

**Modélisation de parois complexes
verticales et inclinées**

4.1 Introduction

Pour isoler les parois verticales du bâtiment en utilisant des PMR, il est nécessaire d'organiser une ou deux lames d'air de quelques centimètres d'épaisseur intercalée entre l'isolant et les parements intérieur et extérieur du mur pour permettre la réflexion du rayonnement. Contrairement à la pose en toiture où la ventilation est primordiale, une pose idéale pour l'isolation des murs exige des lames d'air non ventilées, étanches à l'air. Ces dernières doivent également conserver une épaisseur constante le long de la paroi.

Généralement, dans le cas de l'isolation des murs par l'intérieur, le PMR est agrafé sur un quadrillage de tasseaux en bois ménageant une ou deux lames d'air adjacentes au produit. Le cas de deux lames d'air est représenté sur la figure 4.1.

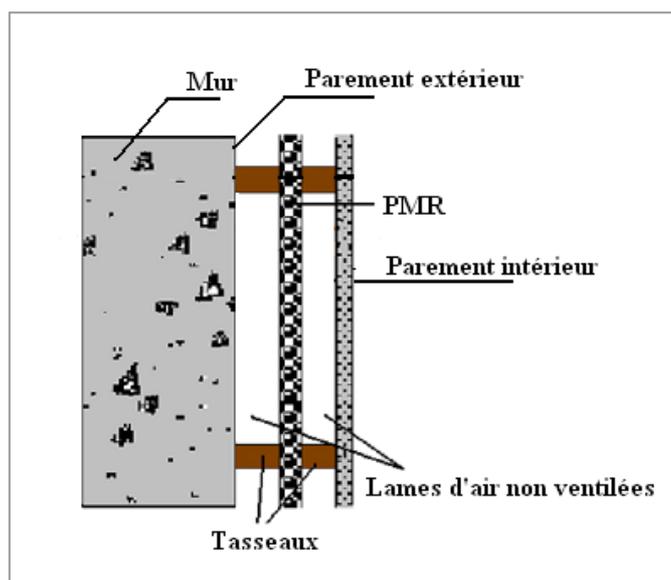


Figure 4.1 - Pose en mur (Cas de deux lames d'air)

Dans ce chapitre, une modélisation de parois verticales complexes est réalisée par découplage des phénomènes de transferts thermiques existant au niveau de l'ensemble de la paroi, puis assemblage des modèles dans un logiciel de modélisation de réseaux thermiques. Dans un premier temps, sont expliqués la méthodologie de découplage des phénomènes thermiques et le choix de la modélisation de type réseau thermique. Ensuite la construction du réseau thermique est présentée. En effet, le logiciel de modélisation des échanges radiatifs MODRAY calcule les facteurs de transferts radiatifs et l'outil de modélisation de réseaux thermiques THERMETTE permet de construire l'ensemble de la paroi complexe. En utilisant les résultats de l'étude de convection naturelle dans les lames d'air non ventilées obtenus au chapitre 2, un assemblage de modèles est ensuite réalisé dans THERMETTE en important les résultats des échanges radiatifs présents calculés dans MODRAY.

Les résultats du modèle sont exploités, interprétés et validés par des études expérimentales sur des boîtes chaudes calibrées, verticales et inclinées. En effet, les performances thermiques du PMR seul et couplé à une et deux lames d'air sont validées à la suite d'une étude expérimentale sur un calorimètre vertical construit au CEP. Ce dernier, incliné, est utilisé ensuite pour valider les performances thermiques d'un complexe incliné de 45° par rapport à l'horizontale et comportant un PMR couplé à une lame d'air.

Enfin, une conclusion sur les performances thermiques de parois verticales complexes est établie avec une détermination de la valeur de résistance thermique maximale que ces produits

peuvent atteindre une fois intégrés au bâtiment. L'impact des paramètres intervenant dans la résistance thermique du complexe sont également explicités.

4.2 Méthodologie de découplage des phénomènes thermiques

La méthodologie du découplage thermique a été utilisée essentiellement afin d'étudier séparément les transferts thermiques thermo-convectifs, radiatifs et par conduction ayant lieu au niveau du complexe mural.

La figure 4.2 schématise une paroi verticale intégrant un PMR et deux lames d'air non ventilées. Les transferts thermiques par convection avec l'extérieur et l'intérieur sont caractérisés respectivement par les coefficients d'échange convectif h_{ce} et h_{ci} . Au sein de la lame d'air il existe, en parallèle avec le transfert radiatif, soit de la conduction pure, soit de la thermoconvection. La convection dans la lame d'air non ventilée est caractérisée par le coefficient d'échange convectif h_{ca} , déjà étudié au chapitre 2. Les autres composants formant la paroi verticale sont sujets à la conduction ou la pseudo-conduction dans le cas des transferts thermiques au sein du PMR et à la conduction et au rayonnement au niveau des ponts thermiques dus aux tasseaux délimitant les lames d'air.

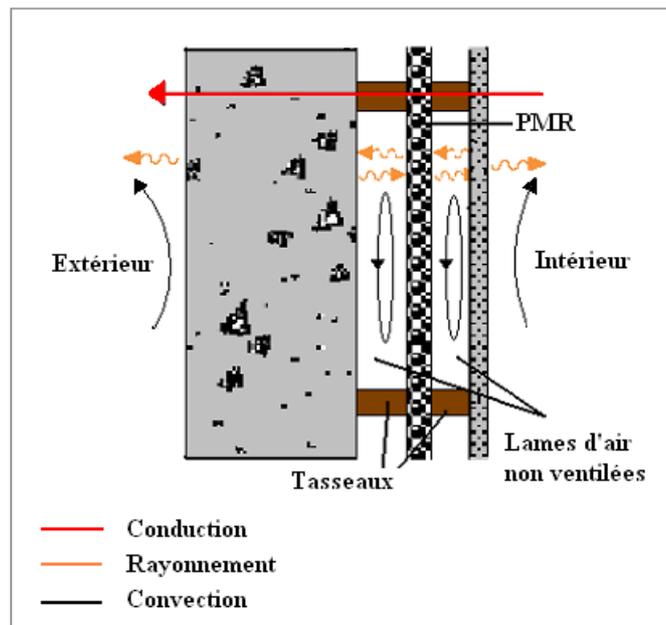


Figure 4.2 - Paroi verticale d'un bâtiment intégrant un PMR et deux lames d'air

Pour une paroi complexe composée d'un mur, d'une lame d'air non ventilée et d'un PMR, le montage équivalent des résistances thermiques est représenté sur la figure 4.3.

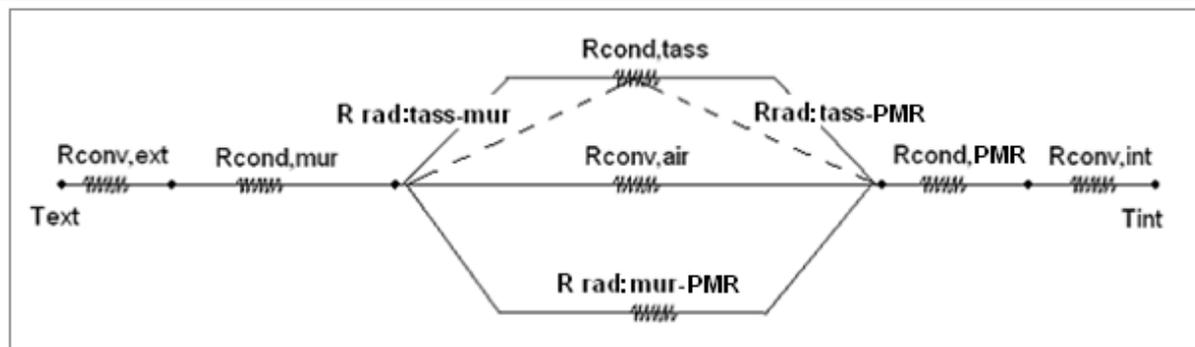


Figure 4.3 - Montage équivalent des résistances thermiques d'une paroi complexe (une lame d'air est représentée)

Les trois modes de transfert thermique existant sont résumés dans ce qui suit.

4.2.1 Les transferts thermo-convectifs

Les transferts convectifs avec l'extérieur et l'intérieur sont représentés respectivement par les résistances thermiques $R_{conv,ext}$ et $R_{conv,int}$. Ils sont généralement donnés par des corrélations présentes dans la littérature. Dans le modèle de paroi complexe développé, les parements extérieur et intérieur délimitant la paroi vont être soumis à des conditions de température et non à un échange convectif afin d'éviter toute erreur liée aux coefficients d'échanges convectifs utilisés.

Le transfert thermo-convectif au niveau de la lame d'air non ventilée a été défini dans le Chapitre 2. Il est représenté par une résistance thermique $R_{conv,air}$, cette dernière dépend des dimensions de la lame d'air, de son inclinaison (verticale dans le cas des parois murales) et du nombre de Rayleigh à l'intérieur de la cavité.

4.2.2 Les transferts radiatifs

Les transferts par rayonnement sont présents entre les différentes parois délimitant l'espace d'air confiné ; à savoir les tasseaux, le mur et le PMR. Les échanges radiatifs sont fonction de la géométrie et des émissivités de ces trois parois. Ils sont déterminés grâce au logiciel de modélisation des échanges radiatifs par facteurs de transfert MODRAY. Cette approche de modélisation permet d'intégrer facilement les échanges radiatifs dans le modèle thermique complexe.

4.2.3 Les transferts conductifs ou pseudo conductifs

Les transferts conductifs sont présents dans les parois homogènes formant le complexe à savoir le mur et les tasseaux. Le PMR qui peut être un matériau multicouches ou en feuille contenant des bulles d'air est sujet à plusieurs phénomènes de transferts thermiques. A cause de sa faible épaisseur et de sa contribution limitée à la résistance thermique globale du complexe, le choix dans ce travail est de représenter les transferts en son sein par une pseudo conduction équivalente. Ainsi, les résistances thermiques $R_{cond,mur}$, $R_{cond,PMR}$ et $R_{cond,tass}$ représentent ces trois composants. Ces résistances thermiques dépendent des propriétés intrinsèques ou équivalentes des matériaux utilisés.

4.3 Développement du modèle complexe de paroi

4.3.1 Description du solveur thermique THERMETTE

Pour représenter les échanges thermiques convectif, conductif et radiatif du système de paroi verticale et pour calculer les températures et les flux dans les différents composants du système, le solveur thermique THERMETTE [THE] est utilisé.

Ce logiciel de calcul thermique a été développé au Centre Energétique et Procédés de MINES ParisTech et permet une modélisation de systèmes thermiques en régime permanent ou dynamique. Ces derniers sont décrits dans le logiciel comme des réseaux de composants 1D (branches dans lesquelles la variation de la température se fait selon une dimension) et 0D (volumes à température uniforme) avec leurs interactions.

Un réseau THERMETTE est constitué des éléments essentiels suivants :

- Une sollicitation : c'est une grandeur qui, formellement, ne dépend que du temps, des températures ou d'autres sollicitations. Elle est généralement imposée au système
- Une branche : c'est un terme utilisé pour représenter un corps matériel, solide ou fluide, dans lequel la température varie selon une seule dimension de l'espace. Sa position dans le réseau est déterminée par ses extrémités qui sont des nœuds du réseau
- Un volume : c'est un terme utilisé pour définir un corps à température uniforme
- Un échange : il peut être défini entre branches, volumes et nœuds. Il est conductif, radiatif ou convectif.
- Un débit : c'est une circulation de matière qui peut être définie entre une branche et un volume ou entre deux volumes

4.3.2 Représentation des éléments du complexe de paroi

Le système à modéliser est composé de plusieurs lames d'air formées à partir des quadrillages de tasseaux. Pour la modélisation d'un complexe muni d'une seule lame d'air, cette dernière est délimitée par le PMR et le parement intérieur. Dans le cas de deux lames d'air, la deuxième est construite entre le parement extérieur et le PMR. Dans tous les cas, la lame d'air est délimitée par une paroi à face réfléchissante de très faible émissivité. La figure 4.4 représente deux lames d'air construites de part et d'autre du PMR dans un système de mur en maçonnerie isolé avec de l'isolant traditionnel.

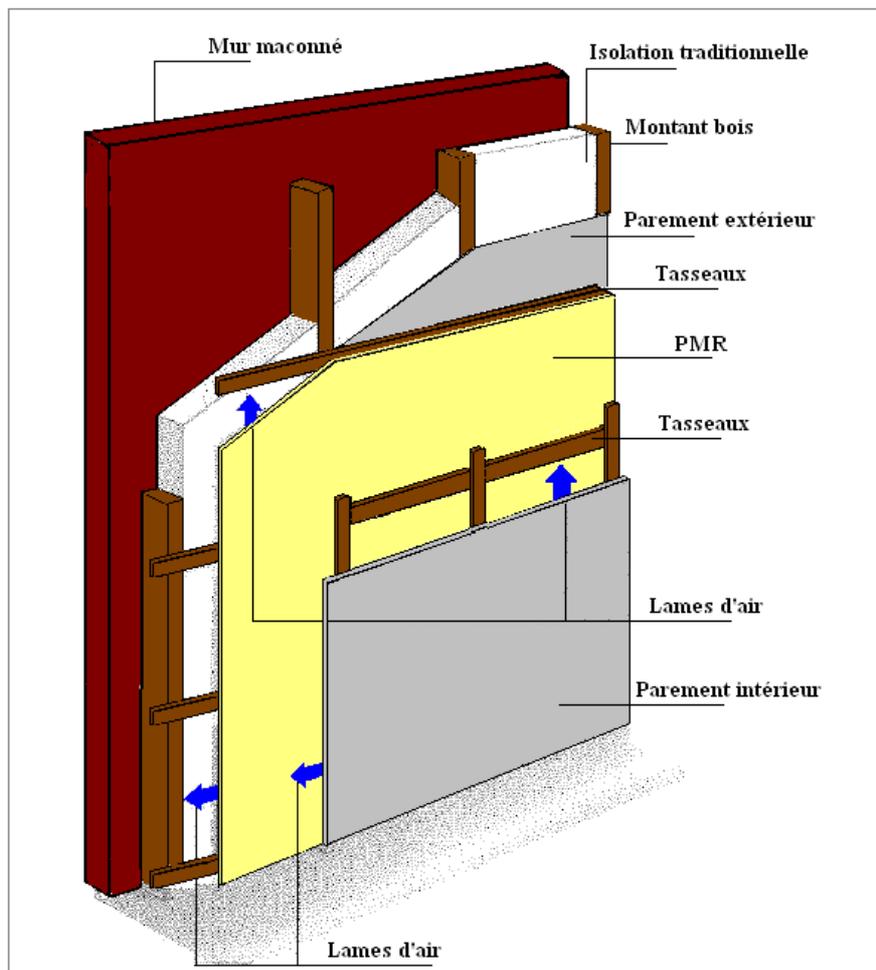


Figure 4.4 - Schéma des quadrillages de tasseaux dans un mur en maçonnerie avec comme complément d'isolation un PMR et deux lames d'air (cas de deux lames d'air)

Le système formé essentiellement par les lames d'air délimitées par les parements intérieur et extérieur et le cadre en tasseaux peut être considéré comme étant reproductible et la cellule unitaire comportant une seule cavité d'air est celle qui va être modélisée dans THERMETTE (cf. figure 4.5). En considérant un flux thermique horizontal passant du revêtement intérieur vers le parement extérieur, le flux total perdu par une paroi est obtenu en multipliant le flux calculé par le nombre de cellules formant la paroi.

Les complexes de paroi modélisés dans ce chapitre, comportant dans un premier temps une lame d'air, sont alors composés des éléments suivants :

- parement extérieur
- tasseaux
- lame d'air
- PMR
- parement intérieur

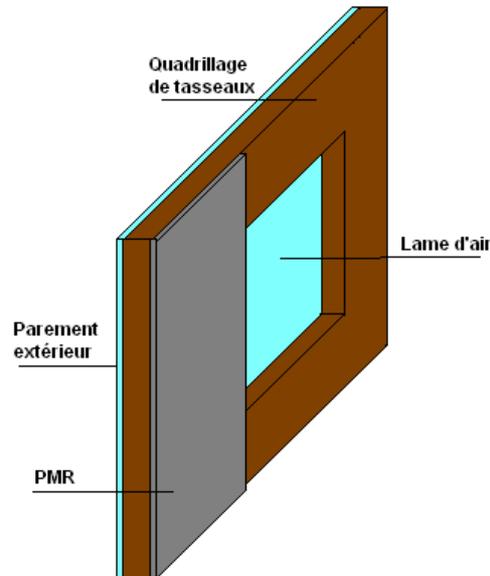


Figure 4.5 - Montage à modéliser

La figure 4.6 représente le modèle nodal d'un complexe PMR muni d'une seule lame d'air représenté dans le logiciel THERMETTE.

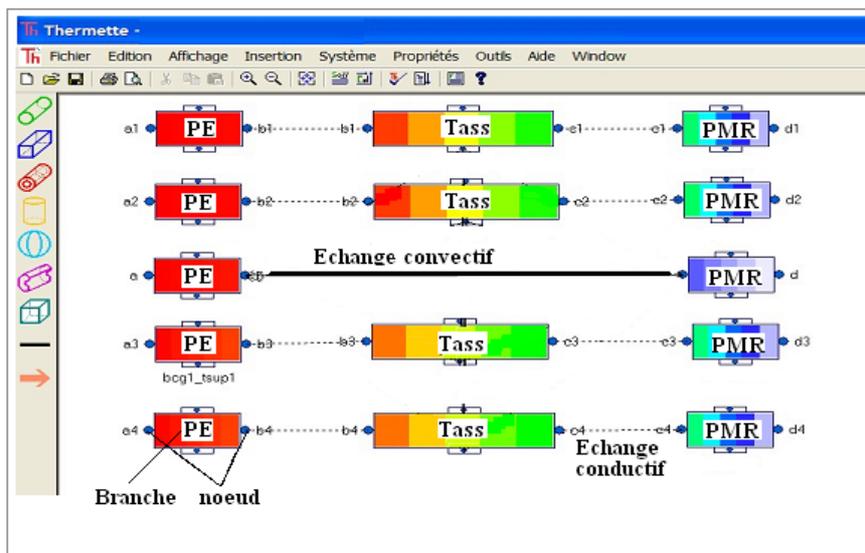


Figure 4.6 - Présentation du modèle partiel dans THERMETTE (hors échanges radiatifs)

Chaque élément est représenté par des branches 1D à deux nœuds externes : un nœud d'entrée et un de sortie. Chaque nœud peut être soumis à une température imposée, un flux surfacique ou un échange convectif (les échanges radiatifs seront introduits au paragraphe suivant). Le fait d'avoir des nœuds ayant le même nom signifie qu'ils sont en contact et que le transfert thermique s'effectue par continuité de la température (cf. figure 4.6). Un échange convectif entre deux branches est défini par un coefficient d'échange convectif. Les branches de la première colonne à gauche de la figure 4.6 représentent le parement extérieur divisé en cinq branches pour différencier son contact avec les tasseaux d'une part et la lame d'air d'une autre part. L'échange thermique entre les cinq branches est négligé devant le flux thermique traversant le complexe dans le sens du gradient de température. Les branches de la colonne du milieu définissent les quatre tasseaux entourant la lame d'air et les branches de la colonne de droite forment le PMR à faces peu émissives. Les traits en pointillés représentent les nœuds en contact et le trait en noir représente l'échange convectif à l'intérieur de la lame d'air. Les

échanges par rayonnement dans les lames d'air non ventilées sont représentés par les facteurs de transferts radiatifs calculés à partir de MODRAY, puis exportés et intégrés dans le modèle thermique global THERMETTE.

4.3.3 Modélisation des échanges par rayonnement

4.3.3.1 Description de l'outil MODRAY

Modray est un logiciel de MODélisation du RAYonnement thermique 3D qui a été développé au Centre Energétique et Procédés de MINES ParisTech [MOD]. Il calcule entre autres les facteurs de transfert radiatif entre surfaces planes opaques grises et diffuses en émission et réflexion. En effet ce logiciel donne respectivement :

- les facteurs de forme dépendant de la géométrie du système discrétisé sous forme de facettes planes, par la méthode des flux plans et une intégration par quadrature de Gauss
- les facteurs de transfert prenant en compte les multi-réflexions diffuses, par la méthode des revêtements.

L'exactitude des résultats de calculs issus de Modray a été vérifiée à différentes reprises au CEP. Ceci a été réalisé soit en comparant les résultats de Modray à des solutions analytiques pour des géométries simples, soit à des résultats issus de la méthode numérique de Monte Carlo pour des géométries plus complexes.

4.3.3.2 Présentation du modèle radiatif

Le schéma de la figure 4.7 représente une lame d'air fermée entourée par les quatre tasseaux, la face intérieure du parement extérieur et la face réfléchissante du PMR. Ce schéma est représenté dans le logiciel de modélisation des échanges radiatifs MODRAY.

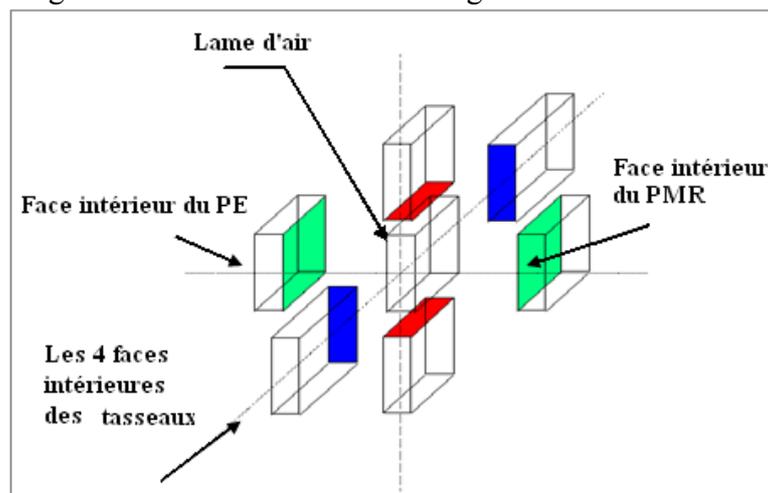


Figure 4.7 - Schéma montrant le rayonnement des faces délimitant la lame d'air

Après avoir introduit les trois dimensions de la lame d'air et les émissivités correspondantes des 6 faces l'entourant, les facteurs de transferts radiatifs sont calculés.

4.3.3.3 Calcul des facteurs de transfert radiatif

Le flux radiatif échangé entre deux nœuds de deux branches séparées par l'air confiné est calculé par l'équation suivante :

$$Q_{rad, ij} = F_{ij} S_i \sigma (T_i^4 - T_j^4) \text{ (W)} \quad (4.1)$$

avec F_{ij} les facteurs de transfert radiatif, S la surface de la paroi en contact avec l'air, T_i et T_j les températures des deux nœuds et σ la constante de Stefan-Boltzmann.

Le temps nécessaire au calcul des facteurs de transferts radiatifs dans Modray avec la description actuelle précitée est de l'ordre de quelques secondes (Processeur de 2,5 GHz).

4.3.4 Assemblage de modèles

Le modèle numérique ainsi développé détermine la résistance thermique de la lame d'air non ventilée intégrant une face de faible émissivité. Il calcule également les performances thermiques d'un complexe PMR couplé à une ou deux lames d'air. Différents paramètres peuvent être modifiés dans le modèle dont principalement l'épaisseur de la lame d'air, son allongement et l'écart de température imposé de part et d'autre du complexe.

Dans ce modèle réalisé dans THERMETTE, on intègre d'une part comme sollicitation la corrélation du coefficient d'échange de convection naturelle proposée au chapitre 2 et d'autre part les facteurs de transferts radiatifs calculés par MODRAY.

Le modèle complet est représenté sur la figure 4.8. Les traits noirs clair désignent les échanges radiatifs entre parement extérieur (PE), tasseaux et PMR ajoutés au modèle.

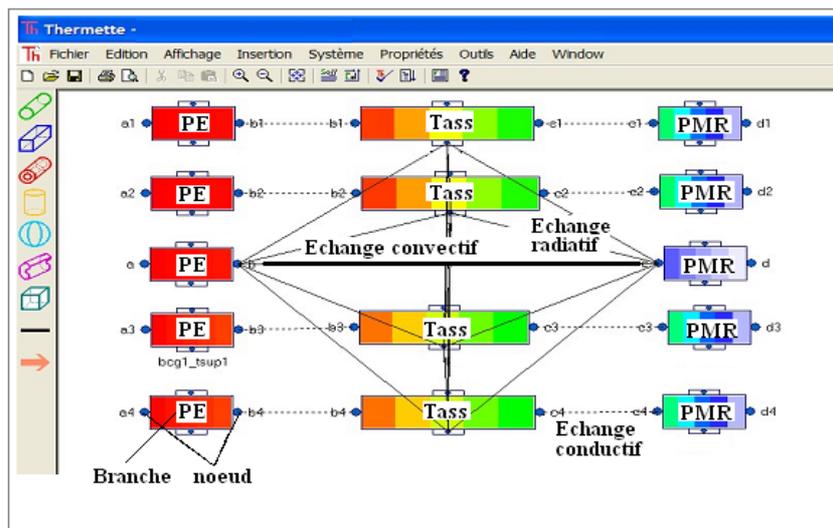


Figure 4.8 - Présentation du modèle complet dans THERMETTE

4.4 Interprétation des résultats et étude paramétrique

Les résultats obtenus par modélisation sont divisés en deux parties. La première partie étudie les performances thermiques des lames d'air non ventilées caractérisées seules, c'est-à-dire sans l'ajout de la résistance thermique du PMR mais présentant une face à faible émissivité. La deuxième partie caractérise les performances thermiques du complexe formé par le PMR couplé à une ou deux lames d'air.

4.4.1 lame d'air non ventilée

La résistance thermique d'une lame d'air dont la coupe longitudinale est représentée à la figure 4.9 dépend des paramètres suivants :

- l'épaisseur b et la hauteur H de la lame d'air, c'est-à-dire l'allongement A correspondant
- la température moyenne de la lame d'air et la différence de températures de part et d'autre
- l'angle d'inclinaison θ de la lame d'air par rapport à l'horizontale
- l'émissivité de la face réfléchissante délimitant la lame d'air, côté PMR.

La résistance thermique d'une lame d'air non ventilée est calculée par le modèle numérique ainsi élaboré. Les calculs sont effectués pour un écart de températures de part et d'autre de la paroi (PMR inclus) de 5, 10, 15 et 20 K (cf. figure 4.9).

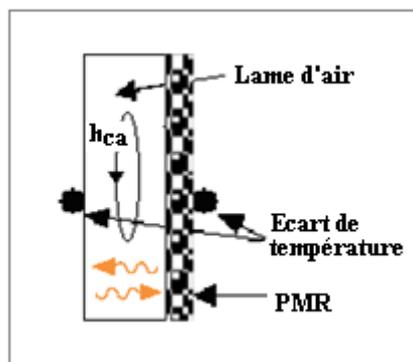


Figure 4.9 - Schéma du système modélisé (PMR couplé à une lame d'air)

Le PMR considéré a une épaisseur de 25 mm et une conductivité thermique équivalente de 0,05 W/m.K.

Dans un premier temps, les paramètres étudiés sont l'inclinaison, l'émissivité thermique de la face réfléchissante et l'écart de températures. La lame d'air est inclinée de 45° par rapport à l'horizontale, elle a une épaisseur de 2 cm et un allongement A égal à 22. Les figures 4.10 et 4.11 représentent les résultats de résistances thermiques de la lame d'air (hors PMR) trouvées en fonction des paramètres étudiés.

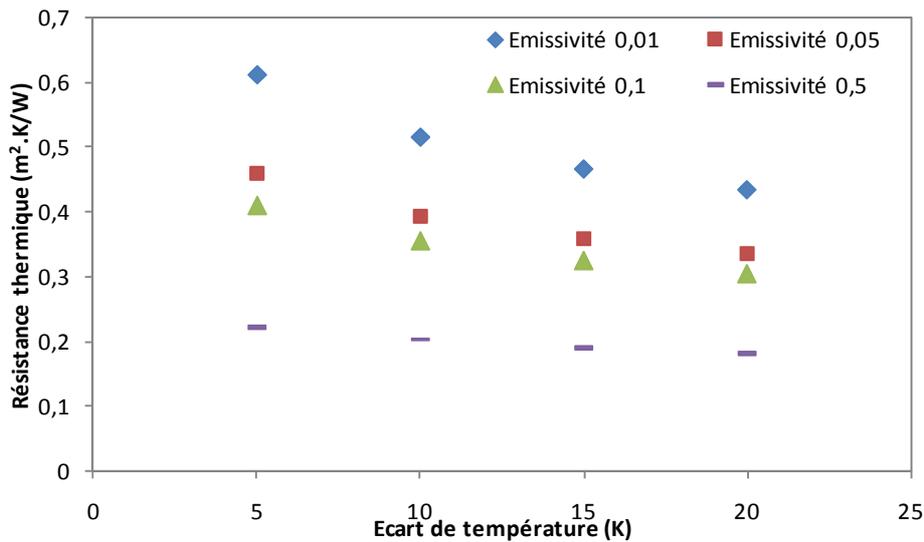


Figure 4.10 - Résistance thermique d'une lame d'air inclinée de 45° en fonction de l'émissivité et de l'écart de températures

Les résultats de la figure 4.10 montrent que l'écart de températures présente un impact fort sur la valeur de la résistance thermique. En effet, l'augmentation de l'écart de températures entraîne l'amplification à la fois du rayonnement et de la convection naturelle dans la lame, ce qui entraîne une baisse de la résistance thermique. Les résultats montrent également que l'impact de l'écart de températures sur la performance thermique de la lame d'air est plus important quand l'émissivité de la face réfléchissante du PMR est faible. En passant d'un écart de températures de 5 K à 20 K, la résistance thermique diminue de 70 % pour une émissivité de 0,01 et 18 % pour une émissivité de 0,5. En effet, pour les émissivités thermiques élevées, la part du rayonnement dans les transferts thermiques, qui est principalement fonction de l'écart de températures de part et d'autre de la lame d'air à la puissance 4, devient importante.

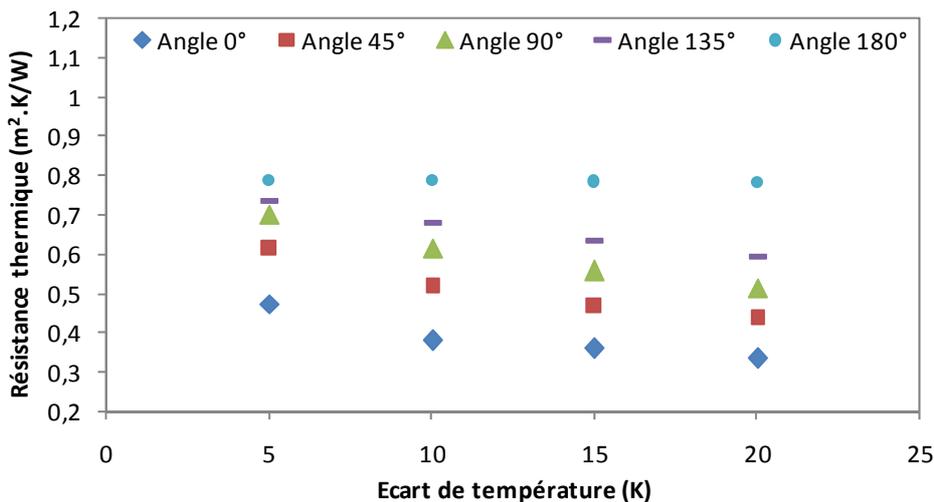


Figure 4.11 - Comparaison des résistances thermiques pour différentes inclinaisons de la lame d'air (émissivité = 0,01)

La figure 4.11 compare les résistances thermiques pour une même émissivité (0,01) mais pour différentes inclinaisons de la lame d'air. Les résultats montrent que plus l'inclinaison de la cavité s'écarte de la position horizontale chauffée par le haut, plus les valeurs de résistances thermiques sont faibles. En effet, ceci est expliqué par le fait que le mouvement de convection

naturelle s'amplifie en passant d'une configuration de lame d'air chauffée par le haut (180°) à celle chauffée par le bas (0°). La résistance thermique minimale obtenue est celle d'une lame d'air horizontale chauffée par le bas, avec un écart de température de 20 K.

La résistance thermique de la lame d'air est maximale pour un flux vertical descendant puisque ce cas de figure défavorise la formation de boucles de convection et entraîne un régime de conduction pur. Cette valeur maximale est de $0,8 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ pour le plus petit écart de températures étudié (5 K) et pour l'émissivité la plus faible (0,01).

Pour étudier l'effet de l'épaisseur sur la résistance thermique de la lame d'air, une cavité verticale est considérée. L'épaisseur de la lame d'air est étudiée ainsi que l'émissivité thermique de la face réfléchissante. Les résultats sont représentés sur la figure 4.12.

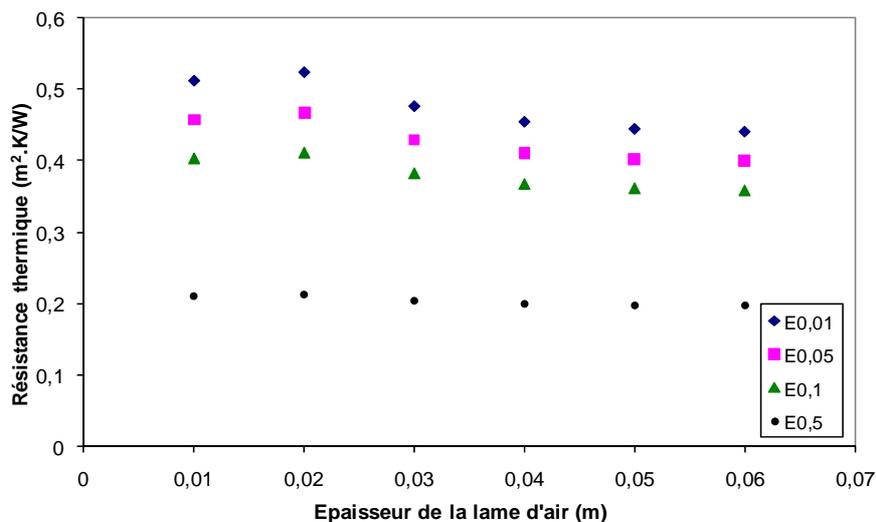


Figure 4.12 - Variation de l'épaisseur d'une lame d'air verticale non ventilée

Pour de faibles épaisseurs, la conduction est le régime de transfert thermique dominant, et donc la résistance thermique et l'épaisseur de la lame sont inversement proportionnelles. En augmentant l'épaisseur de la lame d'air au-delà d'une certaine valeur (dans ce cas égale à 20 mm), les résultats de la modélisation montrent une diminution des performances thermiques. Ceci s'explique par l'amplification de la convection dans les lames d'air plus épaisses et par suite la dégradation de la résistance thermique. Ce maximum de résistance thermique est d'autant plus prononcé que l'émissivité thermique est faible. En effet, pour les émissivités thermiques élevées la part du rayonnement dans les transferts thermiques devient importante, ce qui rend la résistance thermique moins dépendante de l'épaisseur.

4.4.2 Complexe de paroi verticale et inclinée

Dans cette partie, le complexe entier est étudié. Ce complexe est formé par le PMR, une ou deux lames d'air et les ponts thermiques formés par le quadrillage en tasseaux (cf. figure 4.13).

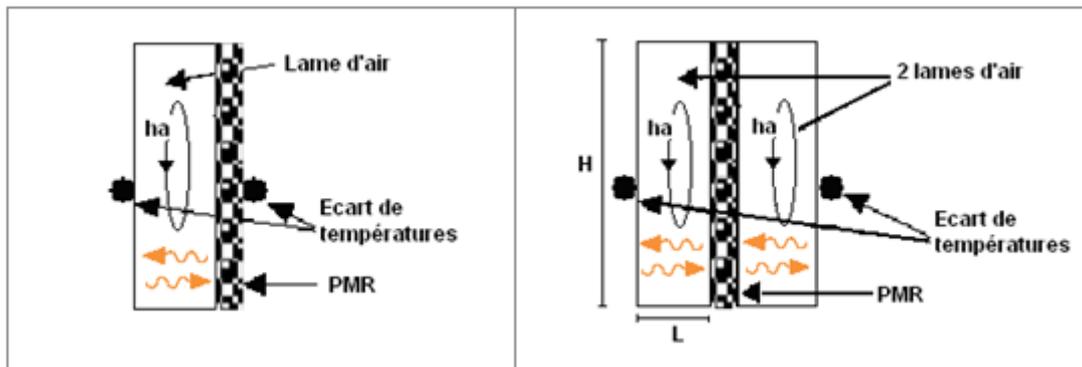


Figure 4.13 - Schéma du système modélisé (PMR couplé à une ou deux lames d'air)

4.4.2.1 PMR couplé à une lame d'air non ventilée

Le complexe étudié est formé par un PMR dont l'épaisseur varie entre 5 et 20 mm dans un premier temps, puis fixée à une épaisseur de 20 mm, de conductivité thermique équivalente de $0,05 \text{ W/m.K}$ et d'une lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur. L'écart de températures de part et d'autre de cette paroi complexe est de 20 K.

La figure 4.14 représente les résistances thermiques du complexe formé d'un PMR de différentes épaisseurs (5, 10 et 20 mm) et d'une lame d'air de 2 cm d'épaisseur en fonction de l'émissivité thermique de la face réfléchissante.

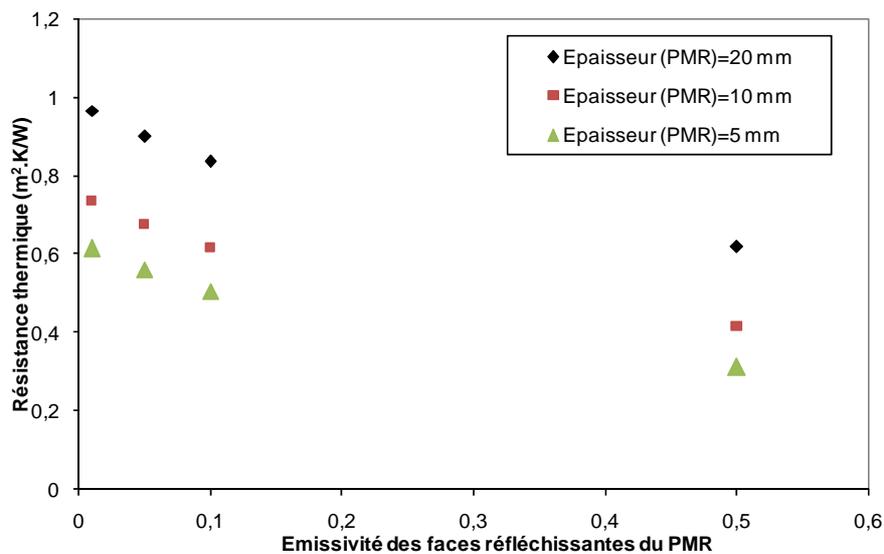


Figure 4.14 - Résistance thermique de la paroi complexe verticale munie d'une seule lame d'air (DT = 20 K)

La résistance thermique maximale de $0,96 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ est obtenue pour un complexe PMR/lame d'air ayant une très faible émissivité (0,01) pour la face réfléchissante du PMR et une épaisseur totale de 4 cm.

Les conclusions suivantes peuvent alors être tirées :

- plus l'émissivité de la face réfléchissante du PMR est faible, plus la résistance thermique du complexe est élevée
- la résistance thermique de la paroi étudiée varie en fonction des paramètres entre 0,3 et $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

La figure 4.15 représente les résultats de performances thermiques d'un complexe PMR/lame d'air pour différentes inclinaisons (0° , 45° , 90° , 135° et 180°) et ceci pour deux émissivités de la face réfléchissante du PMR (0,01 et 0,5).

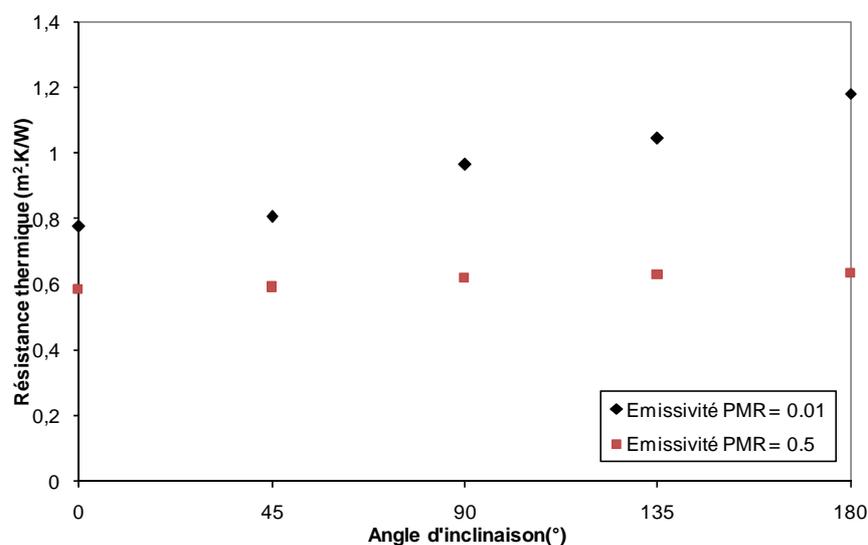


Figure 4.15 - Résistances thermiques d'un complexe intégrant un PMR (20 mm) et une lame d'air de 2 cm pour différents angles d'inclinaisons et émissivités

Les résultats montrent que plus l'émissivité est grande, moins l'impact de l'inclinaison sur les résultats de performances thermiques sera important. En effet, pour une émissivité égale à 0,01, la résistance thermique augmente de 53 % en passant d'un angle de 0° à 180° . Par contre, elle augmente de 8,2 % uniquement dans le cas d'une émissivité de 0,5.

4.4.2.2 PMR couplé à deux lames d'air non ventilées

La lame d'air est responsable de la part la plus importante de la résistance thermique d'une paroi complexe intégrant un PMR. Dans certains cas de montage, le plus souvent en paroi verticale, il est possible de ménager 2 lames d'air.

Afin d'étudier l'importance de l'apport de cette deuxième lame d'air sur les performances thermiques du complexe, une deuxième lame d'air d'épaisseur 20 mm est ajoutée au complexe étudié précédemment (cf. figure 4.16). Les simulations intégrant 2 lames d'air sont effectuées pour un PMR de 25 mm d'épaisseur et de conductivité thermique équivalente de $0,05 W/m.K$.

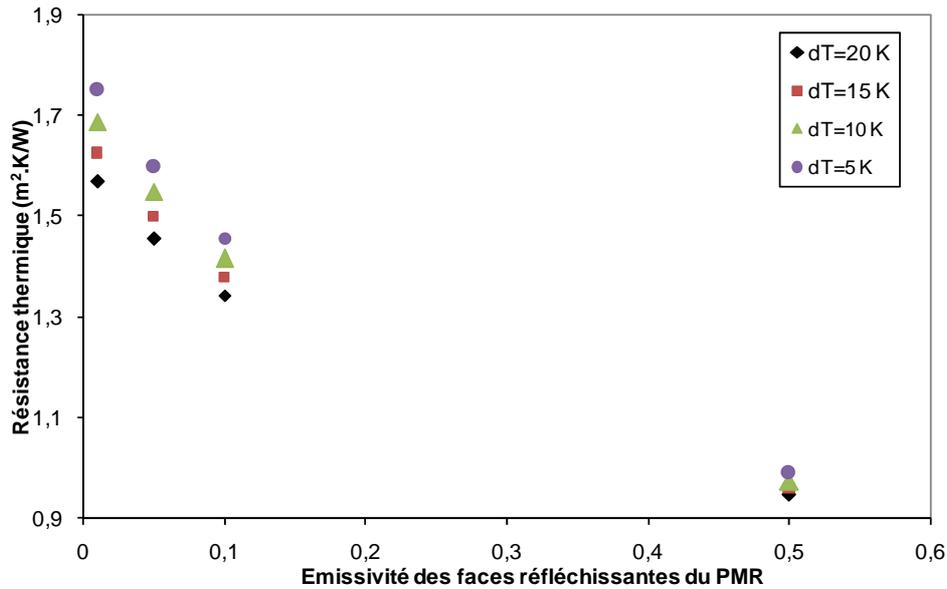


Figure 4.16 - Résistance thermique de la paroi complexe verticale composée d'un PMR (25 mm) munie de 2 lames d'air de 20 mm chacune

Les résultats de la figure 4.16 montrent des valeurs de résistances thermiques qui varient entre 0,95 et 1,75 m².K/W. Ceci correspond à une augmentation qui peut aller de 53 % à 62 % (suivant l'émissivité) par rapport aux résultats représentés à la figure 4.14, d'où l'importance de la présence de deux lames d'air dans le complexe, quand ceci est possible.

La figure 4.17 représente les résultats du modèle intégrant 2 lames d'air adjacentes au PMR pour trois inclinaisons différentes. Les résultats sont compatibles avec les conclusions énoncées précédemment.

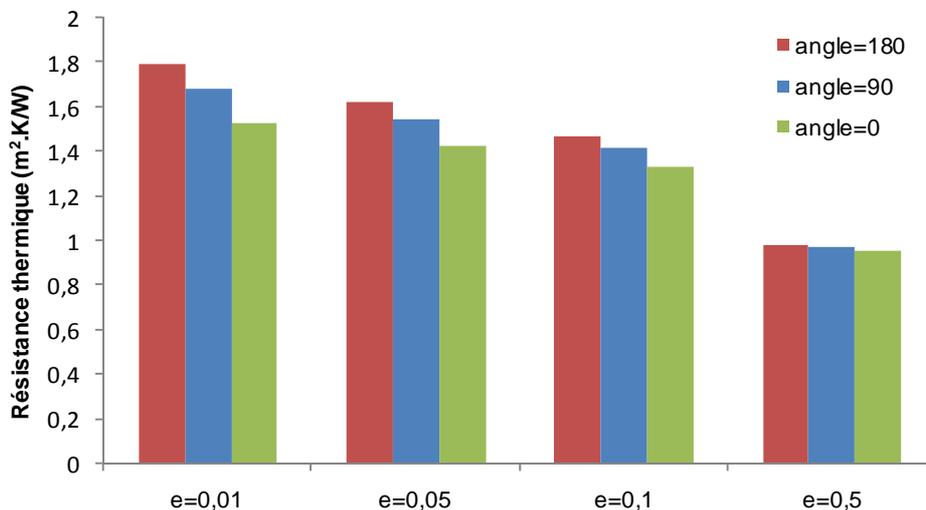


Figure 4.17 - Résistance thermique d'un complexe PMR et 2 lames d'air pour 3 inclinaisons différentes et plusieurs émissivités du PMR (DT = 10 K)

4.5 Validation expérimentale

L'approche expérimentale choisie pour valider le modèle développé précédemment est basée sur la méthode de la boîte chaude calibrée utilisant un calorimètre construit au CEP. Dans cette partie expérimentale, le protocole de mesures est tout d'abord défini suivi d'une

A - DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE MESURE

La figure 4.19 montre une photo d'une des deux cellules construites. L'enveloppe externe est en bois (contreplaqué maintenu par des tasseaux). Les parois de la cellule sont constituées de 5 cm de polystyrène extrudé afin de limiter les pertes thermiques lors des mesures.



Figure 4.19 - Vue d'une cellule

Les dimensions de chaque cellule sont indiquées au tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Dimensions internes d'une cellule

Dimensions en cm (longueur x largeur x profondeur) d'une cellule		
	Dimensions internes sans polystyrène	Dimensions internes avec polystyrène
Cellule	107 x 155 x 41	97 x 145 x 36

Une résistance électrique est prévue à l'intérieur de chacune des deux cellules (cf. figure 4.20). Chaque résistance est reliée à un régulateur de puissance et à un wattmètre afin de pouvoir lire et modifier indépendamment la puissance dans chaque cellule.

La figure 4.21 montre l'installation électrique correspondant à chaque cellule; le variateur de puissance est installé sur la source électrique.

Les acquisitions au wattmètre sont l'intensité et la tension aux bornes de la résistance. L'affichage est alors en W.



Figure 4.20 Résistance électrique à l'intérieur de la cellule

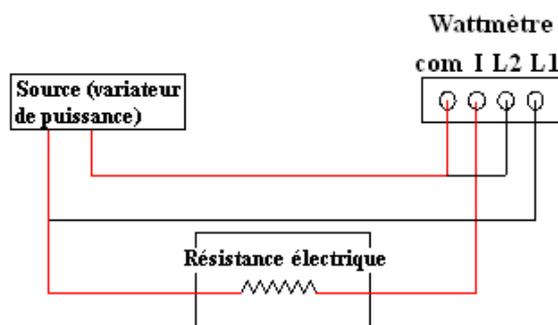


Figure 4.21 Installation électrique d'une cellule

Des thermocouples de type T sont répartis entre les deux cellules de façon à disposer quatre ou cinq thermocouples à l'intérieur de chaque cellule et trois ou quatre à l'extérieur. Un thermocouple est réservé à la mesure de la température ambiante de la salle d'essais.

Tous les thermocouples sont reliés à un module d'acquisition, qui à son tour, transmet les températures, toutes les 30 secondes, à un ordinateur sous format Excel.

Les incertitudes liées aux capteurs utilisés sont répertoriées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 – Niveaux d’incertitudes sur les capteurs

Mesure	Type capteur	Incertitude
Température	Thermocouple type T	±0,2 °C
Puissance	Wattmètre	±0,05 W
Dimensions (longueur, largeur)	Mètre	±0,001 m
Epaisseur	Pieds à coulisse	±0,05 mm

L’incertitude sur le résultat de chaque mesure est déterminée par la méthode de Monte-Carlo qui consiste à effectuer à partir d’un jeu de valeurs mesurées un grand nombre de tirages aléatoires dans la plage d’incertitude du capteur. La valeur moyenne est reportée et l’incertitude correspond à l’écart type des résultats.

La première étape, avant toute caractérisation du matériau à qualifier, est de caractériser les cellules elles-mêmes pour déterminer leurs courbes de pertes thermiques ; celles-ci seront utilisées lors de la caractérisation de chaque matériau afin de calculer la puissance dissipée vers l’extérieur des parois des cellules.

B - Caractérisation des cellules

Il s’agit d’effectuer une série de mesures pour déterminer la courbe des pertes thermiques de chaque cellule en fonction de la différence de températures entre l’intérieur de la cellule et l’air ambiant externe de la salle d’essais.

$$Q_{cellule} = f(dT_{cellule / ambiance\ externe}) \quad (4.2)$$

A chaque mesure, au régime établi, la puissance électrique des résistances chauffantes ainsi que les températures sont relevées. Les mesures sont ainsi répétées pour plusieurs niveaux de puissance.

La figure 4.22 illustre le montage permettant de réaliser les mesures. Il s’agit d’assembler les deux cellules de telle manière que la paroi de séparation centrale puisse intégrer le matériau à caractériser et son cadre en polystyrène pris en sandwich entre deux plaques de contreplaqué.

Les températures sont mesurées à l’intérieur de chacune des cellules et notamment sur chacune des faces du sandwich.

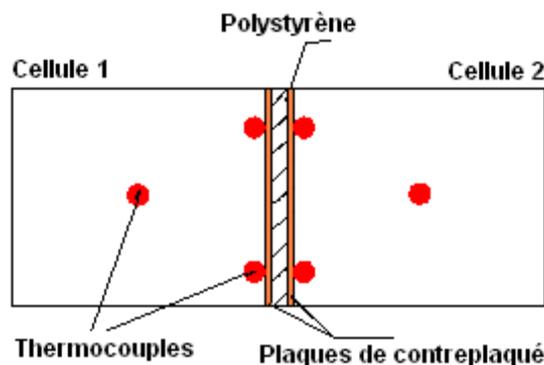


Figure 4.22 - Dispositif de mesure pour caractériser la déperdition des cellules

La puissance de chaque cellule est régulée de manière à obtenir un gradient nul entre les deux volumes, en d'autres termes jusqu'à obtenir des températures quasiment identiques dans les ambiances et sur les parties supérieure et inférieure du polystyrène servant de paroi de séparation.

Cinq mesures sont effectuées pour 5 écarts de températures différents entre l'intérieur des cellules et l'ambiance. Les graphes de la figure 4.23 montrent les courbes des pertes thermiques en fonction de l'écart de températures pour chacune des deux cellules.

Le tableau 4.3 représente les mesures de températures et de puissances relevées après établissement du régime permanent.

Tableau 4.3 - Résultats des mesures de caractérisation des cellules

Mesures	T ambiante (°C)	T cellule 1 (°C)	T cellule 2 (°C)	dT1 (cellule1-ambiance externe)	dT2 (cellule2-ambiance externe)	Perte cellule 1 (w)	Perte cellule 2 (w)
1	24,3	43,05	43,15	18,75	18,85	41,6	40
2	23,2	39,6	39,7	16,4	16,5	36,8	33,5
3	23,3	34,6	34,6	11,3	11,3	24,9	23,2
4	23,3	31,8	31,95	8,5	8,65	18,9	17,8
5	23	40,1	40,4	17,1	17,4	37,8	35,4

Les pertes thermiques suivantes, pour une cellule, peuvent être calculées en fonction des écarts de températures, à l'aide d'une fonction linéaire déduite d'après les mesures réalisées (cf. figure 4.23).

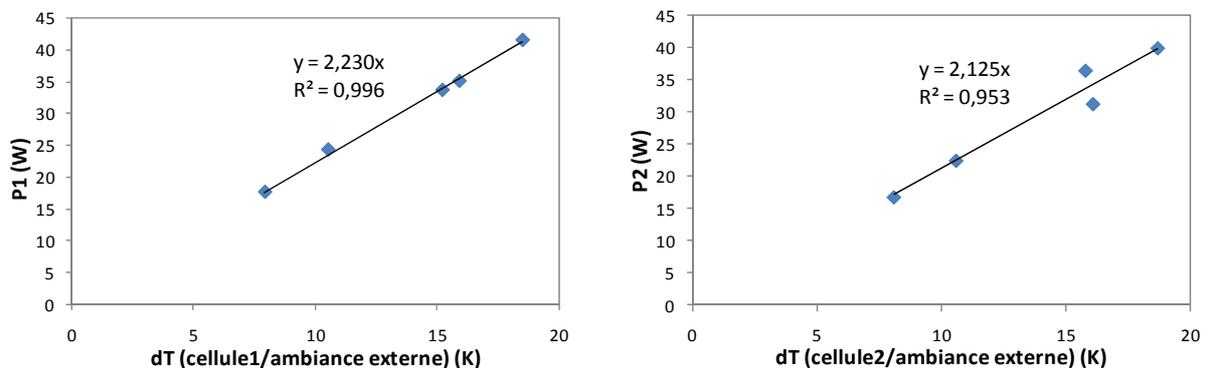


Figure 4.23 - Courbes des pertes thermiques des cellules 1 et 2

C - Caractérisation des pertes du cadre de polystyrène

Pour chaque matériau à caractériser un cadre en polystyrène de même épaisseur est prévu, les pertes thermiques de celui-ci seront caractérisées expérimentalement, notamment en raison de sa géométrie.

La conductivité thermique du polystyrène utilisé pour les mesures est connue et certifiée. Les résistances thermiques R ($m^2.K/W$) du matériau sont données au tableau 4.4.

Tableau 4.4 – Résistance thermique du polystyrène

Epaisseur (mm)	20	30	40	50
R ($m^2.K/W$)	0,55	0,85	1,15	1,45

Les cadres en polystyrène prévus pour la mesure des performances thermiques du PMR seul et couplé à une et deux lames d'air sont d'épaisseurs respectives 20 mm, 40 mm et 60 mm. Deux plaques de contreplaqué sont disposées de part et d'autre des plaques de polystyrène (cf. figure 4.24). Ainsi les mesures sont réalisées avant intégration du sandwich à qualifier afin d'évaluer les pertes thermiques par le cadre.

Les mesures sont menées pour chacune des trois plaques en polystyrène munie des deux plaques de contreplaqué associées. Les trois plaques seront ensuite utilisées comme cadres dans lesquels seront intégrés les sandwichs à qualifier. Les mesures sont réalisées pour plusieurs écarts de températures. Une fois le régime établi, toutes les températures sont relevées : ambiante interne et externe, notamment sur les côtés dans la partie qui constituera le cadre.

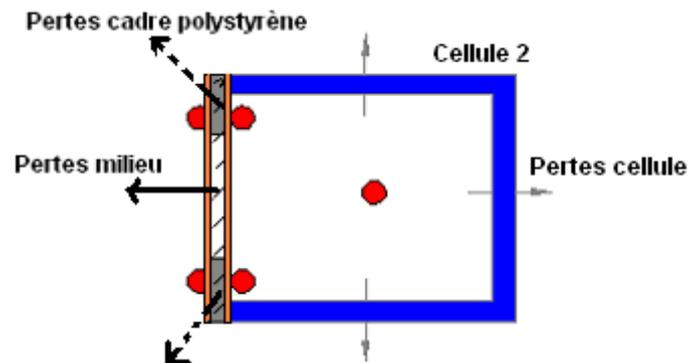


Figure 4.24 - Caractérisation du cadre en polystyrène

Les pertes thermiques de la cellule étant connues en fonction de la différence de températures entre les ambiances interne et externe, le flux thermique qui traverse le polystyrène est alors déterminé par différence entre la puissance imposée et les pertes de la cellule.

$$Q_{total} - Q_{cellule} = Q_{milieu} + Q_{cadre} \quad (4.3)$$

Les températures de surfaces, interne et externe, sont considérées comme étant la moyenne des mesures effectuées pour chaque face. Ces données réunies permettent alors de calculer le flux thermique unidimensionnel traversant le milieu de la paroi en polystyrène suivant l'expression :

$$Q_{milieu} = \frac{\lambda}{e} \times S_{milieu} \times \Delta T \quad (4.4)$$

avec λ la conductivité thermique du polystyrène (W/m.K), Q_{milieu} le flux thermique traversant le milieu de la paroi (W), e l'épaisseur du polystyrène testé (m) et S_{milieu} la surface de milieu du polystyrène, qui sera remplacé par le sandwich à qualifier (m²).

La résistance thermique des deux plaques en bois contreplaqué sont négligées dans ces calculs du fait de sa faible valeur comparée à celle du polystyrène (conductivité thermique du bois 0,28 W/m.K et une épaisseur de 3 mm par plaque).

Le flux thermique traversant le cadre sera alors déterminé par différence entre le flux traversant toute la paroi et le flux traversant le milieu.

Par la suite, les pertes thermiques du cadre peuvent être calculées en fonction de l'écart de températures de part et d'autre de la paroi et ceci à l'aide d'une fonction linéaire déduite d'après les mesures réalisées.

$$Q_{cadre} = f(dT_{paroi}) \quad (4.5)$$

D - Résistance thermique des sandwichs à caractériser

La procédure de mesure est semblable à celle réalisée précédemment pour le cadre, à la différence que la paroi de la cellule est désormais composée du cadre en polystyrène et du sandwich à caractériser. Ainsi le flux thermique traversant la paroi est la somme des flux qui traversent les matériaux qui composent ladite paroi.

Comme représenté à la figure 4.25, des thermocouples mesurent la température du polystyrène et celle du sandwich à caractériser.

Les pertes thermiques par le cadre étant connues, le flux thermique traversant le sandwich à caractériser peut donc être calculé par différence.

$$Q_{sandwich} = Q_{total} - Q_{cellule} - Q_{cadre} \quad (4.6)$$

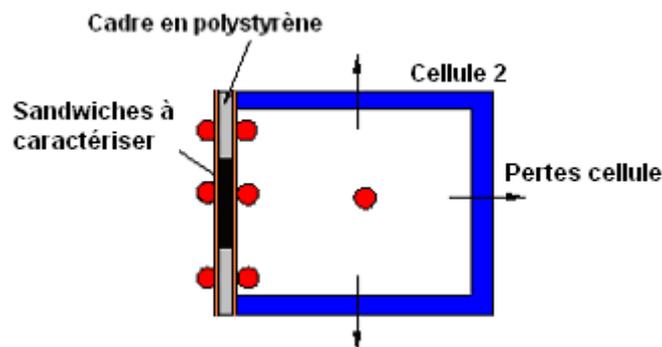


Figure 4.25 - Position dans la cellule du sandwich à caractériser

4.5.1.2 Mise en œuvre des parois complexes à qualifier

La mise en œuvre des sandwichs est la plus proche possible de la mise en œuvre sur chantier. Les parements des sandwichs seront en bois (contreplaqué de 3 mm). Comme indiqué ci-dessus, la contribution des plaques en contreplaqué utilisées en parements, bien que comprise dans la mesure, reste négligeable par rapport à la résistance thermique du sandwich (conductivité thermique du bois 0,28 W/m.K et une épaisseur de 3 mm par plaque, ce qui implique une contribution à la résistance thermique de 0,02 m².K/W).

➤ Mise en œuvre du sandwich PMR

Un PMR de 20 mm d'épaisseur est installé sans tassement à l'intérieur du cadre en polystyrène extrudé également de 20 mm d'épaisseur. Le sandwich ainsi constitué est placé entre deux plaques de contreplaqué de 3 mm d'épaisseur, comme présenté sur la figure 4.26.

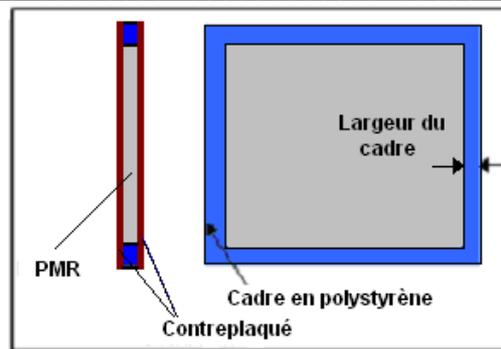


Figure 4.26 - Mise en œuvre du sandwich PMR

La largeur du cadre en polystyrène est de 130 mm ce qui laisse une surface de 87 x 136 cm pour le sandwich A.

➤ **Mise en œuvre du sandwich PMR et une lame d'air**

Une lame d'air d'épaisseur 20 mm est ménagée entre l'isolant mince d'épaisseur 20 mm et l'une des plaques de contreplaqué (l'isolant mince, tendu, est fixé sur le cadre par de la colle). La lame d'air est maintenue constante par deux tasseaux verticaux (cf. figure 4.27) distants de 44 cm.

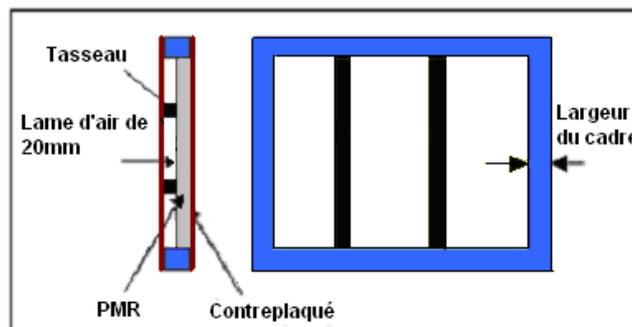


Figure 4.27 - Mise en œuvre du sandwich PMR et une lame d'air

Le sandwich ainsi constitué est placé dans un cadre polystyrène de même épaisseur 40 mm. La largeur du cadre en polystyrène est toujours de 130 mm.

4.5.1.3 Résultats expérimentaux

Après avoir détaillé le protocole de mesures et décrit les sandwiches à caractériser, les cadres en polystyrène puis les sandwiches intégrés dans ces cadres sont caractérisés comme indiqué précédemment et les résultats sont présentés dans ce qui suit pour chacun des trois sandwiches.

➤ **Résistance thermique du PMR**

Le produit réfléchissant utilisé étant d'une épaisseur de 20 mm, une première étape consiste à caractériser les pertes thermiques sortant du cadre en polystyrène de même épaisseur. Pour cela le polystyrène est placé entre deux contreplaqués et fermé avec des serre-joints (cf. figure 4.28) (cf. détail en ANNEXE 4.1).



Figure 4.28 - Caractérisation du cadre de 20 mm

Dans une deuxième étape, le PMR (d'épaisseur 20 mm) à caractériser est inséré dans le cadre en polystyrène (cf. figure 4.29).



Figure 4.29 - Insertion du PMR dans son cadre en polystyrène de 20 mm

La cellule 2 est utilisée pour la caractérisation du PMR. Trois mesures y sont menées ; les températures à l'équilibre ainsi que les conductivités thermiques calculées sont présentées dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 – Calcul de la conductivité thermique intrinsèque du PMR

	Mesure1	Mesure2	Mesure3
Puissance totale (W)	30,7	41,56	50,45
Température ambiante externe (°C)	26,6	27,5	28,1
Température intérieure de la cellule (°C)	35	39	42,2
Ecart de températures d'ambiance (cellule/ambiance externe) (°C)	8,4	11,5	14,1
Flux traversant la cellule (W)	17,83	24,5	29,94
Flux traversant la paroi en polystyrène (W)	12,87	17,06	20,51
Ecart de températures de contact de part et d'autre de la paroi (°C)	6,77	8,846	10,71
Flux traversant le cadre (W)	0,707	0,92	1,12
Flux thermique net traversant le centre du sandwich à caractériser (W)	12,163	16,14	19,39
Épaisseur du sandwich à caractériser (m)	0,02	0,02	0,02
Surface du centre du sandwich à caractériser (m ²)	1,1832	1,1832	1,1832
Conductivité thermique du centre du sandwich (W/m.K)	0,03036	0,03084	0,03057
Résistance thermique du centre du sandwich (m².K/W)	0,6587	0,6485	0,6542
Ecart type	0,02	0,02	0,01

➤ *Résistance thermique du PMR couplé à une lame d'air*

Tout d'abord, on caractérise les pertes thermiques sortant du cadre en polystyrène d'épaisseur 40 mm. Pour cela, il est placé entre deux contreplaqués et fermé avec des serre-joints (figure 4.30). (cf. détails en ANNEXE 4.1)



Figure 4.30 - Caractérisation du cadre en polystyrène de 40 mm d'épaisseur

La présence des deux tasseaux verticaux dans le montage aide à conserver une épaisseur constante de la lame d'air tout au long du sandwich (cf. figure 4.31).



Figure 4.31 - Montage du PMR couplé à une lame d'air

La cellule 1 est utilisée pour la caractérisation de ce sandwich. Trois mesures sont effectuées ; les températures à l'équilibre ainsi que les conductivités thermiques calculées sont présentées dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 – Calcul de la conductivité thermique du PMR couplé à une lame d'air

	Mesure1	Mesure2	Mesure3
Puissance totale (W)	30,3	40	50
Température ambiance externe (°C)	26,62	27,52	28,02
Température intérieure de la cellule (°C)	34,99	38,56	41,71
Ecart de températures températures d'ambiance (cellule/ambiance externe) (°C)	8,36	11,04	13,68
Flux traversant la cellule (W)	18,65	24,62	30,52
Flux traversant la paroi en polystyrène (W)	3,96	5,13	6,31
Ecart de températures de contact de part et d'autre de la paroi (°C)	7,06	9,15	11,25
Flux traversant le cadre (W)	3,96	5,13	6,31
Flux thermique net traversant le centre du sandwich à caractériser (W)	7,69	10,24	13,17
Épaisseur du sandwich à caractériser (m)	0,04	0,04	0,04
Surface du centre du sandwich à caractériser (m ²)	1,1832	1,1832	1,1832
Conductivité thermique du centre du sandwich (W/m.K)	0,0368	0,0378	0,0395
Résistance thermique du centre du sandwich (m².K/W)	1,089	1,06	1,013
Ecart type	0,06	0,06	0,04

4.5.1.4 Synthèse des résultats et validation du modèle

Au cours de ces essais, les performances thermiques du PMR seul et couplé à une lame d'air ont été mesurées en conditions de laboratoire sur le produit réfléchissant dans son état initial, c'est-à-dire tel qu'il a été fourni par les fabricants. Le but de ces essais est de valider le modèle d'évaluation des performances thermiques des parois complexes développé précédemment.

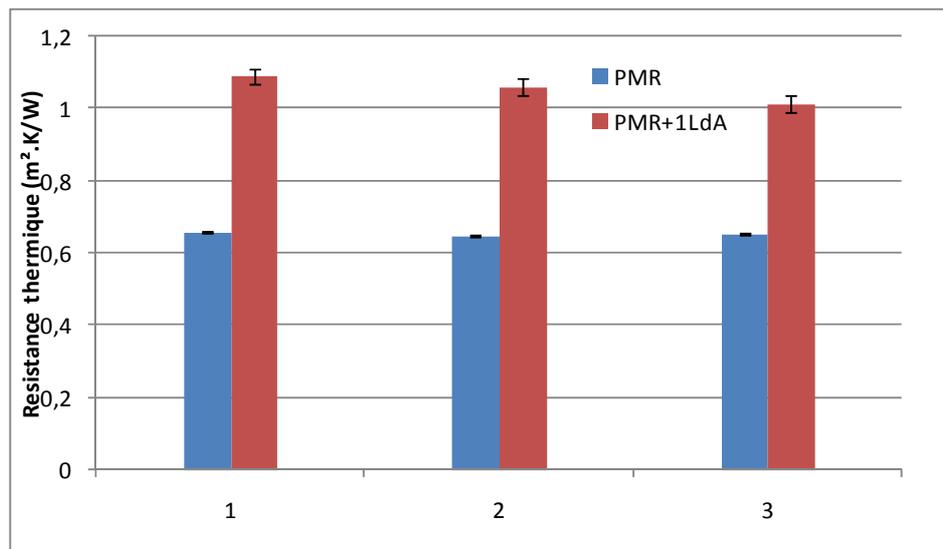


Figure 4.32 - Moyenne et écart type des résistances thermiques du PMR seul et avec une lame d'air

Les barres sur la figure 4.32 indiquent les valeurs obtenues pour les trois sandwichs mesurés. Ces valeurs sont également récapitulées au tableau 4.7.

Tableau 4.7 – Récapitulatif des valeurs mesurées

	Essai	1	2	3
PMR	R (m².W/K)	0,6587	0,6485	0,6542
	Ecart type	0,02	0,02	0,01
PMR + 1 LdA	R (m².W/K)	1,089	1,06	1,013
	Ecart type	0,06	0,06	0,04

La résistance thermique du PMR définie par mesure est de $0,65 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. L'ajout d'une lame d'air d'épaisseur 2 cm augmente cette valeur de 65 %.

La figure 4.33 compare les résultats obtenus par le modèle numérique et ceux des essais pour un complexe formé par un PMR de 20 mm d'épaisseur et une lame d'air non ventilée de 20 mm d'épaisseur. La résistance thermique mesurée du PMR est utilisée et l'émissivité de la face réfléchissante du PMR utilisé dans les essais est de 0,25. Cette dernière est mesurée par la méthode de la sphère intégrante (résolution $\pm 0,05$), étalonnée par le corps noir (noir de fumée et étalon or). La figure 4.33 montre un rapprochement des résultats de résistances thermiques du complexe entre les essais et le modèle. L'écart moyen entre les deux résultats est de 2,3 %. Ces essais peuvent donc valider le modèle de paroi complexe réalisé.

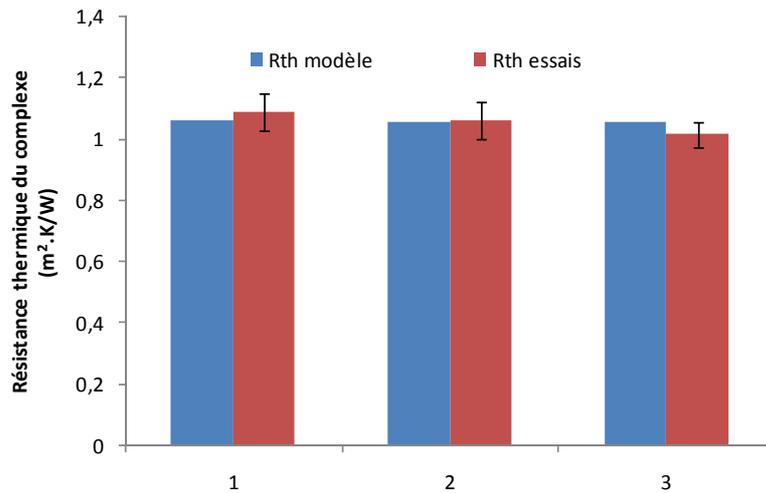


Figure 4.33 - Comparaison de la résistance thermique entre modèle et essais pour un complexe vertical formé d'un PMR et d'une lame d'air

Après avoir validé le modèle de paroi, une étude paramétrique est réalisée afin de déterminer l'impact de l'émissivité sur la résistance thermique d'un complexe PMR couplé à une lame d'air (cf. figure 4.34). L'émissivité varie de 0,01 à 0,5. Les calculs réalisés montrent qu'en passant d'une émissivité de 0,5 à une très faible émissivité (0,01), la performance thermique s'améliore de l'ordre de 35 %.

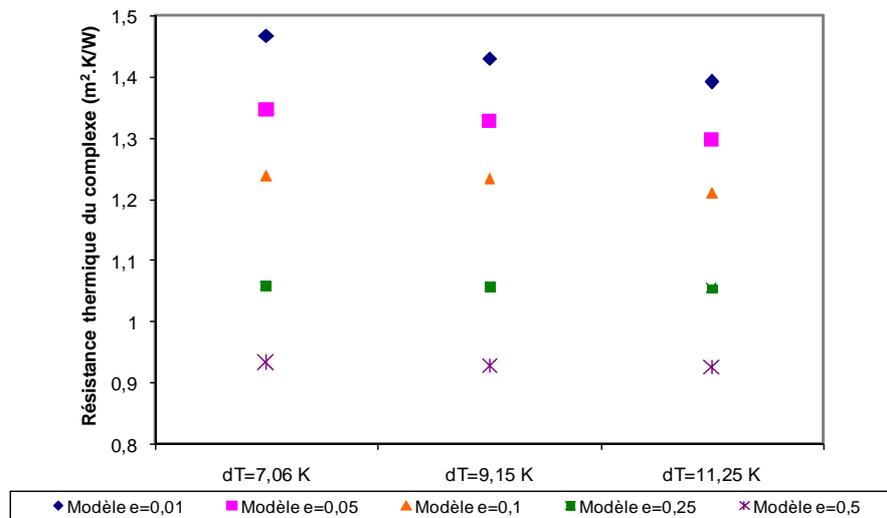


Figure 4.34 - Comparaison de la résistance thermique entre modèle et essais pour un complexe PMR et une lame d'air

4.5.2 Mesure de la résistance thermique de complexes inclinés

Pour valider les résultats du modèle de paroi complexe pour le cas incliné, la boîte chaude gardée utilisée précédemment est inclinée de 45° par rapport à l'horizontale.

4.5.2.1 Protocole de mesure

Une nouvelle caractérisation des pertes à travers la cellule utilisée doit être réalisée avant d'intégrer le complexe à qualifier dans un cadre en polystyrène adéquat. Dans cette série d'essais, les pertes à travers la cellule et le cadre en polystyrène sont déterminées en une seule étape. Après l'intégration de l'échantillon dans le cadre, la différence de flux entre la

puissance totale et les pertes à travers la boîte et le cadre détermineront le flux traversant l'échantillon.

4.5.2.2 Mise en œuvre

La mise en œuvre est identique à celle représentée à la figure 4.27 dans le cas d'une paroi verticale. Le PMR utilisé, un autre produit que celui testé en vertical, a une épaisseur de 2 cm, une conductivité thermique équivalente égale à 0,05 W/m.K et possède des faces réfléchissantes dont l'émissivité est égale à 0,6. Cette dernière est mesurée par la méthode de la sphère intégrante (résolution $\pm 0,05$), étalonnée par le corps noir (noir de fumée et étalon or).

Le cadre en polystyrène utilisé est de 40 mm et possède une conductivité thermique de 0,036 W/m.K

4.5.2.3 Résultats expérimentaux

Deux niveaux de puissance sont étudiés. La démarche du calcul est représentée dans le tableau 4.8. Pour chaque puissance réglée et après avoir atteint le régime stationnaire, les pertes à travers la cellule, le cadre et le milieu sont déterminées. Ensuite, le milieu en polystyrène est remplacé par le complexe (PMR et lame d'air). La différence de flux entre la puissance totale et les pertes à travers la cellule et le cadre est celle qui traverse le complexe. Connaissant de plus l'écart de température de part et d'autre du sandwich, la résistance thermique du complexe peut être déterminée.

Tableau 4.8 – Calcul de la conductivité thermique équivalente du complexe incliné (PMR et lame d'air)

	Mesure1	Mesure2
Puissance totale (W)	39,5	52
Température ambiance externe (°C)	23,6	24,5
Température intérieure de la cellule (°C)	29,9	33
Ecart de températures d'ambiance (cellule/ambiance externe) (°C)	6,3	8,5
Flux traversant la cellule, le cadre et le milieu en polystyrène (W)	30,9	41,8
Ecart de températures de contact de part et d'autre de la paroi (°C)	5,5	7,2
Flux traversant le milieu en polystyrène (W)	5,9	7,7
Flux thermique net traversant le complexe à caractériser (W)	14,5	17,9
Epaisseur du complexe à caractériser (m)	0,04	0,04
Surface du complexe à caractériser (m ²)	1,1832	1,1832
Conductivité thermique du milieu du sandwich (W/m.K)	0,09	0,084
Résistance thermique du milieu du sandwich (m².K/W)	0,446	0,475
Ecart type	0,02	0,03

4.5.2.4 Validation du modèle

La figure 4.35 compare les résultats de résistances thermiques mesurées et calculées du complexe incliné de 45° par rapport à l'horizontale et composé du PMR et de la lame d'air.

La figure montre un écart moyen de 4,5 % entre les résultats des deux approches, ce qui valide le modèle de paroi complexe inclinée.

La résistance thermique du complexe calculée par le modèle de paroi diminue avec l'augmentation du niveau de température. Elle est de l'ordre de 0,45 m².K/W. Cette variation est cependant plus faible que les incertitudes de la méthode de mesure et ne peut être mise en évidence expérimentalement.

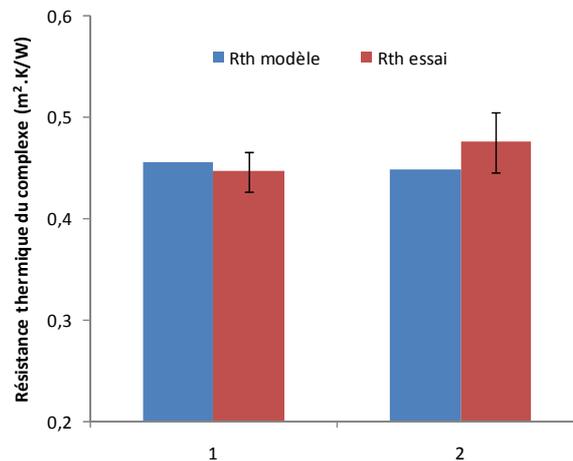


Figure 4.35 - Moyenne et écart type des résistances thermiques du complexe PMR avec une lame d'air

4.6 Conclusions

Dans ce chapitre, un modèle de paroi complexe intégrant des PMR à faces peu émissives et des lames d'air non ventilées a été réalisé par découplage et assemblage de phénomènes thermiques. Les solveurs utilisés ont été introduits et expliqués. En effet, le logiciel de modélisation des échanges radiatifs MODRAY a permis de calculer les facteurs de transferts radiatifs et l'outil de modélisation de réseaux thermiques THERMETTE a permis de construire l'ensemble de la paroi complexe. Par ailleurs, les corrélations établies au chapitre 2 pour le calcul du coefficient d'échange convectif à l'intérieur des lames d'air non ventilées ont été introduites dans le modèle de paroi complexe.

Le modèle de paroi complexe, verticale et inclinée, ainsi réalisé a été ensuite validé par un dispositif expérimental basé sur la méthode de la boîte chaude calibrée en conditions de laboratoire. Les performances thermiques mesurées pour un complexe vertical formé d'un PMR seul et couplé à une lame d'air sont du même ordre de grandeur que celles calculées par le modèle. Les résistances thermiques calculées pour un complexe incliné de 45° comportant un PMR et une lame d'air inclinée ont été également validées par la même boîte chaude mais pour une configuration inclinée.

Les résultats de performance thermique ont montré que le niveau de résistance thermique de ces complexes est principalement fonction de l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR, de l'inclinaison et de l'écart de températures de part et d'autre du complexe. La part principale d'isolation du complexe étant apportée par les lames d'air, les propriétés intrinsèques du PMR n'ont un effet prépondérant sur les résultats que dans le cas de produits épais. Par ailleurs, l'émissivité et la ou les lame(s) d'air sont les paramètres les plus

importants dans la définition du niveau de performance thermique de la paroi. Une étude paramétrique sur l'épaisseur de la lame d'air non ventilée a montré qu'il existe une épaisseur optimale de l'ordre de 2 cm.

Les résultats calculés et mesurés donnent une résistance globale maximale d'une lame d'air non ventilée de l'ordre de $0,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Un complexe d'épaisseur 4 cm, intégrant un PMR et une lame d'air, peut atteindre une résistance thermique de l'ordre de $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ pour de faibles émissivités. Un complexe isolé par un PMR et deux lames d'air adjacentes de 2 cm d'épaisseur chacune peut atteindre, selon le modèle, un niveau d'isolation de $1,8 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Une validation expérimentale des performances d'un complexe intégrant un PMR et 2 lames d'air serait intéressante pour confirmer ce résultat