5.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de modéliser un rampant de toiture qui intègre à la fois un PMR à faces peu émissives et deux lames d'air, une ventilée et une autre fermée. Cette modélisation va permettre d'étudier l'impact de différents paramètres physiques et géométriques sur la transmission de flux à travers le complexe et sur le comportement de la lame d'air ventilée ménagée entre les tuiles et le PMR en périodes estivale et hivernale.

Pour modéliser un rampant de toiture standard intégrant un PMR, il est nécessaire de décrire dans une première étape la conception et la mise en œuvre des rampants de toiture. Ces derniers sont composés de plusieurs éléments et la mise en œuvre de chacun de ces éléments doit vérifier les conditions imposées par les règles standards européennes.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation du comportement du système de toiture en périodes estivale et hivernale par la même méthodologie de découplage et assemblage des phénomènes thermiques utilisée pour développer le modèle thermique de paroi complexe dans le chapitre 4. Des conditions climatiques extrêmes sont considérées (absence de vent en été, prépondérance du vent en hiver).

Pour l'étude du système de toiture en période estivale, le facteur climatique intervenant dans la détermination du facteur solaire du système de rampant est le rayonnement solaire. Ce dernier a un impact particulier sur la lame d'air ventilée aménagée sous les tuiles qui, comme présenté au chapitre 3, fonctionne par effet thermosiphon en absence de vent. Afin de construire le modèle thermique correspondant, les corrélations de débit d'air et des échanges convectifs proposées au chapitre 3 sont utilisées. Le coefficient d'échange convectif dans la lame d'air non ventilée étudié au chapitre 2 est également introduit. Après assemblage, le modèle réalisé est validé par un dispositif expérimental. Une étude paramétrique est ensuite effectuée à l'aide du modèle afin de déterminer l'impact de la variation de différents paramètres sur le facteur de transmission solaire du complexe de rampant modélisé.

Pour la période hivernale, les facteurs intervenant dans la détermination des performances thermiques du complexe de toiture sont la distribution de pression créée par le vent sur les rampants et la perméabilité des tuiles. Pour cela, dans une première étape, un dispositif expérimental est réalisé afin d'étudier la porosité apparente des tuiles. Des simulations CFD sont ensuite réalisées afin d'étudier la répartition des pressions sur les rampants d'une toiture en fonction de l'intensité et de la direction du vent. Un deuxième modèle numérique est ensuite réalisé. Il est composé du milieu pseudo-poreux représentant les tuiles sur lequel sont imposées les pressions statiques exercées par le vent et de la lame d'air ventilée ménagée en dessous de ce milieu. Ce modèle numérique calcule les débits d'air induits dans la lame d'air ventilée obtenus en fonction de différentes vitesses et directions du vent. Le modèle complet de toiture est ensuite assemblé dans THERMETTE et une étude paramétrique est réalisée pour étudier l'impact de différents paramètres sur les déperditions thermiques du complexe de rampant.

Enfin, une conclusion est établie sur l'impact de l'ajout d'un PMR sur les performances thermiques d'un rampant de toiture, en été et en hiver.

5.2 Présentation d'une toiture standard

La toiture est constituée généralement d'une charpente en bois composée de pannes et de chevrons sur laquelle est posée une couverture. Les DTU de la série 40 [DTU 40] conseillent la mise en œuvre d'une lame d'air ventilée d'une épaisseur minimale de 2 cm sous les tuiles et d'un écran de sous-toiture fixé sur les chevrons si le support est discontinu ou sur les voliges si le support est continu.

L'écran de sous-toiture est formé généralement de feutres bitumés ou de feuilles synthétiques et remplit plusieurs fonctions. En effet, il protège les combles des infiltrations de neige poudreuse, de poussière et de suie et achemine vers l'égout les infiltrations dues à la rupture ou déplacement d'un élément de couverture et celles dues à la condensation. Par ailleurs, l'écran de sous-toiture en équilibrant les pressions empêche les éléments de couverture discontinus (les tuiles par exemple) de se soulever sous l'effet du vent.

L'écran de sous-toiture n'est pas un pare-vapeur, il permet à la toiture de respirer afin d'éviter la condensation de la vapeur d'eau provenant de l'intérieur de la maison et maintenir la charpente au sec. Si l'écran de sous-toiture est hautement perméable à la vapeur d'eau (HPV), il peut par suite garantir une évacuation permanente de la vapeur d'eau et peut être posé directement sur l'isolation du rampant (cf. figure 5.1).

La pose d'un pare-vapeur sous l'isolant est indispensable pour limiter la pénétration de l'humidité dans la charpente. Par contre, l'humidité qui arrive à passer dans la toiture est évacuée grâce à la lame d'air ventilée conçue entre l'écran et la couverture. Cette lame d'air supérieure a aussi une fonction supplémentaire, celle de limiter la chaleur provenant du rayonnement solaire et d'améliorer ainsi le confort d'été.



Figure 5.1 – Schéma d'un rampant de toiture standard

Si l'écran est par contre muni de deux faces à propriétés réfléchissantes, il pourra limiter le transfert thermique par rayonnement. La figure 5.2 schématise un écran HPV réflecteur posé avec une lame d'air ventilée supérieure et une lame d'air inférieure non ventilée comme complément d'isolation en hiver. Dans certaines poses et pour augmenter la résistance thermique de la toiture isolée, le PMR est parfois posé avec deux lames d'air adjacentes non ventilées.



Figure 5.2 – Pose d'un écran de sous-toiture HPV réflecteur

Pour les produits réfléchissants étudiés dans ce travail, certains étanches à l'air et à l'eau mais perméables à la vapeur d'eau peuvent remplir la fonction d'écran de sous-toiture. Par contre, les PMR qui sont pour la plupart imperméables à l'humidité sont généralement posés sous les chevrons comme représenté à la figure 5.3. Une lame d'air non ventilée est aménagée entre la membrane d'étanchéité à l'air et le PMR. Pour créer une deuxième lame d'air, un système de fourrure de bois est placé sur le PMR et le parement intérieur est finalement agrafé. Cette mise en œuvre est très courante en réhabilitation des combles perdus.



Figure 5.3 – Pose sous les chevrons (vue face aux pannes)

Le modèle de rampant modélisé dans ce chapitre est représenté à la figure 5.4. Le PMR est posé en écran de sous-toiture avec une lame d'air non ventilée ménagée en sous-face. En dessous de la couverture, une lame d'air ventilée est construite. Le rampant est isolé avec une certaine épaisseur de laine minérale.



(vue face aux chevrons)

Pour une meilleure visualisation, la figure 5.5 représente une coupe longitudinale au niveau du rampant de toiture qui va être modélisé. La coupe coïncide soit au niveau du chevron (à

gauche), soit au niveau de l'isolant traditionnel et de la lame d'air inférieure (à droite). La couverture de tuiles est représentée dorénavant par un parement extérieur.



Figure 5.5 – Deux coupes longitudinales du complexe de toiture intégrant le PMR

5.3 Modélisation d'un complexe de toiture en période estivale

Après avoir présenté les éléments du modèle de rampant étudié, une première partie de ce chapitre consiste à imposer des conditions de températures estivales et un rayonnement solaire incident afin de simuler le comportement thermo-aéraulique de la lame d'air ventilée en période chaude ensoleillée et évaluer le confort d'été grâce au calcul d'un facteur solaire pour le système modélisé. Afin de se mettre dans des conditions estivales extrêmes, le rampant est simulé en absence de vent et en présence continue du rayonnement solaire.

5.3.1 Présentation du modèle de toiture

La méthode de modélisation du rampant de toiture intégrant un PMR et des lames d'air consiste à séparer les phénomènes de transferts thermiques tels que les échanges convectifs et radiatifs à l'intérieur des cavités d'air adjacentes au PMR et les échanges conductifs à travers l'ensemble du complexe de toiture. Ce dernier est composé, de l'ambiance extérieure vers l'intérieur du comble aménagé, des éléments suivants (cf. figure 5.6):

- parement extérieur (couverture)
- lame d'air ventilée
- > PMR
- lame d'air non ventilée
- isolation traditionnelle (laine minérale)
- ➢ parement intérieur



Figure 5.6 – Schéma 3D du modèle de rampant de toiture intégrant un PMR, une lame d'air ventilée supérieure et une lame d'air non ventilée inférieure

L'assemblage du modèle global de toiture est réalisé à l'aide de l'outil THERMETTE. Le schéma de la toiture isolée représenté à la figure 5.7 permet de bien cerner les différents échanges thermiques ayant lieu. Le complexe de toiture est divisé en quatre parties selon la longueur afin d'étudier l'évolution de la température le long du rampant au niveau de la lame d'air ventilée.

Les sollicitations introduites dans le modèle thermique global sont représentées sur la figure 5.7. Un flux solaire net Q_{sol} est imposé sur la surface du parement extérieur en contact avec l'ambiance externe. Ce flux net est la résultante du flux solaire incident sur les tuiles, du flux réfléchi, du flux émis par les tuiles et du flux échangé par convection avec l'air extérieur.



Figure 5.7 – Présentation des conditions aux limites et des sollicitations dans THERMETTE

La modélisation de l'écoulement d'air dans la cavité d'air supérieure ventilée a été réalisée, en détail, au chapitre 3. Le débit d'air massique *m* traversant la lame d'air ventilée est donc calculé d'après l'équation (3.4) et imposé comme sollicitation dans les branches formant l'écoulement d'air de l'entrée à la sortie. Les nombres de Rayleigh définis pour les deux surfaces chaudes et froides $Ra_{L,h}$ et $Ra_{L,c}$ du canal d'air sont respectivement calculés d'après les équations (3.5) et (3.6). Le débit d'air pénètre par la section d'ouverture à l'entrée de la lame d'air ventilée à la température ambiante T_a . D'après le principe de la conservation de masse et en supposant les fuites négligeables, ce même débit sort de la section d'ouverture à la sortie de la lame d'air à une température T_s calculée par le modèle. A l'intérieur de la lame d'air ventilée, les coefficients d'échange convectif h_v sont calculés d'après l'équation (3.12).

La lame d'air inclinée, non ventilée et adjacente au PMR a été étudiée au chapitre 2. Un coefficient d'échange convectif h_{nv} est donc calculé d'après la corrélation adéquate établie par l'équation (2.20) et introduit comme sollicitation dans le modèle thermique.

Sur la surface inférieure du parement intérieur est imposé un échange convectif à la température intérieure T_{int} avec un coefficient d'échange convectif h_{int} . La température intérieure T_{int} est égale à la température ambiante T_a . Cette hypothèse est considérée dans le modèle afin de calculer le flux de chaleur transmis lié essentiellement à l'influence du flux solaire imposé sur la couverture et non sur la différence de températures de l'air.

Le tableau 5.1 représente les différents éléments, paramètres et sorties du modèle thermique global et les valeurs introduites par défauts pour le cas de référence.

Chapitre 5	Modélisation d'un complexe de toiture intégrant un PMR	et une lame d'air ventilée
------------	--	----------------------------

Tableau 5.1 – Paramètres et sorties du modèle de référence de toiture en période estivale							
Paramètres	Symboles	Valeur par défaut					
Flux pénétrant les tuiles	Q _{sol}	224,29 W					
Température ambiante	Ta	24,6 °C					
Température interne	T _{int}	24,6 °C					
Coefficient d'échange superficiel intérieur	h _{int}	8 W/m ² .K*					
Longueur du rampant	L	3 m					
Largeur du rampant	W	0,6 m					
Epaisseur de la lame d'air ventilée	b ₁	0,03 m					
Epaisseur de la lame d'air non ventilée	b ₂	0,02 m					
Section d'ouverture (entrée, sortie)	С	0,02 m					
Angle d'inclinaison	angle	30°					
Résistance thermique de la laine minérale		2,65 m ² .K/W					
Résistance thermique du PMR		0,29 m ² .K/W					
Lame d'air ventilée		Sortie					
Température moyenne de la surface chaude	T_h	Débit d'air (m) et coefficients					
supérieure		d'échange convectif (h _v)					
Température moyenne de la surface froide	T _c						
inférieure							
Température moyenne de l'air	T _{air,m}						
Nombre de Rayleigh supérieur se basant sur L	Ra _{L,h}						
Nombre de Rayleigh inférieur se basant sur L	$Ra_{L,c}$						
Nombre de Rayleigh se basant sur b1	Ra _{b1}						
Lame d'air non ventilée		Sortie					
Température moyenne de la surface chaude	Ti	Coefficient d'échange convectif					
supérieure		(h_{nv})					
Température moyenne de la surface froide	T_k						
inférieure							
Nombre de Rayleigh se basant sur b2	Ra _{b2}						
Sorties du modèle							
Température de sortie d'air	Ts						
Flux sortant du parement intérieur	Q _{int}						
Facteur de transmission solaire	F						

1				11 / / 5001 003		
1:	*) $V(a a) = \pi a a a a$	a dag ràglag 'l	h S on condition	v d'átá l'Eb Slat c	10 10 D'T' 2005	エレコー つわれる エ
	·) valeul issue		n-s en conditior	1 0 8 8 1 1 1 - 5 1 8 1 0	10 Ia K I 2000	

Les sorties du modèle sont essentiellement le flux transmis à l'intérieur du complexe de rampant Q_{int} et la température de sortie de l'air T_s de la lame d'air ventilée. En effet, les performances thermiques du complexe de toiture ne peuvent pas être évaluées par calcul de la résistance thermique globale puisque le système n'est pas fermé, il comporte une lame d'air ventilée. Un nouveau facteur est donc utilisé pour calculer le niveau de performance thermique, c'est le facteur de transmission solaire F qui est le rapport entre le flux thermique transmis à l'intérieur du comble aménagé sur le flux thermique pénétrant le parement extérieur du complexe (eq. 5.1):

$F(\%) = \frac{Q_{\text{int}}}{2} \times 100$	(5.1)
Q_{sol}	

Ce facteur de transmission solaire est différent du facteur solaire. Il est en effet défini par le rapport du flux thermique transmis à l'intérieur sur le flux solaire net. Par suite, si on veut obtenir le facteur solaire du rampant, il faudra multiplier le facteur de transmission solaire F par le facteur solaire des tuiles.

La figure 5.8 schématise la représentation du modèle thermique global dans l'outil THERMETTE. La première colonne représente le parement extérieur divisé en plusieurs parties. Deux parties définissent l'échange conductif avec les deux contre-lattes, les quatre autres parties définissent l'échange convectif avec la lame d'air ventilée représenté par la

deuxième colonne de six branches. Les traits en rouge représentent l'échange convectif de l'air avec la plaque supérieure formée par le parement extérieur, les traits en vert représentent l'échange convectif avec la surface inférieure formée par le PMR et avec les surfaces latérales d'entrée et de sorite. La troisième colonne représente donc le PMR et la dernière l'isolant traditionnel. Une lame d'air non ventilée sépare le PMR de cette dernière colonne ; les traits en rose définissent l'échange convectif à l'intérieur de cette lame d'air fermée.



Figure 5.8 – Modèle thermique du rampant de toiture réalisé dans THERMETTE (sans rayonnement)

Les facteurs de transferts radiatifs qui existent entre les différentes faces délimitant les lames d'air, ventilée et non ventilée, sont calculés à l'aide du logiciel MODRAY. L'émissivité des différents éléments de la toiture est considérée égale à 0,9 sauf pour le PMR. Ce dernier est doté d'une très faible émissivité, pour le cas de référence égale à 0,07. Les nouveaux traits noirs de la figure 5.9 représentent les échanges radiatifs importés de MODRAY dans l'outil THERMETTE.



Figure 5.9 – Modèle thermique du rampant de toiture réalisé dans THERMETTE (avec rayonnement)

Dans la partie qui suit, une validation de ce modèle de toiture est réalisée grâce à un dispositif expérimental construit au CSTB par mesure globale du flux traversant le système de toiture en configuration d'été.

5.3.2 Validation expérimentale

Une étude expérimentale a été réalisée par le CSTB [CSTB, 2007] sur une maquette de rampant de toiture à grande échelle en conditions de laboratoire. Cette étude a permis d'évaluer l'impact de différents paramètres physiques et géométriques sur la quantité d'énergie traversant le rampant. Le dispositif expérimental s'est intéressé plus particulièrement au comportement de la lame d'air ventilée supérieure (vitesse dans la lame et température de sortie d'air).

Etant donné que le dispositif expérimental intègre les mêmes composants du système de toiture modélisé (un produit réfléchissant associé à une lame d'air non ventilée, un isolant traditionnel et une lame d'air ventilée entre la couverture et le PMR), les résultats des essais sont utilisés pour valider notre modèle de toiture en période chaude ensoleillée. Les paramètres de sortie calculés par le modèle thermique et validés par les essais sont les températures sur les interfaces du rampant, les vitesses dans la lame d'air ventilée obtenues d'après les débits calculés, les températures de sortie d'air et les flux thermiques traversant le parement intérieur.

Dans la première partie de la validation expérimentale, le dispositif expérimental est présenté. Ensuite le modèle de rampant est validé pour trois cas d'étude : le cas de référence, un deuxième cas où l'intensité du flux solaire est réduite et un dernier où une plus grande émissivité des faces réfléchissantes du PMR est appliquée.

5.3.2.1 Dispositif de mesure

La maquette expérimentale est une boîte rectangulaire de contreplaqué, elle est formée de l'extérieur vers l'intérieur de deux plaques de contreplaqué collées l'une sur l'autre simulant la couverture, d'une lame d'air ouverte aux deux extrémités donc ventilée, un produit réfléchissant posé comme écran de sous-toiture, une lame d'air non ventilée an contact avec un isolant en laine minérale et enfin une plaque de contreplaqué simulant la plaque de plâtre couramment utilisée en parement intérieur des combles aménagés.



Figure 5.10 - Photo du dispositif expérimental [CSTB, 2007]

La zone d'étude, représentée sur la figure 5.11, est formée par la partie entre deux chevrons d'une toiture ayant une largeur standard de 60 cm. La longueur de la maquette est de 3 m.



Figure 5.11 – Maquette construite et dimensions [CSTB, 2007]

La source de chaleur est un banc constitué de 8 lampes infrarouges parallèles les unes aux autres et montées sur un bâti. Chaque lampe possède deux résistances dissipant 2,4 kW chacune (barres d'acier de 1,50 m chacune). Le banc consomme, selon les données constructeurs, un total de 38,4 kW. Une couche de laine minérale de 100 mm, certifiée ACERMI, est posée sur le parement intérieur ménageant une lame d'air non ventilée de 2 cm d'épaisseur avec le produit réfléchissant. Le PMR est fixé sur toute la surface de la maquette. Il est inséré en sandwich entre les chevrons et les contre-lattes supports du parement extérieur.

Les paramètres mesurés sont les suivants :

- températures sur les différentes interfaces de la maquette (surface/sous-face PMR, surface/sous-face laine minérale, surface/sous-face parement intérieur)
- flux traversant le parement extérieur soumis au rayonnement infrarouge et flux traversant le parement intérieur.
- vitesses d'air dans la lame d'air ventilée et températures d'air à l'entrée, sur trois niveaux à l'intérieur et à la sortie

Les capteurs utilisés sont essentiellement des thermocouples, des plaques fluxmétriques et des anémomètres. Les mesures sont effectuées sur trois niveaux le long de la maquette, par rapport à l'entrée de la lame d'air :

- niveau bas situé à 83 cm de l'entrée
- niveau intermédiaire situé à 158 cm de l'entrée,
- niveau haut situé à 233 cm de l'entrée.

Pour déterminer le profil de vitesse dans la lame d'air ventilée sur les trois niveaux de mesure, une boule chaude a été déplacée avec un pas de 5 mm balayant l'épaisseur de la lame d'air. Etant donné que le PMR n'a pas une structure rigide et peut présenter des ondulations, ce processus de mesure a été également utilisé pour déterminer l'épaisseur de la lame d'air sur les trois niveaux de mesure. Une vitesse moyenne a été calculée pour chaque cas d'étude par la méthode des trapèzes.

Le cas de référence (cas 1) considéré est celui d'un rampant de toiture constitué d'une lame d'air supérieure ventilée de 2 cm d'épaisseur avec des sections d'ouverture à l'entrée et à la sortie de 1 cm. Le PMR possède des faces réfléchissantes d'émissivité égale à 0,07. Le rampant est exposé à une puissance radiative entre 1 000 et 1 400 W/m². La résistance thermique en sous-face du PMR comportant la laine minérale et la lame d'air non ventilée est de 3,2 m².K/W. Elle comporte la résistance thermique de la laine minérale certifiée et celle de la lame d'air non ventilée calculée d'après les règles Th-U.

Le tableau 5.2 représente les différentes configurations réalisées dans les essais avec les modifications prises en compte par rapport au cas de référence.

Cas	Epaisseur de laine minérale (mm)	Résistance thermique en sous- face du PMR (m ² .K/W)	Puissance radiative (W/m ²)	Hauteur de la section d'ouverture (cm)	Epaisseur lame d'air ventilée (cm)	Emissivité du PMR
1	100	3,2	1000 à 1400	1	2	0,07
2	100	3,2	1000 à 1400	1	2	0,9
3	100	3,2	600 à 790	1	2	0,07

 Tableau 5.2 - Description des configurations de rampant étudiées

Une première étude comparative entre modèle et essais consiste à faire varier la puissance radiative (cas 3) afin d'étudier l'effet des températures sur le facteur de transmission du complexe de toiture. Une deuxième étude comparative consiste à changer à 0,9 l'émissivité de la face réfléchissante du PMR initialement à 0,07 (cas 2).

5.3.2.2 Validation du modèle de toiture

Afin de valider le modèle de toiture, les mêmes dimensions des différents éléments du rampant de toiture expérimental sont entrées dans le modèle thermique. Le même flux mesuré pénétrant le parement extérieur est imposé sur la face externe du parement extérieur du modèle. La même température ambiante est utilisée.

La figure 5.12 montre les profils de températures sur les différentes interfaces du complexe de toiture et compare les températures trouvées par modélisation à celles mesurées. Les interfaces comparées sont le milieu de la lame d'air ventilée, la surface du PMR, la sous-face du PMR, la sous-face du PMR, la surface de la laine minérale et la sous-face du parement intérieur.





Les résultats montrent un rapprochement entre les deux profils pour les trois cas étudiés et un écart moyen entre les températures, mesurées et calculées, de moins de 3 K environ.

Pour le cas de référence (cas 1), la vitesse d'air calculée par le modèle présente un écart de 4 % avec la vitesse moyenne mesurée (cf. Tableau 5.3). Les facteurs de transmission solaire obtenus par les deux approches sont également proches, ils présentent un écart de 8 % environ. Les températures de sortie de l'air calculées par le modèle et mesurées d'après l'expérimentation sont très proches, l'écart entre les deux valeurs est inférieur à 2 °C. Donc le comportement thermo-aéraulique du thermosiphon modélisé est validé par les mesures de vitesse et de température.

Tableau 5.3 - Résultats mesurés et calculés pour le cas 1 et 3						
	Ca	as 1	Ca	as 3		
	Essai	Modèle	Essai	Modèle		
v (m/s)	0,47	0,49	0,27	0,34		
Q _{sol} (W)	224,3	224,3	60,5	60,5		
F (%)	3,7	3,4	6,1	4,4		
Lame d'air ventilée						
T _{air,m} (°C)	43,5	43,8	32,4	31,2		
$\mathbf{T}_{\mathbf{s}}(^{\circ}\mathbf{C})$	48,2	46,7	34	32,2		

Pour le cas 3, bien que les températures dans la lame d'air ventilée modélisées sont proches des valeurs mesurées, un écart important sur la valeur de la vitesse et du flux transmis sur le parement intérieur est observé. La très faible valeur de ce flux dans ce cas (2,5 W) permet de justifier l'écart par la difficulté à mesurer précisément un tel flux par le fluxmètre, il en est de même pour la vitesse.

Pour la comparaison des résultats entre l'expérimentation et le modèle pour le cas 2 (cf. tableau 5.4), les écarts sont également minimes, 2 % entre les vitesses d'air et environ 2 % entre les facteurs de transmission solaire calculés et mesurés.

En comparant les deux cas 1 et 3 dans le tableau 5.3, la division de la puissance radiative par quatre entraîne une diminution du débit d'air, de 42 % pour les essais et de 31 % pour le modèle. L'augmentation du facteur de transmission solaire pour les deux approches est justifiée par un thermosiphon moins performant pour de faibles niveaux de température.

En augmentant la valeur de l'émissivité de la face réfléchissante du PMR, le flux traversant le rampant devient plus grand, ce qui diminue le confort d'été. Ceci est montré dans la comparaison des cas 1 et 2 où les émissivités sont respectivement de 0,07 et 0,9.

Tableau 5.4 – Résultats mesurés et calculés pour les cas 1 et 2						
	Ca	as 1	Ca	as 2		
	Essai	Modèle	Essai	Modèle		
v (m/s)	0,47	0,49	0,48	0,49		
Q _{sol} (W)	224,3	224,3	301,6	301,6		
F (%)	3,7	3,4	4,5	4,6		
Lame d'air ventilée						
T _{air,m} (°C)	43,5	43,8	47	51,2		
$\mathbf{T}_{\mathbf{s}}(^{\circ}\mathbf{C})$	48,2	46,7	54,1	53,1		

En effet, le débit d'air induit dans la lame d'air est dépendant de deux phénomènes contradictoires. L'augmentation de l'émissivité donne de faibles écarts de températures de part et d'autre de la lame d'air ventilée (15 K pour le cas 3 et 9 K pour le cas 2) donnant de faibles vitesses d'air et d'autre part l'augmentation de l'émissivité conduit à une température moyenne au niveau de la lame d'air élevée (cf. tableau 5.4), ce qui conduit à une augmentation du débit d'air. La conséquence de ces deux phénomènes, déjà mis en évidence au chapitre 3, est une vitesse d'air du même ordre de grandeur que le cas de référence ainsi qu'une température sur la face inférieure de la lame d'air ventilée plus élevée et donc un flux transmis plus important.

5.3.3 Etude paramétrique

Afin d'étudier l'impact de certains paramètres importants sur le facteur de transmission solaire du rampant de toiture modélisé précédemment, une étude paramétrique est réalisée en utilisant le modèle thermique. Cette étude consiste à faire varier la résistance thermique de l'isolation placée en sous face du PMR, l'inclinaison du rampant, la température ambiante, le flux solaire ainsi que l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR utilisé.

Le rampant de toiture modélisé pour cette étude paramétrique est d'une longueur de 3 m et d'une largeur de 60 cm (distance standard entre deux chevrons). Le flux solaire net traversant le parement extérieur (la couverture) est de 124,61 W/m². L'ouverture au niveau des sections d'entrée et de sortie de la lame d'air supérieure de 3 cm d'épaisseur est de 2 cm. La température de l'air ambiant est de 24,6 °C.

5.3.3.1 Impact du niveau d'isolation du rampant

Pour l'étude de l'impact de la résistance thermique en sous-face du PMR sur le facteur de transmission solaire, les résultats représentés sur la figure 5.13 montrent que le facteur de transmission solaire diminue avec l'augmentation de la résistance thermique de la couche d'isolation placée en sous-face du PMR. En effet, le facteur solaire diminue de 85 % en passant d'une résistance thermique de laine minérale presque nulle à une valeur de 5,2 m².K/W. Les résultats de facteur de transmission solaire montre également qu'une isolation minimale de 20 mm de laine minérale est nécessaire pour répondre aux exigences réglementaires du confort d'été qui se résument par un facteur solaire de l'ordre de 0,02 selon la RT 2005 [RT2005].



5.3.3.2 Impact de l'inclinaison du rampant

Une légère diminution du facteur de transmission solaire est observée dans le cas ou le rampant de toiture est incliné de 45° (cf. figure 5.14). Ceci est expliqué par le fait que l'augmentation de l'inclinaison de la toiture par rapport à l'horizontale favorise l'effet cheminée dans la lame d'air ventilée et par suite la diminution du facteur de transmission solaire. L'impact de l'inclinaison, bien qu'il ne soit pas généralement prépondérant, diminue

avec l'augmentation du niveau d'isolation. En effet, plus l'isolation de la toiture est faible, plus le fonctionnement du thermosiphon devient un paramètre important dans la caractérisation du facteur solaire.

5.3.3.3 Impact de l'émissivité du PMR

L'étude paramétrique suivante consiste à faire varier l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR de 0,01 à 0,9. Elle est réalisée sur un rampant de toiture incliné de 30° et ayant une résistance thermique en sous-face du PMR égale à $3,2 \text{ m}^2$.K/W. La figure 5.14 montre que la dégradation de l'émissivité du PMR a un effet non négligeable sur le facteur de transmission solaire du rampant. En effet, en passant d'une émissivité de 0,1 à 0,5, le facteur de transmission solaire augmente de 20 % environ.



Figure 5.14 – Impact de l'émissivité du PMR sur le facteur de transmission solaire

5.3.3.4 Couplage de deux paramètres : niveau d'isolation et émissivité

Le niveau d'isolation de la toiture et l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR ont un impact important sur la caractérisation de la performance thermique du rampant. La figure 5.15 montre l'impact de ces deux paramètres couplés sur le facteur de transmission solaire du rampant de toiture. Dans cette étude, quatre niveaux d'isolation sont considérés ; 1, 2, 4 et 6 m².K/W. L'émissivité de la face réfléchissante des PMR est variée de 0,01 à 0,9.



Figure 5.15 – Couplage des deux paramètres (Résistance thermique de l'isolation et émissivité du PMR) sur le facteur de transmission solaire

Les résultats montrent qu'un rampant dont l'isolation permet une résistance thermique de 6 m^2 .K/W et dont l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR est de 0,5 donne un facteur de transmission solaire inférieur de 9 %, 48 % et 67 % par rapport aux rampants ayant respectivement les résistances thermiques de 4, 2 et 1 m².K/W mais un PMR à faces très peu émissives (0,07). Ceci montre que l'impact de l'isolation thermique de la toiture est bien plus souligné que celui de l'impact de l'émissivité de la face réfléchissante de la toiture. Cette même conclusion a également été trouvée par une étude numérique validée par un dispositif expérimental réalisé au centre de recherche du CRIR [Rieunier, 2009].

Une deuxième conclusion peut être tirée de cette étude couplant les deux paramètres : plus la résistance thermique de l'isolation de la toiture est faible, plus la diminution de l'émissivité de la face réfléchissante a un impact important sur le facteur de transmission solaire.

5.3.3.5 Impact de la température ambiante

La variation de la température ambiante montre que pour une élévation de la température externe de 20 °C à 40 °C, le facteur de transmission solaire diminue de 17 % (cf. figure 5.16).



Figure 5.16 – Impact de la température ambiante sur le facteur de transmission solaire

En effet, la température ambiante joue un rôle important dans l'estimation des coefficients d'échanges à l'intérieur de la lame d'air ventilée et du débit d'air généré par effet thermosiphon. Comme montré au chapitre 3, le thermosiphon fonctionne mieux quand la température ambiante se rapproche de la température de la paroi froide inférieure du canal. En effet, le passage d'une température ambiante de 20 °C à 40 °C augmente le débit d'air de 20 % environ.

5.3.3.6 Impact du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire incident a un impact important sur l'effet thermosiphon de la lame d'air ventilée donc sur le facteur de transmission solaire des rampants de toiture. Dans cette étude paramétrique, le rayonnement incident varie de 100 à 1200 W/m². Si on considère que le facteur solaire des tuiles est de 0,24 (d'après la RT 2005 [RT2005] ou la norme ISO 13791 [ISO13791]), le flux solaire pénétrant le parement extérieur Q_{sol} correspond à une variation de 24 à 288 W/m² (cf. figure 5.17).



Figure 5.17 – Impact du flux solaire sur le facteur de transmission solaire

Plusieurs cas sont considérés : deux niveaux d'isolation du rampant et trois émissivités différentes pour les faces réfléchissantes du PMR. Les résultats de la figure 5.17 montrent que pour un rampant isolé uniquement avec un PMR et une lame d'air non ventilée, même pour une très faible émissivité, le facteur de transmission solaire ne répond pas aux exigences règlementaires du confort d'été de la RT 2005 [RT2005] et ceci pour la totalité de l'intervalle de flux solaires considérés.

5.3.4 Conclusions

Pour une période chaude ensoleillée, un modèle de rampant de toiture intégrant une lame d'air supérieure ventilée et un PMR a été réalisé. D'autre part, des essais menés sur une maquette de rampant à échelle 1 en conditions de laboratoire ont permis de valider le modèle en comparant les températures aux interfaces, le comportement de la lame d'air ventilée (vitesses d'air et températures) ainsi que les facteurs de transmission solaire obtenus.

Les deux approches, modélisation et expérimentation, ont montré que le facteur de transmission solaire d'un rampant de toiture intégrant un PMR et une lame d'air ventilée en période estivale est étroitement lié à la résistance thermique de l'isolation en sous-face du PMR, à l'émissivité des faces réfléchissantes de ce dernier, à l'intensité du rayonnement solaire, à la température ambiante et à l'inclinaison du rampant. Plus particulièrement, les deux premiers paramètres (niveau d'isolation et émissivité) ont un impact important sur les performances thermiques des systèmes de toiture. Par ailleurs, le flux solaire incident, la température ambiante et l'inclinaison ont un impact moins prépondérant sur les résultats.

Une étude paramétrique supplémentaire a permis d'étudier l'impact des deux paramètres importants couplés ensemble (la résistance thermique en sous-face du PMR et l'émissivité de la face réfléchissante) sur le facteur de transmission solaire. Les résultats ont montré qu'il serait plus favorable d'augmenter d'abord l'épaisseur de l'isolant traditionnel, puis d'intégrer des faces réfléchissantes à très faible émissivité.

5.4 Modélisation d'un complexe de toiture en période hivernale

Cette partie du chapitre s'intéresse particulièrement à la modélisation du rampant de toiture intégrant un PMR et une lame d'air ventilée en période hivernale. La méthodologie de travail est identique à celle présentée dans la partie précédente.

Dans les conditions climatiques hivernales et en présence de vent, l'effet de thermosiphon est négligé par rapport à l'effet du vent. Un travail numérique est alors nécessaire pour étudier l'influence du vent sur la couche perméable de tuiles et sur cette lame d'air supérieure ventilée (cf. figure 5.18).



Figure 5.18 – Modèle de rampant de toiture en période hivernale

Dans une première partie, un banc d'essais est réalisé afin de simuler l'effet du vent sur les tuiles d'un rampant. La porosité apparente de ce milieu, considéré comme étant pseudoporeux, est déduite des mesures. Le dispositif expérimental réalisé permet de mesurer le débit d'air pénétrant en fonction de l'écart de pression statique entre l'amont et l'aval des tuiles.

Un travail de modélisation est ensuite réalisé sur une maison à deux rampants. Les résultats des simulations numériques permettent de trouver la distribution de pression sur les rampants d'une toiture exposée à un vent de plusieurs intensités et directions.

Enfin, en intégrant les propriétés poreuses des tuiles et la distribution de pression dans un modèle complet de toiture dans le code CFD, le débit d'air généré dans la lame d'air supérieure ventilée est calculé en fonction du vent et intégré comme sollicitation dans le modèle global de toiture complexe 0D/1D.

5.4.1 Etude de la perméabilité des tuiles

La couverture des deux rampants de toiture modélisée en période hivernale est constituée d'un assemblage de tuiles. Le contact entre ces tuiles n'est jamais parfait. S'il permet d'assurer une étanchéité relative à l'infiltration d'eau, son étanchéité à l'air est loin d'être parfaite. L'air peut ainsi s'infiltrer à travers les tuiles et s'écouler dans la lame d'air ventilée.

Afin d'étudier la perméabilité apparente de ce milieu pseudo-poreux dont la géométrie est complexe, le recours à l'expérience est primordial. Pour cela, un dispositif expérimental est réalisé. Il permet d'estimer les propriétés pseudo-poreuses de l'assemblage de tuiles.

5.4.1.1 Transfert de masse à travers une paroi poreuse

La modélisation d'un écoulement de fluide à travers un milieu poreux nécessite la spécification des propriétés du fluide utilisé, dans ce cas l'air (densité, viscosité) et du milieu poreux (porosité, résistance visqueuse et inertielle).

Afin de déterminer les propriétés poreuses de l'assemblage de tuiles, considérées comme un milieu pseudo-poreux, il est nécessaire d'établir l'équation de conservation de la quantité de mouvement pour un écoulement d'air à travers un milieu poreux. Cette équation est celle de la conservation de la quantité de mouvement classique de Navier-Stokes dans laquelle s'ajoute un terme S_i qui modélise les effets de résistance due aux forces de frottements avec le milieu poreux.

$$S_{i} = -\left(\sum_{j=1}^{3} D_{ij} \mu V_{j} + \sum_{j=1}^{3} C_{ij} \frac{1}{2} \rho | V_{j} | C_{j} \right)$$
(5.2)

Le premier terme de l'équation représente la perte visqueuse et le second terme la perte d'inertie. Si le milieu poreux est simple et homogène, S_i peut être simplifié de la façon suivante:

$$S_{i} = \frac{\mu}{\alpha} V_{i} + C_{2} \frac{1}{2} \rho |V_{i}| V_{i}$$
(5.3)

Avec

S_i terme source de quantité de mouvement (Pa/m)

 D_{ij} matrice caractérisant les pertes visqueuses (1/m²)

m viscosité dynamique (Pa.s)

C_{ij} matrice de coefficients de résistance d'inertie (-)

V vitesse (m/s)

Pour un écoulement laminaire où les forces visqueuses sont prépondérantes, Darcy a établi un modèle qui néglige les effets d'inertie. En considérant que l'air est incompressible, que le milieu poreux est isotrope, que l'écoulement d'air dans le milieu poreux est monodirectionnel et que les effets convectifs et diffusifs sont négligés, l'équation de Darcy devient la suivante :

$$\frac{dP}{dx} = \frac{-\mu}{\alpha} V \tag{5.4}$$

avec α la perméabilité du milieu (m²), dP la chute de pression à travers le milieu poreux (Pa)

Après intégration de l'équation tout au long de l'épaisseur du milieu poreux, l'équation devient :

$$\Delta P = \frac{-\mu}{\alpha} . V.L \tag{5.5}$$

Pour un écoulement à grande vitesse, les effets d'inertie deviennent prépondérants devant les forces visqueuses et la chute de pression à travers le milieu poreux devient proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. L'équation deviendra par la suite :

$$\Delta P = -C_2 \frac{1}{2} \rho V^2 L$$
 (5.6)

Afin de choisir le type d'écoulement régissant l'écoulement dans la couche de tuiles, un dispositif expérimental est réalisé. Il permettra d'établir la relation reliant le débit d'air et le gradient de pression.

5.4.1.2 Dispositif expérimental

Pour établir la relation entre le débit d'air qui traverse les tuiles et la différence de pressions de part et d'autre de ces tuiles, un banc d'essais est réalisé.

Il est constitué d'un support métallique sur lequel des tuiles sont assemblées comme représenté sur la Figure 5.19. Le support métallique a une longueur de 1,64 m et une largeur de 1,24 m. Des lattes en bois (38 x 38 mm) distantes de 33 cm sont positionnées sur le support. Sur ces lattes sont disposées 5 rangées de 4 tuiles chacune. Les tuiles utilisées sont des tuiles de type double romane.



Figure 5.19 – Construction des tuiles sur le support métallique

La couche de tuiles est fermée par une boîte en polycarbonate. Les bords de la boîte sont collés aux tuiles avec du silicone pour que la boîte soit complètement étanche. Grâce à un ventilateur à vitesse variable relié à la boîte par un conduit circulaire, un débit d'air est soufflé à l'intérieur de cette dernière comme représenté sur la Figure 5.20. La vitesse d'air est constamment contrôlée et mesurée par un anémomètre placé au milieu du conduit. Le positionnement du conduit de ventilation permet d'obtenir une distribution uniforme de la pression statique de l'air au-dessus de la surface de tuiles. En effet le soufflage latéral dans un volume relativement important permet d'imposer une condition de pression au-dessus des tuiles et ainsi d'éviter des vitesses d'air hétérogènes.



Figure 5.20 – Construction de la boîte de ventilation

Un capteur de pression différentielle est placé de part et d'autre de la surface des tuiles, une sonde mesure la pression juste au-dessus des tuiles et une autre mesure la pression atmosphérique. Les tests réalisés consistent à faire varier le débit d'air introduit dans la boîte de ventilation et de mesurer simultanément la différence de pressions obtenue.

Le débit d'air varie de 0 à 0,13 kg/s. Deux séries de mesures représentées sur la Figure 5.21 sont réalisées afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats obtenus.



Figure 5.21 - Résultats expérimentaux de perméabilité des tuiles

Une corrélation est alors établie entre le débit d'air et la différence de pressions. Les résultats montrent que la chute de pression est proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. L'équation obtenue donne la propriété poreuse de la couche de tuiles.

$$\dot{m} = 0.018553 \times \Delta P^{0.5}$$
 (5.7)

En identifiant les deux équations (5.6) et (5.7), on obtient C_2 qui est le coefficient de résistance inertielle équivalent du milieu poreux.

5.4.2 Effet du vent et distribution de pression sur les rampants

Les études de ventilation par effet du vent sur des obstacles de tailles différentes sont généralement réalisées dans des souffleries. Ces essais permettent d'obtenir des résultats de distribution de pressions très précises et réelles mais ils sont généralement liés à des contraintes de coûts et de dimensions.

La simulation CFD est un autre moyen, de plus en plus utilisé, avec les améliorations des modèles de turbulence et des techniques de maillage. En effet, beaucoup de travaux ont utilisé le code CFD Fluent pour simuler l'écoulement d'air autour de bâtiments de différentes tailles et déterminer la répartition des pressions générées par les forces du vent sur les interfaces du bâtiment [Huang, 2007] [Tamura, 2008] [Costola, 2007] [Wiik, 1997] [Oliveira, 2000]. Richards [Richards, 2008] a étudié expérimentalement la distribution du vent sur le toit d'un cube de 6 m.

Afin d'estimer la distribution de pressions statiques sur les deux rampants d'une toiture, un modèle numérique est réalisé dans le code CFD Fluent. Il est constitué d'un grand volume d'air (6 m suivant x, 3 m suivant y et 3 m suivant z) au milieu duquel est située une petite maison avec une toiture à deux rampants (1,24 m suivant z). Ce modèle simule ainsi une maison placée dans une grande soufflerie et dans laquelle il est possible d'orienter le sens du vent. La maison a une toiture de deux rampants inclinés de 30° ayant les dimensions suivantes ; 1,64 m de longueur et 1,24 m de largeur pour chaque rampant (cf. figure 5.22).



Figure 5.22 – Modèle CFD de distribution de pressions sur les rampants

Un maillage adéquat de la géométrie est réalisé (cf. figure 5.23). En effet, compte tenu des variations de vitesse et de pression près des parois, la résolution près de l'interface de la maison, surtout au niveau des rampants, doit être fine. Le maillage a été vérifié avant d'être adopté ; des résolutions plus fines donnes alors les mêmes résultats numériques.



Figure 5.23 – Maillage et dimensionnement de la maison à deux rampants placée dans une soufflerie

Chaque rampant de toiture est divisé en 12 parties afin d'obtenir comme résultats une valeur de pression statique pour chacune des 24 parties étudiées.

On impose comme conditions aux limites à l'entrée du volume d'air (cette entrée varie selon la direction du vent) une vitesse d'entrée et la même valeur à la sortie du volume. Les autres parois du volume d'air sont considérées comme des parois solides.

La vitesse du vent est considérée de 20 km/h ; cette vitesse est la plus représentative des vents moyens en Ile de France. Trois directions possibles du vent dans le plan (x,z) sont étudiées:

- suivant la direction x
- suivant la direction z
- suivant une direction faisant un angle de 45° avec l'axe des x

5.4.2.1 Suivant la direction x

Les résultats de la distribution des pressions statiques sur les deux rampants, positif et négatif, pour un vent de 20 km/h suivant la direction x sont représentés dans le tableau 5.5.

2,49 11,19 10,7 5,83 $-16,06$ $-11,58$ $-7,41$ $-6,53$							-6,53
2,42	12,76	12,2	6,23	-14,43	-11,87	-3,01	-0,04
2,49	11,19	10,7	5,83	-16,01	-13,18	-7,4	-4,52

Tableau 5.5 – Distribution des pressions relatives sur les rampants (+ et -) pour un vent de 20 km/h (direction x) (Pa)

Selon cette direction du vent, le tableau 5.5 montre qu'une surpression a lieu sur le rampant face au vent. Une dépression est observée sur le deuxième rampant. Sur la figure 5.24 est représenté le contour de pression statique sur les deux rampants.



Figure 5.24 – Répartition des pressions statiques sur les deux rampants pour un vent suivant l'axe des x

5.4.2.2 Suivant la direction z

Les résultats de distribution des pressions statiques sur les deux rampants, positif et négatif, pour un vent de 20 km/h suivant la direction z sont représentés dans le tableau 5.6.

	Tableau 5.6 – Distribution des pressions relatives sur les rampants (+ et -)							
			pour un	vent de 20 k	III/II (unec	(1011 Z) (Fa)		
-	19,57	-13,77	-13,9	-11,38	-11,43	-14,02	-13,84	-19,6
-	13	-6,67	-5,16	-2,6	-2,62	-5,2	-6,7	-13
-	27,8	-26,4	-27,3	-26,5	-14,58	-27,34	-26,4	-27,8

Dans cette configuration, le tableau 5.6 montre que l'ensemble de la toiture est en dépression. L'air entrera par les ouvertures de la lame d'air ventilée. La répartition des pressions statiques sur les deux rampants de la maison est représentée sur la figure 5.25.



Figure 5.25 – Répartition des pressions statiques sur les deux rampants pour un vent suivant l'axe des z

5.4.2.3 Suivant un angle de 45° avec l'axe des x

Les résultats de distribution des pressions statiques sur les deux rampants, positif et négatif, pour un vent de 20 km/h à 45° entre les deux directions x et z sont représentés dans le tableau 5.7.

pour un vent de 20 km/h (direction de 45° avec x) (Pa)							
04,12	33,80	43,81	20,48	-1/,0/	-10,98	-24,13	-40,9
55,07	43,19	31,65	16,44	-18,9	-7,48	-15,82	-33,32
12,02	0,1	-2,4	-5,45	-34,47	-15,47	-16,35	-24,11

Tableau 5.7 – Distribution des pressions relatives sur les rampants (+ et -) pour un vent de 20 km/h (direction de 45° avec x) (Pa)

Selon cette direction, la surpression la plus importante est au niveau de l'angle d'attaque. Cette surpression est en valeur absolue la plus importante des trois configurations simulées.

La répartition des pressions statiques sur les deux rampants de la maison pour cette direction de vent est représentée sur la figure 5.26.



Figure 5.26 – Répartition des pressions statiques sur les deux rampants pour un vent faisant 45° avec l'axe des x

5.4.3 Calcul du débit d'air induit dans la lame d'air ventilée

Après avoir déterminé la répartition des pressions statiques sur les différentes parties constituant les deux rampants de la toiture, une deuxième étude numérique est nécessaire afin de déterminer le débit d'air induit dans la lame d'air ventilée. Cette étude intègre les résultats de pression calculés et la porosité apparente des tuiles.

Le modèle de toiture réalisé dans le code CFD Fluent est formé par les deux rampants d'une toiture inclinée de 30° constitués de la couche poreuse de tuiles (cf. figure 5.27) et de la lame d'air ventilée en dessous. Chaque rampant a une longueur de 1,64 m et une largeur de 1,24 m et est divisé en 12 parties. Sur chaque partie est imposée la pression statique obtenue par simulation numérique. Le volume de tuiles formant la partie supérieure du modèle a une épaisseur de 2 cm et est considéré dans Fluent comme étant un milieu poreux isotrope dont le coefficient de résistance d'inertie a été calculé dans la partie 5.4.1.



La lame d'air ventilée au-dessous des tuiles a une épaisseur de 3 cm. A l'entrée et à la sortie de cette lame d'air sont imposées les pressions calculées par le modèle précédent de distribution de pression.



Figure 5.28 – Schéma 3D du modèle numérique

Pour chacune des 3 directions de vent simulées, les pressions retrouvées par le modèle de distribution de pression sont imposés sur les 24 parties, à l'entrée et à la sortie. On retrouve comme sorties les vitesses de l'air au niveau des différentes sections le long de la lame d'air ventilée numérotées de 1 à 15 sur la figure 5.29.

5.4.3.1 Suivant la direction x

Le premier cas étudié représente un vent normal aux rampants. La vitesse de ce vent est de 20 km/h (5,5 m/s).



Figure 5.29 – Schéma représentant la direction du mouvement d'air dans le modèle (direction x)

La figure 5.29 montre le profil de vitesses dans la lame d'air ventilée pour une section normale aux rampants au milieu du modèle de toiture. Les flèches de couleur bleue représentent le mouvement d'air dans le milieu poreux et au niveau des différentes sections de la lame d'air.

Les résultats de la figure 5.30 montrent que 61 % de la longueur des deux rampants est sujette à une vitesse d'air supérieure à 0,6 m/s dans la lame d'air pour un vent de 5,5 m/s. Une autre simulation, pour un vent de 11,1 m/s, est effectuée et les résultats sont également représentés sur la figure 5.30.



Figure 5.30 – Résultats de vitesses d'air dans les différentes sections de la lame d 'air pour deux intensités de vent (direction x)

Les résultats montrent aussi que la majorité de l'air entre à travers les tuiles et que pour cette configuration, la vitesse de l'air dans la lame d'air ventilée peut atteindre une valeur maximale de 25 % de la vitesse d'air extérieur et une valeur moyenne de 11 %.

5.4.3.2 Suivant la direction z

Pour cette deuxième configuration, la figure 5.31 représente le mouvement d'air dans le milieu poreux et au niveau des différentes sections de la lame d'air. Un maillage plus fin permettrait d'éviter la légère asymétrie.



Figure 5.31 – Schéma représentant la direction du mouvement d'air dans le modèle (direction z)

Les résultats de vitesses d'air de la figure 5.32 montrent que 93 % de la longueur de la cavité d'air présente une vitesse supérieure à 0,6 m/s. Pour cette configuration, l'air atteint une vitesse maximale de 50 % la vitesse de l'air extérieur (2,84 m/s) et une vitesse moyenne de 30 %.





5.4.3.3 Suivant un angle de 45° avec l'axe des x

Pour cette dernière configuration, la distribution de pressions statiques sur les deux rampants donne les résultats de mouvement d'air représentés sur la Figure 5.33.



Figure 5.33 – Schéma représentant la direction du mouvement d'air dans le modèle

Les résultats montrent aussi que pour un vent de 20 km/h, l'ensemble de la lame d'air (cf. figure 5.34) présente une vitesse supérieure à 0,6 m/s. L'air induit dans la cavité atteint une vitesse maximale de 55 % par rapport à la vitesse de l'air extérieure et une vitesse moyenne de 33 % de celle ci.



Figure 5.34 – Résultats de vitesses d'air dans les différentes sections de la lame d'air (direction x et z)

L'étude numérique du comportement aéraulique au niveau de la lame d'air ventilée sous l'effet du vent montre donc que les vitesses d'air induites entre la couverture et l'isolation de la toiture ne sont pas négligeables, des valeurs allant jusqu'à 33 % par rapport à la vitesse d'air extérieur peuvent être obtenues. D'autre part, cette étude montre que la porosité de la couche des tuiles engendre des mouvements d'air importants de part et d'autre qui influencent énormément le débit d'air induit dans la lame d'air.

Dans le modèle thermique global et afin d'intégrer les résultats de l'étude numérique pour les trois directions du vent considérées, les deux valeurs extrêmes vont être prises en compte dans le calcul de la vitesse d'air dans la lame d'air ventilée. Cette dernière varie donc selon la direction du vent entre 11 % et 33 % de la vitesse du vent.

5.4.4 Assemblage du modèle de toiture

L'assemblage des phénomènes thermiques ayant lieu dans le rampant de toiture en conditions hivernales est donc réalisé à l'aide de l'outil thermique THERMETTE.

Pour l'échange convectif entre l'ambiance interne du comble et le parement intérieur, la corrélation qui définie le coefficient d'échange superficiel intérieur h_{int} correspond au cas de la convection naturelle sur une plaque inclinée à température uniforme chauffée par le bas, représenté par la corrélation suivante [Sacadura, 1993]:

$$Nu_{L} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_{L}^{1/6}}{\left[1 + \left(0.492/Pr\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^{2}, Ra_{L} = \frac{g\cos(90 - \theta)\beta L^{3}(T_{\text{int}} - T_{PI})}{\upsilon^{2}} \Pr$$
(5.8)

Les propriétés de l'air sont définies à $(T_{int} + T_{PI})/2$

La présence du vent influence le coefficient d'échange superficiel extérieur h_{ext} . Le cas d'une convection forcée turbulente sur une plaque inclinée à température uniforme est donc considéré [ElKhoury, 2003]. Les propriétés de l'air sont déterminées pour $(T_{ext}+T_{PE})/2$

$$Nu_L = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3}, \quad \text{Re}_L = \frac{V_{vent} \times L}{\upsilon}$$
 (5.9)

La convection forcée turbulente présente dans la lame d'air ventilée est représentée par la corrélation de Dittus-Boelter [ElKhoury, 2003]. Le coefficient d'échange convectif h_v est donc défini d'après l'équation suivante

$$Nu_L = 0.023 \operatorname{Re}_L^{0.8} Pr^{0.4}, \quad \operatorname{Re}_L = \frac{f \times V_{vent} \times D_h}{\upsilon}$$
 (5.10)

La longueur caractéristique définie dans le nombre de Reynolds de l'équation 5.10 est le diamètre hydraulique D_h du canal formé par la lame d'air.

Les différentes valeurs par défaut du modèle de rampant en période hivernale sont représentées dans le tableau 5.8.

Chapitre 5	Modélisation d'un comp	lexe de toiture intégrant u	n PMR et une lame d'air ventilée
1	1	U	

Tableau 5.8 – Paramètres, valeurs par défaut et sorties du modèle de toiture en période hivernale						
Paramètres	Symboles	Valeur par défaut				
Température ambiante	Ta	10 °C				
Température interne	T _{int}	19 °C				
Coefficient d'échange superficiel extérieur	h _{ext}					
Coefficient d'échange superficiel intérieur	h _{int}					
Longueur du rampant	L	3 m				
Epaisseur de la lame d'air ventilée	b ₁	0,03 m				
Hauteur de la section d'ouverture (entrée, sortie)	с	0,02 m				
Epaisseur de la lame d'air non ventilée	b ₂	0,02 m				
Angle d'inclinaison	angle	30°				
Vitesse du vent	V _{vent}	5,5 m/s				
Facteur de réduction de la vitesse d'air	f	11 %				
Résistance thermique PMR	R _{PMR}	$0,4 \text{ m}^2.\text{K/W}$				
Résistance thermique Laine Minérale	R _{LM}	$3,2 \text{ m}^2.\text{K/W}$				
Lame d'air ventilée		Sortie				
Débit d'air induit	m					
Température moyenne de la surface chaude	T_{h}	coefficient d'échange convectif				
supérieure	~	(h_v)				
Température moyenne de la surface froide	T _c					
Inferieure Tompérature movenne de l'air	т					
Nombre de Devleigh se besent sur b1	I _{air,m}					
Nombre de Kayleigh se basant sur br	Ka _{b1}	Contin				
Lame a all'hon ventnee	Т	Sortie Coefficient d'échange convectif				
	Ij	(h)*				
Température movenne de la surface froide	T _k	(Π_{nv})				
inférieure	- <u>K</u>					
Nombre de Rayleigh se basant sur b2	Ra _{b2}					
Sorties du modèle						
Température sur la surface extérieure du PMR	T _{PMR}					
Température sur la surface intérieure du PI	T_{PI}					
Flux thermique sur la surface intérieure du PI	Q _{int}					
Résistance thermique du complexe	R					

(*) Paramètres définis en détail dans le chapitre 2 par l'équation (2.20)

La performance thermique du système de toiture modélisé en période hivernale, sans ensoleillement, est exprimée par la résistance thermique du complexe formé par le système fermé (PMR, lame d'air non ventilée et laine minérale). Pour cela, les températures de part et d'autre de ce complexe sont calculées ainsi que le flux thermique en provenance de l'ambiance interne pénétrant le système par le biais du parement intérieur. La résistance thermique du système fermé est donc calculée d'après l'équation suivante :

$R_{th} (m^2.K/W) = S_{complexe} x (T_{PI}-T_{PMR}) / Q_{int}$	(5.11)

avec $S_{complexe}$ la surface du rampant de 0,6 m de largueur et 3 m de longueur (m²), T_{PI} la température moyenne de la surface interne du parement intérieur (K), T_{PMR} la température de la surface externe du PMR (K) et Q_{int} le flux sortant du parement intérieur (W).

Les résultats du cas de référence sont représentés dans le tableau 5.9. Le flux sortant de l'ambiance interne est calculé ainsi que les températures de part et d'autre du système de rampant fermé (sans prendre en compte la lame d'air ventilée). Les coefficients d'échanges convectifs superficiels, à l'intérieur des deux lames d'air adjacentes au PMR sont également donnés. Le modèle permettant de calculer Qint, comme dans le cas de l'été, intègre les transferts radiatifs dans les lames d'air.

Tableau 5.9 – Résultats du modèle de toiture				
Cas référence				
	Q _{int} (W)	3,81		
	T(PMR) (K)	283,2		
	T (PI) (K)	291,2		
	h _{ext} (W/m ² .K)	12,8		
	$h_{int} (W/m^2.K)$	1,4		
	$h_{nv} (W/m^2.K)$	1,3		
	$h_v (W/m^2.K)$	21		
	m (Kg/s)	0,013		
	R_{th} (m ² .K/W)	3,8		

5.4.5 Etude paramétrique

Une étude paramétrique est réalisée sur le rampant de toiture modélisé précédemment en conditions hivernales en faisant varier plusieurs paramètres. En effet, les paramètres qui pourraient avoir un impact sur la performance thermique du rampant sont la résistance thermique de l'isolation en sous-face du PMR, l'émissivité du PMR, la température ambiante et la vitesse d'air dans la lame d'air ventilée.

5.4.5.1 Impact de la résistance thermique

Afin d'étudier l'impact de l'isolation du rampant en sous-face du PMR sur les performances thermiques, la résistance thermique de la laine minérale en contact avec la lame d'air non ventilée varie de 0 à 5 m².K/W. Les résultats de cette étude paramétrique montrent que plus l'isolation en sous-face du PMR augmente, plus la température sur la surface extérieure du PMR s'approche de la température ambiante. Mais pour tous les niveaux d'isolation, l'écart entre les deux températures reste toujours inférieur à 1 K.

La figure 5.35 représente la variation de la résistance thermique du complexe en fonction de la résistance thermique de la laine minérale. Les résultats montrent que la résistance du complexe varie linéairement avec la résistance thermique de l'isolation traditionnelle. En l'absence de laine minérale, le complexe formé par la lame d'air non ventilée et le PMR a une résistance thermique de 0.6 m^2 .K/W.



Figure 5.35 – Impact de la variation de la résistance thermique de laine minérale sur la performance thermique de complexe de toiture

D'autre part, en passant d'une résistance thermique de laine minérale nulle à 5 m².K/W, l'écart de températures de part et d'autre de la lame d'air non ventilée varie de 1,3 à 0,21 K et la résistance thermique due à la convection naturelle de cette dernière varie respectivement de 0,79 à 0,8 m².K/W. Donc l'isolation de laine minérale n'a pas d'impact important sur la résistance thermique globale de la lame d'air non ventilée (convective et radiative) qui est de l'ordre de 0,2 m².K/W.

5.4.5.2 Impact de l'émissivité

Pour un complexe ayant une résistance thermique de laine minérale égale à 3,2 m².K/W, la résistance thermique du complexe augmente de 1,6 % quand l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR passe de 0,9 à 0,01. Sans laine minérale, cette dernière augmente de 13,4 %. L'impact de l'émissivité est donc plus important quand la résistance en sous-face du PMR est faible. Par contre, pour les deux niveaux d'isolation étudiés, l'impact de l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR s'est avéré moins important que dans le cas des conditions chaudes ensoleillées.



Figure 5.36 – Résistance thermique du complexe pour deux émissivités différentes du PMR et deux niveaux d'isolation

5.4.5.3 Impact de la température ambiante

Les résultats de la figure 5.37 montrent que la température ambiante n'influence pas la performance thermique du complexe. Pour une température externe variant de -10 °C à 15 °C, la résistance thermique du complexe reste la même. En effet, plus la température extérieure diminue, plus l'écart de températures de part et d'autre du complexe augmente, plus le flux passant augmente. La résistance thermique obtenue d'après l'équation 5.11 garde alors la même valeur.



Figure 5.37 – Variation du flux, de l'écart de température et de la résistance thermique du complexe en fonction de la température extérieure

5.4.5.4 Impact de la vitesse du vent

Les résultats obtenus après la variation de la vitesse du vent montrent que ce facteur n'intervient pas dans la détermination de la performance thermique du complexe de rampant. En effet, en faisant varier la vitesse du vent de 5 à 17 m/s, la résistance thermique du complexe reste la même et ceci pour n'importe quel degré d'isolation du rampant.

5.4.6 Conclusions

Chapitre 5

Le modèle de rampant de toiture intégrant un PMR et des lames d'air a été modélisé en période hivernale à l'aide de l'outil thermique 0D/1D THERMETTE.

Le débit d'air dans la lame d'air ventilée a été estimé grâce à des simulations numériques réalisées à l'aide d'un outil CFD. Le modèle numérique ainsi réalisé a pris en considération d'une part l'impact de la force et de la direction du vent sur la répartition des pressions sur les rampants de la toiture et d'autre part l'impact de la perméabilité des tuiles évaluée grâce à une étude expérimentale. Les résultats du modèle numérique ont permis de calculer la vitesse d'air dans la lame d'air ventilée en fonction de la vitesse du vent pour les différentes directions considérées.

Les résultats de cette étude ont montré que les vitesses d'air induites dans la lame d'air ventilée ne sont pas négligeables, des valeurs allant jusqu'à 33 % de la vitesse d'air extérieur peuvent être obtenues. D'autre part, cette étude a montré que la porosité de la couche des tuiles engendre des mouvements d'air importants de part et d'autre qui influencent énormément le débit d'air induit dans la lame d'air.

Après assemblage des modèles conductif, radiatif et convectif, les résultats du modèle thermique global ont montré que la vitesse d'air, la température ambiante, l'inclinaison du rampant et l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR n'ont pas un impact significatif sur la résistance thermique du système fermé du modèle de toiture réalisé. Seule la résistance thermique en sous-face du PMR est importante dans la détermination du niveau d'isolation du complexe de rampant.

5.5 Conclusions

Grâce à cette étude, l'impact des lames d'air et des faces réfléchissantes du PMR sur les performances thermiques d'un rampant de toiture a été évalué pour deux conditions climatiques extrêmes. En effet, en période estivale, la présence de la lame d'air ventilée adjacente à la face supérieure du PMR s'est avérée importante dans la détermination du facteur de transmission solaire de la toiture et du confort d'été. Par contre, les résultats en période hivernale ont montré que cette lame d'air n'a pas un impact important sur la définition des performances thermiques du rampant du fait des vitesses d'air non négligeables dans cette lame d'air en cas de vent. D'autre part, la lame d'air non ventilée, ménagée du côté interne du PMR, a un impact moindre, elle profite de la deuxième face réfléchissante du PMR et augmente légèrement le niveau d'isolation en sous-face du PMR.

Pour la période estivale, en l'absence de vent important, le flux solaire est le moteur de l'effet thermosiphon qui induit l'air dans la lame d'air ouverte. Le modèle thermique global en période chaude ensoleillée a montré que le facteur de transmission solaire du système de toiture est essentiellement fonction du niveau d'isolation de la toiture et de l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR. Le rayonnement solaire incident, la température ambiante de l'air et l'inclinaison du rampant ont un impact mais qui est moins important.

Les résultats de la modélisation ont montré également que l'isolation du rampant avec un PMR et une lame d'air non ventilée uniquement n'est pas suffisante pour atteindre les nouvelles exigences règlementaires, même si l'émissivité des faces du PMR est très faible et le flux solaire incident important. Donc l'existence du thermosiphon n'est pas suffisante pour assurer un confort d'été dans les combles aménagés. Il est toujours nécessaire d'ajouter une certaine épaisseur minimale d'isolant traditionnel, par exemple 20 mm de laine minérale pour le cas de référence étudié.

Pour la période hivernale, le vent et la perméabilité des tuiles à l'air sont les principaux moteurs de l'écoulement d'air dans la lame d'air ventilée. Pour cela, la porosité apparente d'un assemblage de tuiles classiques a été évaluée grâce à un banc d'essais spécifique. Deux modèles numériques ont été réalisés à l'aide du code CFD Fluent, ils ont permis d'étudier l'impact de la vitesse et de la direction du vent sur la répartition des pressions au niveau des tuiles, à l'entrée et à la sortie de la lame d'air et de calculer le débit d'air induit en fonction de la vitesse du vent.

Le modèle thermique global réalisé en conditions hivernales (températures basses, absence de soleil et présence de vent) a permis de conclure que le principal paramètre qui influence les performances thermiques du système de toiture fermée inférieur à la lame d'air ventilée est l'isolation en sous-face du PMR.

Une épaisseur minimale de 17 cm de laine minérale de 0,04 W/m.K de conductivité thermique est indispensable pour atteindre les exigences règlementaires d'un complexe intégrant un PMR à faces peu émissives et une lame d'air non ventilée de 2 cm d'épaisseur.