, les produits réfléchissants peuvent être calculés d'après la méthode simplifiée des règles Th-U, version de février 2007. Cette méthode est conforme aux normes NF EN ISO 6946 et NF EN ISO 10211. Elle permet de tenir compte du sens du flux traversant la paroi (horizontal à travers un mur, ascendant ou descendant à travers une toiture), du degré de ventilation des lames d'air et de l'émissivité utile du film réfléchissant.

b. Normes de mesure des résistances thermiques de parois

NF EN ISO 8990

La résistance thermique totale d'une paroi intégrant un produit réfléchissant peut être mesurée à la boîte chaude : NF EN ISO 8990 : Composants de bâtiments et éléments de construction – Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire – Méthode de la boîte chaude gardée et de la boîte chaude calibrée. Cette norme est disponible depuis 1996.

Le principe consiste à placer une éprouvette représentative de la paroi entre deux ambiances contrôlées (chaude et froide) et à mesurer le flux de chaleur total qui la traverse par conduction par convection et par rayonnement. La boîte chaude est basée sur le même principe de mesure de consommation d'énergie que les mesures in situ mais elle permet de mieux maîtriser les conditions climatiques de part et d'autre de l'éprouvette. La précision de mesure est donc connue et bien supérieure. Elle permet également, au besoin, de quantifier l'effet des ponts thermiques intégrés à la paroi (ossatures, écrasement du produit, agrafes, ...).

NF EN 12664 et NF EN 12667

La résistance thermique intrinsèque d'un produit réfléchissant peut être mesurée à la plaque chaude gardée ou au fluxmètre conformément aux normes NF EN 12664 et 12667: Matériaux pour le bâtiment - détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique. Les deux normes ont été publiées en 2001. Elles permettent également de mesurer la résistance thermique totale du produit réfléchissant associé à une ou deux lames d'air non ventilées.

ASTM C1224

Cette norme américaine est spécifique aux parois intégrant des produits réfléchissants et se base entièrement sur la norme NF EN ISO 8990. Elle précise les modalités de calibration et

de l'installation de l'éprouvette à la boîte chaude et permet de quantifier l'impact des ponts thermiques éventuels.

c. Comment utiliser ces normes ?

La détermination de la résistance thermique d'une paroi intégrant un PMR se fait selon les étapes décrites ci-après:

- 1 - Mesure de la résistance thermique intrinsèque du produit avec les normes NF EN 12664 et NF EN 12667
- 2 – Mesure de l'émissivité du film réfléchissant selon une méthode semblable à celle utilisée pour les vitrages à couche (EN 12898).
- 3 – Détermination de la résistance thermique des lames d'air soit par calcul selon la norme NF EN 6946 et d'après les étapes 1 et 2, soit par mesure directe selon les normes NF EN 12664 et NF EN 12667.
- 4 – Détermination de l'effet des ponts thermiques soit par calcul selon la norme NF EN ISO 10211 ou par mesure selon la norme NF EN ISO 8990
- 5 – La résistance thermique totale de la paroi est calculée selon la norme NF EN ISO 6946.

Une alternative aux étapes 1 à 5 est de mesurer directement la résistance thermique totale de la paroi à la boîte chaude selon la norme NF EN ISO 8990.

Au niveau national la résistance thermique est soit déterminée directement d'après l'Avis Technique du procédé, soit calculée d'après la méthode simplifiée des règles Th-U, élaborée conformément aux normes européennes.

d. Résultats

Les méthodes européennes permettent de tenir compte de tous les paramètres ayant un impact sur la résistance thermique d'une paroi intégrant un PMR. On cite la mise en œuvre (nombre et étanchéité à l'air des lames), l'émissivité des films extérieurs et leur dégradation avec le temps, la nature du PMR et son épaisseur, les conditions climatiques, l'orientation de la paroi, etc.

En période de chauffage, la résistance thermique maximale déterminée conformément aux normes européennes ne dépasse pas $2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Cette valeur correspond à une paroi verticale, intégrant un PMR courant de 20 mm d'épaisseur et deux lames d'air étanches à l'air dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 2 cm. L'émissivité est considérée comme faible et durable dans le temps.

Toute altération de l'un ou plusieurs des paramètres influents ne peut que faire chuter la résistance thermique de la paroi.

2. Etudes scientifiques

Les travaux de recherche qui suivent ont été menés par le CSTB, l'Ecole des Mines et le CNRS de POITIERS, avec le soutien de l'ADEME afin de donner une réponse scientifique à la caractérisation thermique des parois intégrant des produits réfléchissants. Ces travaux avaient également pour objectif de vérifier l'adaptabilité des normes existantes aux produits réfléchissants.

Pour ce faire des méthodes de recherche originales par simulation et par mesure ont été menées. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés entre eux puis à ceux issus de l'application des normes européennes.

2.1 Méthodes expérimentales

2.1.1 Méthode par 'mesure globale'

2.1.1.1 Description du dispositif de mesure

Il s'agit d'un dispositif de mesure de la résistance au passage de la chaleur de matériaux minces placés en situation. Ce dispositif a été conçu de façon à permettre de tester des complexes, avec la prise en compte donc de 2 lames d'air de chaque côté du PMR, en essayant de respecter leurs propriétés émissives dans l'infrarouge, de ne pas introduire une inertie thermique importante pour bien faire ressortir leurs propriétés en régime dynamique et, enfin, les mesures doivent être entreprises dans un environnement caractéristique de celui rencontré dans le bâtiment, soit une taille de l'ordre du mètre au moins et des températures proches des températures ambiantes habituelles.

De la chaleur est produite à l'intérieur d'un volume de forme cubique. Cette source est complètement entourée par le complexe à tester. Le complexe est, à son tour, placé dans un environnement bien contrôlé thermiquement. A puissance injectée donnée, la mesure de l'échauffement du volume intérieur en régime stationnaire donne la résistance thermique du complexe (matériau accompagné de 2 lames d'air). Un support mécanique d'ensemble permet de respecter les lames d'air préconisées pour le meilleur usage de ces complexes, sans créer de ponts thermiques ni de masse thermique importante.

On obtient finalement un assemblage fait de 3 cubes emboîtés et reposant sur de petites entretoises thermiquement isolantes pour assurer les lames d'air. L'ensemble est introduit dans une chambre d'essai climatisée. Les caractéristiques de chacun de ces éléments sont décrites brièvement ci-dessous.

La source de chaleur

Un cube de 1 m d'arête a été fabriqué à partir de 6 feuilles minces (1 mm d'épaisseur) de polycarbonate, collées sur un cadre léger en carré de PVC creux (section 25 × 25 mm, épaisseur 1 mm). A l'intérieur du cube, sont placés des films résistifs chauffants d'une surface de 2 m² environ, ainsi que 2 ventilateurs centrifuges qui provoquent un brassage d'air important pour homogénéiser les températures et assurer un bon coefficient d'échange aux parois. Une photographie du cube intérieur est montrée sur la photo 1. Un flux connu est ainsi libéré sur les 6 faces du cube sans élévation importante de température ni point chaud localisé. 24 thermocouples répartis sur les 6 faces du cube intérieur contrôlent l'uniformité des températures. 1 thermocouple examine la température atteinte par les films chauffants et 2 thermocouples mesurent la température de l'air dans le cube.



Photo 1 - Vue du cube intérieur, posé sur un chariot.

La dissipation de chaleur

Un cube en duralumin de 5 mm d'épaisseur et de dimension intérieure égales à 1,144 m a été fabriqué (voir photo 2) de façon à pouvoir contenir un complexe formé d'un matériau de 12 mm d'épaisseur encadré de 2 lames d'air de 30 mm. Le cube a été peint intérieurement et extérieurement, à l'aide d'une peinture noire de grande émissivité ($\epsilon = 0,93 \pm 0,05$). 6 thermocouples, collés au centre des 6 faces extérieures du cube en mesurent la température.



Photo 2 – Vue du cube extérieur dans la chambre climatisée.

Ce cube est positionné à l'intérieur d'une chambre ventilée et climatisée spécialement dédiée [1]. Une arête verticale du cube fait face au courant d'air [2] qui provient d'un mur soufflant de l'air à $0,4 \pm 0,1$ m/s. Un climatiseur maintient la température de cet air à $19 \pm 0,5$ °C et son humidité est surveillée (50 ± 10 %). 6 thermocouples sont répartis dans la chambre d'essais pour mesurer la température ambiante.

Le complexe

De nombreux types de produits peuvent être testés. Constitués, le plus souvent, de panneaux souples ces produits sont fixés sur un cadre léger de PVC (photo 3).

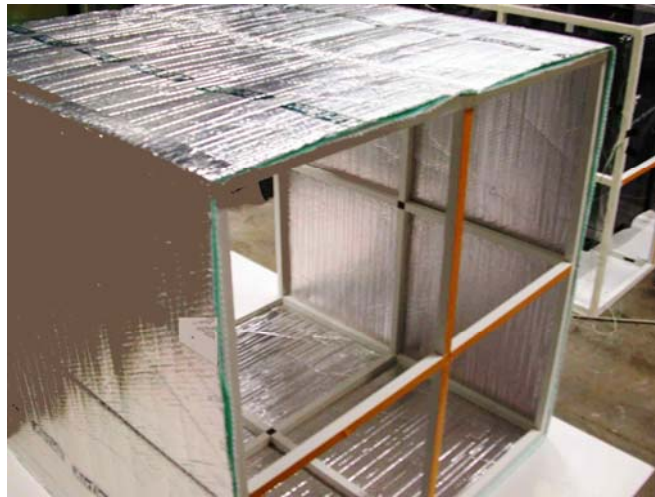


Photo 3 –Vue du cube intermédiaire supportant la barrière thermique réfléchissante.

Des renforts en croix rigidifient les matériaux trop souples. Un troisième cube intermédiaire est ainsi réalisé. Il vient s'insérer entre les 2 autres cubes pour créer les 2 lames d'air. Il repose sur des entretoises faites de polystyrène extrudé (surface 25 cm²) et de hauteur adaptée à l'épaisseur des lames d'air. Les barreaux de PVC servant de squelette au cube intermédiaire constituent des obstacles à l'écoulement de convection pouvant être créé dans les lames d'air. Ces cadres en PVC apportent, sur la convection, un effet comparable aux liteaux de montage des complexes dans les bâtiments réels. Leur effet serait plutôt d'augmenter les échanges convectifs par effet de bord d'attaque [3]. Leur effet sur la conduction, à travers les ponts thermiques ainsi obtenus, est négligeable. Bien que 10 fois plus conducteurs que l'air, les carrés de PVC présentent une section de passage du flux thermique environ 100 fois moins importante que la lame d'air d'une part, ils sont aussi beaucoup moins conducteurs de la chaleur que les liteaux d'autre part, ils constituent donc un bon compromis pour simuler un comportement réel, d'autant plus que les cavités ainsi créées sont de la même taille que les cavités réelles.

La résistance thermique du complexe

La résistance thermique globale R du complexe (m².K/W) est évaluée à partir de la relation :

$$R = S \times \Delta T / P \text{ (m}^2\text{.K/W)} \quad (1)$$

Dans cette expression, ΔT représente la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du complexe et S , la section de passage du flux de chaleur P traversant le complexe de façon uniforme (densité de flux constante dans le temps et identique en tous points).

La grandeur P (W) représente donc la puissance électrique moyenne dissipée dans le cube intérieur. Sa mesure s'obtient à partir de l'évaluation des puissances électriques introduites de façon permanente dans le cube chauffant. Les tensions adaptables et régulées, alimentant les 2 ventilateurs (toute l'énergie des ventilateurs est dissipée finalement en chaleur) et les films chauffants, ainsi que les intensités des courants, sont mesurées aux bornes de deux shunts étalonnés de 0,1 Ω .

Dans ce type de dispositif, c'est seulement à l'état stationnaire que toute la chaleur introduite au sein du cube intérieur franchit le complexe d'isolation à tester. Le reste du temps, une partie de cette chaleur est stockée dans la masse thermique embarquée. Les expériences sont donc conduites sur des durées dépassant systématiquement 24 h et c'est au cours des dernières heures que sont recueillies les valeurs servant à l'évaluation de la résistance.

Par ailleurs, deux sortes de fuites peuvent, malgré tout, être identifiées dans ce dispositif. D'une part, de la chaleur traverse les ponts thermiques créés par les petites entretoises en polystyrène extrudé servant de supports aux différents cubes. Ce flux de chaleur est pratiquement identique à celui qui serait dû à l'air que le matériau isolant remplace, la fuite est donc négligeable. D'autre part, le faisceau de thermocouples provenant des zones chaudes et traversant les parois, constitue lui aussi un pont thermique possible. Ce pont induit un flux de chaleur négligeable car inférieur à 1/10 W pour un écart de température de

10 °C et pour 64 thermocouples traversant le complexe. L'erreur relative sur la puissance injectée a finalement été estimée à 5 %.

Dans ces essais, la section de passage du flux de chaleur a été prise égale à la surface médiane du complexe, soit 6,9 m². Certaines normes considèrent la surface intérieure du complexe, la différence sur les 2 estimations peut atteindre 13 %.

La différence de température ΔT entre l'intérieur et l'extérieur du complexe a été obtenue à partir de la relation suivante :

$$\Delta T = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{Néch} \sum_{j=1}^{Néch} T_{cube\ int_{i,j}}(t) \right) - \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{Néch} \sum_{j=1}^{Néch} T_{cube\ ext_{i,j}}(t) \right) \quad (2)$$

Cette expression fait ressortir la moyenne spatiale, sur les 6 faces de chaque cube, des moyennes temporelles. Ces dernières sont prises sur Néch échantillons régulièrement répartis dans le temps avec un pas de temps de l'ordre de 30 s, typiquement Néch est de l'ordre 3000. Les moyennes sont donc faites sur plusieurs heures et l'erreur absolue sur cette valeur ne dépasse jamais $\pm 0,2$ °C.

Cette expression (2) intègre les petites hétérogénéités de température sur chacune des faces des 2 cubes sur lesquelles les mesures sont faites. Pour le cube intérieur, du fait du brassage important de l'air par les 2 ventilateurs et de la grande surface d'émission de chaleur, les différences de température entre les faces restent toujours inférieures au degré (pour les cas les plus défavorables). Pour le cube extérieur métallique, placé dans le vent d'une soufflerie, les différences entre faces ne dépassent pas 0,5 °C. Des écarts plus importants seraient le signe d'un défaut de montage (par exemple un court circuit créé suite à la disparition d'une lame d'air) ou d'une grande disparité de transfert de chaleur dans les lames d'air.

De ces estimations d'incertitudes de mesure, il résulte que l'erreur relative sur la valeur de R se situe toujours dans une fourchette comprise entre 6 et 8 %.

La résistance thermique variant en fonction du niveau de température des essais d'une part et en fonction de la puissance injectée dans le système à travers les échanges radiatifs d'autre part, si l'on veut comparer différents complexes entre eux, il faut donc mesurer les résistances thermiques pour un même écart de température entre les 2 cubes, autour d'une même température moyenne.

Échelle de valeurs de résistances thermiques

Les résistances thermiques de complexes peuvent être encadrées par 2 valeurs extrêmes. Le cas d'isolation le plus défavorable, correspondant à une résistance thermique minimale, est obtenu pour un complexe sans matériau intermédiaire, c'est-à-dire avec la seule présence d'une lame d'air de 72 mm d'épaisseur pouvant se mouvoir entre les 2 cubes. Dans cette situation, de la convection naturelle prend naissance dans cet interstice. Elle engendre des circulations globales autour du cube intérieur et des cellules secondaires entre les faces du cube intérieur et celles du cube extérieur. Il en résulte un transfert de chaleur important. A cet échange convectif, se rajoute évidemment l'échange radiatif entre les parois des 2 cubes qui présentent de forts pouvoir émissifs (émissivités $0,93 \pm 0,02$ et $0,97 \pm 0,02$ respectivement).

Cette configuration a été testée, elle correspond au cas dit « essai à vide ». Il faut alors injecter une puissance de l'ordre de 400 W pour obtenir un écart de température moyen de 10 °C entre les 2 cubes étanches. On retrouve, au passage, qu'une lame d'air d'environ 7 cm de large constitue un très mauvais isolant thermique car elle se met en mouvement transportant de grandes quantités de chaleur depuis la paroi chaude, vers la paroi froide.

La résistance thermique maximale correspond au cas d'une lame d'air unique, mais imaginaire car l'air est au repos et les 2 cubes intérieur et extérieur présentent des faces en vis-à-vis possédant une émissivité nulle. Les valeurs choisies pour ce calcul de référence d'échange purement conductif sont donc : $\lambda = 0,025$ W/(m.K) ; $e = 0,072$ m ; ce qui donne une valeur limite égale à 2,88 m².K/W.

2.1.1.2 Test de complexes

Pertes thermiques pour différents complexes

Différents complexes ont été réalisés et testés et pour différentes puissances injectées, les résultats bruts concernant les différences de température entre les 2 cubes sont indiquées sur la figure 3.

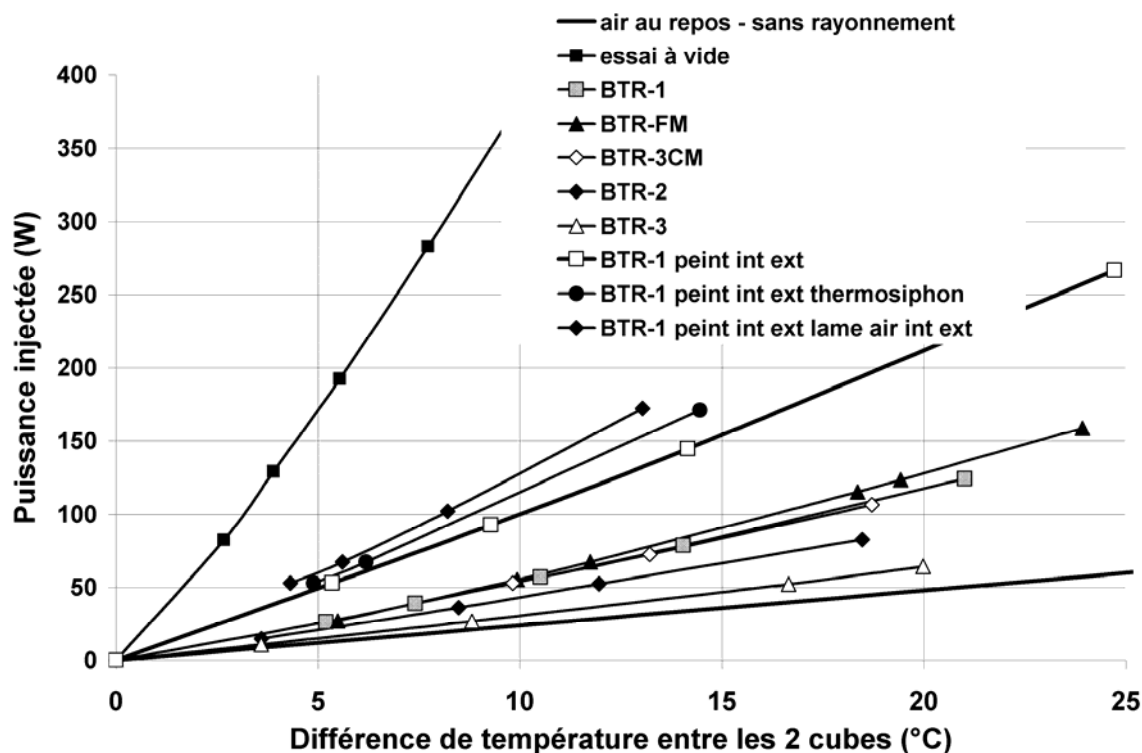


Figure 3 – Comparaison des pertes thermiques pour différents complexes.

Les points expérimentaux se retrouvent bien dans un secteur angulaire limité, en bas, par la courbe théorique donnant la puissance dissipée dans le cas d'une lame d'air en conduction pure et, en haut, par la courbe (courbe essai à vide) donnant la puissance mesurée pour la configuration sans matériau, soit une seule lame d'air en mouvement et un transfert radiatif maximal entre parois. La courbe BTR-FM est obtenue pour un complexe formé avec un double film mince réfléchissant, d'épaisseur 50 μm et d'émissivité de $0,08 \pm 0,05$. Le résultat démontre que le fait de diviser la lame d'air unique initiale de 72 mm en deux lames d'épaisseurs identiques, par une simple paroi réfléchissante, diminue pratiquement de moitié les puissances nécessaires pour atteindre un même écart de température.

Des complexes réalisés à partir de matériaux minces (d'épaisseur de l'ordre de 12 mm) trouvés sur le marché se situent sur des courbes très voisines de la précédente. Ceci démontre que ce type de produits, même s'ils piègent de l'air, leur épaisseur est trop faible et leur conductivité effective trop grande pour améliorer la résistance thermique. Lorsqu'on augmente encore l'épaisseur du produit jusqu'à environ 3 cm, différents comportements sont possibles (courbe BTR-2 et courbe BTR-3CM). L'un voit un échauffement moindre du cube intérieur car constitué d'un milieu poreux disposé en couches successives qui présentent une conductivité effective faible, l'autre n'apporte pas d'amélioration car des ponts thermiques internes aux produits ont été créés par la disposition du matériau. Un produit encore plus épais (5 cm) constitué de panneaux de polystyrène extrudé recouvert de fines feuilles métalliques réfléchissantes et ne laissant par contre que 2 minces lames d'air de chaque côté, donne un résultat proche du cas idéal (courbe BTR-3). Les produits possédant des parois non réfléchissantes (parois peintes avec une peinture noire par exemple : BTR-1 peint int ext) nécessitent des puissances plus importantes pour obtenir le même écart de température. C'est encore aggravé pour des complexes pour lesquels les lames d'air sont

ventilées (BTR-1 peint int ext lame air int ext). Dans ce cas des ouvertures pratiquées dans le cube extérieur et dans le produit au niveau du plafond et du plancher créent des thermosiphons qui induisent des fuites thermiques.

Tous les complexes testés constituent en fait des cubes intermédiaires entourant complètement le cube intérieur. Les échanges convectifs directs entre le cube intérieur et le cube extérieur sont ainsi bloqués. Il subsiste quand même les échanges convectifs entre la lame d'air intérieure et le matériau intermédiaire, puis le transfert conductifs dans le produit lui-même et, enfin, l'échange convectif dans la lame d'air extérieure (3 résistances thermiques en série). Parallèlement, subsistent aussi les transferts radiatifs entre parois (cube intérieur – paroi intérieure du produit, paroi extérieure du produit – cube extérieur). Bien évidemment, les pertes thermiques les plus faibles sont obtenues pour les complexes constitués de matériaux épais, de faible conductivité thermique et possédant des émissivités petites sur chaque face (BTR-2, BTR-3), comme il sera précisé plus loin.

Influence de l'émissivité de paroi

Différents essais ont été entrepris avec le même complexe, d'épaisseur de l'ordre de 12 mm, monté sur un cube en carré de PVC comme indiqué plus haut et recouvert sur les faces intérieures et/ou extérieures de matériaux fortement émissifs (une peinture noire possédant une émissivité voisine de $0,93 \pm 0,02$ ou encore une feuille de papier noir mat, collée en quelques points sur les faces du cube extérieur). La figure 4 présente les résultats des mesures d'efficacité pour différents écarts de température entre les 2 cubes. L'efficacité est définie comme étant le rapport :

$$E = \frac{R(\text{complexe}) - R(\text{essai à vide})}{2,88 - R(\text{essai à vide})} * 100 \quad (2)$$

Elle est maximale lorsque le complexe se rapproche du cas idéal l'air au repos sans rayonnement de parois, elle est nulle si le complexe se comporte comme dans le cas sans produit intermédiaire et un rayonnement de parois maximal. Bien sûr les résistances sont exprimées en $m^2.K/W$.

Si l'on se focalise sur les valeurs interpolées pour un échauffement de $10^\circ C$ du cube intérieur, le complexe présentant des faces faiblement émissives ($\epsilon = 0,12 \pm 0,03$, courbe BTR-1) voit son efficacité initiale passer d'environ $41 \pm 8 \%$ à une valeur de $33 \pm 7 \%$ si sa face intérieure devient fortement émissive après application d'une peinture (courbe BTR-1 peint int), puis à $19 \pm 3 \%$ lorsque les 2 faces sont peintes en noir (courbe BTR-1 peint int ext). C'est la résistance radiative qui diminue systématiquement lorsqu'on augmente l'émissivité des parois. Ce résultat est à rapprocher d'un comportement de produit vieillissant, avec un encrassement des surfaces réfléchissantes. Le cas du matériau recouvert d'une feuille noire montre que l'émissivité équivalente d'une surface composée d'un film de grande émissivité, non adhérent complètement avec une surface de basse émissivité, conduit à une émissivité globale intermédiaire entre les deux. Cependant, même avec des complexes de basse émissivité, l'efficacité n'atteint pas 40 à 50 %. Les résistances thermiques radiatives sont en parallèle avec les résistances conducto – convectives dans les lames d'air. Ces résultats montrent ainsi que les lames d'air, d'épaisseur environ 3 cm, ne sont pas au repos et contribuent à cette mauvaise efficacité d'ensemble.

Influence du produit intermédiaire

Une série d'essais a permis de mettre en évidence un comportement intéressant, fonction de l'épaisseur du produit intermédiaire entre les lames d'air et de sa constitution. Différents complexes possédant des parois d'émissivité voisine mais d'épaisseur de plus en plus grande, sont testés et, sur la figure 4, les résistances thermiques mesurées sont directement comparées.

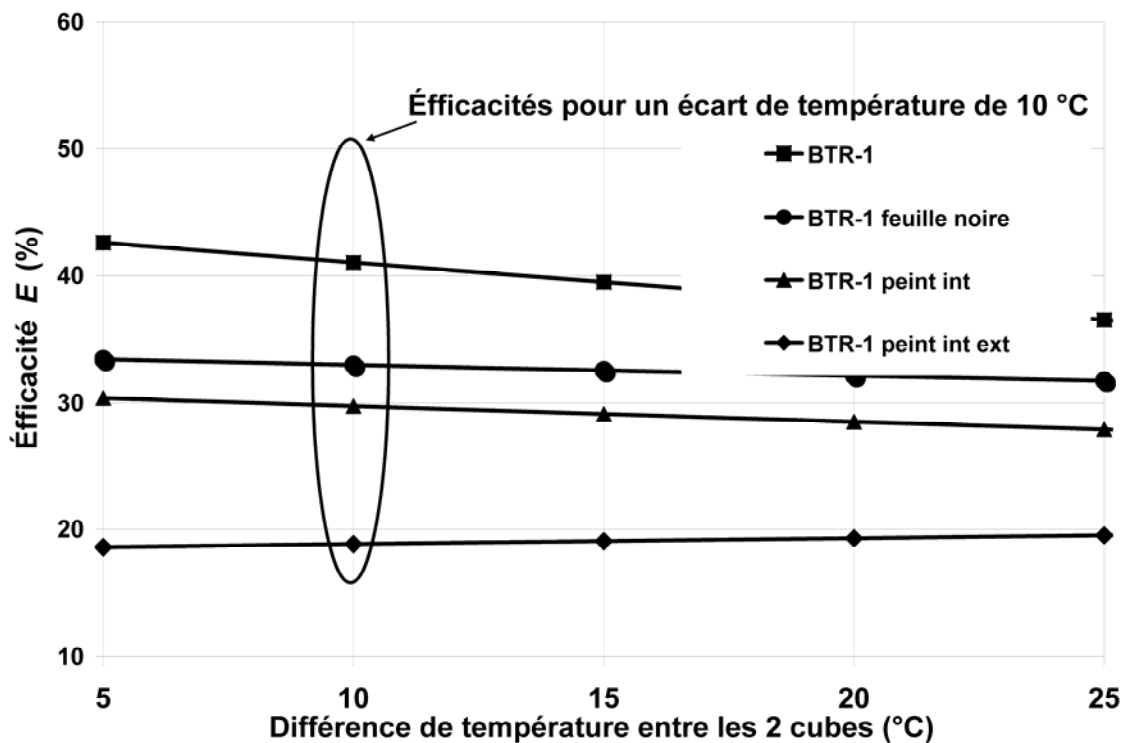


Figure 4 – Influence de l'émissivité des parois sur l'efficacité du complexe.

Pour les complexes possédant des produits intermédiaires même de très faible épaisseur, constitués d'empilements de feuilles de mousse plus ou moins conductrices de la chaleur ou emprisonnant des fines lames d'air (courbe BTR-1, courbe BTR-FM), on obtient une résistance thermique proche de la moitié de la résistance maximale (courbe air au repos, rayonnement nul). Pour les complexes faits de produits plus épais, de l'ordre de 2 à 3 cm d'épaisseur, laissant donc des lames d'air plus minces de chaque côté, la résistance thermique atteint seulement $1,6 \pm 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (courbe BTR-2). Enfin, dans le dernier cas pour lequel le cube intermédiaire est réalisé directement à l'aide de panneaux de polystyrène extrudé de 5 cm d'épaisseur, recouverts de feuilles métalliques de basse émissivité sur leurs 2 faces (courbe BTR-3) et ne laissant subsister que de très minces lames d'air, on obtient une résistance thermique globale de $2,25 \pm 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. La résistance thermique semble augmenter plus vite que l'épaisseur de la barrière isolante centrale. On peut donc en déduire que le mouvement de convection naturelle dans les lames d'air de faible épaisseur est très réduit. Il se pourrait même que l'on assiste à un changement de régime convectif caractérisé par une bifurcation supercritique de type convection de Rayleigh-Bénard, notamment dans les lames d'air horizontales situées au plafond. On y est, en effet, très proche des valeurs critiques des paramètres caractéristiques pour ce changement de régime [8]. En diminuant l'épaisseur des lames d'air au plafond, on passerait donc d'un régime de convection cellulaire à un régime conductif pur faisant chuter brusquement le transfert convectif. Les lames d'air du plancher sont certainement toujours en régime conductif pur car la stratification y est stabilisante. Attention, si les lames d'air sont trop minces, la conduction est alors trop grande et l'efficacité diminue. Toutefois, ce comportement n'apparaît pas pour le produit intitulé BTR-3CM qui, pourtant, présente une épaisseur voisine de 3 cm (Figure 5, courbe BTR-3CM) car, très probablement, l'absence de convection est compensée par une trop grande conduction, au sein du matériau composite lui-même, due à des ponts thermiques internes créés par de la matière conductrice en contact avec les 2 faces.

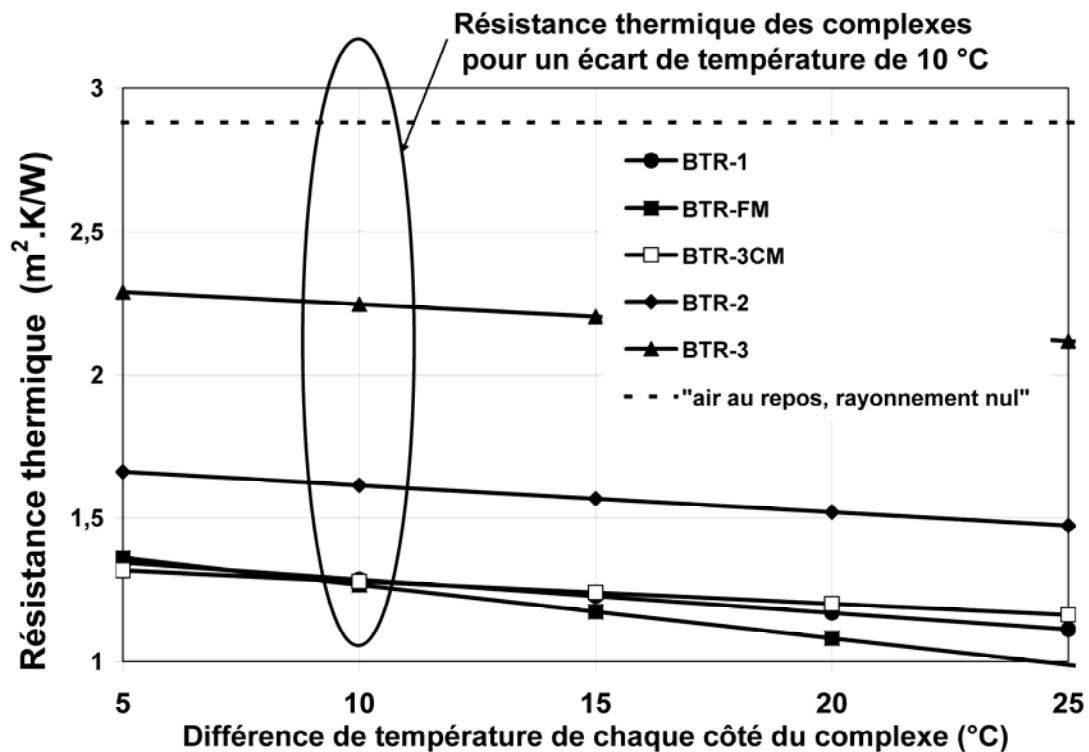


Figure 5 – Influence de l'épaisseur de la barrière réfléchissante intermédiaire.

Dans les parois verticales, on n'observe pas ce changement de régime. Il n'existe pas de bifurcation entre le régime conductif et le régime convectif stationnaire. Seules existent des bifurcations de Hopf qui se produisent probablement pour des écarts de température plus élevés. Et ces dernières bifurcations supposent qu'un écoulement stationnaire préexiste [9]. Ainsi les valeurs de résistance obtenues sont tout à fait comparables à celles que l'on obtiendrait sur des murs beaucoup plus grands car le cloisonnement dû aux liteaux créent des cavités qui restent toujours de taille pratiquement identique à celle obtenue dans le banc de laboratoire. Il ne peut y avoir d'effet d'échelle.

On peut même rajouter qu'en ce qui concerne la convection naturelle dans les lames d'air, il est fort probable que les conditions de laboratoire sont telles que les gradients horizontaux de température restent toujours faibles, ce qui n'est pas forcément le cas dans un mur réel soumis à un ensoleillement partiel par exemple. Il n'y aurait donc pas de condition favorable à la création de circulations tridimensionnelles importantes au sein même des lames d'air, celles-ci induisant des transferts convectifs parfois beaucoup plus grands que dans des configurations restant 2D. Les essais reproductibles et parfaitement contrôlés de laboratoire maximisent les valeurs des résistances thermiques.

2.1.1.3 Lames d'air non étanches

Dans le but de tester la sensibilité du banc, plusieurs configurations mettant en œuvre des lames d'air non étanches ont été examinées. Différents produits minces ou épais, faiblement émissifs ou fortement émissifs et le banc lui-même ont été modifiés pour créer des flux d'air entrants et sortants des lames du complexe. Un trou carré de 10 cm × 10 cm a été percé au centre du plafond un autre au centre du plancher du cube extérieur. De cette façon, sans rajout d'une ventilation forcée, un thermosiphon est créé dans la lame d'air extérieure, un effet cheminée peut s'installer et un débit d'air de ventilation plus ou moins important est provoqué [10]. Les efficacités des complexes sont alors mesurées sur plusieurs essais avec des puissances injectées différentes. Elles sont interpolées à un écart de température de 10 °C entre le cube intérieur et le cube extérieur et à 19 °C de température ambiante. Les résultats sont consignés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Efficacités E en pourcents de différents complexes avec des lames d'air intérieures et extérieures ventilées.

Configuration	BTR-3CM	BTR-2	BTR-1 peint
lames d'air étanches	40,8 %	53,2 %	18,8 %
Ventilation naturelle lame extérieure	39,8 %	52,8 %	18,8 %
Ventilation naturelle lames intérieure et extérieure	24,0 %	29,8 %	13,4 %
thermosiphon entre les 2 lames d'air			16,0 %

Une simple ouverture dans la lame d'air extérieure n'affecte pas trop l'efficacité du complexe. En effet, dans cette cheminée un peu particulière, les écarts de température sont faibles (le cube métallique extérieur est toujours à une température proche de la température ambiante extérieure). Les pertes de charge d'entrée et de sortie sont trop importantes : les sections verticales de passage de l'air après les 2 trous sont petites, $4 \times (10 \times 3 \text{ cm}^2)$ et le circuit aérodynamique impose des changements brusques de direction de l'écoulement. La vitesse en sortie de la cheminée reste donc faible, de l'ordre de 20 cm/s mesurée à l'anémomètre, ce qui entraîne un débit d'enthalpie très faible, voisin de 4 W. On est proche d'un régime de thermosiphon en conduction pure [11].

Lorsque 2 ouvertures identiques aux précédentes sont aussi pratiquées dans le produit monté sur le cube intermédiaire, on obtient alors 2 cheminées en parallèle, ouvertes sur l'extérieur. Dans ce cas, les écarts de température entre l'ambiance et l'air de la cheminée intérieure notamment étant plus importants que précédemment, les débits d'air sont plus grands et l'efficacité s'en trouve alors nettement diminuée, quel que soit le type de matériau (mince, épais, réfléchissant, noir). Les vitesses peuvent alors atteindre 50 cm/s sur le banc d'un mètre de hauteur et les écarts de température entre la sortie et l'entrée des cheminées peut dépasser 17 °C (pour 170 W de puissance et un écart de température de 20 °C entre le cube intérieur et le cube extérieur). Le cas du court circuit entre les 2 lames d'air s'obtient en obturant les ouvertures pratiquées dans le cube extérieur et en laissant les ouvertures dans le cube intermédiaire. Un thermosiphon s'installe encore, l'air montant dans la lame d'air intérieure plus chaude et redescendant dans la lame d'air extérieure plus froide. Un échange thermique supplémentaire se produit, diminuant sensiblement l'efficacité du complexe, même dans le cas d'un complexe peu performant. Cette situation correspond à une mauvaise étanchéité du produit lors de la pose. Dans tous les cas, ces essais montrent que si la lame d'air intérieure communique avec l'extérieur, l'efficacité du complexe, c'est-à-dire sa résistance thermique diminue sensiblement.

2.1.1.4 Conclusion pour la partie banc d'essai mesure globale

Le banc d'essai qui a été présenté est destiné à mesurer, sans étalonnage préalable, la résistance thermique globale de complexes. Il est basé sur le principe du fluxmètre, mis en œuvre de façon extrêmement simple en mesurant l'écart de température de chaque côté du complexe entourant, sans ponts thermiques, une source de chaleur de valeur connue.

Un soin particulier a été apporté à la définition du banc et aux procédures de mesure pour faire ressortir les spécificités des matériaux testés dans le domaine radiatif. Ce dispositif permet d'évaluer, sans ambiguïté possible, une résistance thermique globale du complexe et d'en déduire éventuellement un coefficient d'efficacité, en comparant les puissances dissipées à celles obtenues dans deux cas extrêmes (un cas mesuré d'efficacité nulle et un cas théorique idéal d'efficacité maximale).

Cette mesure permet d'examiner rapidement les performances globales d'un produit sans reproduire tout un ensemble de tests fastidieux (2 ou 3 tests suffisent). Cette caractérisation globale ne correspond pas directement à un usage typique du bâtiment pour l'isolation de parois verticales ou inclinées, toutefois les conclusions des tests peuvent s'extrapoler sans problème car les phénomènes physiques qui ont été identifiés et quantifiés sont, bien évidemment, identiques à ceux rencontrés dans un bâtiment bien que de taille plus grande que le banc test. Par ailleurs, aucune particularité n'a pu être mise en évidence concernant une thermique spécifique de ces complexes. Les lois fondamentales des transferts de chaleur sont bien respectées, en conséquence, les ordres de grandeur obtenus pour les résistances sont très voisins de ceux que l'on mesurerait si l'on faisait des essais sur un bâtiment réel.

Les résultats font ressortir, sans ambiguïté possible, que les complexes réalisés à l'aide d'une barrière thermique réfléchissante mince, positionnée entre 2 lames d'air d'épaisseur proche de 3 cm, possèdent une résistance thermique qui ne dépasse pas $1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Celle-ci s'améliore si l'épaisseur de la barrière centrale est légèrement augmentée, à condition d'utiliser des matériaux de conductivité thermique faible, pour atteindre $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Même l'efficacité d'un bon isolant, remplissant pratiquement tout l'interstice disponible de 72 mm d'épaisseur et voisine de 100 %, ne paraît toutefois pas suffisante pour conférer à ces complexes des propriétés d'isolation en rapport avec ce qui est le minimum requis aujourd'hui pour obtenir des performances intéressantes les parois des bâtiments. Toute détérioration des propriétés émissives des surfaces des matériaux constitutifs diminue cette efficacité. De même, toute ventilation diminue aussi cette efficacité.

2.1.2 Méthode comparative in situ

Objectif

L'objectif de cette méthode est de vérifier la cohérence entre les méthodes in situ et les méthodes conventionnelles normalisées. Elle consiste à comparer les consommations d'énergie en conditions climatiques réelles, entre deux cellules identiques dont l'une est isolée avec un PMR d'épaisseur égale à 2 cm et l'autre avec un isolant traditionnel de 20 cm d'épaisseur (résistance thermique proche de $5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). Le PMR étant mis en œuvre en aménageant deux lames d'air adjacentes de part et d'autre du produit pour une performance thermique optimale.

Les deux cellules sont chauffées pendant une saison d'hiver à une même température de régulation.

Un soin particulier a été porté pour l'étanchéité à l'air des cellules et des différents ponts thermiques.

Cellules d'essais

La cellule d'essais avec produit réfléchissant (cellule A), est construite de la même façon que la cellule isolée avec l'isolant traditionnel (cellule B).

Les deux cellules sont à ossature bois avec une surface intérieure au sol d'environ 13 m^2 . L'épaisseur des parois permet la mise en œuvre de procédé d'isolation de 200 mm d'épaisseur. La hauteur des murs sous toiture est de 2,5 m. Les murs pignons ont une hauteur sous faîtière de 3,3 m.



Figure 6 - Cellules A et B

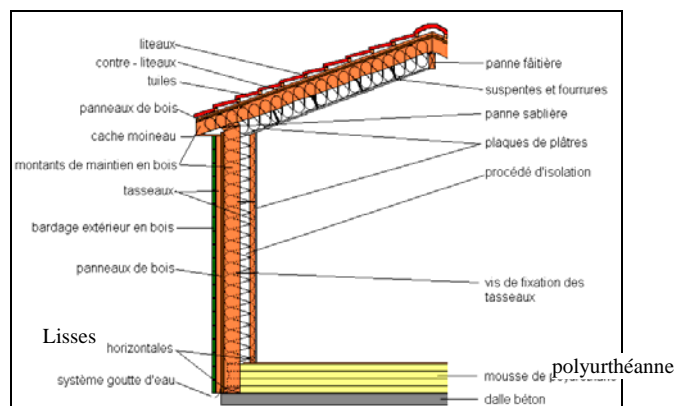


Figure 7 - Coupe schématique des parois

La répartition des températures au sein de l'air ambiant est mesurée à l'aide de sondes platine.

Le chauffage des deux cellules est assuré par des radiateurs à chauffage électrique identiques. Grâce à un système de régulation, les ambiances intérieures sont maintenues à la même température moyenne.

La mesure de la puissance électrique consommée par les radiateurs a été réalisée à l'aide d'un wattmètre. Ceci permet de mesurer la quantité d'énergie dissipée en fonction du temps. Les paramètres météorologiques ont été enregistrés, notamment la température extérieure, l'humidité relative, l'ensoleillement, la vitesse et la direction du vent.

Résultats d'essais

Les puissances de chauffage consommées dans les deux cellules sont représentées dans le graphique ci-après (figure 8) en fonction de la différence de température ΔT entre les deux ambiances intérieure et extérieure (différence entre la mesure effectuée par la sonde centrale des cellules et la mesure issues de données météorologique).

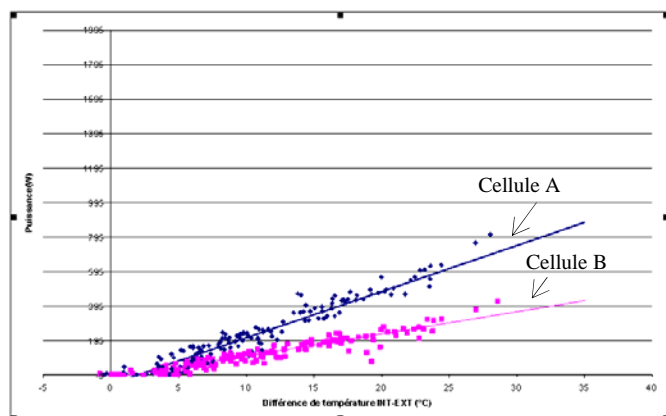


Figure 8 - Puissances en W consommées dans les deux cellules sur une saison d'hiver.

Conclusions

La comparaison entre l'énergie consommée dans la cellule A isolée par un PMR de 2 cm d'épaisseur avec 2 lames d'air étanches adjacentes, et la cellule B isolée par 20 cm d'un produit isolant traditionnel, révèle un rapport proche de 2. Autrement dit la cellule A consomme deux fois plus d'énergie que la cellule B pour une même température intérieure et ceci pour les mêmes conditions climatiques extérieures.

Compte-tenu des déperditions par les autres parois (sol, porte), par les ponts thermiques et par renouvellement d'air, cet écart de consommation correspond à l'ordre de grandeur des performances des produits mesurés selon les essais normalisés à la Boîte Chaude Gardée ou Calibrée.

Toutefois la somme des incertitudes de mesure est beaucoup plus élevée dans les mesures in situ quelque soit les précautions prises. On cite notamment les incertitudes sur :

- les déperditions par les autres parois (sol, porte), par les ponts thermiques et par renouvellement d'air,
- la contribution des apports solaires,
- les coefficients d'échange superficiels extérieurs et intérieurs, compte-tenu de la vitesse du vent, des gradients de température et de la gestion de l'air intérieur,
- les températures intérieures pour les mêmes raisons,
- les chaînes de mesure.

Par ailleurs il est difficile de transposer ces conditions d'essai (conventionnelles et particulières) à ce qui se passe dans une paroi de bâtiment occupé en conditions réelles, compte tenu des différences de géométrie et des conditions d'usage.

C'est pourquoi les mesures dites « in situ et comparatives » n'ont pas été retenues jusqu'à présent pour évaluer la performance thermique des produits d'enveloppe de bâtiment.

2.2. Simulation numérique

Les travaux expérimentaux présentés précédemment ont montré : l'impact sur la conductance de la réflectivité du matériau, l'influence respective des lames d'air associées aux PMR et la variation de la conductance thermique en fonction des positions relatives dans l'espace des PMR. On peut déduire de ces éléments que si les produits peuvent être qualifiés par leurs performances intrinsèques, il convient aussi de caractériser l'ensemble des parois, avec leur constitution et leur orientation propres. Il est ainsi possible d'établir la résistance thermique des parois intégrant de tels matériaux par simulation.

La méthodologie de calcul consiste à découpler les différents phénomènes thermiques intervenant dans une paroi complexe intégrant un produit mince réfléchissant (figure 10).

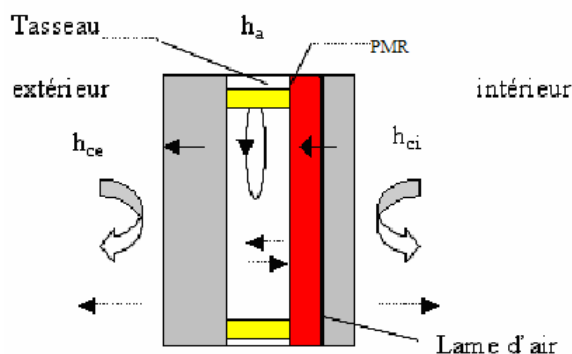


Figure 9. Paroi verticale d'un bâtiment intégrant un produit mince réfléchissant et une lame d'air

La figure 9 ci-dessus schématise une paroi intégrant un PMR. Les transferts par convection avec l'extérieur et l'intérieur sont caractérisés respectivement par h_{ce} et h_{ci} . Au sein de la lame d'air il existe, en parallèle avec le transfert radiatif, soit des échanges conductifs, soit des échanges thermo-convectifs. La convection dans la lame d'air est caractérisée par le coefficient d'échange global h_a . Les transferts conductifs ont lieu notamment au niveau des ponts thermiques dus aux quadrillages et éventuels tasseaux ou montants délimitant les lames d'air.

2.2.1 La convection naturelle dans les lames d'air

L'étude des lames d'air a fait l'objet de travaux de recherche afin de mieux comprendre les phénomènes thermiques de convection naturelle qui s'y développent. Plusieurs corrélations ont été élaborées dans les publications suivantes, [12], [13], [14], [15] [16] et [17]. Ces auteurs ont majoritairement travaillé sur des lames d'air verticales. El Sherbiny, Arnold et Yang ont eux examinés des lames d'air inclinées sans pour autant couvrir tous les angles d'inclinaison.

Une comparaison des différentes corrélations développées pour les lames d'air verticales a montré certains écarts (Commentaire : ces écarts ne sont pas significatifs en absolu puisqu'ils ne modifient pas l'ordre de grandeur de la performance des parois) entre elles.

Enfin ces corrélations sont souvent limitées à des allongements inférieurs à 110.

Pour représenter l'ensemble des situations possibles dans le bâtiment, les résultats de la littérature ne sont pas suffisants, d'où le recours à la modélisation CFD pour compléter les travaux cités ci-dessus.

Cette simulation est réalisée à l'aide de l'outil Fluent. Elle couvre tous les angles d'inclinaison allant de 0° (lame horizontale chauffée par le bas) à 180° (lame horizontale chauffée par le haut). De plus, plusieurs allongements sont représentés allant de 5 à 200 ainsi que des écarts de températures entre paroi froide et paroi chaude allant de 1 K à 50 K.

La figure 10 présente les résultats de simulations pour différents angles et les compare aux corrélations de la littérature dans leur plage de validité. La lame d'air simulée a un allongement de 20 et un écart de température de 5 K.

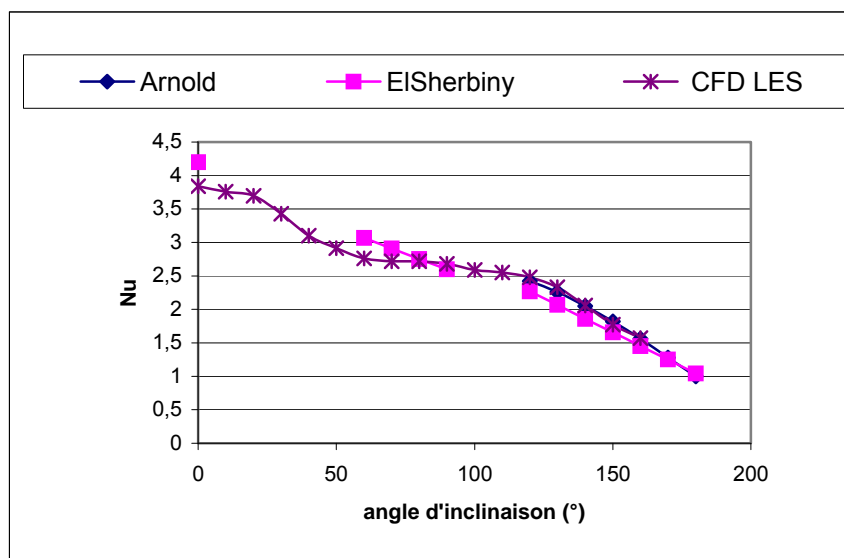


Figure 10 – Résultats de simulations et corrélations pour une lame d'air inclinée

Dans les configurations de montage courantes, verticales ou horizontales, la lame d'air est formée par un quadrillage en tasseaux amenant à des allongements typiques variant entre 20 et 50. Dans le cas des lames d'air non ventilées, situées en toiture, des allongements très importants (de l'ordre de 200) peuvent être rencontrés.

La figure 11 montre l'effet de l'allongement sur le nombre de Nusselt (Nu) quand l'allongement passe de 20 à 200 dans le cas d'une lame d'air inclinée à 135° .

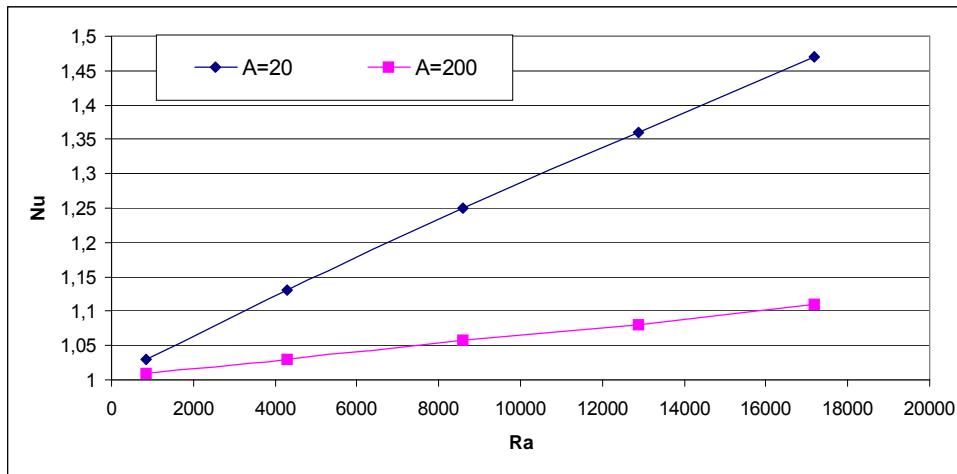


Figure 11 – Effet de l’allongement (lame d’air inclinée à 135°)

Le calcul montre une grande différence du Nu entre un allongement faible et un allongement important ; cet écart s’amplifie quand le nombre de Rayleigh (Ra) augmente. En effet, les lames d’air à très grands allongements présentent des mouvements de convection naturelle de plus faible amplitude.

2.2.2 La modélisation du complexe

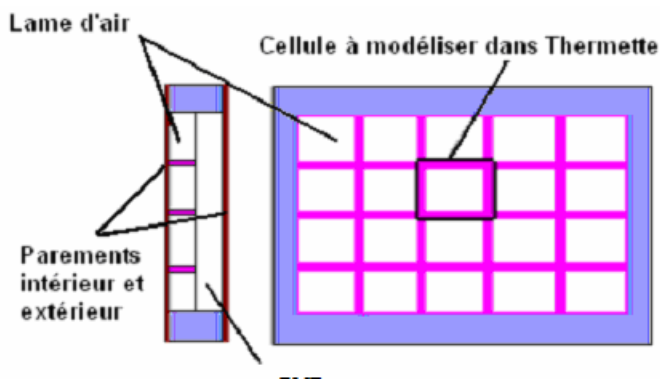


Figure 12. Schématisation du montage modélisé

Le système à modéliser est composé de plusieurs lames d’air entourées par un quadrillage et délimité d’une part par le parement intérieur du mur et de l’autre par la face réfléchissante du PMR (figure 12). Donc le système peut être considéré comme étant reproductible et la cellule unitaire comportant une seule cavité d’air est représentée dans ‘Thermette’ (outil de modélisation de réseaux thermiques développé par le CEP).

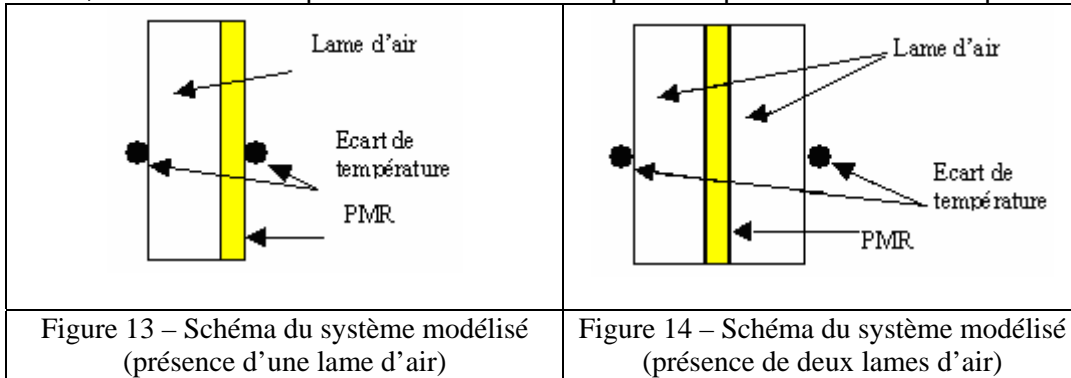
Ce modèle numérique détermine la résistance thermique de la lame d’air (seule ou couplée à un PMR) non ventilée, d’épaisseur L et d’allongement A , intégrant une face peu émissive pour un écart de température ΔT de part et d’autre de cette lame. Dans ce modèle sont intégrés :

- d’une part, le coefficient d’échange de convection naturelle trouvé par modélisation numérique CFD pour chaque angle d’inclinaison et pour différents allongements de la lame d’air et,
- d’autre part, les facteurs de transferts radiatifs pour chaque émissivité prise en compte par Modray (outil de modélisation des échanges radiatifs entre objets au sein d’une enceinte développée par le CEP).

2.2.3 Résultats par configuration

La modélisation décrite ci-dessus est exploitée pour réaliser une étude paramétrique. Des fourchettes de résistance thermique correspondant à chaque configuration de montage et pour diverses propriétés radiatives des faces réfléchissantes du PMR sont obtenues. Les calculs sont effectués pour un complexe PMR intégrant une lame d’air d’épaisseur 20 mm et un allongement de 20 (figure 13). Le cas de deux lames d’air de 20 mm d’épaisseur et

d'allongement 20 est également étudié pour des parois verticales ou horizontales (figure 14). Le PMR considéré a une conductivité thermique de 0,05 W/m.K. Pour l'ensemble des simulations, un écart de température de 20 K est imposé de part et d'autre de la paroi.



L'étude paramétrique est effectuée pour une valeur de l'émissivité de la face réfléchissante du PMR variant de 0,01 à 0,5 (ce qui permet d'analyser la sensibilité de la résistance thermique au vieillissement du matériau et à la diminution de la réflectivité) et pour une épaisseur de PMR variant de 5 à 20 mm.

Paroi horizontale

Pour une paroi horizontale située en partie haute d'une construction (plancher de comble perdu, toiture en rampant...), deux cas de figure sont pris en compte en fonction du sens du flux. La figure 15 donne les résultats pour un flux montant (cas hivernal).

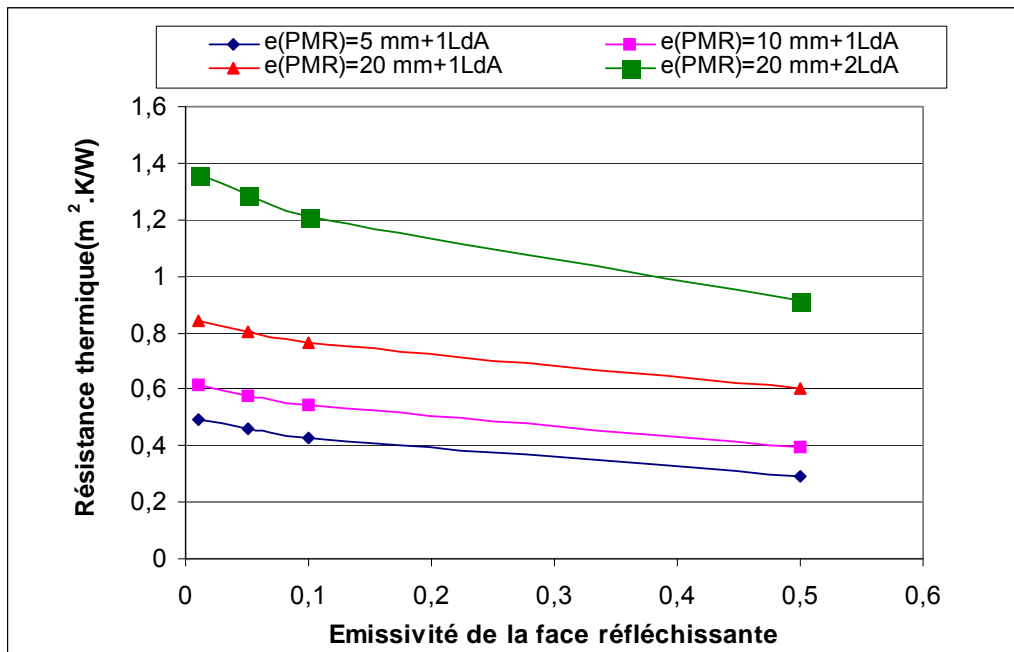


Figure 15 – Cas d'une paroi horizontale (période hivernale)

La figure 15 montre l'importance de la lame d'air. En effet, l'introduction d'une deuxième lame d'air permet d'augmenter la résistance thermique qui passe (pour une émissivité de 0,01) de 0,84 à 1,36 m².K/W.

La perte de la propriété émissive du produit a également un impact important. La dégradation de l'émissivité de 0,01 à 0,5 entraîne une baisse de résistance thermique de l'ordre de 40 %.

La figure 16 présente les résultats dans le cas d'un flux descendant (période estivale). Ce cas de figure est la situation la plus favorable puisque la convection dans la lame d'air est nulle.

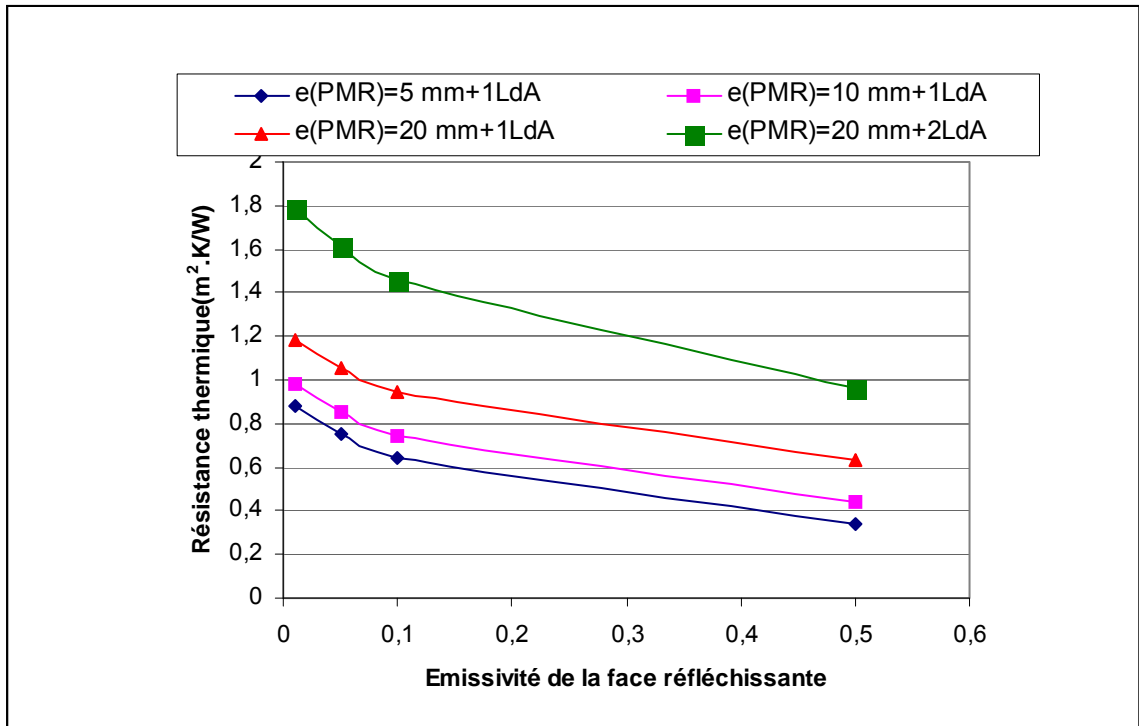


Figure 16 - Cas d'une paroi horizontale (période estivale)

Pour une épaisseur de 20 mm de PMR et pour une émissivité de la face réfléchissante de 0,01 et dans le cas de pose avec deux lames d'air, la résistance thermique du complexe vaut 1,36 m².K/W en période hivernale alors qu'elle est de 1,8 m².K/W en période estivale. On en déduit que l'amplification de la convection dans le cas du flux vertical ascendant n'est pas négligeable.

Paroi verticale

Dans le cas d'une paroi verticale, le sens du flux n'a pratiquement aucune influence sur le résultat. Les deux périodes estivales et hivernales sont ainsi quasiment équivalentes, à la petite différence près sur le flux radiatif net. La figure 17 donne les résultats de la simulation dans cette configuration.

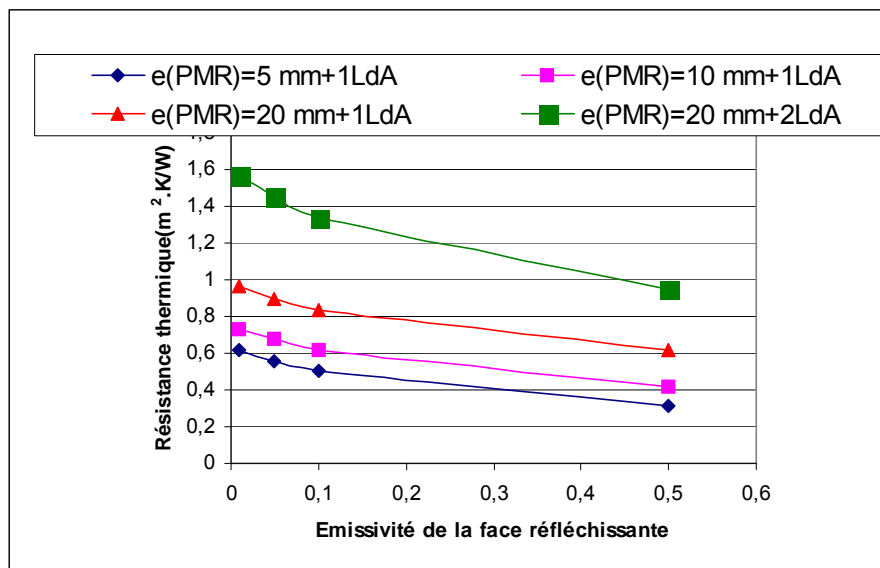


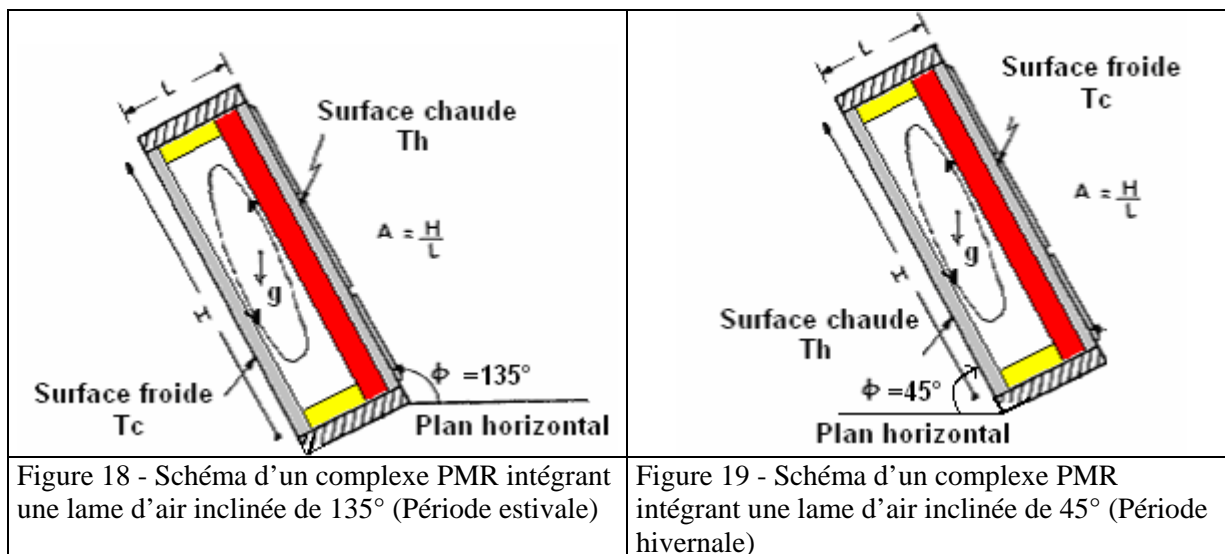
Figure 17 – Cas d'une paroi verticale

La figure 17 montre en effet que la valeur de la résistance thermique d'une paroi verticale se situe entre les situations hivernale et estivale d'une plaque horizontale; la paroi horizontale présentant les deux cas de figure extrêmes en convection naturelle.

La résistance thermique vaut $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ dans le cas d'intégration avec deux lames d'air et pour une émissivité de $0,01$.

Paroi inclinée

Dans le cas d'une paroi inclinée (toiture faisant un angle de 45°), deux situations sont simulées : la situation hivernale où le flux est descendant (45°) (figure 18) et la situation estivale où le flux est descendant (135°) (figure 19). Dans le cas des parois inclinées, il n'est pas techniquement aisé d'aménager deux lames d'air. Les simulations seront ainsi effectuées uniquement pour une lame d'air.



La figure 20 présente les résultats pour la situation hivernale.

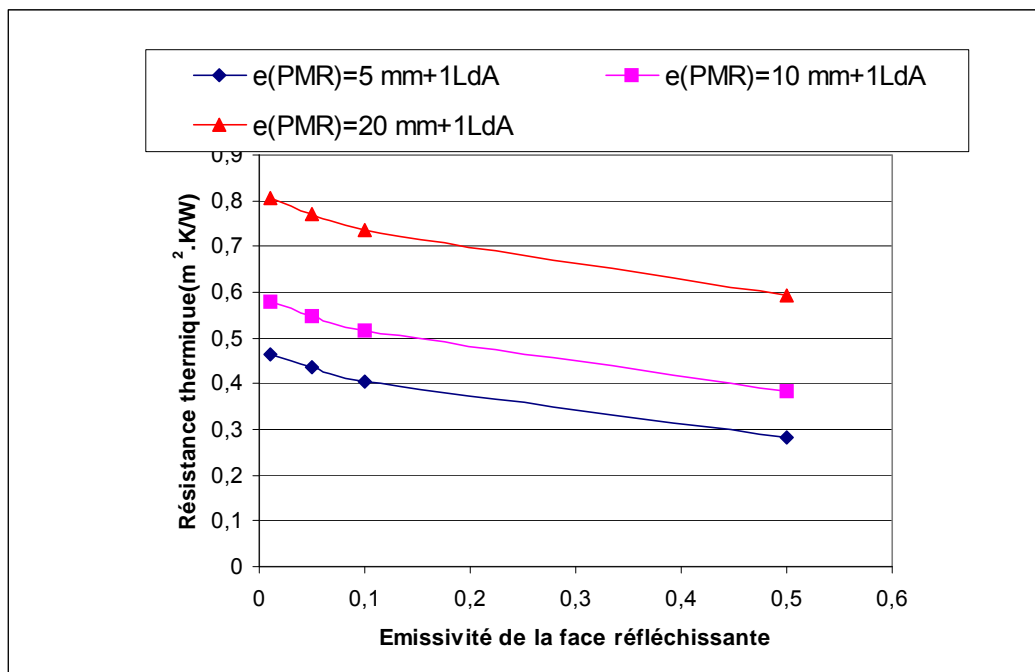


Figure 20 – Cas d'une paroi inclinée à 45° (situation hivernale)

Dans le cas de la situation estivale, la convection naturelle est fortement ralentie. Dans cette situation la résistance thermique est 37% supérieure à celle du cas hivernal. Les résultats de ces simulations sont présentés à la figure 21.

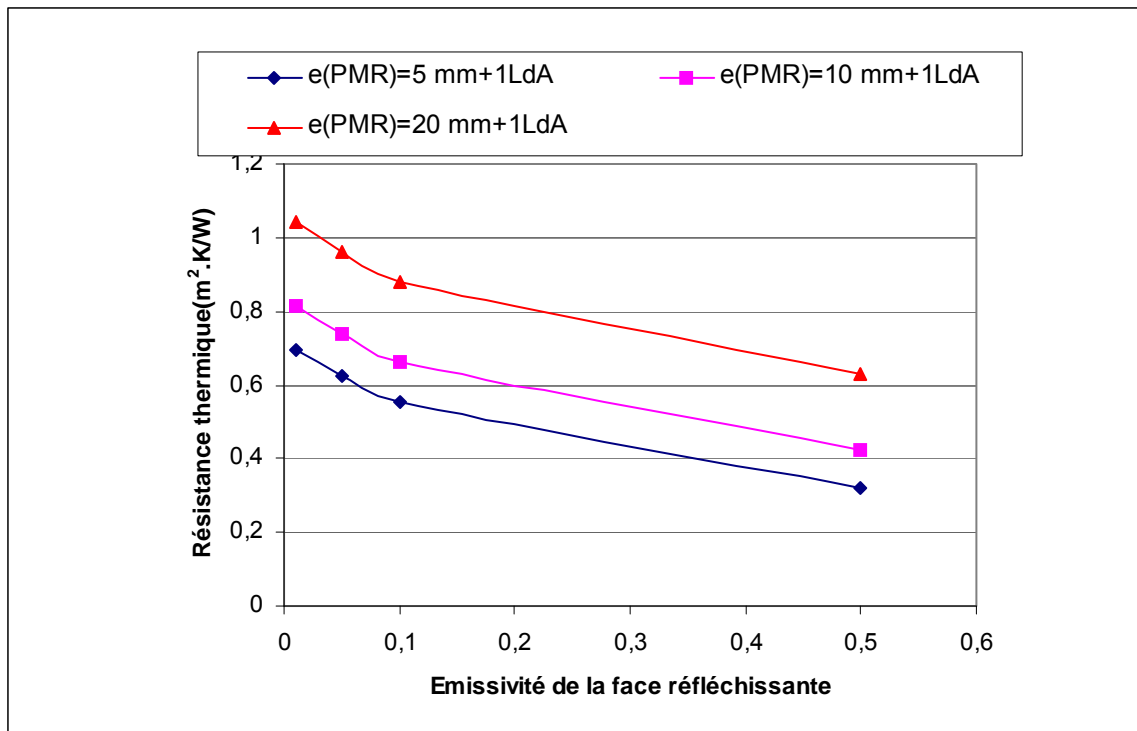


Figure 21 – Cas d'une paroi inclinée à 135° (situation estivale)

L'utilisation d'une lame d'air au lieu de deux lames d'air pénalise fortement la résistance thermique de la paroi inclinée. Celle-ci présente ainsi une résistance thermique de 0,8 m².K/W dans le cas hivernal et pour une émissivité de 0,01. Cette valeur correspond à la moitié de la valeur obtenue pour une paroi verticale comprenant deux lames d'air.

Comparaisons avec les normes européennes

Les résistances thermiques des lames d'air, déterminées par modélisation numérique, ont été comparées à celles calculées selon les normes européennes en vigueur et ceci en fonction de l'émissivité du film réfléchissant. La lame d'air considérée a 3 cm d'épaisseur. Trois configurations ont été étudiées selon le sens du flux traversant (figure 22):

- 1 - Lame d'air verticale avec flux horizontal
- 2 - Lame d'air horizontale ou légèrement inclinée avec un flux ascendant (lame d'air en toiture en conditions d'hiver)
- 3 - Lame d'air horizontale ou légèrement inclinée avec un flux descendant (lame d'air en toiture en conditions d'été)

Les allures des courbes sont similaires quelque soit la configuration.

Pour le flux horizontal les normes conduisent à des résistances thermiques majorées par rapport à celles déterminées par modélisation. L'écart moyen est de 0,05 m².K/W

Pour le flux ascendant la tendance s'inverse et c'est la modélisation qui donne les valeurs majorées de 0.02 m².K/W environ.

Enfin, il y a un très bon recouvrement entre les deux méthodes en cas de flux descendant.

La modélisation numérique permet d'affiner la méthode de calcul européenne par une prise en compte plus détaillée des phénomènes de convection et de rayonnement

dans les lames d'air en fonction de leur configuration géométrique. Néanmoins, l'écart entre les résultats reste faible et a peu d'impact sur la performance globale de la paroi.

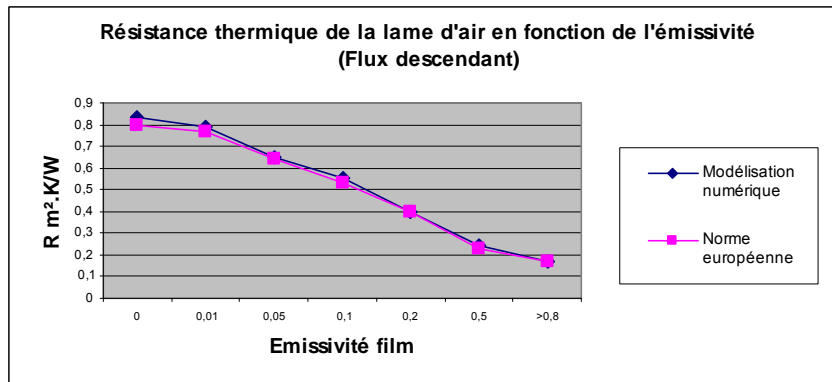
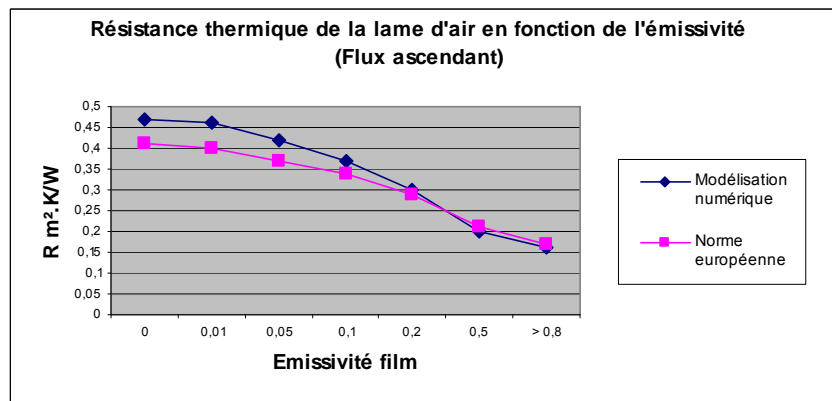
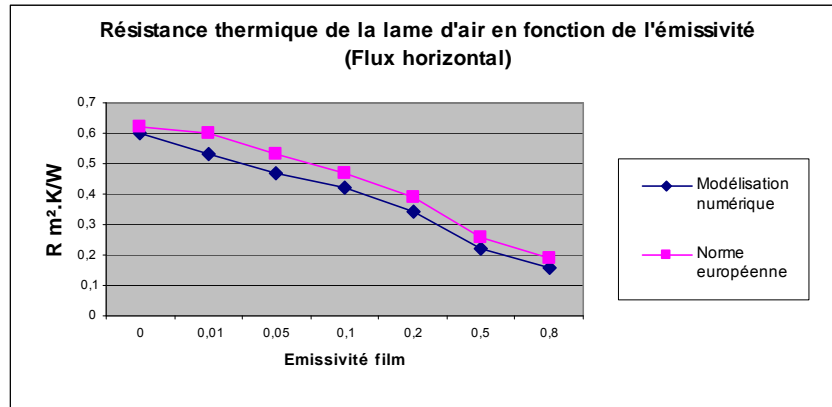


Figure 22 – Résistance thermique d'une lame d'air en fonction du sens du flux et de l'émissivité du film réfléchissant.

Conclusions pour la partie modélisation

Les simulations réalisées ont permis de couvrir la majorité des configurations géométriques et de sens du flux thermique. L'analyse de sensibilité montre une forte influence de l'émissivité de la face réfléchissante du PMR sur la valeur de la résistance thermique. Une dégradation de l'émissivité de 0,01 à 0,5 entraîne une baisse de 50 % de la résistance thermique de la lame d'air.

Les caractéristiques intrinsèques du PMR influent d'une façon non négligeable sur le résultat; ceci est en accord avec les résultats expérimentaux présentés dans la partie 1.

La paroi horizontale en situation estivale (chauffée par-dessus) présente la résistance thermique la plus élevée grâce à la stabilisation de la lame d'air due à la stratification favorable. Cette paroi intégrant deux lames d'air peut présenter une résistance thermique de 1,8 m².K/W pour une émissivité de 0,01. En période hivernale, cette paroi qui est chauffée

par-dessous présente les plus forts mouvements de convection, ce qui entraîne la baisse de la résistance thermique de 25 % par rapport à un flux descendant (période d'été pour une toiture).

La paroi verticale présente une résistance thermique pouvant atteindre 1,6 m².K/W dans le meilleur des cas (avec 2 lames d'air non ventilées).

Les parois inclinées ne pouvant pas intégrer deux lames d'air présentent les résistances thermiques les plus basses. En situation hivernale, la résistance thermique calculée pour une émissivité de 0,01 est de 0,8 m².K/W. En situation estivale, cette résistance augmente pour atteindre 1,05 m².K/W.

Ces simulations ont été faites dans le cadre d'hypothèses d'écoulements dans des plans verticaux. Dans certaines situations concrètes, des différences de température, même faibles, entraînent des gradients dans des directions normales aux directions habituelles, ce qui peut déstabiliser les solutions établies dans des plans verticaux pour orienter les écoulements dans des circulations d'air, en boucle, dans la troisième direction. Les transferts de chaleur sont alors augmentés. Les résultats des simulations 2D peuvent donc contribuer à une majoration des résistances thermiques réelles des lames d'air.

3. Conclusions générales

Suite aux communications contradictoires au sujet des produits minces réfléchissants et aux interrogations des consommateurs autour des vraies caractéristiques thermiques de ces produits, l'Ecole des Mines de Paris, le CNRS de Poitiers et le CSTB ont mené en 2006, avec le soutien de l'ADEME, des travaux de recherche afin d'apporter une réponse scientifique neutre à ce sujet.

Ces travaux ont porté aussi bien sur la simulation numérique que sur des mesures spécifiques pour la détermination de la résistance thermique des produits minces réfléchissants associés à une ou deux lames d'air adjacentes. Les résultats des travaux ont été ensuite comparés entre eux et aux valeurs obtenues conformément aux normes existantes, reconnues au niveau national, européen et international.

En première approximation, les résultats des différentes approches convergent entre eux et avec ceux obtenus par l'application des normes existantes reconnues, notamment les résultats des essais à la boîte chaude gardée ou calibrée.

Ces résultats confirment avant tout qu'il n'y a rien de mystérieux dans le fonctionnement des produits minces réfléchissants. Certes il y a une réduction des échanges thermiques par rayonnement due à la basse émissivité des films, mais son impact sur la résistance thermique totale de la paroi reste limité du fait de la persistance des échanges liés aux mouvements d'air.

L'approche scientifique par modélisation a permis d'affiner la connaissance des phénomènes de convection et de rayonnement dans les lames d'air munies de couches à basse émissivité. Les résultats de ces études serviront de base à l'amendement de certaines normes afin d'améliorer leur précision.

En période froide, la contribution maximale d'un PMR de 2 cm d'épaisseur, à une paroi déterminée selon les différentes approches et **dans les conditions les plus favorables** ne peut pas dépasser 2 m².K/W en résistance thermique.

Le produit réfléchissant seul ne contribue à cette résistance thermique qu'à hauteur de 20 à 40 % selon sa nature et sa mise en œuvre. Ses deux faces peu émissives procurent aux lames d'air adjacentes éventuelles une meilleure résistance thermique par la réduction des échanges thermiques par rayonnement.

Les lames d'air contribuent à cette résistance thermique à hauteur de 30 à 70 % selon la configuration de la paroi. La résistance thermique d'une lame d'air dépend des paramètres suivants :

La perméabilité à l'air,	Une lame d'air non étanche à l'air pourrait facilement perdre la totalité de sa résistance thermique.
L'émissivité <u>utile</u> des couches	Une dégradation de l'émissivité par vieillissement et/ou empoussièremment pourrait réduire de moitié la résistance thermique des lames d'air
Le gradient de température	La résistance thermique de la lame d'air augmente quand le gradient de température entre les ambiances chaude et froide diminue. L'amélioration maximale possible est de 15 % environ.
Le sens du flux traversant	En conditions d'hiver, une même lame d'air non ventilée est plus isolante en mur qu'en toiture. En toiture elle est plus isolante l'été (air quasi immobile) que l'hiver.
L'épaisseur de la lame d'air,	La résistance thermique de la lame d'air augmente avec son épaisseur jusqu'à une valeur proche de 2 cm. A partir de cette épaisseur, elle a tendance à se stabiliser voire à se dégrader à cause de l'amplification des mouvements d'air qui s'y développent.

Avril 2007

Références bibliographiques

- [1] Morillon, F. Bertin, F. Penot, Analyse du comportement de chambres d'essai pour meubles frigorifiques de vente, *Revue Générale du Froid*, n°963, pp. 21-24, 1996.
- [2] A.A. Quintela, A.R. Borges, F. Penot, Thermal diffusion from a surface mounted cube, *Second Asia-Pacific symposium on wind Engineering*, 26-29 June, Bejin, 1989.
- [3] Schlichting, *Boundary layer theory*, Mac Graw-Hill Book Company, 1968.
- [4] Ouvrage collectif coordonné par J.P Bardon et R. Javelas, *Mesure des températures de surface des matériaux semi-transparents*, ARC métrologie CNRS-ADEME, Messages Imprime Vite – Toulouse, 1994.
- [5] Yguel, F. Penot, Étude théorique de la conduction bidimensionnelle instationnaire dans un mur soumis à un flux radiatif uniforme, *Revue de Physique Appliquée*, vol. 17, p. 607-615, 1982.
- [6] Yguel, F. Penot, Transfert de chaleur instationnaire dans les murs verticaux d'un bâtiment, *Revue Générale de Thermique*, n°252, p. 973-981, Décembre 1982.
- [7] F Sacadura, coordonnateur, *Initiation aux transferts thermiques*, CAST, technique et documentation, 4ème tirage, p 145, 1993.
- [8] Zierep, H. Oertel, *Convective Transport and Instability Phenomena*, Verlag, 1982.
- [9] Benkhelifa, Contribution à l'étude expérimentale des bifurcations de convection naturelle dans une cavité en air différentiellement chauffée : influence de l'inclinaison, thèse de l'Université de Poitiers, 2006.
- [10] Penot, A-M. Dalbert, Convection naturelle mixte et forcée dans un thermosiphon vertical chauffé à flux constant, *International journal of heat and mass transfer*, vol. 26, n°11, p. 1639-1648, 1983.
- [11] Penot, J-L. Peube, Sur le régime de conduction aux petits nombres de Rayleigh dans le thermosiphon vertical, *Note aux C.R.A.S.*, T-292, n°13, Série II, p. 931-933, 1981.
- [12] ISherbiny, S. M., "Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Air Layers", Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1980.
- [13] Arnold, J. N., Catton, I., and Edwards, D. K., "Experimental Investigation of Natural Convection in Inclined Rectangular Regions of Differing Aspect Ratios", *Journal of Heat Transfer*, Vol.98, 1976, pp.67-71.
- [14] Yang, H., Zhu, Z., "Numerical Simulation of Turbulent Rayleigh-Benard convection", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.33, 2006, pp.184-190.
- [15] S.H. Yin, Natural convection in an air layer enclosed within rectangular cavities, *Int Journal of Heat Mass Transfer* 21(1978) p 307-315
- [16] Y. Zhao, *Proceedings of clima 2000 on a New set of Analytical correlations for predicting convective Heat Transfer in Fenestration Glazing cavities*, Brussels, 1997 p305-316
- [17] J.L Wright, H.Jin, K.G.T. Hollands, D.Naylor Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 889–904
- [18] NF EN ISO 6946 : Composants et éléments de bâtiment – Résistance thermique et coefficient de transmission thermique – Méthode de calcul.
- [19] NF EN ISO 10211, parties 1 et 2: Ponts thermiques dans les bâtiments – Calcul des températures superficielles et des flux thermiques.
- [20] Règles Th-U, version 2007 (Edition prévue en Février 2007) – Règles d'application de la RT2005
- [21] NF EN ISO 8990 : Composants de bâtiments et éléments de construction – Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire – Méthode de la boîte chaude gardée et de la boîte chaude calibrée.
- [22] NF EN 12664 et 12667: Matériaux pour le bâtiment - détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique.
- [23] ASTM C1224-01 : Standard Specification for Reflective Insulation for Building Applications